

Technische Universität München  
Fakultät für Architektur  
Lehrstuhl für Tragwerksplanung  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Kontrolle der Planungskomplexität bei Entwurf, Analyse und  
Konstruktion von Tragwerken

André Ihde

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Thomas Auer

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel
2. Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Die Dissertation wurde am 30.04.2018 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät Architektur am 27.06.2018 angenommen.



Für Vincent, Jonna und Anja



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der Fakultät für Architektur an der Technischen Universität München bei Professor Rainer Barthel. Besonders für die Unterstützung, Anregungen und produktiven Gespräche zum Charakter der Tragwerksplanung möchte ich mich herzlich bei Professor Barthel bedanken.

Sehr dankbar bin ich Professor Frank Petzold für die Übernahme des Korreferats, sowie vielfältige Hinweise zu Inhalt, Strukturierung und Gewichtung einzelner Themen in der Arbeit.

Für die umfangreichen sprachlichen Korrekturen und ein immer offenes Ohr gilt mein besonderer Dank meiner Zimmernachbarin Katharina, die mich vom Exposé bis zur letzten Seite dieser Arbeit motivierte.

Für Diskussionen und die Weitergabe ihrer Erfahrungen tragwerksplanerischer Unwägbarkeiten und Herausforderungen im Planungsprozess bin ich meinen ehemaligen Kollegen und vor allem meinen Arbeitgebern und Freunden Ralf Dinort und Christian Prenzel sehr dankbar.

Ein großer Dank gilt meinen Eltern für ihre andauernde Unterstützung auf meinem langen Weg bis zur Dissertation, meinem Sohn Vincent und meiner Tochter Jonna für das Verständnis dass Papa immer noch an seinem dicken Buch schreiben muss und an allererster Stelle meiner Frau Anja.

Vielen Dank



# Abstract

The planning process for load-bearing structures is characterised by strong interactions between the different planning domains. The efficiency of this network has great influence on the overall project schedule and budget. The complexity of planning is directly dependent on the quantity, quality and development of planning interactions.

The aim of this work is to develop concepts to handle the complexity and gain deeper insights into the planning process. Interactions of planners are investigated at the level of the overall planning process, the planning process of structural systems and the planning tools. Furthermore, concepts for the visualisation and control of complex relationships are provided, which are subsequently evaluated on the basis of a case study.

The focus of the analysis is the structural planning process. Relations with the processes of participating disciplines are classified as preliminary, parallel or subsequent from the perspective of the structural engineer. The analysis of the structural design process is an introduction to the topic, with the aim of an enhanced understanding and awareness of the planning complexity. Based on the characteristics of the structural planning and the description of cognitive requirements of the planning complexity to the planners, methods for the support of the complexity control are searched.

The starting point here is the graph theory, process and system representation using modelling languages and parametric planning tools. These tools include the creation of geometries, structural discretization, structural analysis as well as derivation of plans, calculation documentation and parts lists.

To create links between the individual models the analysis of the temporal position of both planning algorithms and control methods within the planning process is needed. The analysis is based on literature research and own project experiences. Methods from architecture- and construction informatics, product development, mechanical engineering, software development as well as systems engineering are adapted, applied and assessed. Furthermore, literature sources, software packages are examined and applied with regard to the possibilities of complexity control. Based on the research results, the integration of the investigated methods into the planning process is described.

The developed concepts have the potential to better control the complex planning process of structural engineers and to gain a deeper understanding of the complexity

of interactions in order to identify and control planning risks at an earlier design stage.

**Short version** The structural planning process is characterised by interactions between planning domains. This work aims to develop a concept for handling the complexity of this process. Based on the requirements analysis, potentials are sought to build a holistic parametric and associative design system. The benefits and risks are presented, implemented and evaluated. Through the developed methods, it is possible to reduce design risk and gain a deeper understanding of the relationships of structural planning in building construction.

complexity control, planning risks, graph theory, systems engineering, planning process, dependencies



# Zusammenfassung

Der Gesamtprozess des Entwurfs, der Analyse und Konstruktion von Tragwerken ist durch starke Interaktionen zwischen den einzelnen Fachplanern charakterisiert. Die Komplexität der Tragwerksplanung ist direkt abhängig von Quantität, Qualität und zeitlicher Entwicklung der Interaktionen innerhalb der Planung.

Ziel dieser Arbeit ist die Gewinnung von Erkenntnissen über die Planungsinteraktionen und Abhängigkeiten sowohl zwischen dem Tragwerksplaner und anderen im Planungsprozess beteiligten Fachplanern als auch innerhalb der Tragwerksplanung. Es werden komplexe Beziehungen auf der Ebene des Gesamtplanungsprozesses und der Tragstruktur untersucht. Darauf aufbauend werden Konzepte zur Kontrolle der komplexen Beziehungen bereitgestellt und evaluiert.

Im Zentrum der Betrachtung steht hierbei die Tragwerksplanung. Beziehungen zu Planungsprozessen beteiligter Fachdisziplinen werden als zeitlich vorlaufend, parallel oder nachfolgend aus Perspektive des Tragwerksplaners eingeordnet.

Der Einstieg in die Thematik, mit dem Ziel eines verstärkten Verständnisses und des Bewusstseins über die Planungskomplexität, wird mit der Analyse des Tragwerksplanungsprozesses vorgenommen. Basierend auf den Charakteristika der Tragwerksplanung und der Beschreibung kognitiver Anforderungen der Planungskomplexität an die Planer, werden Methoden zur Unterstützung der Komplexitätskontrolle gesucht. Ausgangspunkt hierbei sind die Graphentheorie, die Prozess- und Systemdarstellung mittels Modellierungssprachen und parametrisch modellierter, assoziierter Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung.

Die strukturierte Verknüpfung der einzelnen parametrischen Algorithmen erfordert die nachfolgende grundlegende Auseinandersetzung mit der zeitlichen Positionierung einzelner Algorithmen und Kontrollmethoden im Planungsprozess.

Die Analyse der Anforderungen an den zu optimierenden und zu unterstützenden Planungsprozess basiert auf Literaturrecherchen und eigenen Projekterfahrungen.

Bei der Suche nach Lösungsansätzen werden Arbeiten aus der Architektur- und Bauinformatik, der Produktentwicklung, des Maschinenbaus, der Softwareentwicklung sowie des Systems Engineering betrachtet. Für die Recherche stehen fachübergreifende Vergleichsbetrachtungen und die Beurteilung der Adaptierbarkeit und Weiterentwicklung der in den Quellen dargestellten Konzepte und Methoden im Fokus. Neben den Literaturquellen werden Softwarepakete auf ihre Leistungsfähigkeit im Hinblick auf die Möglichkeiten der Komplexitätskontrolle untersucht und angewandt.

Gründend auf den Rechercheergebnissen wird die Integration der untersuchten Methoden zur Komplexitätskontrolle in den Tragwerksplanungsprozess verfolgt.

Erwartete Vorteile und Risiken der Verwendung der vorgeschlagenen Methoden der Komplexitätskontrolle werden präsentiert, an Hand eines Beispiels implementiert und bewertet.

**Kurzfassung** Der Tragwerksplanungsprozess ist durch planungsdisziplinäre Interaktionen charakterisiert. Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptentwicklung für die Kontrolle der komplexen Abhängigkeiten innerhalb des Gesamtplanungsprozesses. Auf Grundlage einer Anforderungsanalyse werden Methoden zur Komplexitätskontrolle dargestellt und ihre Integration in den Planungsprozess besprochen. Die Vorteile und Risiken werden präsentiert, implementiert und bewertet. Durch die entwickelten Konzepte und methodische Umsetzung wird es möglich, Planungsrisiken zu reduzieren und ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge in der Tragwerksplanung im Hochbau zu erhalten.

Komplexitätskontrolle, Planungsrisiken, Interaktionen, Tragwerksplanung, Abhängigkeiten, Graphentheorie, Systems Engineering

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Ausrichtung - Abgrenzung - Annahmen . . . . .	7
1.3 Komplexitätsbezogene Probleme der Planungspraxis . . . . .	8
1.3.1 Quellenüberblick . . . . .	8
1.3.2 Buchbeiträge . . . . .	9
1.3.3 Fachartikel . . . . .	12
1.3.4 Umfragen . . . . .	13
1.3.5 Bewertung und weitere der Quellen . . . . .	15
1.4 Forschungslücke . . . . .	19
1.5 Hypothese . . . . .	20
1.6 Forschungsansatz . . . . .	23
1.7 Stand der Forschung - Literatur . . . . .	24
1.7.1 Charakter der Tragwerksplanung . . . . .	25
1.7.2 Graphentheorie und Design Structure Matrix . . . . .	26

1.7.3	Systemtheorie und Systems Engineering . . . . .	27
1.7.4	Parametrische Modellierung . . . . .	28
1.8	Normen und Richtlinien . . . . .	31
1.8.1	Normen im Umfeld der Tragwerksplanung . . . . .	31
1.8.2	Richtlinien mit Bezug zu Planungsprozessen . . . . .	32
1.9	Vorgehen und Gliederung der Arbeit . . . . .	36
<b>2</b>	<b>Charakter der Tragwerksplanung</b>	<b>41</b>
2.1	Interpretation der Tragwerksplanung als Prozess . . . . .	42
2.1.1	Definition der Prozessumgebung . . . . .	42
2.1.2	Eingangsinformationen der Tragwerksplanung . . . . .	44
2.1.3	Einflüsse und Randbedingungen im Tragwerksplanungsprozess	46
2.1.4	Planungsziele . . . . .	47
2.2	Eigenschaften und Anforderungen des Tragwerksplanungsprozesses .	49
2.2.1	Tragwerksplanung als iterative, dynamische Optimierung mit zunehmender Konkretisierung und veränderlichen Zielen in ei- nem dezentralen Umfeld . . . . .	49
2.2.2	Iterative Planungsschritte mit Zunahme der Informationsdichte	49
2.2.3	Mehrkriterienoptimierung in der Tragwerksplanung . . . . .	51
2.2.4	Einbettung der Tragwerksplanung in den Gesamtplanungspro- zess . . . . .	55
2.2.5	Zusammenhang zwischen Planungsfortschritt und Planungssi- cherheit . . . . .	56

2.3	Kognitive Belastung und Einflüsse auf den Tragwerksplaner . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Komplexität in der Tragwerksplanung</b>	<b>63</b>
3.1	Ebenen der Komplexität . . . . .	64
3.2	Definition von Komplexität und Komplexitätsfaktoren . . . . .	64
3.3	Komplexität des Gesamtplanungsprozesses . . . . .	66
3.4	Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses . . . . .	67
3.5	Komplexität der Planungswerkzeuge . . . . .	69
3.6	Korrelation zwischen Komplexitätsebenen . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Methoden des Komplexitätsmanagements in der Tragwerksplanung</b>	<b>75</b>
4.1	Vorgehen und Grundidee . . . . .	76
4.2	Beispielprojekt . . . . .	78
4.2.1	Kriterien der Wahl des Tragwerks . . . . .	78
4.2.2	Gewähltes Projekt . . . . .	78
4.3	Beherrschung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses . . . . .	81
4.3.1	Anforderungen an die Komplexitätsbeherrschung des Gesamtplanungsprozesses . . . . .	81
4.3.2	Teilaufgaben zur Beherrschung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses . . . . .	83
4.4	Methodische Umsetzung zur Beherrschung des Gesamtplanungsprozesses . . . . .	83
4.4.1	Identifikation der Bauwerksfunktionen . . . . .	84

4.4.2	Zuweisen von Verantwortlichkeiten der Projektbeteiligten zu den Funktionalitäten des Bauwerks . . . . .	87
4.4.3	Definition und Präzisierung des Tragsystems . . . . .	89
4.4.4	Definieren von Tragelementen und Wahl des statischen Systems	90
4.4.5	Zuweisen von Funktionen zu Tragelementen . . . . .	92
4.4.6	Darstellung der Zuordnung von Fachplanern zu Tragelementen	94
4.4.7	Erste Rückschlüsse auf kommunikative Lücken und Auswirkungen auf den Gesamtplanungsprozess . . . . .	97
4.5	Methodische Umsetzung zur Beherrschung des Tragwerksplanungsprozesses . . . . .	99
4.5.1	Speicherung und Weiterverarbeitung der Tragwerkinteraktionen mithilfe von Matrizen . . . . .	104
4.5.2	Umsortierung der Design Structure Matrizen zur Vorbereitung von Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung . . . . .	108
4.6	Anforderungsanalyse und Umgang mit der Komplexität der Planungswerkzeuge . . . . .	110
4.6.1	Aufgaben, Anforderungen und Wahl von Planungswerkzeugen	110
4.6.2	Konkretisierung der Anforderungen an die Planungswerkzeuge	111
4.6.3	Vorbereitung des Planungssystems . . . . .	114
4.7	Prozessdekomposition und Aufbau eines parametrisch-assoziativen Planungsmodells . . . . .	121
4.7.1	Prozessdekomposition . . . . .	121
4.7.2	Definition und Dokumentation der zu verwendenden Algorithmen und Parameter . . . . .	124

4.7.3	Verknüpfen der Parameter mit Algorithmen . . . . .	127
4.7.4	Analyse der Parameter- und Algorithmenbeziehungen und De- tektierung von indirekten Beziehungen . . . . .	128
4.7.5	Aufbau der Parameter- und Algorithmenbeziehungen in einer Programmierungsumgebung . . . . .	130
4.8	Korrelations- und Sensitivitätsanalysen auf Grundlage des parametrisch- assoziativen Planungssystems . . . . .	136
4.9	Optimierungen auf Grundlage eines parametrisch-assoziativen Pla- nungssystems . . . . .	140
4.10	Verallgemeinerung der Methoden . . . . .	142
<b>5</b>	<b>Integration der Komplexitätskontrolle in die Tragwerksplanung</b>	<b>151</b>
5.1	Verortung von komplexitätsinduzierten Problemen und Zuordnung von Lösungsmethoden des Komplexitätsmanagements . . . . .	152
5.2	Expertenwissen und Kompetenz . . . . .	153
5.3	Verfügbarkeit und Genauigkeit von Informationen . . . . .	155
5.4	Verantwortlichkeiten und Abstimmungsbedarf . . . . .	156
5.5	Variantenuntersuchungen und Optimierung . . . . .	159
5.6	Anpassungen und fehlende Planung . . . . .	160
<b>6</b>	<b>Beispielhafte Implementierung von Methoden der Komplexitäts- kontrolle in der Tragwerksplanung</b>	<b>163</b>
6.1	Vorgehen . . . . .	164
6.2	Projektbeschreibung . . . . .	164

6.3	Komplexität des Gesamtplanungsprozesses - Funktionen und Projektbeteiligte . . . . .	166
6.4	Vorbereitung Analyse der Tragwerksinteraktionen und Handhabung der Planungswerkzeuge . . . . .	174
6.4.1	Vorüberlegung . . . . .	174
6.4.2	Beschreibung der Strukturen . . . . .	174
6.4.3	Vorbereitung und Aufbau des parametrisch-assoziativen Geometriemodells und Anbindung an die FEM-Umgebung . . . . .	175
6.4.4	Umsetzung des generativen Geometriemodells . . . . .	177
6.5	Analyse der Tragwerkskomplexität mithilfe von Sensitivitätsanalysen	179
6.5.1	Vorüberlegung . . . . .	179
6.5.2	Aufbau des FEM-Modells . . . . .	180
6.5.3	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse . . . . .	180
6.5.4	Ergebnisinterpretation der Sensitivitätsanalyse . . . . .	184
6.5.5	Gewonnene Erkenntnisse über die Komplexität der Tragstruktur	185
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>187</b>
7.1	Überprüfung der Hypothese . . . . .	188
7.1.1	Hypothese . . . . .	188
7.1.2	Vorgehen und Teilfragen . . . . .	188
7.1.3	Verifizierung . . . . .	190
7.2	Zusammenfassung . . . . .	192
7.3	Weiterführende Fragestellungen . . . . .	196



<b>Anhang</b>	<b>199</b>
<b>Glossar</b>	<b>200</b>
<b>Abbildungsnachweise</b>	<b>215</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>228</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>229</b>



# 1

## Einführung

## 1.1 Motivation

Verfolgt man Probleme im Planungs- und Bauprozess von umfangreich dokumentierten Bauwerken wie der Elbphilharmonie in Hamburg<sup>1</sup> (Bild 1.1.1) zurück, werden oft nicht oder zu spät aufgedeckte Interaktionen im Planungsprozess als Ursache identifiziert.



Abbildung 1.1.1: Elbphilharmonie Hamburg 2014, Quelle: René Wolf

Diese Interaktionen treten zwischen verschiedenen Planungsdisziplinen sowie den zugeordneten Fachplanern auf.

Die gerade bei Großprojekten anzutreffende baufortschrittbegleitende Planung<sup>2</sup> ist ohne die Kenntnis und Berücksichtigung dieser Beziehungen nicht möglich. Der erste Schritt der Komplexitätskontrolle ist es, ein Bewusstsein für die Charakteristika dieser Beziehungen zu erlangen und sie genauer zu untersuchen.

Die verschiedenen Perspektiven der Fachplaner auf die Strukturierung eines Bauwerks liegen in den verschiedenen zu erfüllenden und zu planenden Funktionen des Bauwerks begründet. Bei Entwurf, Analyse und Konstruktion des Tragwerks haben die unterschiedlichen Funktionen und Anforderungen des Planungsprozesses verschiedene Sichtweisen auf das Bauwerk mit verschiedenen Gliederungsstrategien zur

<sup>1</sup>In Bürgerschaft Hamburg (Bürgerschaft Hamburg, 2014, S.53) werden gezielt Aussagen zum Einfluss der Tragwerksplanung beschrieben.

<sup>2</sup>Hier wird die Ausführungs- aber auch die teilweise begonnene Werkstattplanung dem Planungsfortschritt angepasst. Dabei ist das Erkennen von Änderungsabhängigkeiten essenziell. Ursache für die baufortschritt-begleitende Planung sind oftmals hoher Zeitdruck, aber auch die hohe Projektkomplexität.

Folge. Die Darstellung 1.1.2 zeigt Gesamt- und Partialmodelle, die in Egger (Egger et al., 2014, S. 110) definierten unterschiedlichen Sichtweisen eines Bauwerksmodells und die umfassenden Abhängigkeiten der vernetzten Domänen<sup>3</sup>. Berücksichtigt man zusätzlich bauphysikalische und montagetechnische Aspekte sowie das äußere Erscheinungsbild und die Einbindung in die gebaute Umgebung, wird die Vielzahl der funktionalitätsbegründeten Sichtweisen auf das zu planende Bauwerk deutlich.

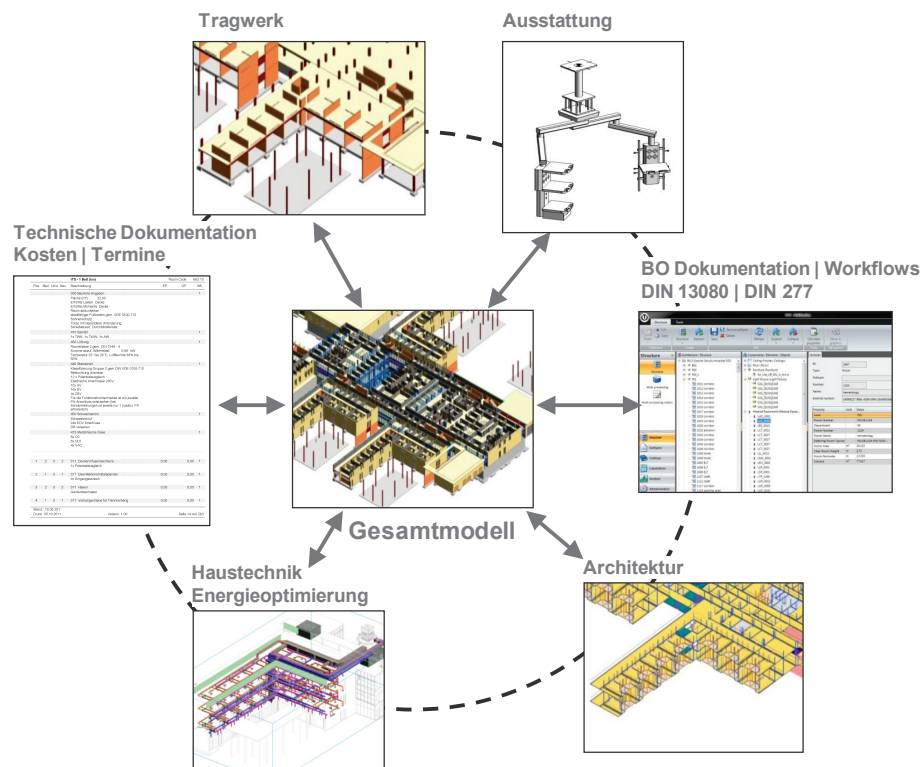


Abbildung 1.1.2: Dezentrale Planung und zentrale Koordination von Informationen aus Egger (Egger et al., 2014)

Diese für die Planung nötigen Sichtweisen werden in der Planungspraxis nur in wenigen Fällen auf Basis einer

(...) durchgängigen, zentralen, und objektbasierten Verwaltung und Koordination von Projektinformationen (...) (Egger et al. 2014, S.18)

erzeugt. Ursachen hierfür sind laut Both (Both et al., 2013, S.179 ff.) unter anderem

<sup>3</sup>„Der Inhalt der Einzeldomänen entspricht der Rolle des Fachplaners innerhalb des Planungsprozesses.“ (Bubner und Thierfelder 2000)

in der Heterogenität der Planungslandschaft, speziell in Deutschland, zu suchen. Einen weiteren Aspekt stellt die juristische Verantwortlichkeit einzelner Fachplaner für die Verwaltung und Koordination der Projektinformationen dar. Es ist fraglich ob sich die Heterogenität in naher Zukunft auflösen wird und ob dieses tatsächlich zu einer zeitlich optimierten Planung, auch mit Blick auf den zugehörigen Regulierungsaufwand, führen wird.

Die auf getrennten Partialmodellen beruhende Erzeugung der unterschiedlichen Repräsentationen des Bauwerks hat zur Folge, dass Änderungen eines Fachplaners und deren Interaktionen mit den Modellen anderer Fachplaner, ohne weitere Maßnahmen nicht automatisiert erkannt werden können. Egger (Egger et al., 2014) schreibt dazu:

Die verschiedenen Bauwerksmodelle werden weiterhin getrennt durch die jeweiligen Fachplaner erstellt, die für ihr Fachmodell auch selbst verantwortlich sind. Diese werden zu Koordinationszwecken in festgelegten Abständen zusammengeführt. Das große gemeinsame Gesamtmodell ist derzeit noch Utopie! Das eine gemeinsame Gesamtmodell in der „Cloud“, an dem alle Beteiligten in Echtzeit arbeiten und sofort alle Änderungen zurückgemeldet bekommen, welches manchmal als BIM kolportiert wird, gibt es unter realen Anforderungen nicht. (Egger et al. 2014, S.50)

Auch bei Verwendung eines Koordinationsmodells<sup>4</sup>, inklusive dreidimensionaler Erstellung eines Volumenmodells und der automatischen Ableitung der verschiedenen notwendigen Ansichten und Schnitte, ist nicht klar ob sich das Aufdecken von kritischen Planungsinteraktionen nicht auf räumliche Kollisionen durch eine Clash Detection<sup>5</sup> beschränkt. In diesem Fall ist das Aufdecken von Planungsrisiken weiterhin sehr stark von den individuellen kognitiven Fähigkeiten des jeweiligen Fachplaners abhängig.

---

<sup>4</sup>Bei dem Koordinationsmodell handelt es sich um ein Modell mit vereinfacht dargestellten Bauwerksdetails mit der Möglichkeit der Visualisierung von Bauabläufen und dem Fokus auf baubetrieblichen Fragestellungen. (Przybylo und Schreyer, 2016, vgl. S.32 ff.)

<sup>5</sup>„Mit Clash Detection wird das automatische Auffinden von geometrischen Durchdringungen (Konflikten oder Clashes) verschiedener Bauteile im 3D-Modell bezeichnet.“ (Borrmann et al. 2015, S.272 f.)

Die Möglichkeiten der Clash Detection sowie des Modell Checkings<sup>6</sup> werden von Tulke in Borrmann Borrmann et al. (2015) wie folgt beurteilt:

Zusätzlich sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die aufgezeigten Möglichkeiten lediglich eine Unterstützung der ingenieurtechnischen Planung bzw. deren Koordination in Teilbereichen darstellen. Eine Vollständigkeit in allen technischen Aspekten ist nicht gegeben. Ebenso verbleibt die Verantwortung weiterhin bei den jeweiligen Fachplanern und wird nicht an Automatisierungswerkzeuge abgetreten. (Borrmann et al. 2015, S.282).

Es bleibt zu bedenken, ob die Notwendigkeit einer hoch detaillierten Volumenmodellierung als Basis von Kollisionskontrollen aus Sicht des Tragwerksplaners als effizient angesehen werden kann. Die Volumenmodellierung setzt voraus, dass die Teilaufgaben der Tragwerksplanung soweit fortgeschritten sind, dass konkrete Aussagen über Dimensionen von Tragelementen gegeben werden können. Treten Kollisionen auf, muss die Dimensionierung der Tragelemente überarbeitet und neue Volumenmodelle erstellt werden. Diverse direkte, indirekte Abhängigkeiten und Zirkelbezüge<sup>7</sup> begründen die Außergewöhnlichkeit des stark iterativen, nicht-linearen Planungsprozesses<sup>8</sup>.

Wie Schnetzer (Schnetzer et al., 2006, vgl. S.158 f.) ausdrückt, besteht eine Kernaufgabe des Bauingenieurs im Tragwerksplanungsprozess darin frühzeitig aufzudecken, welche statischen und konstruktiven Aufgaben in welcher Planungsphase zu lösen sind. Es ist hierbei zwingend in noch offene Aufgaben so tief einzutauchen, dass die Lösbarkeit zu einem späteren Zeitpunkt sichergestellt wird.

Bei Planungsaufgaben mit einem auf den Planungsinteraktionen begründeten hohen Grad der Dynamik bleibt laut Schnetzer dabei immer ein Restrisiko für später notwendige Umplanungen bestehen. Diese Dynamik entsteht durch die Eigendynamik des Tragwerksplanungsprozesses und durch zeitliche Veränderungen aufgrund von Einflüssen anderer Planungsbeteiligter. Ignorieren dieses Restrisikos kann sich darin äußern, dass das Bauwerk mit einem erhöhten Aufwand an Ressourcen, verspätet,

<sup>6</sup>„Der Begriff Modell Checking oder Code Checking meint die automatisierte, regelbasierte Überprüfung des Modells.(...) Kernstück ist dabei die Formulierung der zu überprüfenden Regeln in computerinterpretierbarer Form.“ (Borrmann et al. 2015, S.281)

<sup>7</sup>Zirkelbezüge können in der Planungspraxis auftreten, wenn sich Planungsphasen gegenseitig beeinflussen. Diese Abhängigkeiten können meist nur durch ein iteratives Vorgehen gelöst werden.

<sup>8</sup>Nicht-lineare Planungsprozesse sind Prozesse die Rücksprünge zu früheren Stufen verlangen und aufgrund von Erfahrungen eines Lernprozesses Plankorrekturen erfordern. (Rücksteiner, 1989, vgl. S. 29)

in geringerer Qualität oder im schlimmsten Fall gar nicht erbaut werden kann.

In dem Buch *Black Box BER* (Gerkan, 2013) über den Flughafen Berlin Brandenburg *Willy Brandt* (Bild 1.1.3) nennt Gerkan (Gerkan, 2013, vgl. S.48 f.) als zwei der sieben Plagen des Bauens permanente Änderungen aller Anforderungen im Planungsprozess und mangelnde Kommunikation bzw. Kooperation. Hierbei werden nicht die Änderungen der Anforderungen (Gerkan, 2013, vgl. S.68 ff.) an sich als Plage gesehen, sondern der Umgang mit ihnen und ihren Folgen.

In dem Endbericht der Reformkommission Bau von Großprojekten: *Komplexität beherrschen - kostengerecht, termintreu und effizient* (Püstow, 2015) werden zehn Empfehlungen für die Verbesserung der Planung von Großprojekten definiert. Von diesen Empfehlungen sind fünf als für diese Arbeit wichtig zu nennen.

1. Kooperatives Planen im Team
2. Erst planen, dann bauen
8. Klare Prozesse und Zuständigkeiten/Kompetenzzentren
9. Stärkere Transparenz und Kontrolle
10. Nutzung digitaler Methoden - Building Information Modeling

Die aufgezählten Punkte 1., 2., 8. und 9. stehen in direktem Zusammenhang mit der Kontrolle von Interaktionen im Planungsprozess für die in dieser Arbeit Konzepte zur Verfügung gestellt werden sollen. Der Punkt 10. zum Thema der BIM-Methodik soll unterstützend wirken.

Ansätze der BIM-Methodik zeigen in der Planungspraxis Defizite in Richtung der Planungs Kooperation. Both (Both et al., 2013, S.179 ff.) erwähnt beispielsweise Vorurteile bei der unternehmensübergreifenden Weitergabe und kooperativen Nutzung von BIM Modellen. Albrecht (Albrecht, 2014, S.34 ff.) nennt neben organisatorischen, technischen, juristischen und Akzeptanzproblemen auch preisliche Hürden vor allem für kleinere Planungsbüros. Weitere aktuelle Probleme mit der BIM-Methode aus der Praxis des Autors ergeben sich aus einer unzureichenden Verfügbarkeit von Fachkräften, nicht gelösten Problemen des Schutzes des geistigen Eigentums, speziell bei individuell entwickelten Bauteilen und einem hohen Detaillierungsgrad ab dem Level of Development (LOD) 400<sup>9</sup> sowie der späten Verfügbarkeit von, für Kollisionskontrollen ausreichend detaillierten, BIM-Modellen.

Werden die Auswirkungen von auf Interaktionen beruhenden Änderungen nicht ana-

---

<sup>9</sup>„An LOD 400 element is modeled at sufficient detail and accuracy for fabrication of the represented component. The quantity, size, shape, location, and orientation of the element as designed can be measured directly from the model without referring to non-modeled information such as notes or dimension call-outs.“ (BIM Forum 2017, S.13)



lysiert, ausreichend kommuniziert oder nach erfolgter Analyse ignoriert, wird das von Schnetzer (Schnetzer et al., 2006) benannte Restrisiko erhöht. Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung von Konzepten zur Minimierung dieses Restrisikos. Zum Erreichen dieses Ziels werden in dieser Arbeit Methoden der Graphentheorie, der Systemtheorie bzw. des Systems Engineering und der parametrisch-assoziativen Modellierung gekoppelt sowie ein Koeffizient der deskriptiven Statistik vorgeschlagen und erläutert.



Abbildung 1.1.3: Flughafen Berlin Brandenburg „Willy Brandt“ 2013

## 1.2 Ausrichtung - Abgrenzung - Annahmen

Für die Ausrichtung und Abgrenzung dieser Arbeit werden neben der HOAI (Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung, 2013) auch die SIA 112 (SIA, 2014) und weitere Beschreibungen des Planungsprozesses verwandt. Wie von Both (Both, 2006, S.34) beschrieben, hat die HOAI als Preisverordnung die Zielsetzung der Gliederung der Planungsleistung nach kostentechnischen Aspekten. Da sie einen elementaren

Aspekt der heutigen Planungspraxis darstellt, ist sie ein wichtiger Ausgangspunkt dieser Arbeit. Für den weiteren Planungsprozess werden das Schweizer Planungsmodell in der SIA 112 (SIA, 2014) und das Phasenmodell der VDI 2221 (Verein Deutscher Ingenieure, 1993) (siehe Abbildung 1.8.3 auf Seite 35) herangezogen, bei denen der integrale Planungsgedanke<sup>10</sup> und die kausalen Zusammenhänge zwischen den Planungsleistungen stärker im Fokus stehen als bei der HOAI.

Während der Analyse konkreter in der Tragwerksplanung durchzuführender Teil- und Sonderleistungen wird Bezug auf die kausalen Zusammenhänge der Leistungsphasen der HOAI genommen. Es wird der üblichen Praxis folgend davon ausgegangen, dass die Projektbeteiligten zu Beginn der Planung nicht vollständig bekannt sind. Jedoch wird vorausgesetzt, dass die prinzipielle Notwendigkeit einzelner Gebäudefunktionen definiert und ihnen Planungsleistungen zugeordnet werden können. Im Laufe der Planung werden den einzelnen Leistungen so bald als möglich individuelle Fachplaner zugeordnet. Dies hat zur Folge, dass bei der Suche nach einem Optimum für das Tragwerk und den Planungsprozess frühzeitig Expertenwissen der ausführenden Firmen eingebunden werden kann.

## 1.3 Komplexitätsbezogene Probleme der Planungspraxis

### 1.3.1 Quellenüberblick

Um Diskussionspunkte für die Evaluierung der aufzuzeigenden Methoden des Komplexitätsmanagements der Tragwerksplanung zur Verfügung zu stellen, sollen konkret auftretende Probleme der Planungspraxis im Zusammenhang mit der Planungskomplexität im Bauprozess genannt werden. Neben den bereits genannten Quellen Bürgerschaft Hamburg (Bürgerschaft Hamburg, 2014), Gerkan (Gerkan, 2013) und Schnetzer (Schnetzer et al., 2006) werden weitere Quellen hinzugezogen. Die Auswahl der Quellen erfolgte mit der Vorgabe solche zu finden die neben der Darstellung komplexitätsinduzierter Probleme Lösungsansätze für den Umgang mit der Planungskomplexität aufzeigen. Die dargestellten Probleme werden im Anschluss in Kategorien einsortiert und die Lösungsansätze mit Blick auf das übergeordnete Ziel

---

<sup>10</sup> „Bei der Integralen Planung geht es um die ganzheitliche Betrachtung aller Belange des Gebäudes. Dabei wird das Ziel verfolgt eine ansprechende architektonische Gestalt mit einem optimierten Tragwerk, intelligentem Technikeinsatz und der geeigneten Materialwahl zu planen. Dies soll durch einen mehrdimensionalen, integrativen Prozess erreicht werden.“ (Hausladen und Tichelmann 2009, vgl. S.6)

der Arbeit der Bereitstellung von Konzepten zur Minimierung des Restrisikos für spätere Umplanungen und deren Folgen beurteilt.

Als Ausgangspunkt für die Suche bieten sich folgende Quellen an

1. Buchbeiträge
2. Fachartikel
3. Umfragen
4. rechtliche Untersuchungen von Bauprojekten
5. persönliche Projekterfahrungen

aus denen wesentliche Inhalte zitiert, paraphrasiert und in den anschließenden Abschnitten besprochen werden.

### 1.3.2 Buchbeiträge

Hauber, Ismail und Scherer schreiben zu der Komplexität in Bauprojekten folgendes:

Jeder Projektbeteiligte entwickelt in seiner Vorstellung Gedankenmodelle über das geplante Bauwerk. Diese Gedankenmodelle werden laufend weiterentwickelt und die zugehörigen Bauprozesse in der Vorstellung durchgespielt. Die Vorstellungskraft reicht, in aller Regel, auch bei routinierten, erfahrenen Projektbeteiligten nicht aus, um die Komplexität von Bauwerken vollständig und vor allem fehlerfrei zu erfassen. Um die Gedankenmodelle zu überprüfen und zu perfektionieren, entstehen Skizzen, Pläne und auch Modelle aus Pappe und Holz. Sofern dieser ungemein bedeutende und unverzichtbare Gedanken- und Ideenprozess an einem virtuellen Bauwerk auf diese Weise entwickelt werden könnte, ist zu erwarten, dass die gedankliche Vorstellungskraft auf ein höheres Qualitätsniveau angehoben wird. Durch Präzision und Detailtreue werden interaktive 3D Bauwerksmodelle in der Hand von routinierten und erfahrenen Projektbeteiligten zu mächtigen Planungsinstrumenten und weisen den Weg in die Zukunft des Bauwesens. Die Möglichkeit, kreative Gedankenabläufe aller planenden Projektbeteiligten an einem visualisierten 3D

Model abzustimmen, hilft, Entscheidungen schneller und sicherer treffen zu können. Eine Qualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Zeitersparnis ist zu erwarten. (Scherer und Schapke 2014, Pos. 88,6/694)

Das Thema Komplexitätsreduktion im Planungs- und Bauprozess wird von Petra von Both wie folgt thematisiert:

In den USA konnten in Bezug auf Planungs- und Fertigungseffizienz in den letzten Jahren durch gezielten Rechneinsatz im Planungs- und Bauprozess sowie durch industrielle Fertigungs- und Assemblierungsmethoden bereits augenfällige Verbesserungen erreicht werden, im Gegensatz dazu sieht sich die deutsche Baubranche im globalen Kontext in einer verschärften Wettbewerbssituation.

Wie Architekten- und Ingenieurkammern nun erkannt haben, liegt die Ursache für diese Situation in einer oft ineffizienten und an überalterte Methoden und Rollenbilder geknüpften Arbeitsweise. Reaktionen hierauf bestehen allerdings zumeist in einer stärkeren Spezialisierung und Arbeitsteilung im Planungs- und Bauprozess, um - tayloristischen Ansätzen folgend - durch Segmentierung einer Komplexitätsreduktion und Effizienzsteigerung in den einzelnen Prozessen zu erhalten. Dies mündet allerdings meist in einer isolierten sequenziellen Bearbeitung der Prozesse und führt damit zu Qualitätseinbußen durch erhöhte Kompatibilitätsprobleme der separat optimierten Teillösungen.

Der Lösungsansatz kann daher nur in der Erhöhung der globalen, das heißt in diesem Zusammenhang auf das Gesamtprojekt bezogenen, Wertschöpfung liegen. Konkret gehen Experten davon aus, dass sich eine Produktivitätssteigerung insbesondere durch Innovation und Vernetzung im Planungs- und Bauprozess, durch neue integrierte Technologien, computerbasierte 3-D/4-D-Modellierung von Bauwerken, CAD-CAM-Kopplung, neue Prozesse sowie neue Arten der Dienstleistungen erreichen lässt. (Zieta et al. 2011, S. 21 f.)

Schapke, Beetz, König, Koch und Borrmann beschreiben Probleme bezüglich der Abstimmung in der Bauplanungspraxis komplexer Projekte wie folgt:

Die Bauplanung und -ausführung ist ein hochgradig arbeitsteiliger Pro-

zess mit einer Vielzahl von Beteiligten. Die Abstimmung untereinander, die für das Gelingen eines Bauvorhabens essenziell ist, geschieht noch heute vorwiegend durch den Austausch von 2D-Plänen. Gerade bei komplexen Bauvorhaben ist diese Form des Informationsaustausches jedoch fehleranfällig und zeitaufwendig, da die jeweilig Kontrolle, Koordination und Abstimmung nicht automatisiert unterstützt werden kann. Durch den Gebrauch digitaler Bauwerksinformationsmodelle und die Modellierung von abgestimmten Arbeitsabläufen können verschiedene Formen der Zusammenarbeit in vielen Aspekten effektiv unterstützt und verbessert werden. Von verschiedenen Planungsbeteiligten benötigte Informationen können dadurch auf dem aktuellen Stand gehalten und angeboten werden, wobei der gemeinsame Datenraum aller Planungsbeteiligten teilautomatisiert überprüft und konsistent gehalten werden kann. Dies erlaubt schnellere iterative Planungszyklen, eine verbesserte Kontrolle und Übersicht des Projektfortgangs und erleichtert die Kommunikation aller Beteiligten durch gemeinsame verwendete Informationsressourcen. Um diese Vorteile digital unterstützter Zusammenarbeit effektiv und effizient einzusetzen, sind jedoch einige grundlegende Veränderungen gegenüber papierbasierten Arbeitsabläufen nötig. (Borrmann et al. 2015, S.208)

Mit Bezug auf tragwerksplanungsinterne Abhängigkeiten schreiben Rank, Romberg und Niggel:

Das in der Tragwerksplanung übliche Vorgehen besteht darin, Gebäude in einzelne Tragstrukturen zu untergliedern und diese weitgehend unabhängig voneinander zu berechnen und zu bemessen. Dabei kommen für jeden Typ von Tragstruktur unterschiedliche Verfahren und Programme zum Einsatz. Die anzunehmenden Lasten werden durch Idealisierung des Gesamtmodells beziehungsweise durch sukzessive Übernahme von Lasten und Gegenkräften von oben durch das ganze Tragwerk hindurch bis zu den Auflagern bestimmt. Dieses primär sequenzielle Vorgehen erschwert jedoch eine parallele Arbeitsweise seitens verschiedener Fachplaner. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Tragwerkssysteme lassen sich die Aufgaben auch nur schwer automatisieren. Ganz besonders deutlich werden die Nachteile, wenn Änderungen am System vorgenommen werden müssen. In diesem Falle müssen alle Abhängigkeiten wiederum neu über-

prüft werden und die betroffenen Tragwerksteile nochmals neu durchgerechnet werden.

Die stete Betrachtung eines Bauwerks am Gesamtmodell stellt gegenüber einer klassischen Vorgehensweise mittels Positionsstatik einen umfassenden Ansatz in der Berechnung von Tragstrukturen dar. Es ist dabei zu beobachten, dass in der Praxis zunehmend Bedarf besteht, Gebäude als Ganzes zu modellieren und zu berechnen (Rank et al. 2007, S. 296).

### 1.3.3 Fachartikel

Nöldgen (Nöldgen et al., 2014) beschreibt die Effekte des Einsatzes der BIM-Methode auf die Tragwerksplanung zur Bewältigung der Planungskomplexität. Für die interdisziplinäre Anwendung werden notwendige Weiterentwicklungen in Blick auf Schnittstellen, Regularien und Vergabe- und Vergütungsregelungen vorgeschlagen. Die Verwendung von BIM für die Tragwerksplanung wird als ausführungsfähig angesehen, insofern vorher eine große Zahl elementarer Familien durch den Anwender programmiert wird. Die Anbindung an die Berechnung mittels FEM<sup>11</sup> wird als verbesserungswürdig angesehen. Es ist ein großer Nachbearbeitungsaufwand bzw. Vorbereitungsaufwand des BIM-Modells für die Tragwerkanalyse notwendig.

Knippers diskutiert in Knippers (Knippers, 2014) warum Ansätze zur Kontrolle und Koordinierung auf Basis digitaler Bauwerksmodelle in Deutschland schwerer zu verwenden sind als bei dem im Artikel dargestellten Projekt in China. Als ein Hauptgrund wird die fehlende Möglichkeit der Bildung von strategischen Partnerschaften zwischen Planungsbeteiligten aufgrund der deutschen Vergabe- und Honorarvorschriften angesehen. Beispielsweise findet sich die BIM-Methode bisher nur als besondere Leistung in der Leistungsphase 2-Objektphase in der HOAI, obwohl sie für alle Planungsphasen relevant ist. Knippers beschreibt anhand des Beispiels des neuen Bahnhofs in Shenzhen wie die Koordination zwischen Architekt und Tragwerksplaner mittels einer Excel-basierten Datenhaltung und der Modellierung mittels Rhino3D umgesetzt wird. Er legt dar wie sich die Rolle des Ingenieurs durch den Einsatz der parametrischen Modellierung verändert.

In Fuchs (Fuchs et al., 2013) wird praxisnah erörtert warum der Einsatz von BIM in hochkomplexen Planungsprojekten als sinnvoll erachtet wird, aber die detaillierte Abbildung auch der kleinsten Details inklusive der zugehörigen Detailnachweise nicht als zwingend angesehen wird. In dem Beispielprojekt wird beschrieben welche

---

<sup>11</sup>Finite Element Methode

hohen Aufwand die Definition der Schnittstellen zwischen den einzelnen Fachplanern bedeutet.

Jungwirth, Scholz, Deinhard und Schneider erörtern in Jungwirth (Jungwirth et al., 2015) den generellen Unterschied zwischen der 3D-Konstruktion mit der BIM-Methode und der Modellierung der Tragwerksplanung aufgrund anderer Bezugssysteme. Aus diesem Grund wird die Tragwerksplanung als eigenständiger Prozess innerhalb des BIM-Prozesses gesehen. Hier wird ein Bedarf zur Weiterentwicklung der Funktionalität von BIM-Softwarewerkzeugen definiert. Auch bei Bereitstellung weiterentwickelter Funktionalitäten wird die Gegenrechnung mit einfachen Methoden als zwingend angesehen.

#### 1.3.4 Umfragen

An der Online-Umfrage *BIM - Potentiale, Hemmnisse und Handlungsplan* Both (Both et al., 2013) nahmen 301 Probanden teil. 142 Fragebögen waren konsistent, vollständig und konnten verwandt werden. Die effektive Zahl eingeladener Personen lies sich nicht quantifizieren. Als ein Fazit der Umfrage wird folgendes formuliert:

Bezogen auf den kooperativen Aspekt machte die Umfrage allerdings deutlich, dass derzeit noch große Vorurteile und Reserviertheiten in Bezug auf eine unternehmensübergeordnete Weitergabe und kooperative Nutzung von BIM-Modellen bestehen. Erstaunlich scheint in diesem Zusammenhang, dass im Bereich der Forschung seit den Ansätzen zu Anfang der 2000er Jahre im Bereich des CSCW (Computer Supported Collaborative Work) [GrRu99, Müll99, Forg99, Rüpp07] kaum neue, auf den Kontext BIM anwendbare Ansätze im Bereich der Kooperationsmethodik entstanden sind. Die dort entwickelten Ansätze internetbasierter Informationsplattformen (sogenannter Projekträume) und Groupwaresysteme existieren völlig losgelöst und parallel zu neueren modellbasierten Ansätzen des kollaborativen Modellmanagements (vgl. Model-Server). Aufgabe der Forschung muss es sein, Konzepte und prototypische Implementierungen für die Integration dieser Ansätze auf Modell und Prozessebene zu schaffen.

Die Anwendung der mit der BIM-Methodik verbundenen integrativen und kollaborativen Arbeitsweisen und der damit einhergehende erhöhte Aufwand an Koordination und Synchronisation läßt neue Prozesse sowie

Verantwortlichkeiten und Rollen entstehen, die im „klassischen“ Projektmanagement nur unzureichend abgedeckt werden. Teamorientierte Ansätze sind bisher nicht praxistauglich ausformuliert und in den bestehenden Organisations- und Kooperationsstrukturen kaum umsetzbar. Die Prozesse der BIM-Einführung und Anwendung sind bisher bei den verschiedenen Akteuren sehr individuell entsprechend der jeweiligen spezifischen unternehmerischen Rahmenbedingungen umgesetzt. Deutlich wird anhand der Umfrage aber der Bedarf an generalisierten Hilfestellungen und Leitfäden. Um eine entsprechende Breitenwirkung entfalten zu können, bedarf es einer genaueren Analyse der bisher stattgefundenen Pilotprojekte und die Klärung der Frage, welche Erfahrungswerte und individuellen Erkenntnisse generalisierbar sind. Gerade in Hinblick auf die derzeit stattfindende Diskussion zur Festlegung inhaltlich, qualitativer Modellstandards (Qualitätskriterien) erscheint dies sinnvoll. (Both et al. 2013, S.179 f.)

In Bezug auf die Tragwerksplanung lässt sich herausstellen, dass 71% der Tragwerksplaner angeben mit einer modellbasierten Arbeitsweise zurechtzukommen. Das ist der Höchstwert unter den teilnehmenden Fachplanergruppen.

Bei der Umfrage „Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden“ (Braun et al., 2015) des Fraunhofer Instituts aus dem Jahr 2015 innerhalb des Forschungsprojektes FU-CON 4.0 - Parametrische Planung und digitale Fertigung nahmen 378 Personen teil. Dreiviertel der Befragten sind Fachplaner. Die zentrale Botschaft der Studie lautet:

### **Zentrale Botschaft der Ergebnisse und offene Fragen**

Von der durchgängig digitalen Prozesskette liegt man in der Praxis noch weit entfernt. Die Bereitschaft neue Planungsmethoden einzuführen ist jedoch auch nicht wirklich hoch. Die meisten sehen keinen Grund mit Gebäudeinformationsmodellen zu arbeiten oder sie assoziieren BIM mit hohen Softwarekosten, die sich die überwiegend kleinstrukturierte Planerlandschaft nicht leisten kann.

BIM könnte in Zukunft eine Hürde darstellen, vor allem wenn es bei öffentlichen Aufträgen gesetzliche Vorschriften diesbezüglich geben sollte. Eine drastische These wäre, dass die kleinen Büros aussterben könnten oder sie lernen damit umzugehen.

Generell fehlen softwareunabhängige Informationen zur Planungsmetho-



de BIM und deren Vorzüge. Obwohl jeder Fünfte Befragte bereits mit Gebäudeinformationsmodellen arbeitet, nutzt kaum einer das Potential der 4D- und 5D- Planung.

Die bisherigen BIM-Nutzer bearbeiten vor allem Großprojekte. Weiterhin fehlen zur durchgängig digitalen Bauprozesskette passende (informationsverlustfreie) Austauschformate.

Rechtliches wie Haftungsfragen sowie Urheber- und Nutzungsrechte müssen geklärt werden. Das Planen und Ausführen mit der BIM-Methode muss reglementiert werden. Hierzu hat sich ein DIN-Normungsausschuss seit Januar 2015 formiert. Weiterhin ist die Frage, inwieweit sich die HOAI ändern muss, da insbesondere der Zeitaufwand mit der Planungsmethode BIM zu Beginn höher, in späteren Leistungsphasen aber geringer ist. Die Benefits und zusätzlichen Vermarktungspotenziale müssen klar herausgestellt werden. (Braun et al. 2015, S.27)

Mit Blick auf die Zusammenarbeit mit Projektpartnern ist zu erwähnen, dass fast Dreiviertel der Tragwerksplaner eine frühere Integration in die Projekte für sinnvoll halten.

### 1.3.5 Bewertung und weitere der Quellen

Den Lösungsvorschlägen der referenzierten Buchbeiträge aus Scherer (Scherer und Schapke, 2014), von Zieta (Zieta et al., 2011), Borrmann (Borrmann et al., 2015) und Rank (Rank et al., 2007) ist gemein, dass Ansätze zur Handhabung von Abhängigkeiten und Interaktionen im Planungsprozess und somit der Planungskomplexität durch die umfangreiche Bauwerksmodellierung gesucht werden. Bei teilweiser Einbindung semantischer<sup>12</sup> Informationen mittels der BIM-Methodik wird der Prozesskomplexität mit einer erhöhten Komplexität des Planungswerkzeugs begegnet. Die aufgeführten Quellen wie Both (Both et al., 2013, S.179 f.) und Nöldgen (Nöldgen et al., 2014) beschreiben, dass speziell die BIM-Methode mit einem nicht zu unterschätzenden Aufwand hinsichtlich des Modellaufbaus und der Modellpflege verbunden ist und Hinderungsgründe in Deutschland wie von Braun (Braun et al., 2015, S.27), Knippers (Knippers, 2014) und Nöldgen (Nöldgen et al., 2014) erwähnt

<sup>12</sup> „Sind die Bauwerkselemente nur durch geometrische Daten beschrieben, liegt noch kein semantisches Datenmodell vor. Die Bauwerkselemente haben nur eine Form, aber noch kein Wissen über ihre Funktionen. Dies wird ihnen erst über die Semantik mitgegeben.“ (Scherer und Schapke 2014, Pos.139/1253)

aufgrund der Rahmenbedingungen, speziell der HOAI, gegeben sind. Bei der Bauwerksmodellierung mittels der BIM-Methodik hinterfragt Fuchs (Fuchs et al., 2013) die Notwendigkeit einer hoch detaillierten Modellierung für die Tragwerksplanung. Jungwirth, Scholz, Deinhard und Schneider erörtern in Jungwirth (Jungwirth et al., 2015) die Notwendigkeit der Gegenprüfung für die aus BIM-Modellen abgeleiteten statischen Berechnungsmodelle mittels einfacher Plausibilitätsüberlegungen.

Die bei von Both in Zieta (Zieta et al., 2011, S. 21 f.) geforderte Vernetzung zum Informationsaustausch erfordert zunächst die Kenntnis darüber, welche Fachplanern Informationen miteinander austauschen müssen, um deren Partialmodelle adäquat verbinden zu können.

Dieses Wissen wird dabei vorausgesetzt, ist aber keineswegs selbstverständlich. Es erfordert genaue Analysen unter Berücksichtigung des speziellen Charakters des Planungsprozesses, aber auch Wissen über die interstrukturellen Interaktionen des Tragwerks sowie dessen konstruktive Umsetzung. Es ist notwendig Methoden zur gezielten Analyse des Kommunikationsbedarfs der mit dem Tragwerksplaner interagierenden Fachplaner bereitzustellen sowie die Sensitivitäten einzelner Tragelemente untereinander aufzudecken.

Die aufgeführten Fachartikel und auch der referenzierte Artikel von Schnetzer (Schnetzer et al., 2006) haben oft in Bezug auf die Problemdarstellung der Planung eine begrenzte Detailtiefe, Gerichtsprotokolle hingegen sind nur in geringem Umfang zugänglich. Ausführliche Berichte wie der zur Hamburger Elbphilharmonie in Bürgerschaft Hamburg (Bürgerschaft Hamburg, 2014, S. 53) oder direkte Einblicke in die gelaufene Planung wie der von Gerkan (Gerkan, 2013) sind eine Seltenheit. Aus diesen Gründen werden die bereits aufgeführten Quellen um Projekterfahrungen des Autors zu dem Thema der Planungskomplexität erweitert, um zusätzliche Probleme aus der Planungspraxis zu definieren. Als komplexitätsinduziert werden dabei Probleme definiert die mit Interaktionen von Personen, Modellen, Tragelementen und Teilplanungsprozessen im Gesamtplanungsprozess in Verbindung stehen.

In Kapitel 5 werden diese aufgenommen und im Planungsprozess verortet. Die in den genannten Quellen und in den vom Autor bearbeiteten Bauprojekten aufgetretenen komplexitätsinduzierten Probleme erheben nicht den Anspruch einer vollständigen Darstellung aller denkbaren komplexitätsinduzierten Problemstellungen. Girmscheid (Girmscheid, 2014) beschreibt den Unikatcharakter von Bauwerken wie folgt:

Fast jedes Bauwerk besitzt Unikatcharakter und ist gekennzeichnet durch:

- Errichtung am Ort der Nutzung und damit individuelle topografi-

- sche, geologische, verkehrstechnische und nachbarliche Bedingungen
- individuelle Architektur, Baustoffkombination und Konstruktion
- regionale Bau- und Umweltgesetze
- individuelle Vertragsgestaltung, Bauherrenorganisation und Projektabwicklungsform

Diese Charakteristik beeinflusst und gestaltet den Bauproduktionsprozess, der daher für jedes Bauwerk individuell geplant werden muss, um eine technisch wie ökonomisch optimale Abwicklung zu erreichen.(...) Dies bedeutet, dass der Bauherr in fast allen Phasen des Bauwerkserstellungsprozesses seine individuellen Bedürfnisse und Vorstellungen in den Prozess integrieren möchte. Dies ist nur durch eine starke Interaktion möglich. (Girmscheid 2014, S.35)

Aufgrund dieses Unikatcharakters von Bauwerken ist auch die Planung jedes Bauwerks eine individuelle Aufgabe mit individuellen Problemstellungen hinsichtlich der Interaktionen zwischen Personen, Modellen, Tragelementen und Teilplanungsprozessen. Die aus den Quellen und Projekterfahrungen des Autors entwickelten komplexitätsinduzierten Probleme lauten entsprechend eines möglichen chronologischen Auftretens im Planungsprozess sortiert wie folgt:

1. Expertenwissen und Kompetenz
  - a. Nicht alle nötigen Experten werden im frühen Stadium der Planung komplexer Projekte eingebunden. Kompetenz bleibt ungenutzt.
  - b. Erfolgreiche Lösungsvarianten/-strategien für gleichartig komplexe Aufgabenstellungen auf Basis von Expertenwissen können nicht oder nur stark beschränkt gespeichert und in einem neuen Projekt wiederverwendet werden.
  - c. In Vorgängerprojekten detektierte Probleme werden bei gleichartig komplexen Entwurfskonstellationen nicht automatisch gemeldet. Genauso wenig wird ein Wiederholen gleichartiger Fehler vermieden.
2. Verfügbarkeit und Genauigkeit von Informationen
  - a. Die Gewinnung von Erkenntnissen über das Tragverhalten und die Dimensionen des Tragwerks von komplexen Strukturen brauchen zu lange, um ein nachprüfbares Feedback über verschiedene Lösungsmöglichkeiten an den Objektplaner geben zu können.

- b. Das komplizierte Verhalten von realen Strukturen wird in den ersten Analysemodellen unzureichend abgebildet.
- c. Planungsentscheidungen müssen auf Basis geschätzter Informationen bzw. Annahmen getroffen werden.
- d. Bei der Voranalyse des Tragwerks müssen Entscheidungen über Lasten, Lagerungen und Bodenkennwerte geschätzt werden, da konkrete Informationen zu Beginn des Projektes noch nicht vorhanden sind.
- e. Die Planungstiefe in frühen Planungsphasen ist zu gering, um genügend zuverlässige Informationen über spätere Planungsinteraktionen und das Erreichen der Planungsziele zu geben.

### 3. Verantwortlichkeiten und Abstimmungsbedarf

- a. Zwingender Abstimmungsbedarf mit am Projekt beteiligten Fachplanern wird nicht automatisch erkannt. Die fehlende frühe Abstimmung und adäquate Abstimmungskonzepte pflanzen sich folgend in der Modellierung des Tragwerks fort.
- b. Verantwortlichkeiten für Schnittstellen im Planungsprozess werden zum Planungsbeginn nicht ausreichend präzise definiert.
- c. Die Geometrie des Gesamtbauwerks wird über die Disziplingrenzen hinweg ungenau und unzureichend beschrieben und abgestimmt.

### 4. Variantenuntersuchungen und Optimierung

- a. Disziplinübergreifende Optimierungen und Variantenuntersuchungen sind aufgrund unzureichender durchgängiger Modellanbindungen und fehlender Konzepte nicht möglich.

### 5. Anpassungen und fehlende Planung

- a. Veränderungen in der Planung einzelner Fachplaner werden nur langsam oder unvollständig in die laufende Planung anderer Planungsbeteiligter eingearbeitet, da sie oftmals nicht zeitnah kommuniziert werden.
- b. Bisher fehlende Planungsleistungen werden nicht automatisch erkannt.
- c. Unerwartete Fertigungs- und Montagetoleranzen werden im laufenden Planungsprozess nicht mehr in die Modelle eingepflegt. Auswirkungen der Montage bzw. Bauwerkserstellung auf die strukturelle Integrität werden in frühen Planungsphasen mit unzureichenden Sicherheiten berücksichtigt.

## 1.4 Forschungslücke

Sowohl häufiger werdende Probleme bei der Realisierung von Baugroßprojekten (siehe dokumentierte Beispiele wie Gerkan (Gerkan, 2013) oder Bürgerschaft Hamburg (Bürgerschaft Hamburg, 2014)), Umfragen wie die von Both (Both et al., 2013) und Braun (Braun et al., 2015) sowie Aussagen der in Abschnitt 1.3.3 aufgeführten Fachartikel zeigen, dass praxistaugliche Konzepte zur Komplexitätskontrolle und oftmals auch das Bewusstsein über Planungsinteraktionen in Bezug auf die Tragwerksplanung fehlen. In der Forschung entwickelte Konzepte der Planungs Kooperation haben aus verschiedenen Gründen ihren Weg in die Planungspraxis der Tragwerksplaner noch nicht gefunden wie z. B. im Fazit der Umfrage von Both (Both et al., 2013, S.179 f.) angegeben oder sich nicht vollumfänglich als Erfolg erwiesen. Besonders nicht offensichtliche, indirekte Bezüge und Zirkelbeziehungen werden oftmals erst wahrnehmbar, wenn sich Störungen im Planungsprozess einstellen. Einige nicht entdeckte Interaktionen treten erst im Laufe der Bauausführung oder im schlimmsten Fall während der Nutzung des Bauwerks zu Tage. Neu zu entwickelnde und anzuwendende Konzepte zur Komplexitätskontrolle auf Grundlage der Graphentheorie, der Systemmodellierung und der parametrisch-assoziativen Modellierung sollen erforderliche Interaktionen im Tragwerksplanungsprozess gezielt aufdecken, helfen sie zu analysieren und aktiv auf sie zu reagieren. Die parametrisch-assoziative Modellierung in dieser Arbeit beruht auf den Definitionen der Begriffe Parametrik-Funktionalität und Assoziativität von Vajna (Vajna et al., 2009). Die Parametrik-Funktionalität wird wie folgt definiert:

Die Parametrik-Funktionalität ermöglicht die Verwendung variabler Größen (Parameter) für Eigenschaften und Abhängigkeiten (Beziehungen) in und zwischen Produktmodellen. Durch die Verwendung der parametrischen Funktionalität (Hinzufügen, Ändern, Löschen der Parameter) wird das Produktmodell direkt verändert. Das CAD-System muss dabei das Produktmodell aktualisieren und die Konsistenz des Modells hinsichtlich systeminterner Regeln (Constraints) prüfen und sicherstellen. (Vajna et al. 2009, S.508 f.).

Die Ausgangsdefinition der Assoziativität von Vajna (Vajna et al., 2009) lautet

Assoziativität bedeutet bei CAx-Systemen, dass Änderungen in einem

Modell (z. B. CAD-Modell) automatisch in andere Modelle (z. B. NC-Programm) übertragen werden. Eine bidirektionale Assoziativität (d. h. die gegenseitige Verknüpfung einer Dimension mit der dazugehörigen Maßzahl ändert sich das eine, ändert sich das andere automatisch mit) ist bei den meisten 3D-CAD-Systemen heute realisiert. (Vajna et al. 2009, S.492).

Die *parametrisch-assoziative Modellierung* bezeichnet in dieser Arbeit in Anlehnung an Vajna (Vajna et al., 2009) eine Modellierung die ein Modell aufgrund der verwandten variablen Größen für Eigenschaften und Abhängigkeiten so erzeugt, dass es verändert werden kann und mit anderen Modellen so verbunden ist, dass Änderungen in einem der Modelle automatisch in andere Modelle übertragen werden.

## 1.5 Hypothese

Die zu überprüfende Hypothese dieser Arbeit lautet:

*Die Anwendung von Methoden der Graphentheorie, der Systemmodellierung und der parametrisch-assoziativen Modellierung für die Komplexitätskontrolle unterstützt die Reduzierung von in der Planungskomplexität begründeten Risiken bei Entwurf, Analyse und Konstruktion von Tragwerken.*

Diese Risiken basieren auf einem zu späten oder gar nicht erfolgten Aufdecken von notwendigen Interaktionen im Planungsprozess. Das bedeutet, dass ein Konzept das es erlaubt, erforderliche Interaktionen umfangreicher und früher aufzudecken, Planungsrisiken verringert. Aufgrund des auf Seite 16 erwähnten Unikatcharakters besitzt jede Bauaufgabe ihre individuellen Risiken, was zu einer großen Vielfalt von prinzipiell möglich Risiken führt. Hier werden signifikante Risiken genannt, die einen großen Aufwand an Umplanungen verursachen können. Die Sortierung erfolgt auf Grundlage der Signifikanz der erwarteten notwendigen Umplanungen des Tragwerks. Als konkrete Risikoooberbegriffe werden hier die

1. Nichterfüllung von Bauwerksfunktionen,
2. Nicht ausreichende Planungszeit und Planungsqualität,

3. Änderungen von Planungsgrundlagen und Planungszielen,
4. Änderungen der Planungswerkzeuge und
5. Änderungen von Bauprodukten

definiert. Diese Risiken bestehen, wenn Interaktionen zwischen Teilprozessen der Gesamtplanung vernachlässigt werden. Jedem Risikobereich werden Fragen zugeordnet und im Kapitel 7 mit Blick auf die erarbeiteten Konzepte beantwortet und diskutiert. Die aufgeführten Risiken können voneinander abhängen.

1. Nichterfüllung der Bauwerksfunktionen

Der Gebäudeentwurf lässt sich nicht so umsetzen, dass alle geforderten Bauwerksfunktionen eingehalten werden.

- a. *Können die erforderlichen Interaktionen zwischen Planungsbeteiligten die für die Umsetzung des Tragwerks unter Erfüllung aller geforderten Bauwerksfunktionen notwendig sind durch Verwendung der Konzepte früher aufgedeckt werden?*

2. Nicht ausreichende Planungszeit und Planungsqualität

Die vorhandenen ausreichend qualifizierten Fachplaner reichen nicht aus, um die Planungsaufgabe innerhalb des Zeitrahmens zu bewältigen. Der vorgegebene Zeitrahmen für die Planung des Tragwerks wird deutlich überschritten. Die Bauausführung wird aus Zeitmangel teilweise ohne detaillierte Planung ausgeführt. Funktionelle bzw. qualitative<sup>13</sup> Mängel, fehlende Nachhaltigkeit und unzureichende Nachvollziehbarkeit der Planung (Dokumentation) des erstellten Bauwerks sind die Folge dessen.

- a. *Lässt sich der Planungsprozess durch die Verwendung der erarbeiteten Konzepte optimieren und die personellen Ressourcen effizienter einsetzen?*
- b. *Können negative Auswirkungen auf die Qualität des zu erstellenden Bauwerks früher aufgedeckt werden?*

3. Änderungen von Planungsgrundlagen und Planungszielen

Bei umfangreicheren Projekten sind Veränderungen von Planungszielen während der Gesamtplanungsdauer keine Seltenheit. Ergeben sich Änderungen in

---

<sup>13</sup>Neben quantitativ schwer erfassbaren subjektiven Qualitätskriterien sind andere Kriterien wie Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit mit Zahlen greifbar und bewertbar.

der geforderten Funktionalität des Bauwerks, so müssen oft auch die genauen Planungsziele des Tragwerkes angepasst werden.

Weitere Planungsrisiken können sich durch Veränderungen von Planungsgrundlagen ergeben. So werden Bodenverhältnisse für die Dimensionierung der Fundamente eines Tragwerkes in den ersten Phasen der Planung oftmals noch nicht durch umfangreiche Bodengutachten gestützt. Wird im Laufe der Planung ein solches Gutachten erstellt und führen die Ergebnisse zu grundlegend anderen Lagerungsbedingungen für das Fundament, muss die Planung angepasst werden. Die genannten Risiken werden als Risiken der Planungsprozessumgebung zusammengefasst.

a. *Lassen sich durch eine bessere Komplexitätskontrolle die Auswirkungen von Änderungen der Planungsprozessumgebung schneller und besser abschätzen?*

#### 4. Änderungen der Planungswerkzeuge

Bei Projekten mit langen Planungszeiten sind Probleme mit den Planungswerkzeugen, speziell der Planungssoftware, möglich. Diese ergeben sich durch notwendige Updates, geänderte Anforderungen an Schnittstellen seitens der Planungspartner oder höhere Anforderungen seitens der Planungsdokumentation z. B. durch die Notwendigkeit der BIM-Methode.

a. *Sind notwendige Änderungen von Planungswerkzeugen durch Methoden der Komplexitätskontrolle schneller in den Planungsprozess implementierbar?*

#### 5. Änderungen von Bauprodukten

Als weitere Risiken sind Probleme mit der Bauproduktbereitstellung zu sehen. Treten Lieferengpässe ursprünglich geplanter Bauprodukte auf, sind einzelne Produkte nicht mehr in ausreichender Qualität zum Beginn der Bauwerkserstellung verfügbar, sind schnelle Umplanungen notwendig.

a. *Sind die Auswirkungen von notwendigen Bauproduktänderungen auf die resultierende Umplanung durch Methoden der Komplexitätskontrolle schneller aufdeckbar?*



## 1.6 Forschungsansatz

Im Rahmen dieser Dissertation wird die konzeptionelle und methodische Zusammenführung von Ansätzen der Graphentheorie, der Systemtheorie, der parametrisch-assoziativen Modellierung und der Analyse der Prozess- und Modellinteraktionen aus Sicht der Tragwerksplanung verfolgt. Dies erfolgt auf Grundlage einer vertieften Analyse der Charakteristika des Tragwerksplanungsprozesses.

Bei der Verwendung der Ansätze geht es nicht um eine Prozessumgestaltung, wie von Rüppel (Rüppel, 2007, S.3 f.) erwähnt, sondern um eine Neuinterpretation und Erweiterung der Betrachtungsweisen. Dabei werden die Methoden der Darstellung von Systemen aus dem Systems Engineering, hier speziell die Modellierungssprache<sup>14</sup> SysML, verwendet um das komplexe Beziehungsgeflecht bei der Planung von Tragsystemen unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Gesamtbauwerk, der strukturellen Interaktionen und der zugehörigen Planungsprozesse visuell zu erfassen und aufzubereiten. Für die Formulierung der Anforderungen werden gezielt Methoden des Requirements Engineerings angewandt.

Auf Grundlage der Anforderungsanalyse werden die notwendigen Planungsteilprozesse ermittelt, anschließend deren übergeordnete kausale Zusammenhänge definiert und mithilfe von Algorithmen der Graphentheorie in eine optimierte Reihenfolge gebracht und die ermittelten Abhängigkeiten zwischen Teilprozessen visualisiert.

Im nächsten Schritt werden die Planungsteilprozesse weiter konkretisiert. Hierbei stehen die zwischen den Teilprozessen notwendigerweise auszutauschenden Informationen im Mittelpunkt. Diese Informationen werden parametrisiert und bilden somit die Grundlage für eine parametrisch-assoziative Modellierung der notwendigen, im Folgendem als *Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung* bezeichnete, Algorithmen<sup>15</sup> mit deren Hilfe flexibilisierte Analyse- und Konstruktionsmodelle erstellt werden.

Als Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung werden hier aneinander gereihete Regeln zum Erreichen von Planungsteilzielen definiert. Teilziele können dabei der Aufbau von digitalen Repräsentationen von Bauwerksgeometrien, Analysemodellen

---

<sup>14</sup> „Modellierungssprachen sind künstlich definierte Sprachen, die dazu dienen, Modelle, d. h. abstrahierende Beschreibungen, zu erstellen. Sie werden insbesondere im Rahmen der Softwareentwicklung eingesetzt, um Ausschnitte der realen Welt zu modellieren (z. B. Geschäftsprozessmodelle, Ist-Analyse), Anforderungen an eine zu realisierende Software zu präzisieren oder Entwurfs- und Architekturbeschreibungen zu erstellen.“ (Engels 2016)

<sup>15</sup> „Vollständig bestimmte endliche Folge von Anweisungen, nach denen die Werte der Ausgangsgrößen aus den Werten der Eingangsgrößen berechnet werden können.“ (Deutsches Institut für Normung 2014b, S.29)

des Tragverhaltens oder die Volumenmodellierung der konstruktiven Ausbildung der Tragstruktur sein. Zum Erreichen dieser Planungsziele werden die Regeln schrittweise in vordefinierter Reihenfolge durchlaufen. Durch den Planungsalgorithmus werden konkrete Eingangsinformationen, wie äußere und innere Einwirkungen auf das Tragwerk oder Lagerungsbedingungen, in Resultate wie Bauteilabmessungen transformiert. Im Laufe der Arbeit wird auch nur von *Planungsalgorithmen* gesprochen. Auf Basis der flexiblen Analyse- und Konstruktionsmodelle können tiefer gehende Sensitivitätsanalysen<sup>16</sup> der Tragstruktur sowie des gesamten Planungsprozesses erfolgen und somit Aussagen über Quantität und Qualität von Prozess- und Modellinteraktionen getroffen werden. Bei diesen Analysen werden Methoden aus der Produktentwicklung auf Grundlage der Darstellung von Planungsinteraktionen in Matrizenform, hier speziell der Design Structure Matrix verwandt.

Eine weitere Frage ist die Einbindung der besprochenen Lösungsansätze in den dezentralen Planungsprozess des Gesamtbauwerks. Die Methoden werden im Laufe der beispielhaften Planung eines Tragwerks zusammengeführt, implementiert, erprobt und evaluiert. Ziel der Implementierung und Evaluierung ist die Beantwortung der in der Hypothese (1.5) gestellten Fragen.

## 1.7 Stand der Forschung - Literatur

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten thematisch verwandten Dissertationen, Monografien, Fachartikel und Forschungsvorhaben. Nach Nennung der relevanten Inhalte wird der inhaltliche Bezug zu dieser Dissertation hergestellt. Aus der Vielfalt von Publikationen in den jeweiligen Fachgebieten werden diejenigen genannt die einen unmittelbaren inhaltlichen Bezug zu dem in Abschnitt 1.6 aufgeführten Forschungsansatz besitzen. Bei Büttner (Büttner und Hampe, 1977) handelt es sich um ein Grundlagenwerk der Tragwerksplanung. Die Arbeiten werden den Bereichen *1.7.1 - Charakter der Tragwerksplanung*, *1.7.2 - Graphentheorie*, *1.7.3 - Systemtheorie und Systems Engineering* und *1.7.4 - Parametrische Modellierung* zugeordnet und mit den neuesten Publikationen beginnend aufgeführt. Den Arbeiten der Graphentheorie werden, wegen der direkten Überführbarkeit von Graphendarstellungen in Matrizenform und der gleichartigen Analysealgorithmen, auch die Arbeiten mit dem Thema der Design Structure Matrix

---

<sup>16</sup>Bei der Sensitivitätsanalyse geht es darum, die Interaktionen zwischen Eingangsparametern eines Planungsprozesses bzw. Planungsalgorithmus und deren Auswirkungen auf Planungsergebnisse zu analysieren.

zugeordnet. Im Abschnitt der Systemtheorie finden sich ausgewählte Arbeiten des Systems Engineering mit Bezug zu dieser Arbeit.

### 1.7.1 Charakter der Tragwerksplanung

In der Arbeit von Geyer (Geyer, 2009) wird die Anwendung der aus Luft- und Raumfahrt bekannten multidisziplinären Entwurfsoptimierung für das Bauwesen untersucht. Mithilfe dieser Methode soll der Entwurfsraum von Gebäudeentwürfen untersucht und gute Konfigurationen gefunden werden können.

Zum Erreichen dieser Ziele werden Weiterentwicklungen in folgenden Bereichen vorgeschlagen:

1. Entwicklung von Bewertungsmodellen unter Berücksichtigung der für das Bauwesen wichtigen qualitativen Aspekte
2. Integration eines Optimierungsmodells in das Gebäudemodell
3. Aufbau parametrischer Analysemodelle zur Ermöglichung eines interaktiven Entwurfsprozesses

Als interessante Ausgangspunkte für diese Dissertation werden die Aufspaltung der Optimierung in zwei zunächst autarke Modelle und die zusätzliche Abspaltung vom Analysemodell gesehen. Die Betrachtung der Optimierung als Modell im Planungsprozess lässt sich sehr gut mit dem Gedanken der Tragwerksplanung als System der Systeme in Einklang bringen der den Übergang von der Tragwerksplanung zur Systemtheorie vorbereitet. Durch die zunächst autarke Bearbeitung der Partialmodelle (Systeme) lassen sich Planungsaufgaben besser auf verschiedene Planungsbeteiligte verteilen und koordinieren. Die ordnende Funktion übernimmt dabei ein Koordinierungsmodell das visuell repräsentiert wird. Ein wichtiges Hilfsmittel in der Arbeit ist die Verwendung der visuellen Modellierungssprache SysML deren Syntaxbeschreibung sich in Kapitel 4.5 findet.

Die ganzheitlich-systemische Denkweise bei der Planung komplexer Unikate steht im Mittelpunkt der Arbeit von Both (Both, 2006). Das von ihr entwickelte systemische Projektmodell besteht aus einzelnen Elementen, die bedarfsabhängig zum Planungsgesamtsystem zusammengefügt werden. Das systeminterne Organisationsmodell unterstützt die Aufdeckung von Interaktionen zwischen den Partialmodellen

und die Einbindung von Planungs- und Managementaspekten. Dabei wird eine isolierte Betrachtung verschiedener Planungsteilbereiche vermieden. Das systemische Projektmodell unterteilt sich in ein Ziel- und Aufgabenmodell, ein Organisationsmodell, ein Prozessmodell und ein Informationsflussmodell die durch umfangreiche Kommunikationsmechanismen zum Datenaustausch ergänzt werden. Für die Umsetzung des Gesamtmodells wird von einer internetbasierten Projektumgebung ausgegangen.

Da der Fokus der Arbeit von Both primär auf der Verschmelzung von Projektmanagement und Objektplanung liegt, werden Aspekte der Tragwerksplanung tangiert aber nicht detailliert besprochen. Der Vergleich verschiedener Interpretationen des Planungsprozesses im Bauwesen mit Blick auf die integrale Planung ist eine Voraussetzung für das bessere Verständnis der Interaktionen des dezentralen Gesamtplanungsprozesses und ist aus diesem Grund ein wichtiges Fundament für diese Arbeit. Dörner (Dörner, 1997) gibt Einblicke in die Verhaltensmuster von Menschen die mit komplexen, vernetzten und dynamischen Planungssituationen konfrontiert werden. Es wird beschrieben, wie sich komplexe Systeme verhalten können und welche Komplexitätseffekte berücksichtigt werden müssen. Diese Verhaltensmuster dienen als wichtige Kriterien für die Konzeptentwicklung der Komplexitätskontrolle.

Die von Dörner beschriebenen Verhaltensmuster dienen bei der Charakterisierung des Tragwerksplanungsprozesses als Grundlage zur Erläuterung auftretender Probleme.

In dem von Büttner (Büttner und Hampe, 1977) geschriebenen Buch werden neben grundlegenden Begriffen der Tragwerkslehre auch die Teilprozesse des Planungsprozesses von Bauwerken strukturiert beschrieben und in einem Flussdiagramm dargestellt. Es werden die Randbedingungen des Planungsprozesses sowie Entwurfsziele definiert. Aussagen zur Auswirkung der Verwendung von Computern im Tragwerksentwurfsprozess werden gegeben und geänderte Anforderungen an die Entwerfer definiert. Aus diesem Buch werden grundlegende Begriffsdefinitionen der Tragwerkslehre verwandt. Darstellungen in dem Buch zeigen Interaktionen sowie mögliche Planungsrücksprünge innerhalb des Tragwerksentwurfs auf.

### 1.7.2 Graphentheorie und Design Structure Matrix

Brath (Brath und Jonker, 2015) beschreibt die Visualisierung und Analyse mittels Graphen für Wirtschaftsprozesse. Ziel dabei ist es tiefere Einblicke in die Dynamik von Wirtschaftsprozessen zu erhalten. Die Begrenzungen traditioneller Darstellungs-

methoden wie Balken- oder Liniendiagramme in Hinblick auf Beziehungsdarstellungen zwischen Elementen werden aufgezeigt. Das Buch gibt einen Überblick wie diese Begrenzungen mittels Graphen-Darstellungen überwunden werden. Die von Brath und Jonker beschriebenen Algorithmen und Werkzeuge zur Visualisierung und Analyse von Wirtschaftsprozessen werden auf die Tragwerksplanung angewandt, um Interaktionen zwischen Fachplanern und Bauwerksfunktionen sowie strukturelle Interaktionen innerhalb von Tragwerken aufzuzeigen und zu analysieren.

In Akintola (Akintola et al., 2015) wird die Verwendung von auf Design Structure und Multi Domain Matrizen sowie auf der BIM-Methodik beruhenden Verfahren für die Koordinierung komplexer Prozesse des Bauwesens besprochen die dafür verwandt werden in BIM-Modellen auftretende Änderungen und deren Auswirkungen auf Projektbeteiligte zu analysieren. Der Ansatz komplexe Prozesse mithilfe von auf Design Structure Matrizen basierenden Methoden zu kontrollieren, wird in dieser Arbeit ebenfalls verwendet und auf die Tragwerksplanung übertragen.

Das Buch von Kreimeyer (Kreimeyer und Lindemann, 2011) gibt zunächst einen umfangreichen Überblick über die Charakterisierung der Komplexität in Entwurfsprozessen und deren Modellierung. Es werden Methoden zur Komplexitätsbeherrschung dargestellt. Diese Methoden werden durch ein hierfür entwickeltes Softwarepaket unterstützt. Mathematische Basis dieser Methoden ist die Graphentheorie und die Umsetzung erfolgt auf Grundlage von DSM-, IDM- und MDM-Matrizen.

Die in der Arbeit beschriebenen Vorgehensweisen für den Aufbau von Design Structure Matrizen und die Fügung zu Multi Domain Matrizen mittels Inter Domain Matrizen wird für Probleme der Tragwerksplanung adaptiert. Die Analysemethoden werden für die Abhängigkeitsanalyse struktureller Interaktionen innerhalb von Tragwerken und zu anderen Gewerken verwandt.

### 1.7.3 Systemtheorie und Systems Engineering

Ein Ziel der Forschungsarbeit von Borrmann (Borrmann et al., 2014) ist es strukturelle Abhängigkeiten bzw. gegenseitige Beeinflussungen von Schädigungsmechanismen von Brückenbauwerken gezielter analysieren zu können. Für die Beschreibung dieser Interaktionen wird die Modellierungssprache SysML verwandt. Mithilfe der Sprache können alle relevanten Beziehungen zwischen den Schadensmechanismen und den einzelnen Strukturteilen abgebildet werden.

Wie in dem Artikel wird auch in dieser Arbeit SysML verwandt um strukturelle Interaktionen von Tragwerken abzubilden. Darüber hinaus dient die Sprache der

grafischen Aufbereitung der Beziehungen zwischen einzelnen Planungsaktivitäten. Weilkiens (Weilkiens und Soley, 2014) beschreibt disziplinunabhängig wie komplexe Planungsprozesse mit der visuellen Sprache SysML abgebildet werden können. Aufbauend auf der Sprache wird der Prozess SYSMOD eingeführt, der helfen soll die Planung komplexer Objekte strukturierter darzustellen und zu unterstützen. Ausgangspunkt hierbei ist die Systemidee, die mithilfe der Werkzeuge des SYSMOD-Prozesses sukzessive in ein physisches, strukturiertes System überführt wird.

Der in dem Buch beschriebene Prozess SYSMOD dient in Teilen als Orientierung für den systematischen Aufbau eines parametrischen Geometriemodells eines Tragwerks und die anschließende Sensitivitätsanalyse des Tragverhaltens.

Abulawi (Abulawi, 2012) stellt die Handhabung der Komplexität in der Entwicklung von Karosseriebauteilen dar. Detaillierte Einsichten in verschiedene Techniken der Komplexitätshandhabung in diesem Feld werden gegeben. Als zentrale Idee steht hier die Visualisierung von Prozessen und Systemen unter Nutzung der grafischen Modellierungssprache SysML. Abulawi verwendet die Sprache als Werkzeug für den Informationsaustausch und die konzeptionelle Entwicklung ihres Planungssystems.

In der Dissertation vorgeschlagene Vorgehensweisen für die Vorbereitung der räumlichen Modellierung von Karosseriebauteilen mittels SysML werden für die Tragwerksplanung adaptiert. Die Charakterisierung der Planungskomplexität für den Karosseriebau dient als ein Ausgangspunkt für die eigene Definition der Komplexität in der Tragwerksplanung.

Patzak (Patzak, 1982) setzt sich in seinem Buch grundlegend mit disziplinübergreifenden Problemen bei der Planung komplexer Systeme auseinander. Die allgemeingültigen Charakteristika der Planungskomplexität werden hierbei detailliert beschrieben. Aufbauend auf der Definition der Komplexität von Patzak wird eine eigene Definition der Komplexität in der Tragwerksplanung erarbeitet.

#### 1.7.4 Parametrische Modellierung

Rolvik (Rolvink et al., 2014), Mueller und Coenders geben in ihrem Artikel einen Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich der Entwurfsunterstützung während der frühen Phasen der Tragwerksplanung. Diese Entwicklungen werden in die folgenden sechs Bereiche untergliedert:

1. Grafische Statik

2. Formfindungswerkzeuge
3. Entwurfsoptimierung
4. Interaktive evolutionäre Optimierungen
5. Parametrisch-assoziative Modellierung
6. Dashboard-based-design tools

Die Einsatzmöglichkeiten dieser Entwicklungen sowie die Verortung im Tragwerksplanungsprozess werden erläutert und deren Charakteristika verglichen. Eine Auswahl der beschriebenen Entwicklungen findet unter Berücksichtigung derer Eigenschaften auch in dieser Arbeit ihren Einsatz.

Davis (Davis, 2013) beschreibt in seiner Dissertation den Charakter des parametrischen Entwurfs sowie die Herausforderungen beim Aufbau parametrischer Modelle. Er erörtert drei Vorgehensweisen zum Aufbau strukturierter parametrischer Modelle. Zusätzlich werden Hinweise für die Schulung der parametrischen Modellierung bei Studierenden gegeben. In dieser Dissertation werden von Davis besprochene Konzepte beim Aufbau parametrischer Modelle, wie beispielsweise das Clustern mehrerer Komponenten, zur besseren Modellkoordinierung verwendet.

Die Arbeit von Coenders (Coenders, 2011) gibt Einblicke in die Prozessabhängigkeiten der Tragwerksplanung. In der Arbeit wird untersucht wie einzelne Planungsteilschritte durch parametrisch-assoziative Modelle unterstützt werden können. Kernthema ist die Entwicklung und Implementierung der Infrastruktur *NetworkedDesign*. Die Infrastruktur soll Grundlage für Entwicklungen von Software und Schnittstellen im Bereich der Tragwerksplanung und -analyse sein. Als zukünftige Forschungsfelder erwähnt Coenders die bidirektionalen Beziehungen zwischen verschiedenen parametrisch-assoziativen Entwurfssystemen. Die kognitiven Aspekte der Planung im Zusammenspiel mit der parametrischen Modellierung werden als weiterer interessanter Themenbereich genannt. In dieser Dissertation stehen die Themen der Verringerung des kognitiven Aufwands in der Planung und die bidirektionalen Beziehungen von Planungsprozessen im Hochbau im Mittelpunkt. Die von Coenders dargelegten Methoden auf Basis der parametrischen Modellierung helfen beim Verständnis der Tragwerksplanung als komplexen Prozess.

Die Dissertation von Hudson (Hudson, 2010) beschreibt fünf strategische Ansätze zur Anwendung des parametrischen Entwurfs in der Praxis. Diese Ansätze können flexibel kombiniert werden, um dem Unikatcharakter verschiedener Tragwerke gerecht zu werden. Die fünf Ansätze werden beschrieben als:

1. Wissensentwicklungsstrategie
2. Wissensspeicherungsstrategie
3. Modellbaustrategie
4. Entwurfsanalysestrategie
5. Dokumentationsstrategie des parametrischen Modells.

Die aufgeführten Strategien setzen sich gezielt mit den Abhängigkeiten parametrischer Modelle und ihrer Handhabung auseinander. Die hier definierten Vorgehensweisen finden Eingang in die Überlegungen zur Strukturierung parametrischer Modelle in dieser Dissertation.

In der Dissertation von Tessmann (Tessmann, 2008) wird ein Ansatz für die Umgestaltung des Tragwerksentwurfs aus Sicht der Architektur beschrieben. Er setzt sich als Ziel, Methoden und Ergebnisse der Tragwerksanalyse stärker in den Entwurf zu integrieren. Hier wird eine Abkehr vom linearen Ablauf im Entwurfsprozess hin zu einem gesteuerten, bewusst iterativen Planungsablauf gefordert. Dieser iterative Planungsprozess bindet die Ergebnisse der Tragwerksanalyse auf Grundlage der parametrischen Modellierung permanent in die Generierung des Tragwerks ein. Die dargestellte Verbindung der Generierung der Tragwerksgeometrie und der Tragwerksanalyse erfordert eine Verknüpfung der zugehörigen Partialmodelle. Um den Entwurfsprozess iterativ ausführen zu können, werden die verwendeten Planungsmodelle durch die Einführung von Parametern und einer entsprechenden Modellierung flexibilisiert. Die Arbeit von Tessmann zeigt das Potenzial der Verknüpfung von parametrisierten Analyse- und generativen Geometriemodellen<sup>17</sup>. Dieses Potential soll auch in dieser Dissertation genutzt werden. Die Ausrichtung der Arbeit liegt auf den frühen Phasen der Tragwerksplanung, die weitestgehend in der Konzeptentwicklung liegen. Anschließende Teilprozesse, speziell die Werkstattplanung, die Erstellung prüffähiger Statiken, Montageplanung und deren Auswirkung auf zeitlich früher angesiedelte Planungsprozesse werden nicht behandelt.

---

<sup>17</sup> „Bei dem generativen Geometriemodell ist die Modellinformation in einer Erzeugungsvorschrift enthalten, es wird daher der Lösungsweg gespeichert.“ (Vajna et al. 2009, S.500)



## 1.8 Normen und Richtlinien

### 1.8.1 Normen im Umfeld der Tragwerksplanung

Normen bilden im Idealfall die Verbindung zwischen Forschung und Praxis. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Überblick über Normen und Richtlinien gegeben, die Ausgangspunkt für die Einordnung der zu erarbeitenden Methoden der Komplexitätskontrolle in den Gesamtplanungsprozess von Hochbauwerken und zur Beschreibung der Interaktionen im Planungsprozess sind. Diese Einordnung wird im Detail im Kapitel 5 vorgenommen.

In der HOAI (Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung, 2013) findet sich direkt keine Darstellung der kausalen Abhängigkeiten sowie des zeitlichen Ablaufs innerhalb des Planungsprozesses. Es werden die einzelnen Leistungsbilder des Tragwerksplaners, des Architekten, anderer Fachplaner, wie Landschaftsplaner oder Fachberater der Umweltverträglichkeit, Bauphysik, Geotechnik, technische Ausrüstung oder Ingenieurvermessung aufgeführt. Eine Zuordnung der Zuständigkeiten der am Bau Beteiligten wird von Deckelmann (Deckelmann und Franke, 2002, S.49) in Darstellung 1.8.1 vorgenommen. Der von ihm erwähnte iterative Charakter (siehe (Deckelmann und Franke, 2002, S.48)) der Planung ist in der Darstellung nicht ablesbar.

Das Ziel der SIA 112 (siehe Abbildung 1.8.2) wird in der Norm wie folgt definiert:

Die Komplexität der Bauaufgaben nimmt ständig zu. Die Vernetzung von technischen, ökonomischen, ökologischen, sozialen und architektonischen Fragen erhält eine immer größere Bedeutung. Nutzung und Betrieb eines Bauwerks sind bestimmende Parameter für die Projektierung. Bevor mit der eigentlichen Projektierung begonnen werden kann, sind Bedarfsanalysen, Machbarkeitsabklärungen und verschiedene Nachweise notwendig. Erhaltungs- und Umnutzungsplanungen sind verlangt. Die Betrachtungen der Bauplaner müssen den ganzen Lebenszyklus eines Bauwerks umfassen.

Die hohen Anforderungen an die Fachplaner haben zur Folge, dass die Nachfrage nach gesamthaften Planungsleistungen steigt. Gefragt sind ganzheitliche, vernetzte, spartenübergreifende Planungsleistungen, die von interdisziplinären Fachplanerteams erbracht werden. Das Ziel des

Modells der Bauplanung ist es, die Basis für eine optimale Organisation dieser Planungsleistungen zu bilden. (SIA 2014, S.5)

Die Komplexitätskontrolle soll in der SIA 112 durch eine rechtzeitige größtmögliche Klärung der Ziele, sowie die Definition der Anforderungen und eine ganzheitliche Erfassung des Lebenszyklus des Bauwerks sichergestellt werden. Im Gegensatz zur HOAI werden die zu erbringenden Leistungen der Fachplaner explizit angegeben und als Voraussetzung für den jeweils nächsten Schritt angesehen. Somit wird die kausale Beziehung der einzelnen Planungsleistungen indirekt gegeben.

In der DIN 18205 (Deutsches Institut für Normung, 1996) werden umfangreiche Prüflisten dargestellt, um die Bedarfsplanung eines Bauwerks strukturiert durchzuführen. Die Norm stimmt bis auf geringe Änderungen mit der ISO 9699: 1994 (“Performance standards in building - Checklist for briefing - Contents of brief for building design“) überein und ist somit auch für Projekte außerhalb Deutschlands verwendbar. Da die verschiedenen Funktionsanforderungen eines Bauwerks einen großen Teil der Planungskomplexität bei Tragwerken ausmachen, ist diese Norm eine gute Grundlage in den ersten Phasen der Planung um einen Überblick über notwendige Interaktionen zu bekommen. Mithilfe der Prüflisten der DIN 18205 können nicht nur Ziele, sondern auch weitere einschränkende Gegebenheiten wie zur Verfügung stehende Mittel oder Rahmenbedingungen schriftlich im Bedarfsplan definiert werden. Die Prüflisten sind in drei Teillisten mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad aufgeteilt. Eine Darstellung der drei Listen mit Nennung der beinhalteten Teilaspekte findet sich in Abbildung 1.8.4.

## 1.8.2 Richtlinien mit Bezug zu Planungsprozessen

### VDI 2221

Das Dokument behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen des methodischen Entwickelns und Konstruierens technischer Systeme und Produkte. Es werden diejenigen Arbeitsabschnitte und Arbeitsergebnisse definiert, die wegen ihrer generellen Logik und Zweckmäßigkeit Leitlinie für ein Vorgehen in der Praxis sein können. (Verein Deutscher Ingenieure 2016)

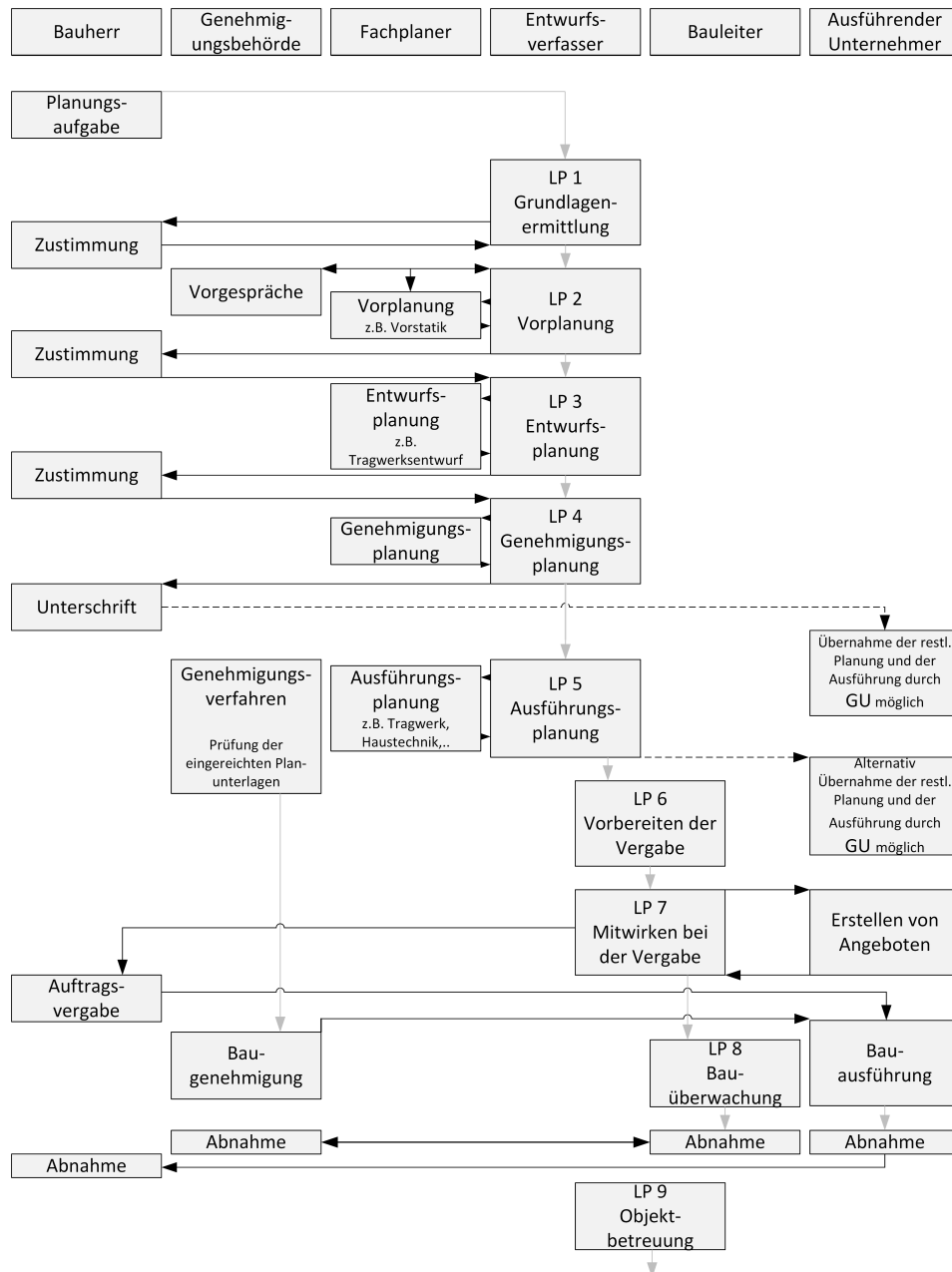


Abbildung 1.8.1: Darstellung des Ablaufplans einer Bauplanung und Ausführung mit zugehöriger Einordnung der Leistungsphasen nach HOAI und der Zuordnung der Zuständigkeiten der am Bau Beteiligten; nach Deckelmann und Franke (2002)

---

## Phasen, Teilphasen und Teilphasenziele

---

Phasen	Teilphasen	Ziele
<b>1 Strategische Planung</b>	11 Bedürfnisformulierung, Lösungsstrategien	Bedürfnisse, Ziele und Rahmenbedingungen definiert, Lösungsstrategien festgelegt
<b>2 Vorstudien</b>	21 Definition des Bauvorhabens, Machbarkeitsstudie	Vorgehen und Organisation festgelegt, Projektierungsgrundlagen definiert, Machbarkeit nachgewiesen, Projektdefinition und Projektpflichtenheft erstellt
	21 Auswahlverfahren	Anbieter/Projekt ausgewählt, welche den Anforderungen am besten entsprechen
<b>3 Projektierung</b>	31 Vorprojekt	Konzeption und Wirtschaftlichkeit optimiert
	32 Bauprojekt	Projekt und Kosten optimiert, Termine definiert
	33 Bewilligungsverfahren / Auflageprojekt	Projekt bewilligt, Kosten und Termine verifiziert, Baukredit genehmigt
<b>4 Ausschreibung</b>	41 Ausschreibung, Offertvergleich, Vergabe	Kauf- und Werkverträge abgeschlossen
<b>5 Realisierung</b>	51 Ausführungsprojekt	Ausführungsreife erreicht
	52 Ausführung	Bauwerk gemäß Pflichtenheft und Vertrag erstellt
	53 Inbetriebnahme, Abschluss	Bauwerk übernommen und in Betrieb genommen, Schlussabrechnung abgenommen, Mängel behoben
<b>6 Bewirtschaftung</b>	61 Betrieb	Betrieb sichergestellt und optimiert
	62 Überwachung / Überprüfung / Wartung	Bauwerkszustand abgeklärt, Wartung sichergestellt
	63 Instandhaltung	Dauerhaftigkeit und Wert für die Restnutzungsdauer aufrechterhalten

---

Abbildung 1.8.2: Teilphasen und Teilphasenziele nach (SIA, 2014)

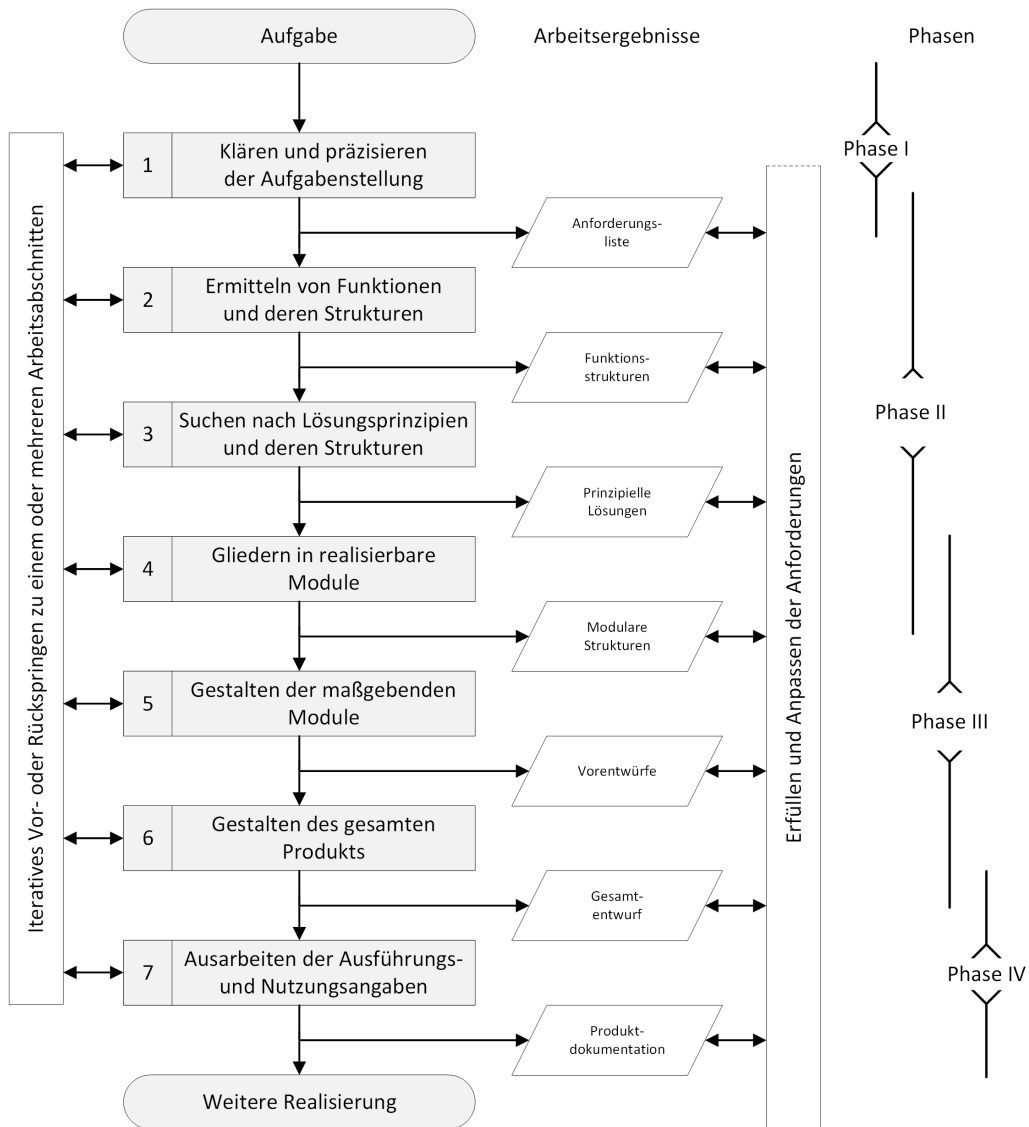


Abbildung 1.8.3: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach (Ver- ein Deutscher Ingenieure, 1993)

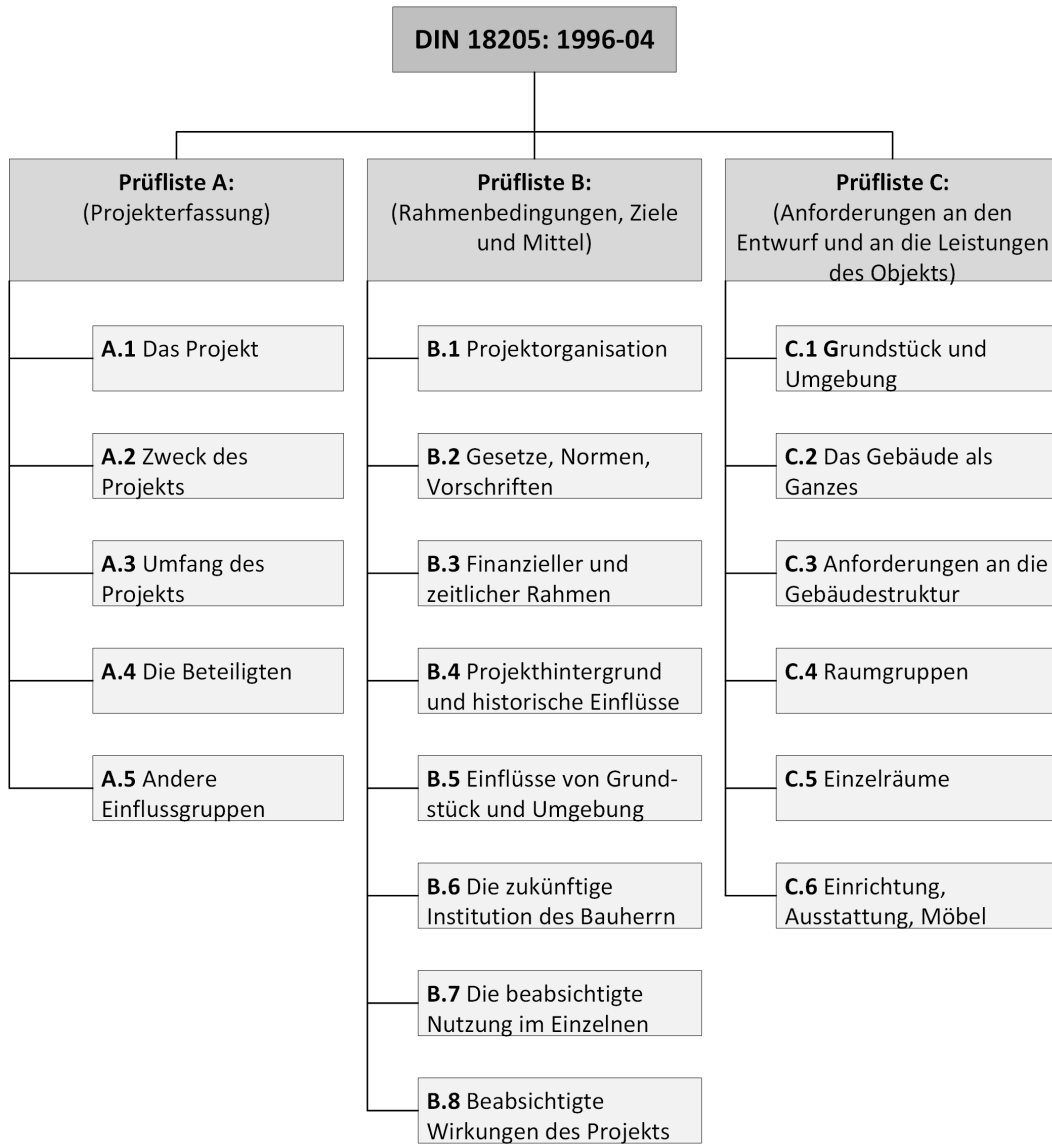


Abbildung 1.8.4: Prüflistenunterteilungen der DIN 18205; Eigene Darstellung nach (Deutsches Institut für Normung, 1996)

## 1.9 Vorgehen und Gliederung der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Kapitel 1 bis 3 widmen sich der theoretischen Betrachtung und Aufbereitung der Komplexität in der Tragwerksplanung, während sich Kapitel 4 bis 6 mit konkreten Forschungsansätzen zum verbesserten

Umgang mit der Planungskomplexität und deren praktischer Anwendung beschäftigen. In der Schlussbetrachtung in Kapitel 7 werden die beiden Teile zusammengeführt und weitere sich daraus ergebende Forschungsfragen definiert. Die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Kapiteln werden in Abbildung 1.9.1 so dargestellt, dass Kapitel 1 als Fundament der Arbeit unten angeordnet wird, auf dem alle weiteren Kapitel aufbauen, deren Erkenntnisse dann final in Kapitel 7 eingehen. Die in den einzelnen Kapiteln behandelten Themen sind im Folgenden aufgeführt.

#### Kapitel 1 - Einführung

In diesem Kapitel werden komplexitätsinduzierte Probleme in Bezug auf die Tragwerksplanung, die Auslöser für das Nichteinhalten des zeitlichen oder finanziellen Rahmens oder das Erreichen von geforderten Funktionalitäten sind, genannt und genauer definiert. Aus diesen Problemdefinitionen wird eine Forschungslücke abgeleitet und in eine Hypothese übertragen. Auf Grundlage der Hypothese werden Forschungsansätze herausgearbeitet und der Stand der Forschung bezüglich der Forschungsansätze dargelegt.

#### Kapitel 2 - Charakter der Tragwerksplanung

Kapitel 2 beschreibt den Prozess der Tragwerksplanung inklusive der zugehörigen Einflüsse, Randbedingungen, verarbeiteten Informationen und Ziele. Des Weiteren werden die wesentlichen Eigenschaften der Tragwerksplanung umrissen und die kognitiven Anforderungen und Einflüsse auf den Tragwerksplaner abgeleitet.

#### Kapitel 3 - Komplexität in der Tragwerksplanung

Nach der Definition der Komplexität in der Tragwerksplanung werden Komplexitätsmerkmale und Komplexitätsfaktoren sowie die Korrelation zwischen ihnen besprochen.

#### Kapitel 4 - Methoden des Komplexitätsmanagements in der Tragwerksplanung

Ausgehend von einer Präzisierung des Ziels der Anwendung von Methoden des Komplexitätsmanagements werden in diesem Kapitel auf Grundlage einer Beispielstruktur Konzepte zum Aufdecken von notwendigen Interaktionen zwischen Planungsbeteiligten erarbeitet und angewandt. Des Weiteren werden Möglichkeiten zum Aufdecken von tragstrukturellen Interaktionen erörtert. Mithilfe einer parametrisch-assoziativen Modellierung der Dimensionierung des Beispielprojekts werden Sen-

sitivitätsanalysen und Optimierungen der Tragstruktur durchgeführt. Das Kapitel wird mit der Induktion der im Kapitel entwickelten Methoden abgeschlossen.

Kapitel 5 - Integration der Komplexitätskontrolle in den Tragwerksplanungsprozess

In Kapitel 5 werden komplexitätsbezogene Probleme im Tragwerksplanungsprozess verortet und ihnen Lösungsansätze aus Kapitel 4 zugeordnet.

Kapitel 6 - Beispielhafte Implementierung von Methoden der Komplexitätskontrolle in der Tragwerksplanung

Die in Kapitel 4 erarbeiteten Methoden werden auf ein reales Projekt in einer frühen Projektphase angewandt, um fundierte Aussagen über den erwarteten notwendigen Informationsaustausch zwischen den Projektbeteiligten zu treffen. Der notwendige Informationsaustausch wird bis auf die Ebene der Tragelementsparameter verfolgt. Auf Grundlage der parametrischen Modellierung der Geometrie einer Teilstruktur werden Interaktionen innerhalb der Tragstruktur abgeleitet.

Kapitel 7 - Schlussbetrachtung

In Kapitel 7 wird die in Kapitel 1 formulierte Hypothese bestätigt, die erzielten Erkenntnisse der Arbeit zusammengeführt und offene Fragestellungen und Perspektiven für weiterführende Forschungsarbeiten formuliert.



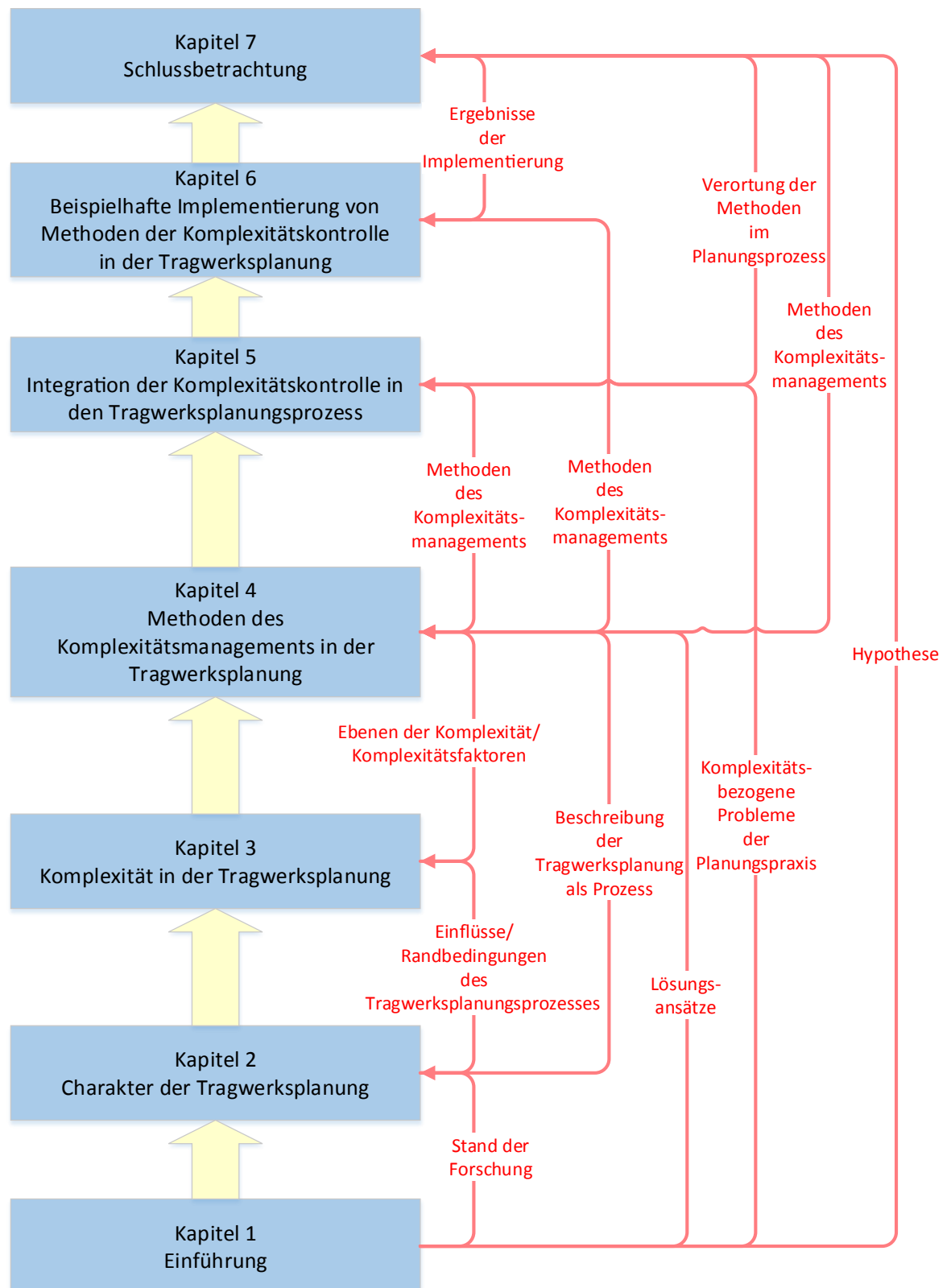


Abbildung 1.9.1: Überblick ausgewählte Verbindungen zwischen den Kapiteln der Arbeit; Eigene Darstellung



# 2

## Charakter der Tragwerksplanung

## 2.1 Interpretation der Tragwerksplanung als Prozess

In Kapitel 1.1 wird als erster und wichtigster Schritt zu einer verbesserten Komplexitätskontrolle bei Hochbauprojekten die Erlangung eines vertieften Bewusstseins über den Charakter der Tragwerksplanung und der in ihr enthaltenen Interaktionen genannt. Um dies zu unterstützen, wird im Folgenden der Weg der Beschreibung des Entwurfs, der Analyse und Konstruktion von Tragwerken als Prozess besprochen.

Der Fokus ist dabei auf Interaktionen innerhalb der Tragwerksplanung und zu anderen Planungsdisziplinen gelegt. Parallel werden wichtige Begriffe der Tragwerksplanung definiert und Methoden der Prozessbeschreibung aufgezeigt.

Ausgehend vom Ziel der Tragwerksplanung, der Erstellung eines Tragwerks, wird die Prozessumgebung dargestellt.

### 2.1.1 Definition der Prozessumgebung

Aus der Vielzahl von Definitionen des Begriffes Prozess wird wegen ihrer Allgemeingültigkeit die von Ebert (Ebert, 2012, vgl. Pos. 1063/1088) als Ausgangspunkt ausgewählt. Als *Prozess* wird nach Ebert allgemein eine definierte Abfolge von Tätigkeiten die der Erreichung eines Ziels dienen beschrieben. Prozesse werden durch ihre Eingänge<sup>1</sup>, Ausgänge, Voraussetzungen bzw. Randbedingungen und die Art des Prozesses selbst definiert.

Eine transparente Möglichkeit Prozesse und ihr Umfeld darzustellen, bietet das hier für die Tragwerksplanung eingeführte Turtle Diagramm nach Hinsch (Hinsch, 2014, S.23). Abbildung 2.1.1 zeigt die allgemeine Prozessdarstellung die in Abbildung 2.1.2 für die Tragwerksplanung konkretisiert wird. Das Turtle Diagramm stellt in dieser Arbeit die oberste Ebene der Prozessbeschreibung mit dem höchsten Abstraktionsniveau dar.

---

<sup>1</sup>Die Eingänge können sowohl materieller oder informeller Natur sein.

### Allgemeine Darstellung eines Prozesses mit dem Turtle Diagramm

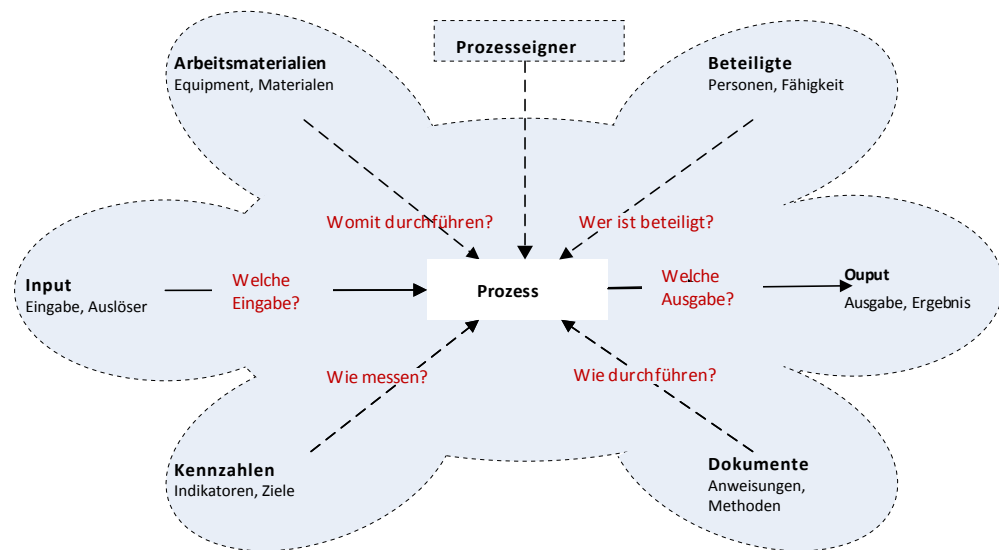


Abbildung 2.1.1: Prozess als Turtle Diagramm; Eigene Darstellung in Anlehnung an Hinsch (Hinsch, 2014)

### Darstellung der Prozessumgebung der Tragwerksplanung

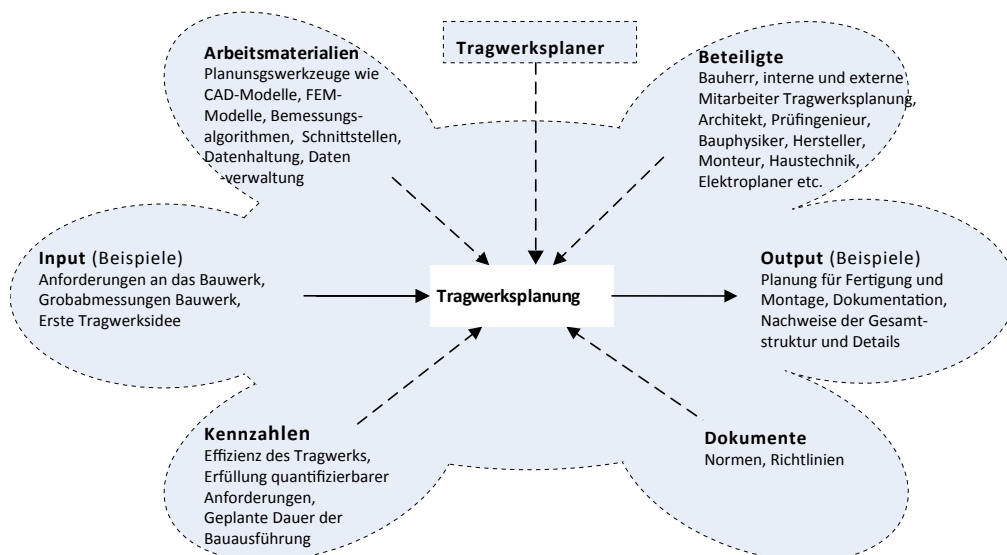


Abbildung 2.1.2: Tragwerksplanung als Turtle Diagramm; Eigene Darstellung

### 2.1.2 Eingangsinformationen der Tragwerksplanung

Die Eingangsinformation (in Bild 2.1.2 Input) der Tragwerksplanung ist zunächst die Bedürfnisformulierung seitens des Auftraggebers ein Bauwerk zu erstellen, für das ein Tragwerk geplant werden muss. In der SIA 112 (SIA, 2014) passiert dies beispielsweise in der ersten Phase *1 Strategische Planung* und beginnt mit der Leistung des Auftraggebers:

„Klären der übergeordneten Ziele und Rahmenbedingungen.“ (SIA 2014, S.11)

In der HOAI findet sich diese Leistung beim Objektplaner in der *LPH 1 Grundlagenermittlung*:

- a) Klären der Aufgabenstellung auf der Grundlage der Vorgaben oder der Bedarfsplanung des Auftraggebers. (Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung 2013, S.99)

Die Bedarfsplanung findet in der HOAI keine Erwähnung. Sie ist wie Simmerdinger (Simmendinger, 2013, P.388/3090) schreibt der HOAI vorgelagert und ihr wird in der Baupraxis oft zu wenig Bedeutung beigemessen.

In der SIA 112 wird der Tragwerksplaner nicht explizit erwähnt, tritt in der HOAI aber parallel mit dem Objektplaner in Erscheinung.

- a) Klären der Aufgabenstellung auf Grund
  - der Vorgaben oder der Bedarfsplanung
  - des Auftraggebers im Benehmen mit
  - dem Objektplaner.

(Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung 2013, S.141)

Bereits bei der nächsten Grundleistung des Tragwerksplaners

„ b) Zusammenstellen der die Aufgabe beeinflussenden Planungsabsichten“ (Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung 2013, S.141) tritt implizit das Thema Interaktionen auf die Agenda. Bei der Zusammenstellung der beeinflussenden Planungsabsichten ist es das Ziel sowohl in der Tragwerksplanung benötigte Informationen

von anderen Planern als auch die selber weiterzugebenden Informationen frühzeitig aufzudecken. Die Planungsabsichten lassen sich auch als zu erfüllende Funktionen des Gesamtbauwerks interpretieren. Um die Funktionen bereits in dieser Phase umfangreich zu berücksichtigen, bietet es sich für den Tragwerksplaner an selber die dafür zuständige DIN 18205 (Deutsches Institut für Normung, 1996) (siehe Darstellung 1.8.4) als Basis der Zusammenstellung der zu erfüllenden Funktionen zu verwenden. Jeder der Funktionen sollte anschließend ein entsprechender Fachplaner zugeordnet werden. Diese Zuordnung ist für jedes Bauwerk individuell, wird aber zwischen ähnlichen Gebäuden auch ähnliche Zuordnungen zeigen. Bereits gemachte Erfahrungen aus Vorgängerprojekten können hier genutzt werden, sodass Expertenwissen nicht ungenutzt bleibt. In frühen Gesprächen der Planer können diese Zuordnungen genauer definiert und zusätzlich gewichtet werden. Wenn in den folgenden Planungsschritten ein erstes grobes Konzept der Tragstruktur erstellt wird, können den Tragelementen dieser ersten Grobstruktur neben der Funktion der Lastabtragung weitere zu erfüllende Funktionen des Gesamtbauwerks zugeordnet werden. Über die vorher definierte Funktions-Fachplaner Beziehung können den Bauelementen anschließend direkt die entsprechenden Fachplaner zugeordnet werden, die den Tragwerksplanungsprozess beeinflussen und von denen Informationen zu bekommen bzw. zu beziehen sind. Beispielsweise wirken sich auf die Planung einer tragenden Außenwand Planungen des Fassadenplaners, des Bauphysikers, des Haustechnikers, des Elektroplaners und später auch die Art und Weise der Bauausführung durch die Baufirma aus.

Wie diese Interaktionen bereits in der frühen Phase der Planung auf Basis von Matrizenmethoden analysiert und gewichtet werden können wird in Kapitel 4 umfassend dargestellt.

Anschließend an die Überprüfung der Planungsziele und planerischen Rahmenbedingungen finden sich in der SIA 112 Phase 1 (SIA, 2014, S.11) die folgenden Leistungen:

#### Lösungsalternativen 112.2

1. Erarbeiten von Bewertungskriterien und deren Gewichtung
2. Darstellen verschiedener Lösungsstrategien und deren Bewertung mit dem erwarteten Ergebnis von *Beschrieb, Skizzen, Pläne verschiedener Lösungsstrategien (inkl. deren Bewertung)*.

Die verschiedenen Lösungsalternativen in dieser Phase können sich aus tragwerks-

planerischer Sicht zunächst sowohl im generellen Tragsystem, den Baustoffen als auch deren Grobabmessungen unterscheiden. Diese ersten Varianten lassen sich aus parametrischer Sicht bereits als zahlenmäßig erfassbare Dimensionen, Materialeigenschaften oder Boolesche Variablen<sup>2</sup> definieren. Diese definierten Parameter bilden zusammen mit der Funktionsbeschreibung die Eingangsinformationen bzw. Eingangsparameter für den Tragwerksplanungsprozess.

### 2.1.3 Einflüsse und Randbedingungen im Tragwerksplanungsprozess

Wie in Abbildung 2.1.2 dargestellt, wird die Tragwerksplanung durch diverse Beteiligte, zur Verfügung stehende Arbeitsmaterialien beziehungsweise Planungswerkzeuge, Kennzahlen und Dokumente beeinflusst. Die Beeinflussung äußert sich darin, dass die für die Durchführung der Leistungsphasen notwendigen Artefakte<sup>3</sup> (siehe z. B. die erwarteten Dokumente in dem Modell Bauplanung SIA 112 (SIA, 2014, S.11 ff. )) nicht nur vom Tragwerksplaner, sondern auch von Beteiligten wie dem Bauherrn, Architekten etc. mitdefiniert werden. Die vom Tragwerksplaner erzeugten Artefakte müssen mit Kennzahlen und den Inhalten von zwingenden Dokumenten, wie Normen, Richtlinien aber auch vertraglich geregelten Abläufen im Einklang stehen. Auf der Ebene der in der Tragwerksplanung durchzuführenden Planungsalgorithmen bedeutet dies, dass Eingangsinformationen nicht nur Ausgangsinformationen vorauslaufender Planungsalgorithmen sind. Zusätzlich müssen ebenfalls Ergebnisse und Anforderungen anderer Fachplaner aufgenommen werden. So können beispielsweise Planungsleistungen des Architekten oder des Haustechnikplaners zu Einschränkungen geometrischer Art in der Tragwerksdimensionierung führen. Diese Einschränkungen werden einem Dimensionierungsalgorithmus in diesem Fall als Eingangsinformationen übergeben und als Grenzwerte berücksichtigt. Ergebnisse einer solchen algorithmierten Dimensionierung müssen als Ausgangsinformationen an alle beteiligten Planer weitergegeben werden die diese Informationen wiederum als Eingangsinformationen ihrer nachfolgenden Leistungen benötigen. Stehen notwendige Informationen noch nicht zur Verfügung stoppen alle kausal gekoppelten Algorithmen und somit der Tragwerksplanungsprozess. In den meisten Planungssituationen werden in diesem Fall risikobehaftete, nicht validierte Schätzwerte ver-

---

<sup>2</sup>Boolesche Variablen lassen sich in diesem Zusammenhang als Entscheidungsvariable erläutern. Sie können entweder wahr oder falsch sein und beispielsweise folgende Frage beantworten: Hat das Tragwerk aussteifende Wände? -> wahr oder falsch.

<sup>3</sup>Artefakte in diesem Zusammenhang sind Resultate einzelner Planungsaktivitäten wie Skizzen, Pläne, statische Nachweise oder Montageabläufe.



wendet. Zum Zeitpunkt der Verfügbarkeit dieser Werte muss ein iterativer Abgleich mit den Schätzwerten erfolgen und bei Bedarf Prozesse mit ungültigen Schätzungen wiederholt werden. Durch die kausale Verkettung innerhalb der Gesamtplanung müssen in diesem Fall auch alle nachfolgenden Planungen auf ihre Gültigkeit überprüft und gegebenenfalls nochmals durchlaufen werden. Solche Planungsrücksprünge sind typisch für den Tragwerksplanungsprozess. Das Risiko von Planungsrücksprüngen ist in den frühen Phasen der Planung höher als in fortgeschrittenen, da in diesen Phasen die Interaktionen die Ursache für die Planungskomplexität quantitativ und qualitativ oft noch unzureichend verstanden werden können. Mit dem Risiko von Planungsrücksprüngen in der Tragwerksplanung eng verbunden, ist das Risiko spätere Änderungen meist Erhöhungen von Mengen und Dimensionen von Bauelementen berücksichtigen zu müssen. Das bedeutet, dass ein indirekter Zusammenhang zwischen einer notwendigen Sicherheit in der Dimensionierung der Bauteile und den noch unerkannten bzw. unzureichend untersuchten Interaktionen im Planungsprozess besteht.

#### 2.1.4 Planungsziele

Das finale Ziel der Tragwerksplanung ist das komplett erstellte Tragwerk. Für die Planung sind dabei folgende mögliche Teilziele zu erreichen:

1. Erfüllung aller funktioneller Anforderungen des gesamten Bauwerks inklusive der Lastabtragung
2. Effizienter Umgang mit Baustoffen ohne die Grenzen der Struktur dabei soweit auszulasten, dass wahrscheinliche spätere Umplanungen oder Nutzungsänderungen unmöglich sind
3. Einhaltung aller relevanter Normen, Richtlinien sowie vertraglicher Bedingungen, Spezifikationen und sonstiger Nebenbedingungen.

Die funktionellen Anforderungen lassen sich dabei präzise spezifizieren. So kann die Zielerfüllung der Funktion Lastabtragung unter Berücksichtigung der relevanten Normen und Richtlinien wie folgt definiert werden:

1. Einhaltung der Bemessungswerte des Tragwiderstands in Abhängigkeit des verwendeten Baumaterials unter Berücksichtigung von Imperfektionsbetrachtungen

der Tragelemente und des Gesamttragwerks

2. Einhaltung der erlaubten Verformungen einzelner Tragelemente
3. Einhaltung der erlaubten Eigenfrequenzen von Tragelementen und der Gesamtstruktur.

Um komplette Tragwerke zu erstellen, müssen bis zum Planungsende folgende Dokumente erarbeitet und bereitgestellt werden:

1. Übersichts- und Positionszeichnungen mit Achsbezügen
2. Zusammenbaupläne sowie Einzelteilzeichnungen und -listen für die Fertigung der einzelnen Bauelemente inklusive Angaben zur konkreten Materialwahl und deren Beschichtung bzw. Oberflächenbeschaffenheit
3. Rechnerischer Nachweis der Lastabtragung der Gesamtstruktur, einzelner Bauelemente, sowie der Verbindung- und Lagerungsdetails
4. Nachweise der Gebrauchstauglichkeit (Verformungen und Schwingungsverhalten)
5. Nachweise der sicheren Lasteinleitung in den Untergrund
6. Nachweise des Korrosionsschutzes sowie der Dauerhaftigkeit der verwendeten Materialien
7. Nachweise des Brandschutzes.

Der Weg von den in Abschnitt 2.1.2 erläuterten Eingangsinformationen der Tragwerksplanung zu den Planungszielen unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.1.3 aufgeführten Einflüsse und Randbedingungen wird mit Hilfe von Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung durchgeführt. Diese sollen den im folgenden Abschnitt beschriebenen Eigenschaften und Anforderungen der Tragwerksplanung entsprechen und so aufbereitet werden können, dass Interaktionen zwischen einzelnen Algorithmen aufgedeckt und analysiert werden können.

## 2.2 Eigenschaften und Anforderungen des Tragwerksplanungsprozesses

### 2.2.1 Tragwerksplanung als iterative, dynamische Optimierung mit zunehmender Konkretisierung und veränderlichen Zielen in einem dezentralen Umfeld

Um geeignete Methoden für die Komplexitätskontrolle des Tragwerksplanungsprozesses auszuwählen, ist es wichtig typische Interaktionen innerhalb der Tragwerksplanung aus verschiedenen Perspektiven zu interpretieren. Eine Möglichkeit ist die Interpretation der Tragwerksplanung als schrittweise Annäherung an die verschiedenen Planungsziele mit zunehmender zu verarbeitender Informationsdichte. Dabei wird die gesamte Planung des Bauwerks meist von verschiedenen Planern dezentral bearbeitet. Die schrittweise Annäherung an mehrere Planungsziele wiederum lässt sich als Pareto-Optimierung<sup>4</sup> interpretieren.

### 2.2.2 Iterative Planungsschritte mit Zunahme der Informationsdichte

Eine stark abstrahierte Darstellung des Charakters von Entwurfsprozessen findet sich bei Asimow (Asimow, 1962, S.5). Die Darstellung 2.2.1 wird von Asimov wie folgt beschrieben:

Philosophy of Design. The feedback becomes operable when a solution is judged to be inadequate and requires improvement. The dotted elements represent a particular application. (Asimow 1962, S.5)

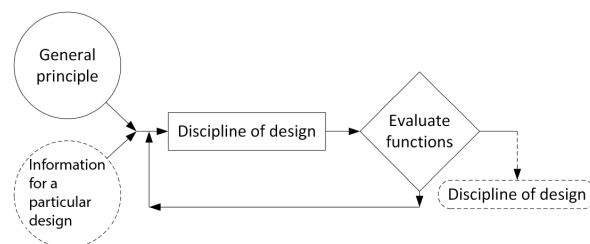


Abbildung 2.2.1: Philosophy of Design nach (Asimow, 1962)

<sup>4</sup>„Die Lösung einer Pareto-Optimierung ist die Pareto-Front. Die Pareto-Front bildet die Summe der besten (pareto-optimalen) Kompromisslösungen. Sie enthält im allgemeinen Fall auch die Optima der einzelnen Zielfunktionen selbst. Pareto-optimal ist eine Lösung dann, wenn es keine andere Lösung gibt, die zu einer gleichzeitigen Verbesserung beider Zielkriterien führt.“ (Jäger 2009, S.818)

Eine Darstellung der Konkretisierung innerhalb des Entwurfsprozesses basierend auf den Beschreibungen von Asimow (Asimow, 1962, S. 11 ff.) und Mesarovic (Mesarovic, 1964) findet sich bei Rowe (Rowe, 1987, S. 13) (siehe Abbildung 2.2.2). Hier wird sowohl der iterative Charakter als auch die zunehmende Konkretisierung der Planung aufgenommen.

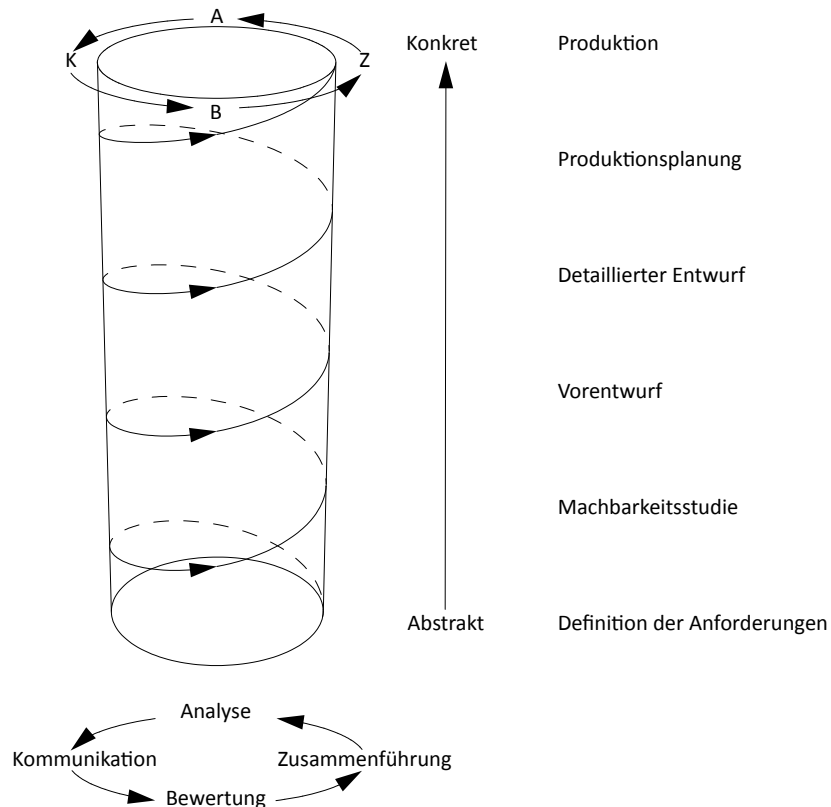


Abbildung 2.2.2: Ikonisches Modell des Entwurfsprozesses; Eigene Darstellung in Anlehnung an Rowe (Rowe, 1987)

Von Patzak (Patzak, 1982) wird zum Thema der Wiederholung von Planungsschritten folgendes definiert:

Im Normalfall eines Planungsprozesses, insbesondere bei innovativen Problemen, ist es oft nötig, einen einzelnen Planungsschritt oder eine ganze Planungsphase zu wiederholen, was im Vorgehensmodell der Planung in Form von Rückkopplungen berücksichtigt ist. Je komplexer und innovativer ein Problem sich stellt, desto mehr wird die Planung den Charakter eines Probiervorgangs (Trial & Error) annehmen. Nur durch ein

derartiges iteratives Vorgehen kann es zur laufenden Verbesserung des Ergebnisses im Sinne eines Lernprozesses kommen. Die Planung besitzt somit den Charakter eines lernenden Systems im kybernetischen Sinne. (Patzak 1982, S.104)

Die hier definierte Wiederholung einzelner Planungsschritte kann durch den Einsatz von generischen Methoden<sup>5</sup> deutlich beschleunigt werden, was im Kapitel 4 im Detail besprochen wird. Unter Berücksichtigung der Wiederholung von Planungsteilprozessen und des in Abschnitt 2.1.3 aufgeführten Umfelds der Tragwerksplanung sind Charakteristika von Optimierungsprozessen mit mehreren Zielkriterien erkennbar, die im nächsten Abschnitt besprochen werden.

### 2.2.3 Mehrkriterienoptimierung in der Tragwerksplanung

Bei der Mehrkriterien- oder Pareto-Optimierung steht nicht die optimale Lösung nur eines Problems im Mittelpunkt. Es wird eine Optimierung mehrerer der in Abschnitt 2.1.4 aufgeführten, teils widersprüchlichen Planungsziele beabsichtigt. Neben mehreren Planungszielen treten dabei auch eine Vielzahl von zu optimierenden Eingangsparametern, der in Abschnitt 2.1.2 aufgeführten Ausgangspunkte, der Planung auf. Erschwerend gibt es neben Optimierungszielen und mehreren Parametern verschiedenartigste Restriktionen (siehe Abschnitt 2.1.3) die auf die Pareto-Optimierung einen Einfluss nehmen.

Im Tragwerksplanungsprozess spielen neben Zielen wie geringem Tragwerksgewicht oder kurzer Montagedauer auch schwer fassbare und quantifizierbare Kriterien aus dem Bereich des Objektplaners (Architekt) wie das ästhetische Zusammenspiel der Tragstruktur mit der Umgebung und der architektonischen Entwurfsgedanke eine Rolle. Für die Integration von qualitativen Kriterien müssen spezielle Vorgehensweisen verwandt werden. Geyer (Geyer, 2009, S.69) beschreibt in seiner Dissertation eine der möglichen Vorgehensweisen. Das von ihm vorgestellte Verfahren arbeitet mit einem inneren numerischen Zyklus und einem äußeren interaktiven Zyklus. Der äußere Zyklus enthält ein Gewichtungsfaktoren-basierendes Bewertungsmodell, das erlaubt die Zielkriterien der Optimierung entsprechend gewählter Präferenzen

---

<sup>5</sup> „Wiederverwendung von Softwareprodukten (d. h. Kode und Dokumentation), Entwicklungsschritten und sonstigen Entwicklungserfahrungen durch generische Methoden in dem hier verstandenen Sinn bedeutet einen systematischen Rückgriff auf relevante Informationen und Erfahrungen aus vergangenen Projekten.“ (Nagl und Westfechtel 2003, S.92 f.)

zu berücksichtigen. Der Entwerfer kann dabei die Gewichtungsfaktoren einzelner Teilzielfunktionen flexibel beeinflussen und so verschiedene Optimierungslösungen direkt vergleichen. Die Optimierungsrestriktionen des Planungsprozesses ergeben sich in der Tragwerksplanung durch normativ geregelte Einschränkungen von Verformungen, materialabhängige Maximalspannungen oder auch ein zu begrenzendes dynamisches Verhalten. Bei derartigen Optimierungsproblemen sind Gradientenverfahren<sup>6</sup> nur in extrem vereinfachten Ausnahmefällen anwendbar. Gradienten-basierte Verfahren arbeiten mit differenzierbaren Funktionen von mathematisch formulierten Parameterzusammenhängen. Die notwendigen Funktionen der Parameterzusammenhänge sind in der Tragwerksplanung oftmals nicht vorhanden oder die Ableitung der Funktionen und deren Interpretation in der praktischen Umsetzung nicht mit einem vertretbaren Aufwand zu bewältigen. Beispielsweise lässt sich bereits der Zusammenhang zwischen der Belastung und Verformung eines einfach überbestimmten<sup>7</sup> Tragwerks wie eines gelenkig gelagerten Rahmens nur unter genauer Kenntnis der verwendeten Materialien und Querschnitte unter Zuhilfenahme von Differenzialgleichungen bestimmen. Bei deutlich stärker überbestimmten Tragwerken, die zudem auch noch ein stark nicht-lineares Tragverhalten zeigen, wie Gitterschalen oder Seilnetze wird die Differenzierung der das Tragverhalten beschreibenden Funktionen unmöglich. Häufig geht es in der Anwendung auch nicht darum, die eine beste Tragwerkslösung zu finden. Dann ist es das Minimalziel eine Lösung für das Tragwerk bereitzustellen, die keine der definierten Restriktionen verletzt. Aber auch für dieses Ziel ist wie bei Patzak (Patzak, 1982) erwähnt ein systematisches Probieren nötig. Hierfür bieten sich beispielsweise auf Erfahrungen beruhende Annahmen von Experten, direkte numerische Suchverfahren<sup>8</sup> oder evolutionäre Strategien<sup>9</sup> an. Die Evolutionsstrategien arbeiten immer mit mehreren Iterationen über das gesamte Optimierungsproblem. In den einzelnen Iterationsschritten müssen sämtliche, die Tragwerksplanung repräsentierende Algorithmen durchlaufen werden.

---

<sup>6</sup>„Der Grundgedanke des *Gradientenverfahrens* ist, sich ausgehend von einem zufälligen Startpunkt in die Richtung fortzubewegen, in der die zu maximierende Zielfunktion am stärksten ansteigt bzw. in die entgegengesetzte Richtung bei einer zu minimierenden Zielfunktion. Die Richtung dieses stärksten Anstiegs lässt sich durch das Bilden des Gradienten, d. h. der partiellen Ableitungen der Zielfunktion berechnen. Das *Gradientenverfahren* ist nur bei differenzierbaren Funktionen anwendbar, (...)“ (Gerdes et al. 2004, S.16)

<sup>7</sup>Das Tragwerk hat eine Freiheitsgradfixierung mehr als für die Abtragung aller Lasten benötigt wird.

<sup>8</sup>Direkte numerische Suchverfahren orientieren sich am Gradienten der Zielfunktion, welche durch Differenzenbildung gebildet werden.(Wiedemann, 2013, vgl. S.303)

<sup>9</sup>„Die dahinter stehende Idee knüpft an die Fähigkeiten der Natur an, sich durch Adaption an eine veränderte Umgebung anzupassen, durch Innovation Probleme auf völlig neue Art und Weise zu lösen und Lösungen für sehr komplexe Probleme in kurzer Zeit und durch Prüfung einer relativ geringen Anzahl von Möglichkeiten zu erzeugen.“ (Gerdes et al. 2004, S.31)

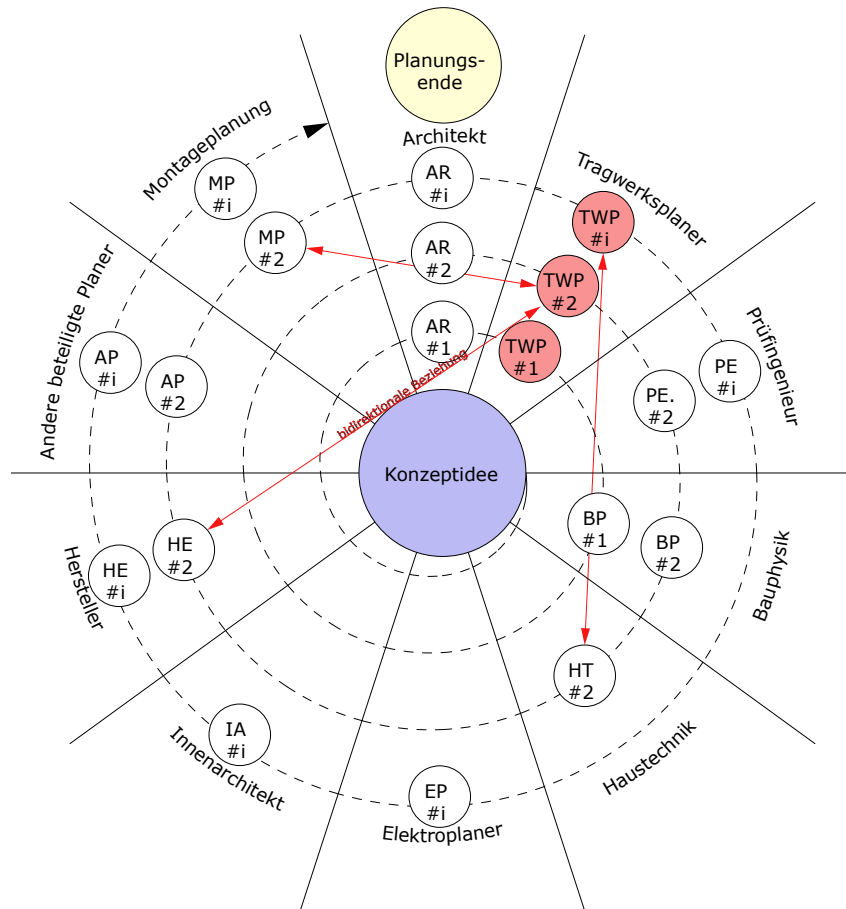


Abbildung 2.2.3: Zyklischer Durchlauf und bidirektionale Beziehungen der Planungsmodelle; Eigene Darstellung

Die auf dem Spiralmodell von Boehm (Boehm, 1986, S.64) aufbauende beispielhafte Darstellung 2.2.3 zeigt den zyklischen Durchlauf der verschiedenen Planungsstände<sup>10</sup> der einzelnen Planer innerhalb der Gesamtplanung eines Bauwerks. Dabei müssen die jeweiligen Planungsstände an veränderte Eingabeinformationen bzw. Eingabeparameter angepasst werden und produzieren neue Ausgangsinformationen bzw. Ausgabeparameter. Die gestrichelten Linien verlaufen in der Richtung der einzelnen Planungsstände. Von speziellem Interesse sind die bidirektionalen Beziehungen (markiert mit roten Linien). Diese Linien setzen Planungsstände in Beziehung deren Planer einen gegenseitigen Informationsbedarf (Parameterraustausch) haben. Beispielsweise benötigt die Montageplanung Informationen der Tragwerksplanung (in Darstellung 2.2.3 TWP #2), genauso braucht die Tragwerksplanung Informationen

<sup>10</sup>Der Planungsstand bezeichnet hier die Gesamtheit der zu einem bestimmten Datum fertiggestellten Pläne, Berechnungen und Dokumente.

über die finale Montage für die Dimensionierung von Tragelementen und Detailverbindungen. Allgemein beginnt zunächst der Tragwerksplaner mit seiner Arbeit und muss Auswirkungen und Signifikanz nachfolgender Planungen schätzen, um diese dann später anzupassen bzw. zu optimieren. Aufgrund der bidirektionalen Beziehungen sind Schätzungen und das bewusste Ignorieren von Einflüssen späterer Planungen essenziell um den Planungsprozess am Laufen zu halten. Ohne diese Vorgehensweisen wäre es schwierig komplexe oder innovative Bauprojekte überhaupt erfolgreich zu beenden. Es braucht adäquate Methoden um dieser bewussten Missachtung von Interaktionen zu begegnen und resultierende Planungsrisiken auszuschließen. Die psychologische Komponente dieser Handlungsweise wird nach Dörner (Dörner, 1997) *Einkapselung* genannt und in Abschnitt 2.3 noch eingehender beleuchtet. Die zunächst ignorierten bidirektionalen Beziehungen treten auf der Ebene von generisch definierten Planungsalgorithmen als Rückkopplungen oder auch Zirkelbezüge in Erscheinung. Rückkopplungen sind typisch für iterative Prozesse und können als Gradmesser für den Fortschritt der Planung verwandt werden. Sind in einem Planungssystem noch unaufgelöste bzw. missachtete Zirkelbezüge vorhanden ist die Planung noch nicht beendet. Ein Zirkelbezug gilt dann als aufgelöst, wenn die Ausgangsparameter von Planungsprozess A die Ausgangsparameter von Planungsprozess B, die gleichzeitig Eingangsparameter von Planungsprozess A sind, nicht mehr verändern. Das Auflösen der Zirkelbezüge zeigt sich in der zunehmenden Präzisierung der Gesamtstruktur, einzelner Tragelemente, der Fügung der Elemente aber auch der Präzisierung der zeitlichen Erstellung des Tragwerks. Ausgangspunkt ist die zunächst noch abstrakte Idee des Bauwerks, die durch eine zunehmende Definition von Tragwerksparametern im Laufe der Planung ausdetailliert wird. Auch die zunächst noch sehr allgemein definierten Funktionen bzw. Planungsziele des gesamten Bauwerks werden im Laufe der Planung präzisiert, sodass fortlaufend ihre Übereinstimmung mit dem aktuellen Planungsstand des Tragwerks abgeglichen werden muss. Die Planungsziele sind demnach nicht starr, sondern über den gesamten Planungsprozess hinweg in gewissen Grenzen flexibel. Diese Flexibilität der Planungsziele unterscheidet sich deutlich von Planungsprozessen der Produktentwicklung oder des Fahrzeugbaus. Eine der Ursachen dieser Eigenschaft ist die Einbettung der Tragwerksplanung in eine dezentrale Planungsumgebung die im folgenden Abschnitt diskutiert wird.



#### 2.2.4 Einbettung der Tragwerksplanung in den Gesamtplanungsprozess

Der Definition von Patzak (Patzak, 1982, S.96 ff.) folgend, handelt es sich bei der Planung von Tragwerken um eine Planung mit stark dezentralem Charakter. Diese Art der Planung weist Unzulänglichkeiten in folgenden Richtungen auf:

1. beschränkter Problemhorizont
2. mangelnde Planungsübersicht
3. mangelhafte Ausrichtung auf das Gesamtziel

(Patzak, 1982, vgl. S.97).

Die Tragwerksplanung erfordert die Berücksichtigung der vielfältigen Interaktionen zwischen den folgenden Beteiligten:

1. Bauherr
2. Architekt
3. Tragwerksplaner
4. weitere Fachplaner (z. B. Geotechniker, Gebäudetechniker)
5. Prüfbehörden und -ingenieure
6. Hersteller bzw. Monteure

Diese zu koordinierenden Interaktionen erhöhen die Komplexität der Planungsaufgabe deutlich. Both (Both, 2006) schreibt unter der Verwendung des Begriffs *Wechselwirkungen* in diesem Zusammenhang:

Ein weiterer Faktor der Komplexität besteht in der Beziehungsdichte und Vernetzung, die mit wachsender Anzahl an problemrelevanten Aspekten im Allgemeinen zunehmen. Diese Veränderungen des Problemumfanges führen so zu einem Anwachsen der bei Bauplanungen ohnehin sehr ausgeprägten inhaltlichen Vernetzung der verschiedenen Planungsbereiche. Die vielfältigen thematischen Interaktionen der zu bearbeitenden Problemstellungen sind für die einzelnen Planer so oft nicht mehr direkt

nachvollziehbar. Dadurch kann es zu großen Kompatibilitätsproblemen der erarbeiteten Teillösungen kommen. (Both 2006, S.2)

Die späteren Interaktionen zwischen den Planern sind zu Beginn der Planung nicht vollumfänglich bekannt und können deshalb auch nicht direkt berücksichtigt werden. Die Veränderungen beim Aufdecken der Interaktionen im Laufe der Planung und deren Auswirkung auf die Planungssicherheit wird im folgenden Abschnitt thematisiert.

### 2.2.5 Zusammenhang zwischen Planungsfortschritt und Planungssicherheit

Im Laufe des Planungsprozesses werden die Beziehungen zwischen den Parametern des Tragwerks aber auch die Relationen zu anderen Planungsbeteiligten immer genauer definierbar. Dies bedeutet sowohl eine Zunahme der Erkenntnisse der Quantität der Relationen als auch eine Zunahme des Wissens über die Art der Beziehungen. Die Einflüsse der finalen Bauwerkserstellung auf das zu planende Tragwerk werden klarer interpretierbar und damit planbar. Die Gefahr für Planungsrisiken sinkt somit mit zunehmendem Planungsfortschritt. Diese Relation ist ein wichtiger Ausgangspunkt für Überlegungen zu Planungspuffern in frühen Planungsphasen. Diese Planungspuffer lassen sich in den frühen Planungsphasen über finanzielle Puffer in der initialen Kostenermittlung, aber auch in Auslastungspuffern bei der Dimensionierung von Tragelementen und -details umsetzen.

## 2.3 Kognitive Belastung und Einflüsse auf den Tragwerksplaner

Die zentrale Komponente des Tragwerksplanungsprozesses ist der in Darstellung 2.1.2 als Prozesseigner definierte Tragwerksplaner. Um durch Komplexität hervorgerufene Planungsrisiken zu reduzieren, ist es wichtig zu verstehen, wie Menschen in komplexen Situationen handeln. Das Aufdecken von Interaktionen im Planungsprozess ist als Lernprozess zu verstehen. Zur Beschreibung der kognitiven Belastung dieses Lernprozesses wird die *Cognitive Load Theory* angewendet.

Cognitive load theory is an universal set of learning principles that are proven to result in efficient instructional environment as a consequence of

leveraging human cognitive learning processes. (Clark et al. 2011, S.7)

Die Cognitive Load Theory beschäftigt sich mit den Einflüssen auf das erschwerte bzw. erleichterte Lernen die auf das Verstehen von Interaktionen im Tragwerksplanungsprozess übertragen werden sollen. Bei der Cognitive Load Theory nach Sweller (Sweller et al., 2011) wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

1. Zentrales Element beim Lernen ist das Arbeitsgedächtnis, das gleichzeitig nur eine beschränkte Menge an Informationen halten kann.
2. Das menschliche Wissen wird in Schemata gespeichert.
3. Beim Lernen werden neue Schemata gebildet und mit bereits vorhandenen Schemata verknüpft.
4. Lernen wird dann ineffektiv, wenn das Arbeitsgedächtnis beim Schemataerwerb überfordert wird.
5. Es gibt drei verschiedene kognitive Belastungsanteile, instrinsisch, extrinsisch und lernbezogene Belastung die sich addieren und gegenseitig beeinflussen.

Die drei kognitiven Belastungsanteile definieren sich in der Cognitive Load Theory wie folgt:

#### *Intrinsische kognitive Belastung*

Die intrinsische Belastung ist direkt an die Menge der gleichzeitig zu verstehenden Interaktionen und damit die Komplexität des Problems gekoppelt. Die maximale Belastung wird durch parallel im Arbeitsgedächtnis haltbare Elemente und deren Interaktionen bestimmt. (Plass et al., 2010, vgl. S.41)

#### *Extrinsische (irrelevante) kognitive Belastung*

Die extrinsische kognitive Belastung erzwingt mentale Arbeit, die für das Lernziel irrelevant ist und verschwendet folglich begrenzte mentale Ressourcen.(Clark et al., 2011, vgl. S.12)

#### *Lernbezogene (relevante) kognitive Belastung*

Die lernbezogene Belastung, auch *germane load* genannt, beschreibt den relevanten, unbedingt nötigen Anteil, der für das eigentliche Lernen benötigt wird. Hierbei werden neue Schemata im Arbeitsgedächtnis aufgebaut und mit bestehenden verknüpft.

Um diesen Aufbau und die Verknüpfung zu erleichtern, müssen die intrinsische und extrinsische Belastung so gering wie möglich gehalten werden. Für den Tragwerksplaner bedeutet die Adaption der Cognitive Load Theory für das Aufdecken von Planungsinteraktionen und das Erkennen komplexer Zusammenhänge folgendes:

1. Die Elemente des Tragwerks, die zugehörigen anderen Funktionen des Bauwerks mit den zugeordneten Planern sowie weitere beeinflussende Faktoren (Normen, Forderungen des Bauwerks, Einflüsse der Herstellung und Montage usw.) müssen so aufbereitet und dargestellt werden, dass das Arbeitsgedächtnis nicht überbeansprucht wird. Die wesentlichen Elemente müssen gefiltert werden können und die unwesentlichen ausblendbar sein, um die intrinsische und extrinsische Belastung zu reduzieren. Einen Anhaltspunkt gibt hier beispielsweise die Miller'sche Zahl (Miller, 1956), die besagt dass nicht mehr als sieben (plus minus zwei) Informationseinheiten vom menschlichen Kurzzeitgedächtnis verarbeitet werden können. Somit sollten Interaktionsdarstellungen von Elementen der Tragwerksplanung mit mehr als sieben Elementen so aufbereitet werden, dass sie in überschaubare Einheiten gruppiert werden können. Um ein erstes Verständnis für das Tragverhalten einer Struktur zu entwickeln, ist es meist nicht nötig jedes einzelne Tragelement, inklusive aller Verbindungsmittel, in einer Analyse zu berücksichtigen. Das Gruppieren von Fassaden oder Dachelementen in Primär-, Sekundär- oder Tertiärsystem oder vergleichbare Hierarchien ist hierfür bei der Einstiegsanalyse meist ausreichend.
2. Die Darstellung der Eingänge, Ausgänge und Randbedingungen des Tragwerksplanungsprozesses muss so aufbereitet werden, dass irrelevante Informationen gezielt herausgefiltert werden können. Das bedeutet beispielsweise dass Elemente des Tragwerksplanungsprozesses, die keine oder sehr geringe Interaktionen mit anderen Elementen haben, gezielt aus einer Analyse herausgefiltert und ausgeblendet werden können. Sekundäre und tertiäre Einflüsse auf das Tragverhalten werden dabei vereinfacht und abstrahiert dargestellt. So werden auch bei anspruchsvollen Tragwerken Windeffekte eingangs nur über flächige Drücke angesetzt, anstatt die tatsächlichen statischen und dynamischen Wirkungen des Windes im Detail zu zeigen. Diese Betrachtungen erfolgen erst in späteren Phasen.

Ist die Informationsaufbereitung nicht an das Arbeitsgedächtnis anpassbar, treten Probleme mit der Erfassbarkeit von Interaktionen auf, die Dörner (Dörner, 1997) in seinem Buch „Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situa-

tionen“ an Beispielen ausführlich beschreibt. In dem Buch werden die verschiedenen Verhaltensweisen von Menschen beim Versuch der Lösung von komplexen Aufgabenstellungen, also unter hohen kognitiven Belastungen aufgezeigt. In Darstellung 2.3.1 werden die definierten allgemeinen Verhaltensweisen zusammengefasst.

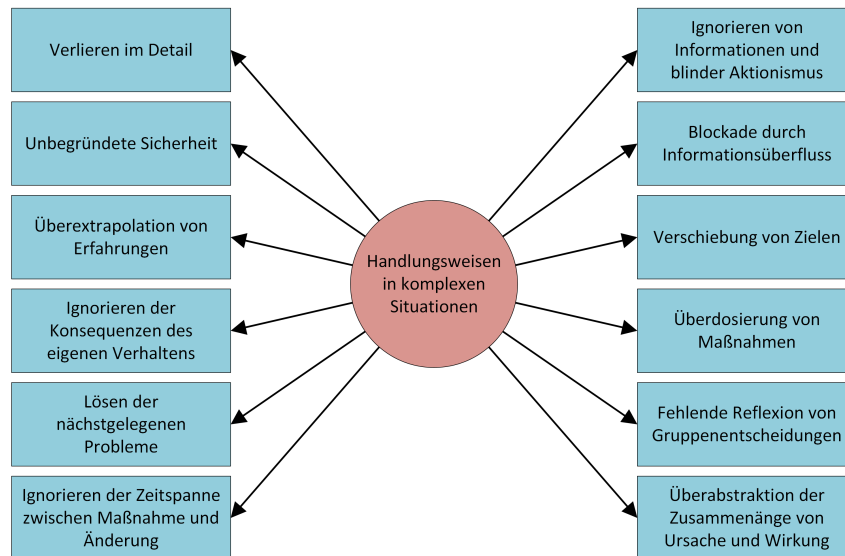


Abbildung 2.3.1: Typisches Verhalten von Menschen in komplexen Situationen; Eigene Darstellung in Anlehnung an Dörner (Dörner, 1997)

Viele dieser Verhaltensweisen lassen sich bei der Bearbeitung von anspruchsvolleren Planungsprojekten wiederfinden. Eine andere Perspektive bildet der Begriff des kognitiven Aufwands. Er steht in direktem Zusammenhang mit der Anzahl der Denkschritte, die der Tragwerksplaner leisten muss, um die Zusammenhänge zwischen den Eingangsinformationen eines Planungsalgorithmus mit den Ausgangsparametern desselben oder auch anderer Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung in Beziehung zu setzen. Verliert der Planer die Möglichkeit diese Beziehungen zu analysieren, wird also die kognitive Belastung höher als es die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses erlaubt, sind die in Abschnitt 1.5 aufgeführten Planungsrisiken die Folge. Deshalb soll das Gleichgewicht durch geeignete Konzepte auch bei anspruchsvollen Bauprojekten hergestellt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass sich aufgrund unterschiedlicher fachlicher Erfahrungen der Planer auch Art und Weise des Erkenntnisgewinns und somit die kognitiven Prozesse<sup>11</sup> individuell unterscheiden. So können verschiedene Perspektiven auf dasselbe Tragsystem und die ver-

<sup>11</sup> „Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Denken, Gedächtnis und Sprache sind kognitive Prozesse die ständig in uns ablaufen.“ (Gerstenmaier und Banyard 1995, S.42)

knüpften Planungsalgorithmen individuell zu einem schnelleren oder langsameren Wahrnehmen<sup>12</sup> von Zusammenhängen führen. Es bietet sich somit an, den Planern verschiedene Sichtweisen zur Analyse anzubieten. Von Longo (Longo und Barrett, 2010) wird versucht, den kognitiven Aufwand beim Lösen einer Aufgabe qualitativ und quantitativ zu fassen. Dafür werden die den Aufwand beeinflussenden Faktoren in Abbildung 2.3.2 dargestellt. Die unter dem Begriff der *Erregung* gesammelten Faktoren wie Anspannung, Neugier, Angst oder Motivation sind stark subjektive, individuelle Einflüsse die durch Verwenden von Methoden der Komplexitätskontrolle bzw. Komplexitätsanalyse nicht oder nur geringfügig beeinflusst werden können. Andere unter den Begriffen *Intention*, *Wahrnehmung* und *Ungewollte Verklärung des Inhalts* gesammelte Faktoren können hingegen mit Blick auf die intrinsische und extrinsische kognitive Belastung gezielt gelenkt werden. Ziel dabei ist es, den definierten kognitiven Aufwand im Tragwerksplanungsprozess so weit als möglich zu reduzieren.

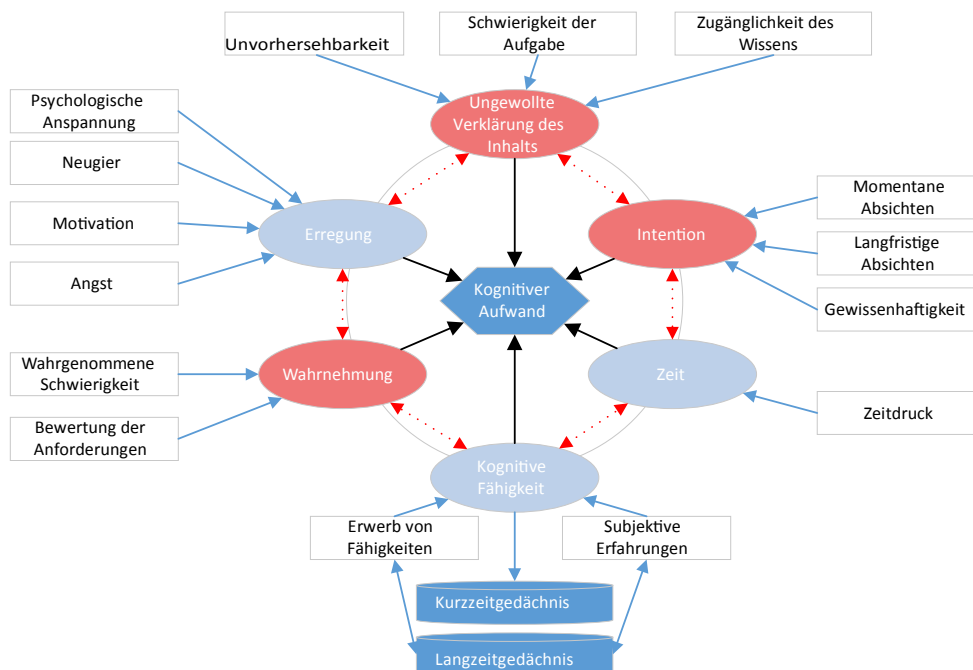


Abbildung 2.3.2: Faktoren die den kognitiven Aufwand beeinflussen nach Longo (Longo und Barrett, 2010)

Das bedeutet im Bezug auf die einzelnen von Longo (Longo und Barrett, 2010)

<sup>12</sup>„Wahrnehmung impliziert die Aufnahme von Informationen über unsere Sinnesorgane sowie die anschließende Verarbeitung dieser Information zu inhaltlich bedeutsamen und sinnhaften Sachverhalten.“ (Gerstenmaier und Banyard 1995, S.42)

erwähnten lenkbaren Faktoren:

1. Intention:

Die Intention oder der Zweck eines jeden Planungsschrittes bzw. der grundlegenden Algorithmen sollte ersichtlich sein.

2. Wahrnehmung:

Die Schwierigkeit der zu lösenden Aufgabe soll im Planungsprozess wahrzunehmen sein.

3. Ungewollte Verklärung:

In der Darstellung eines Planungsschrittes bzw. Algorithmus sollen optional nur die relevanten Parameter darstellbar sein.

Nach Darstellung der relevanten Eigenschaften des Tragwerksplanungsprozesses, inklusive der kognitiven Anforderungen und Einflüsse auf den Planer, werden im nächsten Kapitel die Interaktionen für die verschiedenen Ebenen der Komplexität genauer beleuchtet.





# 3

## Komplexität in der Tragwerksplanung

### 3.1 Ebenen der Komplexität

Der Begriff der Komplexität wird in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen aufgrund anderer Perspektiven unterschiedlich verwendet. Deshalb wird hier die Anwendung im Kontext der Tragwerksplanung definiert.

In der Tragwerksplanung sind drei korrelierende Ebenen der Komplexität zu unterscheiden. Diese sind:

1. die Komplexität des interdisziplinären *Gesamtplanungsprozesses*,
2. die Komplexität des *Tragwerksplanungsprozesses*,
3. und die Komplexität der *Planungswerkzeuge*, die sich durch die Interaktionen bei der Durchführung von Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung ergibt.

Planungswerkzeuge sind im Rahmen dieser Definition alle Hilfsmittel die im Tragwerksplanungsprozess verwandt werden. Dies sind beispielsweise einfache Handrechnungen und -zeichnungen, CAD Werkzeuge, Finite Element Modelle aber auch die parametrisch-assoziative Modellierung und die BIM-Methodik. Nach einer übergeordneten Definition von Komplexität werden die spezifischen Faktoren der einzelnen Komplexitätsebenen definiert. Innerhalb des Gesamtplanungsprozesses lässt sich die Komplexität noch in interne und externe Komplexität unterteilen. Interne Komplexität bezieht sich hierbei auf Interaktionen innerhalb des Tragwerksplanungsprozesses, externe Komplexität auf Interaktionen mit anderen Planungsbeteiligten. Die Komplexitätsfaktoren werden in der Literatur, wie beispielsweise bei Abulawi (Abulawi, 2012) auch als Komplexitätstreiber bezeichnet.

### 3.2 Definition von Komplexität und Komplexitätsfaktoren

Patzak (Patzak, 1982, S.22) definiert Komplexität als Merkmale von Systemen und unterteilt diese Merkmale in Abbildung 3.2.1. Bei Beer (Beer, 2008, S.16) kommt als weiteres Merkmal noch die Dynamik von Prozessen dazu.

Komplexe Systeme unterscheiden sich dann von komplizierten Systemen durch ihr Zeitverhalten, ihre Dynamik, also die Veränderung der relevanten systemimmanenten Parameter in der Zeit. (...)Weiterhin besteht

bezüglich des aktuellen sowie zukünftigen Verhaltens der Systemvariablen in komplexen Systemen immer ein gewisser Grad der Unsicherheit. Dies betrifft sowohl die inneren Systemvariablen als auch die Systemauswirkungen auf die Umwelt. (Beer 2008, S.17)

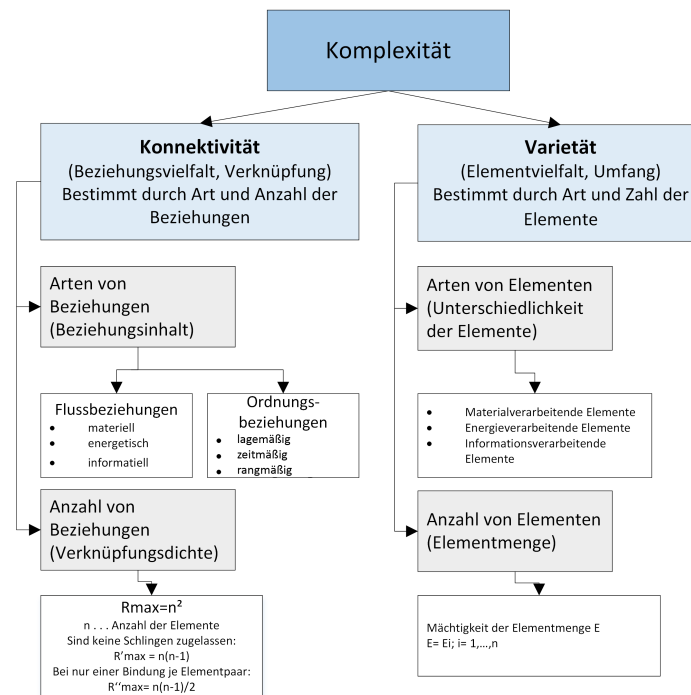


Abbildung 3.2.1: Komplexität (Merkmale der Systemstruktur) nach Patzak (Patzak, 1982)

Edmonds (Edmonds, 1999) nimmt die Unsicherheit in der Voraussage des Verhaltens in die Definition der Komplexität auf:

Complexity is that property of a model which makes it difficult to formulate its overall behaviour in a given language, even when given reasonably complete information about its atomic components and their inter-relations. (Edmonds 1999, S.72)

Dabei ist das schwer voraussagbare Verhalten das Resultat der Eigenschaften eines komplexen Systems. Dieses schwer voraussagbare Verhalten kann aus mathematischer Sicht als chaotisches System bezeichnet werden. Argyris (Argyris et al., 1995) schreibt hierzu:

Typisch für chaotische Systeme ist ihre empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen, die durch das exponentielle Auseinanderdriften benachbarter Trajektorien verursacht wird. Zwei Anfangsbedingungen, die innerhalb einer gewissen Meßgenauigkeit zunächst nicht zu unterscheiden sind, divergieren und können nach einer endlichen Zeitspanne voneinander unterschieden werden. Mikroskopische Abweichungen werden also nach kurzer Zeit auf einer makroskopischen Skala sichtbar, und das dynamische System wirkt somit als Informationsquelle. (Argyris et al. 1995, S.258)

Die verschiedenen Definitionen zusammenfassend werden die Komplexitätsfaktoren in die Kategorien Konnektivität - Assoziativität, Varietät - Parametrie und Dynamik unterteilt und in der Arbeit verwendet. Basis der Konkretisierung der Faktoren in Darstellung 3.5.1 sind wie bei Patzak (Patzak, 1982) Elemente und Beziehungen. Für diese wird zusätzlich der Faktor Dynamik definiert.

### 3.3 Komplexität des Gesamtplanungsprozesses

Wie in Abschnitt 2.2.4 erläutert ist die Tragwerksplanung in einen dezentralen Gesamtplanungsprozess eingebettet. Aus diesem Grund müssen weitere vielfältige Interaktionen zwischen sämtlichen Planungsbeteiligten berücksichtigt werden. Diese zu koordinierenden Interaktionen erhöhen die Komplexität der Planungsaufgabe maßgebend. Unter Berücksichtigung dieser Problembeschreibung lässt sich die Komplexität des Gesamtplanungsprozesses anhand konkreter Faktoren in Abbildung 3.5.2 definieren und anschließend kommentieren.

#### 1. Varietät

- a. Neben der Anzahl beteiligter Domänen innerhalb des Gesamtplanungsprozesses ist die Gesamtanzahl aller insgesamt beteiligten Fachplaner, Bauherren und Behördenmitarbeiter für die Komplexität des Prozesses bedeutsam.

#### 2. Konnektivität

- a. Bei der Art der Beziehungen zwischen den Planungsbeteiligten geht es um die

Richtung der Beziehung, also die Frage ob die Abhängigkeiten einseitig<sup>1</sup> oder wechselseitig<sup>2</sup> sind. Wechselseitige Beziehungen haben einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Komplexität des Gesamtplanungsprozesses, da sie eine Ursache für iterative Planungsverläufe sind.

### 3. Dynamik

- a. Die Beziehungen zwischen einzelnen Planungsbeteiligten können sich im Laufe der Planung verändern. Gerade bei bidirektionalen Informationsflüssen nimmt die Tiefe und Anzahl der auszutauschenden oder abzugleichenden Informationen im Planungsprozess zu.
- b. Mit dem Fortschreiten der Planung ändert sich der Detaillierungsgrad der einzelnen Domänen. Der notwendige kognitive Aufwand für das Verständnis der Planungsabhängigkeiten wird dadurch dynamisch erhöht.

## 3.4 Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses

Bei Tragwerken handelt es sich der Systemdefinition von Patzak (Patzak, 1982) folgend um ein System.

Ein System besteht aus einer Menge von Komponenten, welche Eigenschaften besitzen und welche durch Beziehungen miteinander zur Verfolgung gesetzter Ziele verknüpft sind. (Patzak 1982, S.19)

Das Systemziel ist die Abtragung von internen und externen Einwirkungen. Die Systemkomponenten sind einzelne mit definierbaren Eigenschaften versehene Tragelemente, die über reale physische Koppelungen in Interaktion stehen und in denen zeitlich veränderliche Spannungszustände vorherrschen. Mit Bezug auf die Definition von Edmonds (Edmonds, 1999, S.72) lässt sich die Komplexität des des Tragwerksplanungsprozesses an der eingangs trotz genauer Kenntnis der Eigenschaften einzelner Tragelemente nicht exakten Beschreibbarkeit des Tragverhaltens unter gegebenen Lasten festmachen. Je größer der analytische Aufwand und damit auch der

---

<sup>1</sup>Hier ist Planer A von Planer B im Informationsfluss abhängig, aber Planer B nicht von Planer A.

<sup>2</sup>Hier benötigt sowohl Planer A von Planer B, als auch Planer B von Planer A Informationen um seine Aufgabe innerhalb seiner Domäne abschließen zu können. Sie können sich also wechselseitig in der Ausführung ihrer Tätigkeit behindern.

unter Abschnitt 2.3 definierte kognitive Aufwand für die Voraussage des Verhaltens des Tragwerks desto komplexer stellt sich der Tragwerksplanungsprozess dar. Die unter Abschnitt 3.2 definierten Komplexitätsfaktoren werden in Abbildung 3.5.3 zugeordnet. Zu den im Diagramm 3.5.3 definierten Faktoren sind folgende inhaltliche Konkretisierungen zu machen:

### 1. Varietät

- a. Bei der Varietät der Tragelementtypen spielen neben der Element- oder Querschnittsgeometrie und unterschiedlichen Materialien bzw. der rheologischen Modellierung<sup>3</sup> auch weitere Charakteristika wie die Vorspannung eine Rolle.

### 2. Konnektivität

- a. Neben der Gesamtanzahl der Tragelementkopplungen ist auch die Art der konstruktiven Tragelementkopplung von Bedeutung und die Auswirkung auf das Tragverhalten zu berücksichtigen.

### 3. Dynamik

- a. Zur Veränderung der Beziehungen zwischen den Tragelementen kommt es zunächst zu Beginn der Strukturerstellung durch unterschiedliche Bauzustände. Später können Umnutzungen des Gebäudes die Ursache von Änderungen sein. Gerade bei aufwendigeren Strukturen<sup>4</sup> können strukturelle<sup>5</sup> und geometrische<sup>6</sup> Nichtlinearitäten ursächlich für veränderliche Interaktionen der Tragelemente mit Bezug auf das Tragverhalten sein.
- b. Die zeitlichen Veränderungen von Tragelementeigenschaften und internen Schnittgrößen werden neben rheologischen Einflüssen vor allem durch veränderliche Belastungssituationen hervorgerufen, die im Tragwerksplanungsprozess berücksichtigt werden müssen.

---

<sup>3</sup>„Die rheologische Modellierung basiert somit auf der Idee der Ableitung konstitutiver Gleichungen mithilfe einfacher analoger Modelle für die Spannung-Verzerrungs-Beziehung“ (Altenbach 2012, S.287)

<sup>4</sup>Hier sind Bauwerke der Honorarzone V gemeint.

<sup>5</sup>Je nach Belastungssituation können Lasten zwischen Tragelementen übertragen werden oder nicht. Das bedeutet die Elemente haben veränderliche Kontaktsituationen. Eine weitere strukturelle Nichtlinearität ist die Übertragung von Kräften zwischen Tragelementen über Reibung.

<sup>6</sup>Die Beschreibung des Belastung-Verformungsverhaltens erfolgt mithilfe von Theorie II. oder III. Ordnung.

### 3.5 Komplexität der Planungswerkzeuge

Die Komplexität der Planungswerkzeuge basiert auf Interaktionen zwischen ihnen. Auf der untersten Ebene interagieren die als variable Größen definierten Materialeigenschaften, Tragwerkseinwirkungen sowie die Abmessungen der einzelnen Tragstrukturelemente<sup>7</sup>. Diese Beziehungen werden mithilfe von mathematischen Regeln<sup>8</sup> definiert. Bei dem in Kapitel 1.4 erläuterten parametrisch-assoziativen Planungssystem werden die Beziehungen zwischen den Parametern ebenfalls als mathematische Regeln beschrieben.

Die mathematischen Regeln können in einem Algorithmus zusammengeführt und sukzessive durchlaufen werden. Dieser Algorithmus muss die in Beziehung stehenden Parameter als Eingabe- und auf der anderen Seite als Ausgabeparameter beinhalten. So können die Eingangsparameter<sup>9</sup> einer Bauteildimensionierung über einen Dimensionierungsalgorithmus, der sowohl mathematische Regeln zur Schnittgrößenmittlung, Spannungsauswertung und Querschnittsermittlung beinhaltet in die Ausgangsparameter, wie Bauteildimensionen überführt werden. Diese Dimensionierungsalgorithmen können sich in ihrer Komplexität unterscheiden. So lässt sich die Dimensionierung eines Zugstabes mittels dreier Gleichungen durchführen und am Ende tritt als Ausgangsparameter der Zugstabsdurchmesser als einziger Parameter auf. Bei der Dimensionierung einer typischen Seilklemme treten hingegen bis zu achtzig Eingangsparameter, wie Reibungskoeffizienten, die Montagetemperatur oder der Klemmbeiwert auf. Der Algorithmus muss mehrere Schleifen und Entscheidungsabfragen durchlaufen und es sind sehr viele Parameter zur Beschreibung der finalen Geometrie der Seilklemme als Ausgabeparameter notwendig. Sind diese Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern einseitig gerichtet, beeinflusst ein Parameter E Parameter A. Parameter A beeinflusst Parameter E hingegen nicht. Nicht nur die Anzahl der in dem Dimensionierungsalgorithmus enthaltenen Algorithmen ist von Bedeutung. Auch die Qualität der Interaktionen ist relevant. So können die in einem Algorithmus verwandten Parameter linear oder nicht linear in Beziehung stehen. Zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern können Zirkelbezüge auftreten.

Zusätzlichen Einfluss auf die Komplexität der Planungsalgorithmen hat auch hier

---

<sup>7</sup> „Tragstrukturelement ist ein Teil einer Tragstruktur, der über Kopplungen (Gelenke u. a.) an andere Tragstrukturelemente angeschlossen ist.“ (Büttner und Hampe 1977, S.10)

<sup>8</sup> „Eine mathematische Regel ist eine Gesetzmäßigkeit, die eine bestimmte Verknüpfung von Begriffen beinhaltet, die in der Regel mit einem Namen versehen und in einer symbolischen Kurzform memoriert wird.“ (Storz 2009, S.42)

<sup>9</sup> Dies sind üblicherweise Geometrie, Material, Einwirkungen und Lagerungsbedingungen.

das dynamische Systemverhalten wie von Schleicher (Schleicher, 2012) beschrieben:

Während der Bauausführung nimmt das Bauwerk unterschiedliche Systemzustände ein, wie z. B. den der Rohbaufertigung oder den Zustand "Gebäudehülle dicht". Daher lässt sich ein Bauwerk als dynamisches System beschreiben, das außerdem ein eher stochastisches als deterministisches Systemverhalten aufweist. Dieses Verhalten ergibt sich aus der bereits zuvor geschilderten und in der Baupraxis häufig auftretenden Situation der Leistungsänderungen oder durch unvorhersehbare Ereignisse während der Auftragsabwicklung, wie z. B. Ablaufstörungen aufgrund extremer Witterungseinflüsse bzw. höherer Gewalt. Hieraus können notwendige Anpassungen im Bauablauf oder unvermeidbare Bauverzögerungen resultieren. (Schleicher 2012, S.16)

Werden Algorithmen im Laufe der Planung verändert, ergänzt, entfernt oder beibehalten diese bereits eine Zeitabhängigkeit, erhöht sich die Komplexität des gesamten Planungssystems. Zirkelbezüge sind typisch für iterative Prozesse und können als Gradmesser für den Fortschritt der Planung verwandt werden. Sind in einem Planungssystem aus Planungswerkzeugen noch unaufgelöste Zirkelbezüge vorhanden ist die Planung noch nicht beendet. Auch hier lässt sich die Komplexität mit Hilfe der unter Abschnitt 3.2 genannten Faktoren in Abbildung 3.5.4 strukturieren.

### 1. Varietät

- a. Parametern können beispielsweise verschiedene Datentypen<sup>10</sup> zugeordnet sein.

### 2. Konnektivität

- a. Das Niveau der Beziehungen zwischen den Planungswerkzeugen wird durch das Niveau der Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung bestimmt.

### 3. Dynamik

- a. Zeitliche Veränderungen von Planungsparametern können durch Veränderungen von Planungsalgorithmen und veränderte Randbedingungen des zu planenden Tragwerks hervorgerufen werden.

---

<sup>10</sup>Datentypen können beispielsweise ganze Zahlen, Gleitkommazahlen oder logische Werte oder einzelnen Zeichen aufnehmen.



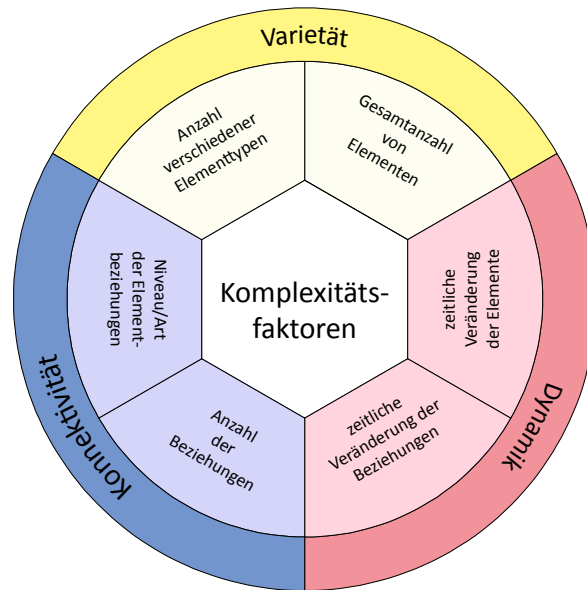


Abbildung 3.5.1: Allgemeine Komplexitätsfaktoren von Systemen; Eigene Darstellung

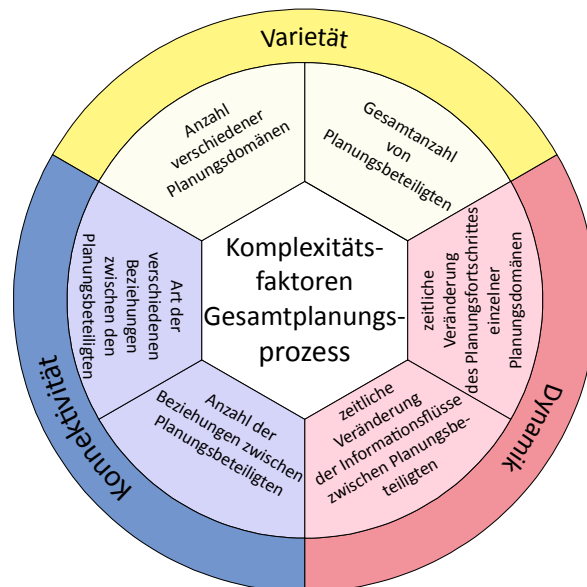


Abbildung 3.5.2: Komplexitätsfaktoren des Gesamtplanungsprozesses; Eigene Darstellung

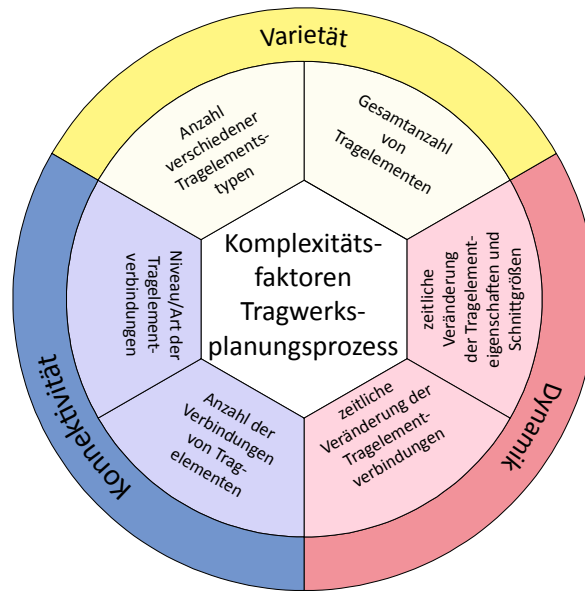


Abbildung 3.5.3: Komplexitätsfaktoren des Tragwerksplanungsprozesses; Eigene Darstellung

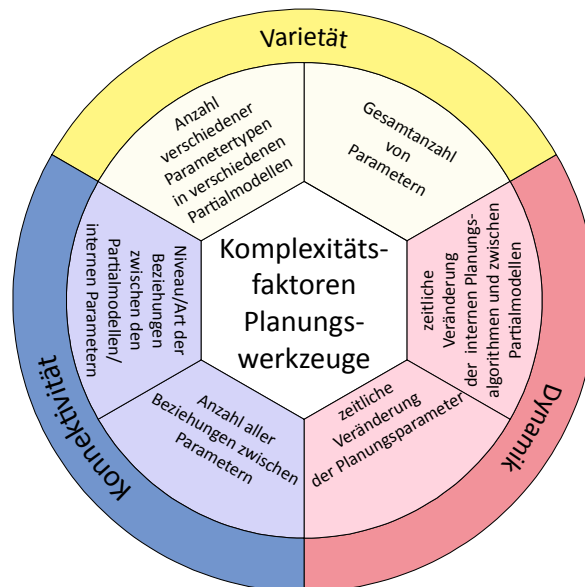


Abbildung 3.5.4: Komplexitätsfaktoren der Planungswerkzeuge; Eigene Darstellung

### 3.6 Korrelation zwischen Komplexitätsebenen

Mögliche Korrelationen der Komplexitätsfaktoren zwischen den Bereichen Gesamtplanungsprozess, Tragwerksplanungsprozess und den Planungswerkzeugen werden in Abbildung 3.6.1 dargestellt. Einige ausgewählte Zusammenhänge werden im Folgenden erläutert.

1. Die Charakteristika<sup>11</sup> eines Tragelements können mithilfe der Planungswerkzeuge durch einzelne Parameter abgebildet werden. Somit ist die Gesamtzahl von Tragelementen direkt mit der Gesamtanzahl der Parameter der Planungswerkzeuge verbunden.
2. Die konstruktiven Verbindungen zwischen Tragelementen müssen bei der Anwendung der Planungswerkzeuge durch Parameterbeziehungen abgebildet werden. So können beispielsweise die Freiheitsgrade benachbarter Tragelementsverbindungen gleich, unabhängig oder über Reibungskoeffizienten gekoppelt sein. Diese Verbindungen zwischen Tragelementen können neben dem Tragwerksmodell oder in einer Volumenmodellierung der Verbindungen repräsentiert werden.
3. Der für die Komplexität der Planungswerkzeuge maßgebenden Einfluss sind die Beziehungen innerhalb des Tragwerks. Somit ist die Komplexität der Planungswerkzeuge direkt an die Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses gekoppelt, da das Tragwerk für dessen Analyse mithilfe der Planungswerkzeuge abgebildet werden muss.
4. Sowohl die Speicherung der Tragelementcharakteristika (siehe A) als auch deren zeitliche Änderungen im Gesamtplanungsprozess müssen mit den Planungswerkzeugen abgebildet werden. Somit besteht eine indirekte Korrelation zwischen der Gesamtanzahl von Tragelementen und deren zeitlicher Änderung als Planungsparameter.

---

<sup>11</sup>Diese Charakteristika sind Material, Dimensionen, räumliche Ausrichtung, interne Zustände, Beziehungen zu anderen Tragelementen etc.

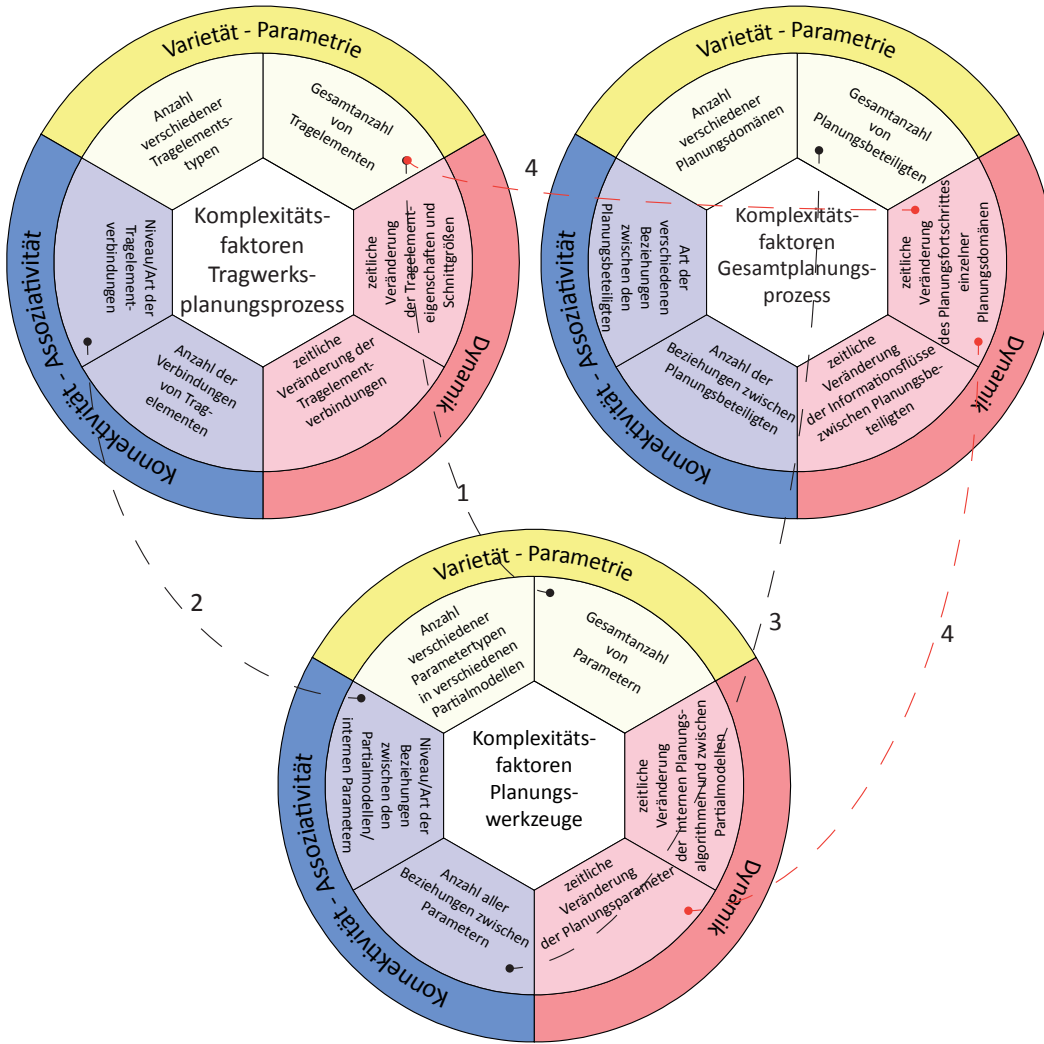


Abbildung 3.6.1: Korrelationen der Komplexitätsfaktoren; Eigene Darstellung

# 4

## Methoden des Komplexitätsmanagements in der Tragwerksplanung

## 4.1 Vorgehen und Grundidee

Nach Darstellung der sich aus der Planungskomplexität ergebenden Problemstellungen in Abschnitt 1.3, der die Komplexität beeinflussenden Charakteristika des Tragwerksplanungsprozesses in Kapitel 2 und einer Beschreibung der verschiedenen Komplexitätsebenen und Komplexitätsfaktoren der Tragwerksplanung in Kapitel 3 werden nun Methoden des Komplexitätsmanagements in der Tragwerksplanung entwickelt. Hier gilt als oberstes Ziel, den in Kapitel 2.3 definierten kognitiven Aufwand so weit als möglich zu reduzieren und anschließend den Bezug zu den Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung herzustellen. Die optimale Positionierung der einzelnen erarbeiteten Methoden im Gesamtplanungsprozess wird anschließend im Kapitel 5 besprochen. Als Ausgangspunkt für den Umgang mit der Komplexität beim Entwurf, der Analyse und Konstruktion von Tragwerken werden die in Kapitel 3 definierten Ebenen der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses, des Tragwerksplanungsprozesses und der Planungswerkzeuge verwandt.

Für die Ebene des Gesamtplanungsprozesses werden Methoden der Graphentheorie angewandt, um auf dem vom Bauwerk zu erfüllenden Funktionen basierende Interaktionen zwischen Planern aufzudecken, zu visualisieren und zu analysieren. Dabei werden den zu erfüllenden Bauwerksfunktionen die jeweils verantwortlichen Fachplaner zugeordnet. Im Anschluss werden die Bauwerksfunktionen mit den Tragwerkelementen in Beziehung gesetzt. Mit Hilfe von Analysemethoden der Graphentheorie werden Fachplaner-Bauwerksfunktion-Tragelement Beziehungen gesamthaft in einem Graphen dargestellt. Dies geschieht so, dass auf die Notwendigkeit zum Austausch von Informationen innerhalb des Planungsprozesses mithilfe von Algorithmen der Graphentheorie geschlossen werden kann.

Auf der Ebene des Tragwerksplanungsprozesses werden im folgenden Schritt auf Grundlage der Lastweiterleitung Interaktionen innerhalb des Tragwerks aufgedeckt auf die planerisch reagiert werden muss. Dies geschieht mithilfe von Methoden des Systems Engineering. Durch Adaption des Vorgehens zum Aufbau von Systemmodellen und der Anwendung der zugehörigen Modellierungssprache SysML werden die Strukturierung und das Verständnis der Interaktionen zwischen den einzelnen Tragelementen deutlich erleichtert. Die erkannten interstrukturellen Interaktionen werden mittels Graphen dargestellt und in einem nächsten Schritt in einer Matrix gespeichert und auf weitere indirekte Interaktionen untersucht.

Die entstandene Matrix der Interaktionen innerhalb der Struktur ist Ausgangspunkt für eine Anforderungsanalyse und den anschließenden Aufbau und die Ver-

knüpfung der einzelnen durchzuführenden Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung. Da dieser Aufbau und die Verknüpfung bei größeren Tragwerken einen enormen Aufwand bedeuten, werden hier wiederum Methoden des Systems Engineering verwandt. Mithilfe von Diagrammen der Modellierungssprache SysML werden die Strukturierung und das Verständnis der Interaktionen zwischen den einzelnen Planungsalgorithmen vereinfacht. Um zusätzliche direkte und indirekte strukturelle Interaktionen auf der Komplexitätsebene des Tragwerks zu erkennen, wird die Tragwerksgeometrie mittels eines generatives Geometriemodells aufgebaut und auf Grundlage der Tragwerksgeometrie ein flexibles statisches System erstellt, das an die Geometrie verknüpft bleibt. Dieses statische System wird über Geometrieparameter gesteuert, die außer der Tragwerksgeometrie auch die Dimensionen der einzelnen Tragelemente beschreiben. Diesen Tragwerkselementen werden folgend Einwirkungen sowie Materialeigenschaften zugeordnet, deren Größen veränderlich definiert werden. Mithilfe der Einwirkungen, Materialeigenschaften, den definierten Tragelementen und Verbindungen des Tragsystems sowie Dimensionierungsalgorithmen werden die eingangs geschätzten Tragelementdimensionen bestätigt bzw. angepasst. Durch die durchgängige flexible Modellierung ist die Möglichkeit einer parametrischen Sensitivitätsanalyse und parametrischen Optimierung<sup>1</sup> gegeben. Die zu analysierenden Sensitivitäten dabei entsprechen den tragwerksinternen strukturellen Interaktionen. Dabei werden gezielt Steuerungsparameter der Geometrie verändert und mithilfe eines Koeffizienten der deskriptiven Statistik analysiert.

Viele der zu erläuternden Methoden und Algorithmen benötigen zwingend einen Bezug zu einer realen oder realitätsnahen Planungsaufgabe, um ihren Stellenwert nachfolgend einschätzen zu können. Aus diesem Grund werden im nächsten Teilabschnitt die Kriterien für die Wahl einer Beispielstruktur begründet und die Beispielstruktur beschrieben. Den Abschluss des Kapitels bildet die Verallgemeinerung der aufgezeigten Methoden in Abschnitt 4.10 als Vorbereitung für die Anwendung auf ein reales Projekt in Kapitel 6.

---

<sup>1</sup>„Man möchte in Abhängigkeit der Lösung von gewissen Koeffizienten die Zielfunktion und/oder deren Nebenbedingungen studieren. Dies bezeichnet man als *Sensitivitätsanalyse*. Wenn man hierfür in die Zielfunktion und/oder Nebenbedingungen Parameter einführt, so spricht man von einer *parametrischen Sensitivitätsanalyse* oder *parametrischer Optimierung*.“ (Benker 2003, S.135)

## 4.2 Beispielprojekt

### 4.2.1 Kriterien der Wahl des Tragwerks

Bei der Suche nach einem geeigneten Planungsobjekt werden folgende Kriterien definiert:

1. Die Planungsaufgabe soll sehr nahe an einer realen Planungsaufgabe angelehnt sein, um relevante Interaktionen in die Betrachtungen aufzunehmen.
2. Die zu analysierende Struktur soll bisher noch keiner umfangreichen, baukonstruktiven und tragwerksplanerischen Betrachtung unterzogen worden sein, um eine möglichst objektive Beurteilung zu ermöglichen.
3. Alle wesentlichen Bestandteile, Zusammenhänge und Randbedingungen sollen durch den dargestellten Planungsprozess abgebildet werden.
4. Um einen zielgerichteten Vergleich mit traditionellen Planungsmethoden zu ermöglichen, soll die Komplexität der zu planenden Struktur auf das nötige Maß reduziert sein.
5. Im Rahmen der beispielhaften Planung der Struktur sollen die Methoden des auf parametrischen Betrachtungen beruhenden Komplexitätsmanagements so umfangreich wie möglich erläutert werden.

### 4.2.2 Gewähltes Projekt

Bei der gewählten Struktur zur Erläuterung der entwickelten Konzepte handelt es sich um das quadratische  $50 \times 50$  Projekt (siehe Bild 4.2.1 ) von Mies van der Rohe. Das auch als *Core House* (Colombo, 2012, vgl. S.245) bekannte Projekt wurde von Mies van der Rohe in den Jahren 1951-1952 zusammen mit Myron Goldsmith und Studenten des Illinois Institut of Technology (IT) entworfen. Die Struktur umhüllt einen stützenfreien quadratischen Raum mit Glas. Nur vier Stützen tragen das Dach und leiten sämtliche Fassadenlasten in den Untergrund. In der Ursprungsidee war das Haus für die Massenproduktion unter absoluter Minimierung der Elemente gedacht und sollte an verschiedene Lebenssituationen und Standorte anpassbar sein. Zur Erreichung der Ziele sollte das Haus in den Größen 40 ft x 40 ft, 50 ft x 50 ft



und 60 ft x 60 ft (12.9 m, 15.24 m, 18.28m) gebaut werden können. Bei sämtlichen Innenwänden war angedacht, Leichtbauwände zu erstellen, die nicht zur Lastabtragung herangezogen werden. Die Position der Stützen wurde bewusst nicht an der üblichen Position, den Ecken, gewählt um dem Dach eine schwebende Erscheinung zu geben, und mit dem eingehüllten Raum eine räumliche Kontinuität zu erzeugen. Mies van der Rohe hinterließ neunzehn Skizzen und etwa dreißig technische Zeichnungen zu dem Projekt. Bei dem Entwurf wurden weitgehend externe Randbedingungen vernachlässigt. Da es für das Projekt keinen konkreten Kunden gab, diente es als experimentelles Projekt, das nicht rechnerisch analysiert wurde, aber als Ursprung vieler gebauter Nachfolgeprojekte wie der Neuen Berliner Nationalgalerie (siehe Bild 4.2.3) gelten kann. Bei der Realisierung dieser Nachfolgeprojekte zeigten sich besonders die Kragarme als große Herausforderung, sodass teilweise zusätzliche Stützen eingeführt wurden. Das Ziel der absoluten Stützenfreiheit des Innenraums wurde aber auch bei diesen Projekten erreicht.

Da das Projekt weder gebaut noch aus baukonstruktiver Sicht tiefer gehend analysiert wurde, aber wie an Nachfolgeprojekten gezeigt wurde, umsetzbar ist, werden die unter Kapitel 4.2.1 aufgeführten Kriterien 1 und 2 erfüllt. Im Gegensatz zu dem Entwurf von Mies van der Rohe sollen in dieser Analyse sowohl statische, bauphysikalische und konstruktive als auch herstellungs- und montagetechnische Belange sowie Fragen der Gründung berücksichtigt werden. Somit kann das Kriterium 3 mit der Planung des Projektes erfüllt werden. Für die Bodenstruktur wird hier ebenfalls eine Trägerroststruktur gewählt, um auch die Bodenhöhe flexibel zu halten.

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, richtet sich die Komplexität eines Planungsprozesses in großem Maße nach der Quantität und Qualität sowie der Korrelationen der Interaktionen zwischen den beinhalteten Teilprozessen. Aus statischer Sicht sind diese Interaktionen Kraft- und Verformungsbeziehungen zwischen verschiedenen Tragelementen. Bei konstruktiven Belangen zeigen sich Zusammenhänge zwischen der Detaillierung von Elementverbindungen und der strukturellen Steifigkeit sowie Kraftexzentrizitäten. Ebenso hat die möglichst homogene Gründung der Struktur einen direkten Einfluss auf die Lastabtragung innerhalb der Struktur. Durch die geringe Anzahl der Tragelemente des Core House ist die Quantität der Interaktionen vergleichsweise gering, jedoch sind sowohl strukturelle als auch planungsprozessbedingte Interaktionen zu erwarten. Somit kann Kriterium 4 erfüllt werden.

Da die Planung sukzessive in Detaillierungsstufen mit zunehmendem Komplexitätsgrad erfolgt, lassen sich verschiedenartige Methoden des Komplexitätsmanagements mithilfe des Beispielprojekts untersuchen. Die verschiedenen Varianten des Core

House von Mies van der Rohe (siehe Bild 4.2.2) zeigen, dass der Originalentwurf als flexibler Entwurf mit veränderlichen Parametern angedacht war. Neben der Breite und Tiefe des Entwurfs waren auch eine diagonale Anordnung des Trägerrosts und verschiedene Stützenanzahlen und -positionen ursprüngliche Überlegungen. Durch den parametrischen Charakter wird mit der Untersuchung der Core House Struktur auch das Kriterium 5 erfüllt.



Abbildung 4.2.1: Core House, Mies van der Rohe (Chicago History Museum Research Center, 2016a)



Abbildung 4.2.2: Core House Variante, Mies van der Rohe (Chicago History Museum Research Center, 2016b)



Abbildung 4.2.3: Nationalgalerie Berlin, Mies van der Rohe (Wikipedia, 2016)

## 4.3 Beherrschung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses

### 4.3.1 Anforderungen an die Komplexitätsbeherrschung des Gesamtplanungsprozesses

Malik (Malik, 2002, vgl. S.38) definiert Komplexitätsbeherrschung als Herstellen einer rational geltenden Ordnung von Elementen und korrespondierenden Prozessen bzw. Abläufen unter Berücksichtigung einer vordefinierten Zwecksetzung. Übersetzt in die Tragwerksplanung bedeutet dies, für ein Projekt die Bauwerksstruktur hierarchisch zu ordnen, den Zweck und die Ziele des zu planenden Gebäudes zu definieren und in Teilziele zu unterteilen. Als Teilziele bieten sich die konstruktiv umzusetzenden Funktionalitäten des zu planenden Hochbauprojekts an. Anschließend können den definierten Funktionalitäten Elemente des Tragsystems zugeordnet werden. Jede dieser Funktionalität-Bauelements Zuordnungen wird durch einen Teilplanungspro-

zess in der jeweiligen Domäne umgesetzt werden, der das Erreichen der Funktionalität gewährleistet. Die Tragelemente werden im Laufe der Planung weiter untergliedern und die zugeordneten Funktionalitäten konkretisiert.

Die von Malik (Malik, 2002) erwähnte rational geltende Ordnung wird durch das hierarchische Strukturieren und Zuordnen der Teilelemente und Teilprozesse in ein geordnetes Gesamtgebilde geschaffen.

Ludwig (Ludwig, 2005) definiert Komplexitätsbeherrschung wie folgt:

Die Komplexitätsbeherrschung steht für das Vermögen, komplexe Systeme unter Kontrolle zu bringen. Inakzeptable Zustände sollen ausgeschaltet, akzeptable hervorgebracht und bewahrt werden. (Ludwig 2005, S. 123)

Um akzeptable Zustände hervorzubringen, zu bewahren und inakzeptable auszuschalten, werden diese gesucht und bewertet. Auf Basis der Definitionen von Malik (Malik, 2002) und Ludwig (Ludwig, 2005) lautet die Definition des Vorgehens der Komplexitätsbeherrschung mit dem Fokus auf der Tragwerksplanung wie folgt:

Zur Komplexitätsbeherrschung des Gesamtplanungsprozesses muss zunächst der Zweck des Bauwerks definiert und in Teilfunktionen präzisiert werden. Aufbauend auf der Fokusfunktion der Tragfunktion muss ein Tragwerkssystem gefunden, hierarchisch strukturiert und in Tragelemente zerlegt werden. In einem weiteren Schritt müssen Überlegungen angestellt werden, inwieweit die gewählten Tragelemente weitere Nicht-Tragwerk-Bezogene Funktionen erfüllen müssen. Werden nun diesen Funktionen die verschiedenen notwendigen Fachplaner zugeordnet, ist diese neu erstellte rationale Zuordnung der Ausgangspunkt für das weitere Erkennen und Bewerten der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses. Ein elementarer Punkt hierbei ist die nachvollziehbare Dokumentation sowohl der Funktionen, der hierarchisierten Tragstruktur als auch der Zuordnung von Funktionen und Planungszuständigkeiten. Die Dokumentation wird dabei so ausgelegt, dass nachfolgende Prinzipien des Komplexitätsmanagements effizient darauf zugreifen.

Bereits in dieser Phase wird davon ausgegangen, dass ein Erkenntnisgewinn auf der Ebene der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses (siehe Abschnitt 3.3) erreicht wird. Durch Berücksichtigung des prinzipiellen Vorgehens wird es im Folgenden möglich den Gesamtplanungsprozess, wie von Ludwig (Ludwig, 2005) definiert, unter Kontrolle zu bringen und inakzeptable, den gewünschten Funktionalitäten entgegenlaufende, Interaktionen auszuschalten. Es ist offenkundig, dass in dieser ers-

ten Strukturierungsphase nur Aussagen über direkte Interaktionen erfasst werden. Werden Tragelementen mehrere Funktionen und damit auch meist unterschiedliche Fachplaner zugeordnet, wird unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 definierten Komplexitätsfaktoren von einer Erhöhung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses ausgegangen. Die Wahrscheinlichkeit für nicht-offensichtliche indirekte Abhängigkeiten oder Zirkelbezüge steigt parallel an. Um diese zu detektieren und zu analysieren bedarf es weiterer Methoden die später vorgeschlagen werden.

#### 4.3.2 Teilaufgaben zur Beherrschung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses

Anhand von Definition 4.3.1 werden Kernaufgaben der Komplexitätsbeherrschung des Gesamtplanungsprozesses herausgearbeitet.

1. Identifikation der Bauwerksfunktionen - Zweckdefinition Bauwerk
2. Zuordnung der Planer zu den Funktionen
3. Definition und Präzisierung des Tragsystems
4. Definieren von Tragelementen und Wahl des statischen Systems
5. Zuweisen von Funktionen zu Tragelementen
6. Darstellung der Zuordnung von Fachplanern zu Tragelementen
7. Erste Rückschlüsse auf kommunikative Lücken und Auswirkungen auf den Planungsprozess

Die zur Abarbeitung der Aufgaben verwendeten Methoden und verwandten Planungswerkzeuge ermöglichen und unterstützen diese Tätigkeiten.

### 4.4 Methodische Umsetzung zur Beherrschung des Gesamtplanungsprozesses

Die im vorangehenden Abschnitt aufgeführten Teilaufgaben werden sukzessive durchlaufen. Kennzeichnend hierbei ist, dass noch keinerlei rechnerische Analyse des Tragwerks notwendig ist. Die durchzuführenden Teilschritte können auf Grundlagen ers-

ter Projektspezifikationen durchgeführt werden und stellen den Einstieg in die Komplexitätskontrolle des Gesamtplanungsprozesses dar. Die Darstellung der Schritte findet wo notwendig am Beispiel des 50 x 50 Projekt von Mies van der Rohe statt.

#### 4.4.1 Identifikation der Bauwerksfunktionen

Ausgehend von den baulichen Hauptfunktionen des Bauwerks, Tragen, Einhüllen, Ver- und Entsorgen, die die Nutzbarkeit des Gebäudes gewährleisten sollen (Moro et al., 2009, vgl. S.342), werden im Folgenden die notwendigen Unterfunktionen dargestellt. Für die Tragwerksplanung steht die Hauptfunktion des Tragens im Mittelpunkt. Die Tragfunktion untergliedert sich in die vier Unterfunktionen (Büttner und Hampe, 1977, vgl. S.11)

1. Kräfte und andere Wirkungen aufnehmen,
2. weiterzuleiten,
3. umzulenken und
4. abzugeben.

Die beiden anderen Hauptfunktionen Einhüllen sowie Ver- und Entsorgen interagieren mit der Tragfunktion. Die Funktion des Tragens wird bei Moro (Moro et al., 2009, S.355) drei Hierarchieebenen des Tragwerks, dem Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk zugeordnet. Tertiärtragwerkselemente leiten die angreifenden Einwirkungen, wie Eigengewicht, Erdbeben-, Schnee- oder Windlasten ab. Wird ein Tertiärtragelement zerstört, stellt dies keine Gefahr für die Standsicherheit des Gesamttragwerks dar. Sekundärtragwerkselemente nehmen neben den direkt auf sie wirkenden Einwirkungen auch die Einwirkungen der mit ihnen verbundenen Tertiärtragelemente auf und leiten diese an die Primärtragelemente weiter. Ein Versagen der Sekundärelemente hat in der Regel keinen Einfluss auf die Standfestigkeit der Primärtragwerkselemente. Fällt ein Primärtragwerkselement aus, das bedeutet es erfüllt die ihm zugeordneten Unterfunktionen der Aufnahme seines Eigengewichts, der Weiterleitung und Umlenkung der Lasten aus den Sekundärtragwerkselementen sowie die Lastabgabe in den Baugrund nicht mehr, ist ein Gesamteinsturz des Bauwerks die Folge (Schittich et al., 2006, vgl. S. 104). Alle Tragelemente müssen Brandlasten widerstehen.

Im Folgenden werden die Begriffe Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk stellvertretend für die ihnen jeweils zugeordneten vier Unterfunktionen der Tragfunktion verwandt. Es sind von allen Tragelementen der drei Hierarchieebenen alle vier Unterfunktionen des Tragens zu leisten. Dem wird in Abbildung 4.4.1 durch jeweils vier integrierte Kreise, die den Unterfunktionen des Tragens entsprechen, Rechnung getragen. Der blaue Rand symbolisiert, dass die Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerke ebenfalls hierarchische Oberbegriffe der in Abschnitt 4.4.4 zuzuordnenden Tragwerkselemente sind, die in Abschnitt 4.4.4 jeweils als blaue Knoten symbolisiert werden.

Dieses Vorgehen wird in Abbildung 4.4.1 aus Gründen der besseren Darstellbarkeit gewählt. In Abbildung 4.4.1 werden zusätzlich zu den durch die Teiltragsysteme Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk repräsentierten Unterfunktionen des Tragens, die den Hauptfunktionen Einhüllen sowie Ver- und Entsorgen zugeordnete Unterfunktionen dargestellt. Die Nutzung des Bauwerks wird als roter Knoten ebenfalls visualisiert.

Die Nutzung bei Bauwerken des Hochbaus zeigt eine enorme Vielfalt. Hochbauten lassen sich in mehrere Kategorien wie beispielsweise Gebäude für Lehre, Verwaltungsbauten, Wohnbauten, Sportstätten oder Industriegebäude mit ganz individuellen Nutzungen unterteilen. Aus diesem Grund werden die denkbaren individuellen Nutzungen in Darstellung 4.4.1 nicht explizit wiedergegeben. Die Gesamtheit aller möglichen Nutzungsarten wird als ein durch seine Größe dominanter Kreis dargestellt, der als Auslöser des Bauvorhabens den Unterfunktionen des Bauwerks übergeordnet ist. Die Darstellung der Unterfunktionen erfolgt ohne Priorisierung, da sich auf Grund des auf Seite 16 erwähnten Unikatcharakters von Bauwerken die Gewichtung der zu erfüllenden Funktionen bei jedem Bauwerk stark unterscheiden kann. Des Weiteren können bei einzelnen Bauvorhaben weitere Funktionen zu erfüllen sein oder Funktionen entfallen komplett. Die Auswahl der gezeigten Unterfunktionen erfolgt auf Grundlage der von Moro (Moro et al., 2009, vgl. S. 347) definierten Grund- und Teilfunktionen einer Gebäudestruktur. Die Anzahl der tatsächlichen in der Planung des gesamten Bauwerks benötigten Fachplaner hat, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, einen signifikanten Einfluss auf die Komplexität des Planungsprozesses. Für die auf das Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk aufgeteilten Hauptfunktionen des Tragens ist jeweils ein Tragwerksplanungsbüro zuständig. Die Anzahl der anderen Fachplaner ist direkt an die verschiedenen zu erfüllenden Unterfunktionen des Bauwerks gekoppelt und diese erfordern in der Regel individuelle Planer für beispielsweise natürliche Belüftung, thermische Konditionierung oder künstliche

Beleuchtung. Aufgrund dieser Tatsache werden die Unterfunktionen der Hauptfunktionen Einhüllen, Ver- und Entsorgen detailliert in Abbildung 4.4.1 dargestellt. Der Einfluss der Unterfunktionen auf das zu planende Tragwerk ist bei kleineren Projekten oft offensichtlich. Bei umfangreichen Projekten nimmt die direkte Ablesbarkeit der Einflüsse stark ab und besonders die indirekten Einflüsse auf Tragwerkelemente und Zirkelbezüge zwischen den Unterfunktionen müssen weiter analysiert werden.

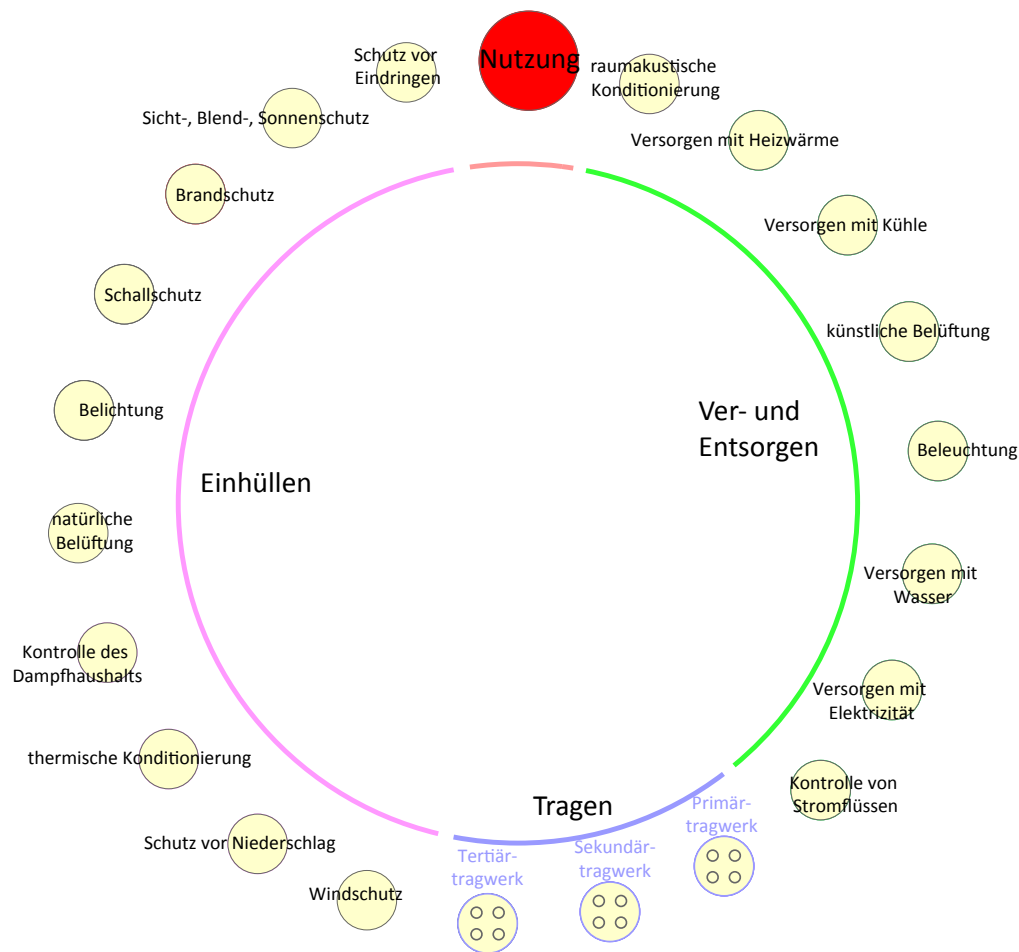


Abbildung 4.4.1: Beispielhafte Verortung des Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerks im Zusammenhang mit den Hauptfunktionen und der Nutzung eines Bauwerks; Eigene Darstellung

Entscheidend bei der Planung von Tragwerken ist es, dass diese Funktionen zu Beginn einer Planung fixiert und dokumentiert werden. Die Nutzung des Bauwerks, die Unterfunktionen der Hauptfunktionen Einhüllen, Ver- und Entsorgen sowie das Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerks als Stellvertreter der ihnen zugeordneten



vier Unterfunktionen der Tragfunktion werden in Abbildung als Kreise dargestellt. Diese Kreise werden im weiteren Vorgehen als Knoten entsprechend der Graphentheorie interpretiert. Diese Knoten werden kreisförmig angeordnet, um ihnen im nächsten Abschnitt durch Integration der Fachplaner konkrete Verantwortliche zuzuweisen.

#### 4.4.2 Zuweisen von Verantwortlichkeiten der Projektbeteiligten zu den Funktionalitäten des Bauwerks

Den im vorherigen Abschnitt definierten Funktionen werden nun den jeweiligen Planern zugeordnet. Hierfür werden die in der HOAI definierten Leistungsbilder der unterschiedlichen Planer als Ausgangspunkt verwendet.

Für die Visualisierung der Zuordnung von Planer und Funktionen wird der Graph 4.4.1 weiterentwickelt, wobei die Kreise welche die dem Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk zugeordneten Funktionen repräsentieren nicht mehr dargestellt werden. Die Zuordnungen werden hierbei als Kanten abgebildet. Diese Zuordnungen sollten so früh als möglich innerhalb eines Projektes definiert, permanent aktualisiert und kommuniziert werden. Durch die Verwendung von Werkzeugen zur Generierung und Veränderung von Graphen-Darstellungen<sup>2</sup> ist es möglich, diese Zuordnungen im Laufe der Planung zu ergänzen, aufzulösen oder deren Gewichtung zu verändern. Des Weiteren entsteht die Möglichkeit, einzelne Planer genauer zu spezifizieren oder auch in Sub-Planer aufzuteilen. So ist es durchaus sinnvoll die Planung der Haustechnik in technische Gebäudeausrüstung, Klima, Sanitär und Energie in Abhängigkeit der Gebäudekomplexität aufzuteilen. Darstellung 4.4.2 zeigt für das Beispielprojekt die Gesamtzuordnung der Projektbeteiligten zu ihren Funktionsverantwortlichkeiten. Jede Verbindung wird hierbei mit einem Verb (plant, koordiniert, überprüft, definiert, präzisiert) näher beschrieben.

---

<sup>2</sup>In diesem Fall wird Gephi (siehe Anhang) verwendet.

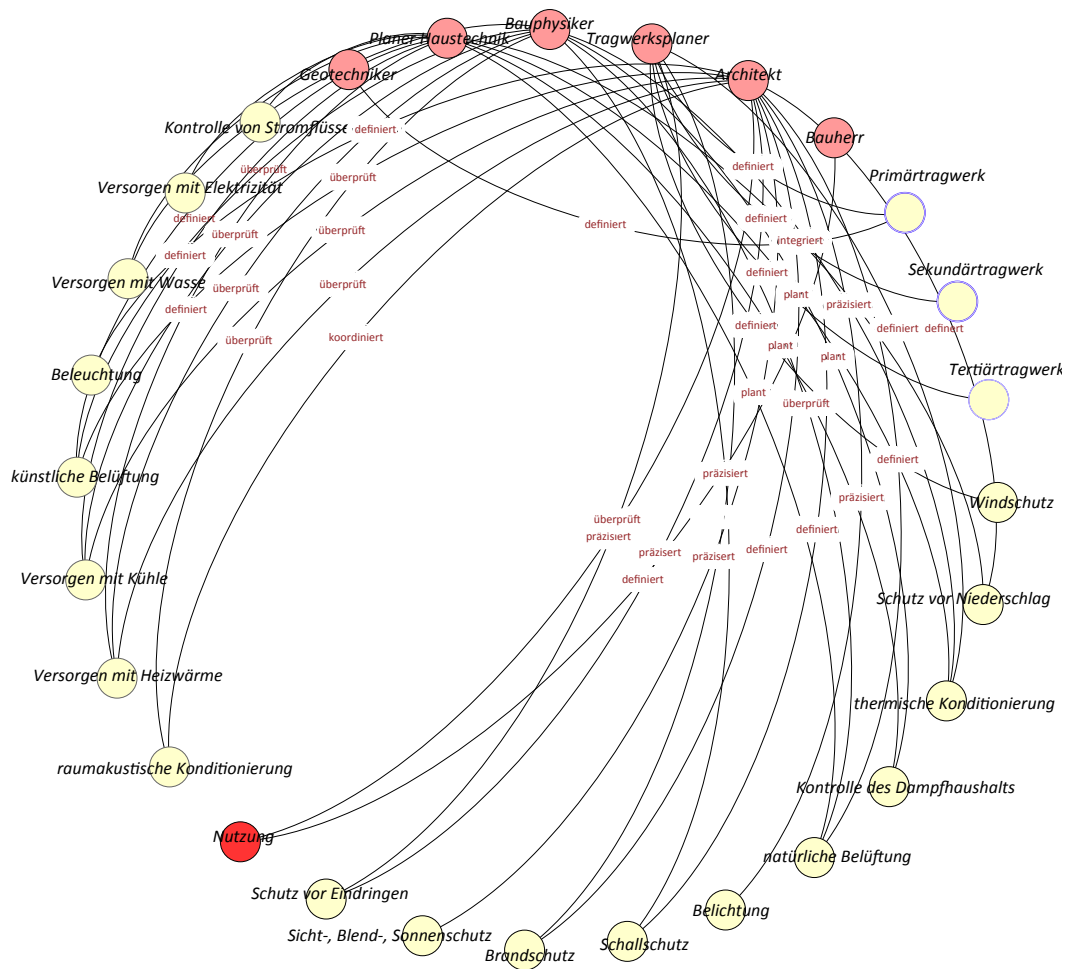


Abbildung 4.4.2: Zuordnung der Verantwortlichkeiten zu Projektbeteiligten; Eigene Darstellung

Bereits in dieser Darstellung fällt es schwer, die Zuordnungen zu lesen. Es bietet sich an, gezielt die Beziehungen einzelner Planer optisch hervorzuheben und die anderen Beziehungen unterzuordnen. Dadurch wird, wie eingangs gefordert, der kognitive Aufwand für das Erkennen von Abhängigkeiten reduziert. In Abbildung 4.4.3 wird die Verantwortlichkeit des Architekten für den Sichtschutz, Blendschutz und Sonnenschutz herausgelöst dargestellt. Abbildung 4.4.4 zeigt alle direkten Funktionsverantwortlichkeiten des Tragwerksplaners.

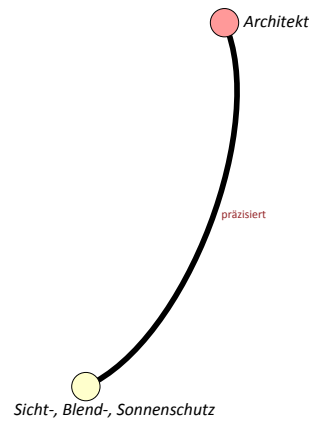


Abbildung 4.4.3: Einzelzuordnung Verantwortlichkeit Sicht-, Blend- und Sonnenschutz zum Architekten; Eigene Darstellung

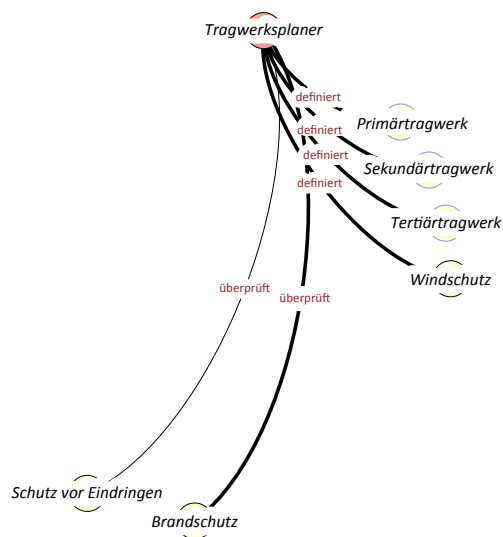


Abbildung 4.4.4: Verantwortlichkeiten des Tragwerksplaners; Eigene Darstellung

#### 4.4.3 Definition und Präzisierung des Tragsystems

In diesem Schritt wird zum ersten Mal das Tragwerk selbst in die Komplexitätskontrolle einbezogen. Hierbei wird eine Grobstrukturierung vorgenommen. Es gilt dabei wesentliche Elemente des Tragwerks zu spezifizieren und erste Eigenschaften wie

beispielsweise Materialien und Schätzungen über die Dimensionen durchzuführen. Diese Grobstrukturierung und Positionierung sollte während der Konzeptionierung des Tragwerks erfolgen. Abbildung 4.4.5 zeigt am Beispiel des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe eine solche Grobstrukturierung.

Die Struktur wird entsprechend der Funktionalität in Primärtragsystem (blau), Sekundärtragsystem (gelb), Tertiärtragsystem (rot), Lagerung des Tragsystems (grau) eingeordnet. Mit Ausnahme der Lagerung (Beton) und des Fassadenelements (Glas) wird für das gesamte zu betrachtende Tragwerk von Stahl ausgegangen.

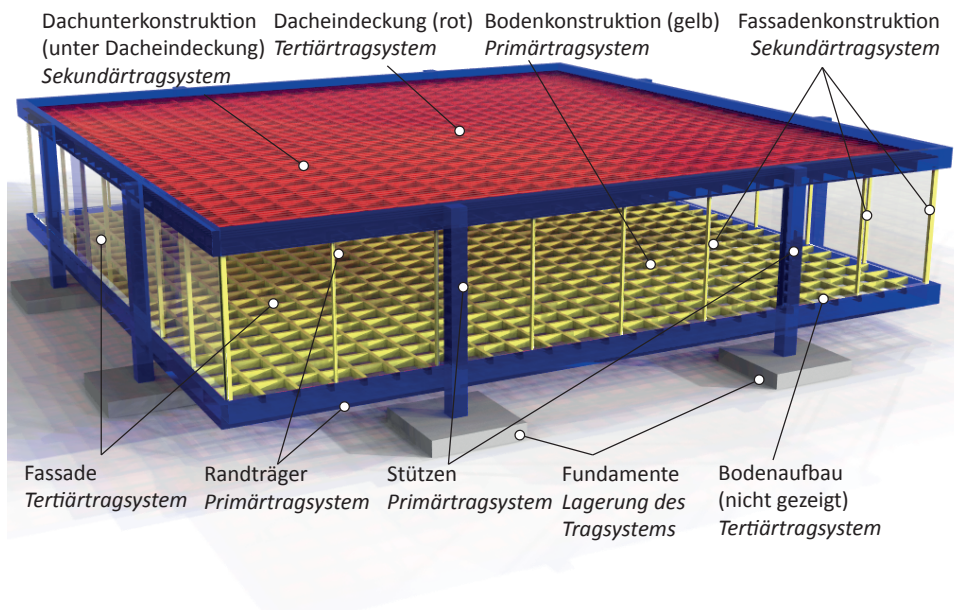


Abbildung 4.4.5: Grobstrukturierung des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe; Eigene Darstellung

#### 4.4.4 Definieren von Tragelementen und Wahl des statischen Systems

Nach einer weiteren Präzisierung des Tragwerks wird es möglich einzelne Tragelemente zu identifizieren. Diese nächste Stufe der Tragwerksdarstellung findet sich in Abbildung 4.4.6. Dabei werden die Tragsysteme durch die Schwerachsen der geschätzten Dimensionen der Tragelemente repräsentiert. Diese Schätzungen können auf Erfahrung, aber auch Analysen vergleichbarer Projekte beruhen und sind Ausgangspunkt für eine spätere erste statische Berechnung. Im nächsten Schritt wird das statische System definiert. Das bedeutet im Einzelnen sowohl die Definition von

Tragelementen, Lagerungsbedingungen, Freiheitsgraden von Verbindungen als auch die Definition relevanter Einwirkungen in ihrer Art, Richtung und Größe. Für einige der Hauptpositionen werden hier bereits einzelne typische Elemente definiert.

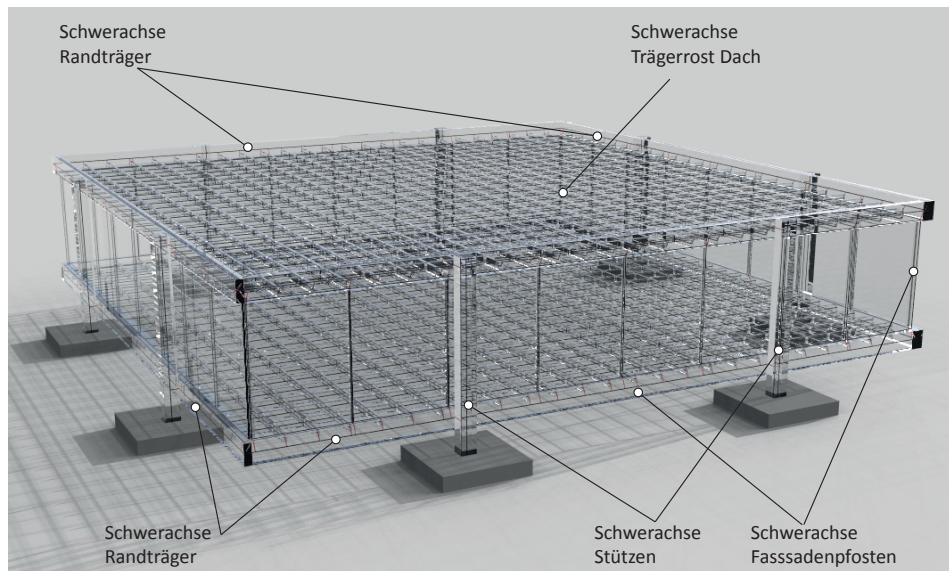


Abbildung 4.4.6: Schwerachsen der Haupttragelemente am Beispiel des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe; Eigene Darstellung

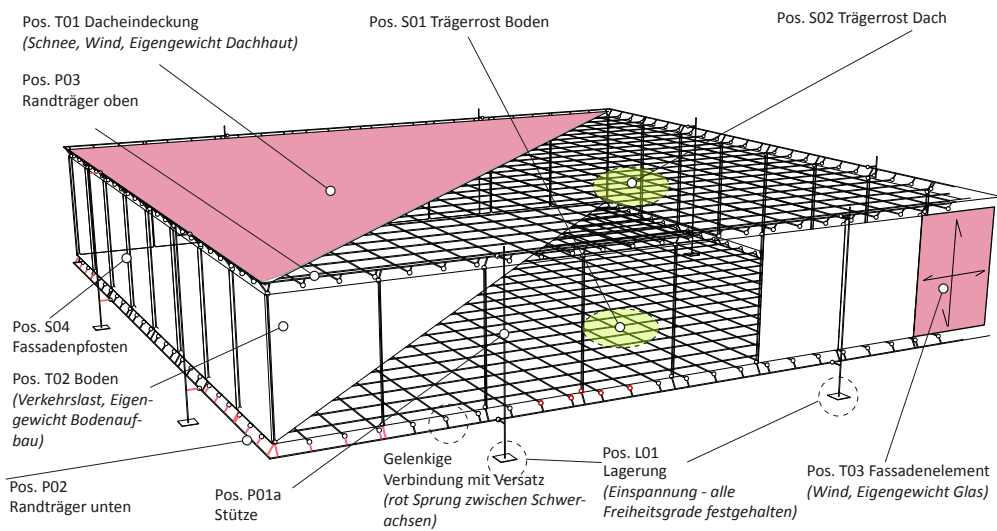


Abbildung 4.4.7: Positionen des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe; Eigene Darstellung

#### 4.4.5 Zuweisen von Funktionen zu Tragelementen

Für die Zuweisung von Funktionen werden den einzelnen Tragelementen mithilfe von Kanten in Abbildung 4.4.8 die Funktionen des Bauwerks zugeordnet, die neben der Tragfunktion bereitgestellt werden. Die Art der Funktionsgewährleistung wird durch die Beschriftung der jeweiligen Funktionszuordnung angegeben.

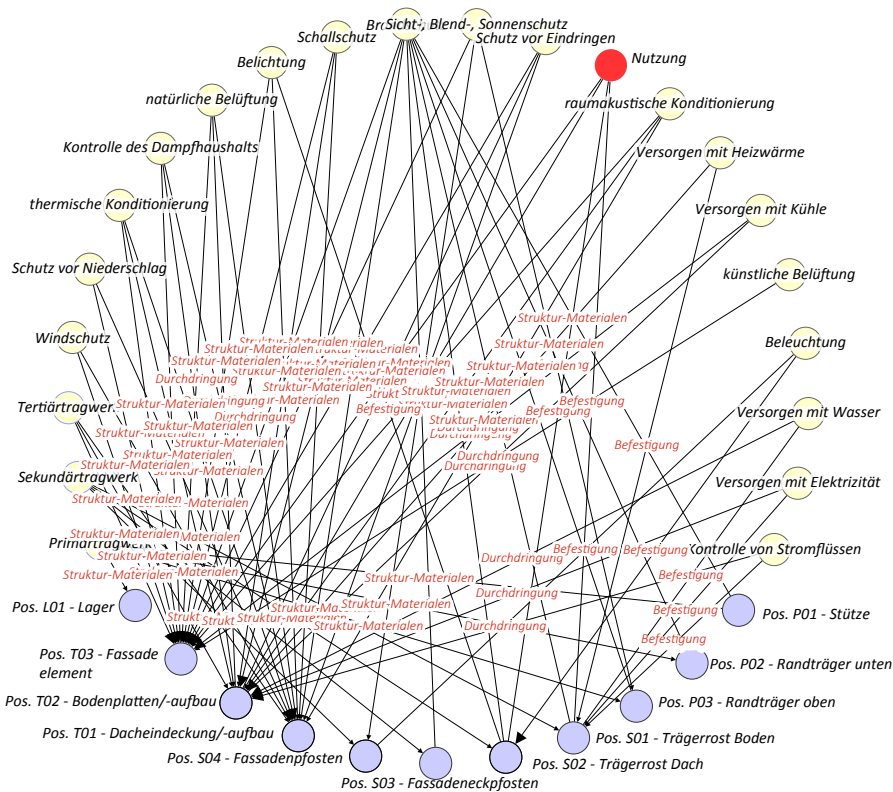


Abbildung 4.4.8: Zuordnung Funktionen-Tragelemente; Eigene Darstellung

Hierbei werden Substantive gewählt, die einen Hinweis geben, welcher Art die Funktionszuweisung ist. Dieser Hinweis hat nicht den Anspruch großer Präzision, sondern dient dem Aufdecken von notwendigem Informationsaustausch. Um das Lesen einzelner Relationen zu erleichtern, werden in Abbildung 4.4.9 nur für das Bauelement T02 Bodenaufbau die Funktionsbeziehungen dargestellt. Hierbei werden die einzelnen Beziehungen nach folgendem Schema gewichtet und visualisiert:

1. Stärke 0: Keine Kante bedeutet keinerlei Zuordnung,
2. Stärke 1: entspricht einer untergeordneten,

3. Stärke 5: einer normalen Beziehung und
4. Stärke 10: einer dominanten Funktionszuordnung.

In Darstellung 4.4.10 werden der Funktion Sicht- Blend- Sonnenschutz die Trag-  
elemente zugeordnet. Auch hier werden die Beziehungsgewichtungen sowie eine Be-  
schreibung der Interaktion gegeben.

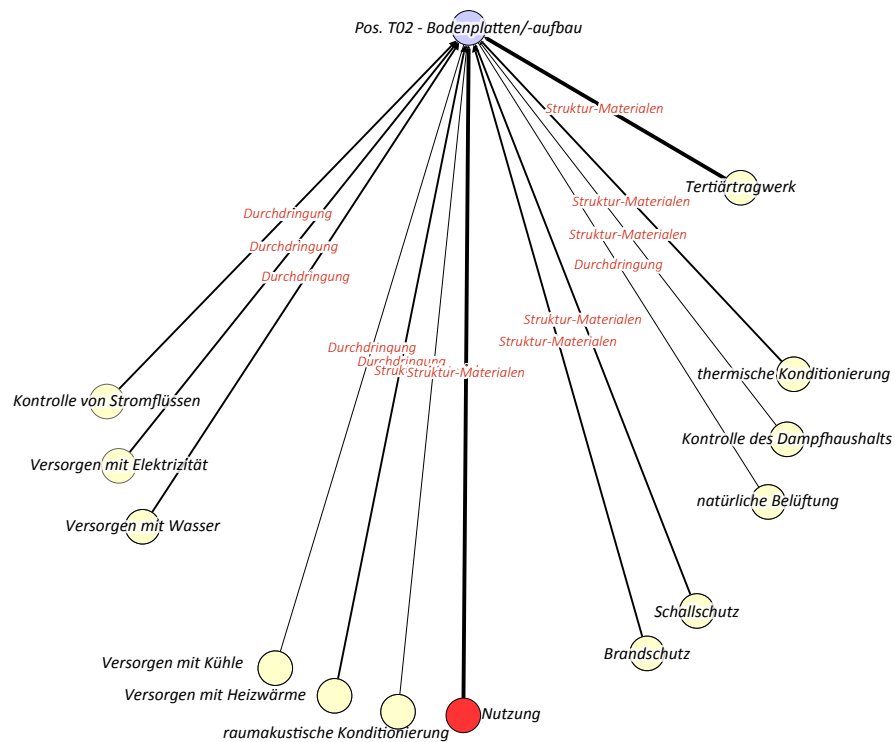


Abbildung 4.4.9: Zuordnung Funktionsbeziehung Pos T02 Boden; Eigene Darstellung

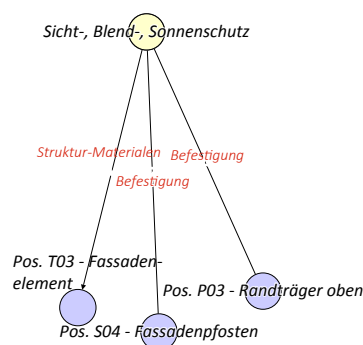


Abbildung 4.4.10: Zuordnung Funktionsbeziehungen Sicht- Blend- Sonnenschutz; Eigene Darstellung

## 4.4.6 Darstellung der Zuordnung von Fachplanern zu Tragelementen

Die Zusammenführung der Zuordnungen von Bauwerksfunktionen zu Tragelementen und Planungsbeteiligten wird in Abbildung 4.4.11 aufgezeigt. Bereits mit diesem Graphen ist es möglich, durch uninformierte Suchalgorithmen<sup>3</sup> Zusammenhänge zwischen Planern und Tragelementen aufzudecken.

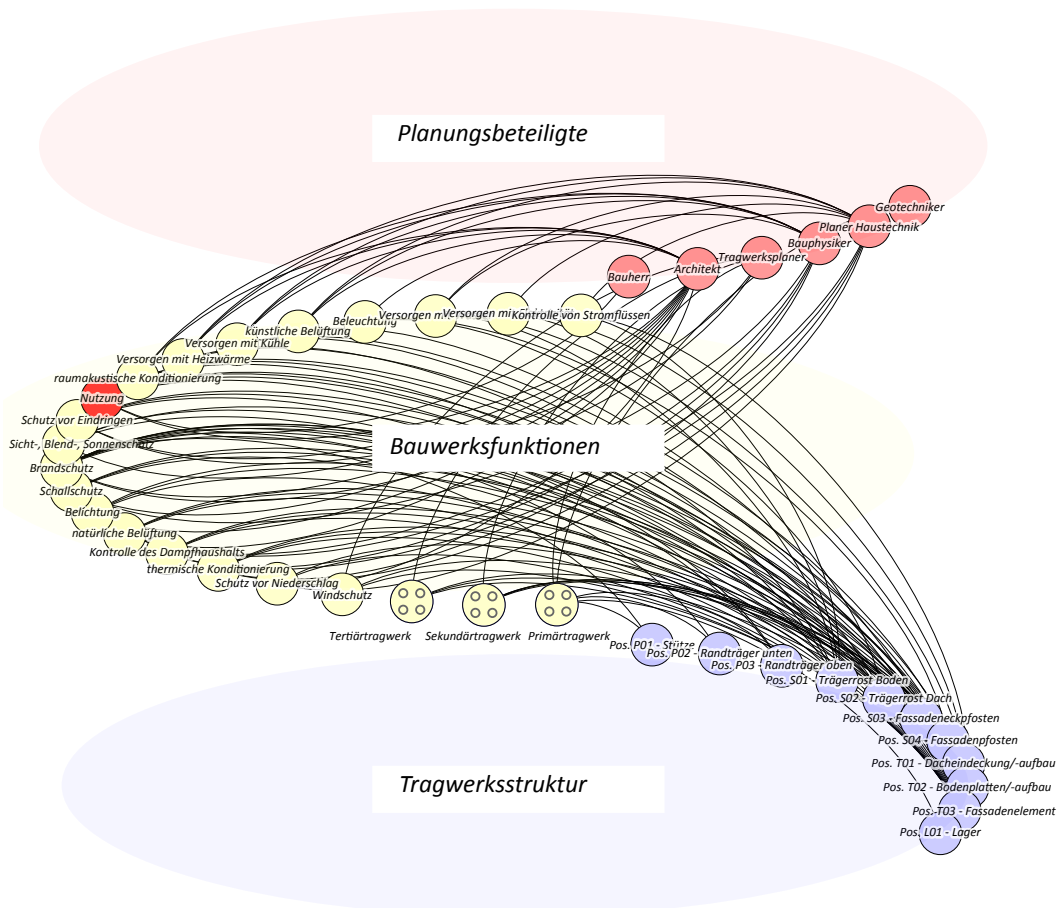


Abbildung 4.4.11: Überblick Zusammenhänge Planungsbeteiligte-Bauwerksfunktionen-Tragwerksstruktur; Eigene Darstellung

Grundlage dieser Abfrage sind die in der Graphentheorie verwendeten Algorithmen der Tiefen- und Breitensuche. Beide Algorithmen suchen nach weiteren Knoten, die innerhalb des Knotennetzes mit einem Ausgangsknoten verbundenen sind. Kann ein Pfad zwischen einem Planungsbeteiligten-Knoten und einem Tragelements-Knoten

<sup>3</sup>Diese Algorithmen nutzen die Informationen der Kantenbezeichnungen der Graphen nicht.



gefunden werden, ist ein noch nicht genauer spezifizierter Einfluss des Planers auf das Tragelement wahrscheinlich. Die so erkannte Verbindung muss dann auf der Ebene des Tragwerksplanungsprozesses entsprechend berücksichtigt werden. Dabei wird sichergestellt, dass die geforderte Funktionalität durch das verknüpfte Tragwerkelement auch bewerkstelligt werden kann. Abbildung 4.4.12 zeigt alle Verantwortlichkeiten des Tragwerksplaners für die Beispielstruktur, die vorab inklusive Gewichtungen definiert werden.

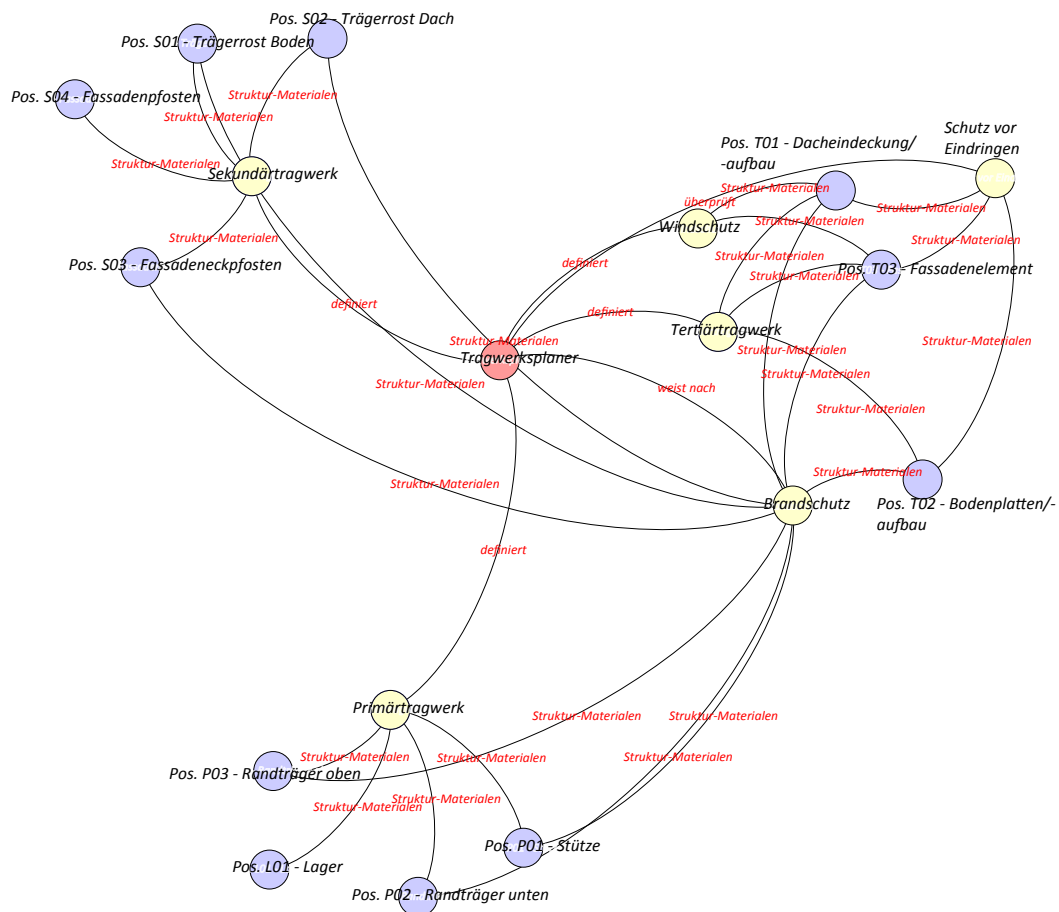


Abbildung 4.4.12: Verantwortlichkeiten Tragwerksplaner; Eigene Darstellung

Zum Aufbau des Graphen wird die Tiefensuche verwandt um Vorgänger des Knotens *Tragwerksplaner* zu ermitteln. Die so aufgefundenen Knoten werden anschließend unter Verwendung des von Jacomy (Jacomy et al., 2014) beschriebenen ForceAtlas2 Algorithmus<sup>4</sup>, der die vorab definierten gewichteten Beziehungen zwischen den Kno-

<sup>4</sup> „ForceAtlas2 is a force directed layout: it simulates a physical system in order to spatialize

ten berücksichtigt, zueinander angeordnet. Mithilfe des gleichen Vorgehens können dem Bauteil *T03 - Fassadenelement* die verantwortlichen Planer zugeordnet werden. Dabei ist durch den Abstand zwischen dem zentralen Bauteilknoten und den einzelnen Planern ablesbar, welcher Planer den größten Einfluss auf das Bauteil hat. Aus Abbildung 4.4.13 ergibt sich die Einflussreihenfolge auf Grundlage der vorab definierten Gewichtungen wie folgt:

1. Architekt
2. Tragwerksplaner
3. Bauphysiker
4. Planer Haustechnik
5. Bauherr

Muss nun einer der Planer während seiner Planung Änderungen an den Fassadenelementen vornehmen, gibt diese Reihenfolge die Reihenfolge des Informationsaustauschs und des anschließenden Auflösens von planerischen Zirkelbezügen vor. Mittels der eingefügten Bezeichnungen an den Verbindungskanten kann abgelesen werden, welcher Art der Einfluss des einzelnen Planers auf das Bauteil *T03 - Fassadenelement* ist. So lässt sich in Abbildung 4.4.12 zum Beispiel ablesen: Der Tragwerksplaner definiert das Sekundärtragwerk und nimmt damit beispielsweise Einfluss auf Struktur und Materialien der Position *S03 - Fassadeneckpfosten*.

---

a network. Nodes repulse each other like charged particles, while edges attract their nodes, like springs. These forces create a movement that converges to a balanced state. This final configuration is expected to help the interpretation of the data.“ (Jacomy et al. 2014)

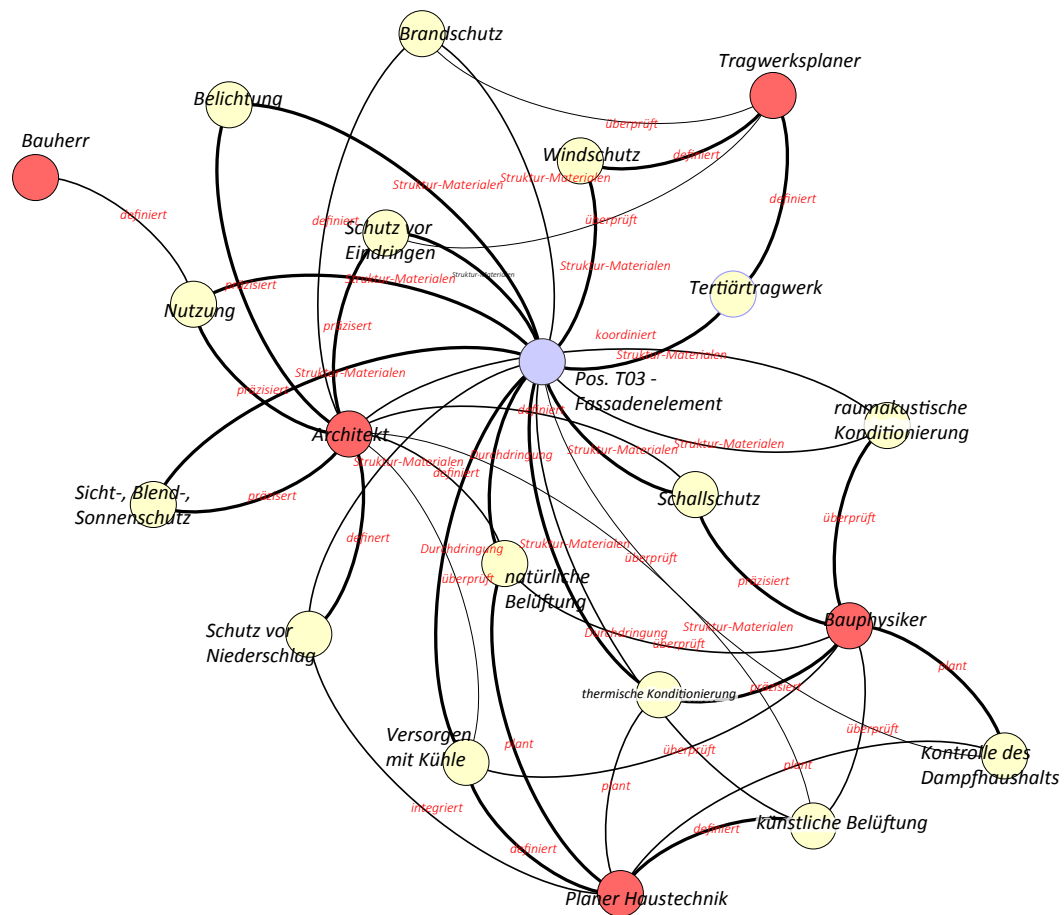


Abbildung 4.4.13: Verantwortlichkeiten der Planer für die Fassadenelemente; Eigene Darstellung

#### 4.4.7 Erste Rückschlüsse auf kommunikative Lücken und Auswirkungen auf den Gesamtplanungsprozess

Für die Analyse der Gewichtung der Beziehungen zwischen Planungsbeteiligten und Tragwerkselementen wird hier eine fünfstufige Methode vorgeschlagen:

1. Zuordnung einer Gewichtung zwischen Planungsbeteiligten und Funktion
2. Zuordnung einer Gewichtung zwischen Funktion und Tragelement
3. Suche von verknüpften Knoten ausgesuchter Tragelemente oder beteiligter Planer in dem zusammenhängenden Graphen mittels uniformierter Suchalgorithmen

4. Analyse des verknüpften Graphen mittels des ForceAtlas2 Algorithmus
5. Visualisierung der Analyseergebnisse

Mit Blick auf das beschriebene Vorgehen ist zu erkennen, dass sich damit Verantwortlichkeiten sowie funktionelle Zuordnungen aufzeigen, aber noch nicht im Detail beschreiben lassen. Es kann somit die Notwendigkeit eines Informationsaustauschs aufgedeckt werden. Die Entscheidung welche Informationen im Detail ausgetauscht werden müssen, muss über die genaue Analyse der zu erfüllenden Funktionen erfolgen. Jeder Planer verwendet seine eigenen Planungsmethoden zur Sicherstellung der Funktionen. Gemein ist allen diesen Methoden, dass im Ergebnis die Materialität, genaue Position, Struktur und damit auch die Dimensionen der Tragelemente beschrieben und übergeben werden müssen. Diese Beschreibung kann mündlich, in Tabellenform, auf Grundlage von zweidimensionalen Zeichnungen, digitalen Volumenmodellen, BIM-Modellen oder auch Kombinationen aller Möglichkeiten bestehen.

Alle diese Eigenschaften der Bau- bzw. Tragelemente lassen sich über charakteristische Materialkennwerte, wie beispielsweise E-Modul, Durchlässigkeitskoeffizienten und Abmessungen wie Profilhöhe oder Wandstärke beschreiben. Die Kennwerte lassen sich oft sehr schnell fixieren da die Funktion hier oft einen geringeren Spielraum bei den Materialien, wie auch bei den Abmessungen und Positionen lässt. Oftmals wird in der Planungspraxis die Materialwahl aber auch durch die zeitliche Verfügbarkeit einzelner Materialien beschränkt. Die Dimensionen und exakten Positionen der Tragelemente sind oft bis kurz vor Beendigung der Planung noch einer permanenten Änderung unterworfen und sollten daher in der Planung als variable Werte (Parameter) verstanden werden. Der Bereich in dem sich diese Parameter ändern nimmt zum Ende der Planung ab.

Ein adäquates Mittel zum frühzeitigen Erkennen dieser relevanten Parameter ist die vorauslaufende Analyse der notwendigen Planung. Dies soll in der Form einer sehr präzisen Beschreibung der Planungsschritte, die zum Sicherstellen der geforderten Funktion der Tragelemente notwendig ist, erfolgen. Dabei werden die einzelnen für die Planung benötigten Werkzeuge, im Fall der Tragwerksplanung die Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung gesammelt, verknüpft, geordnet und anschließend mit Blick auf die zu integrierenden charakteristischen Parameter der Tragelemente untersucht. Diese Vorgehensweise wird in Abschnitt 4.6.3 beschrieben.

Bereits vor der Durchführung von Planungsalgorithmen ist es möglich eine erste Analyse der Komplexität des Tragwerks durchzuführen, die auf der Systemtheo-

rie und der Graphentheorie beruht. Diese Methode wird im folgenden Abschnitt beschrieben und bereitet die Beschreibung der Komplexitätskontrolle der Planungswerkzeuge vor.

## 4.5 Methodische Umsetzung zur Beherrschung des Tragwerksplanungsprozesses

Die Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses wird wie in Abschnitt 3.4 beschrieben neben der Gesamtanzahl der Tragelemente und dem dynamischen Verhalten des Tragwerkes hauptsächlich über die Anzahl und Art der Tragelementsverknüpfungen bestimmt. Bei diesen Verknüpfungen, die im Folgenden als Interaktionen zwischen den Tragelementen angesehen werden, geht es um reale konstruktive Kopplungen von Tragelementen mittels Verbindungsmitteln wie Schweißungen, stiftförmigen Verbindungsmitteln, Verklebungen, Klemmungen mittels Reibung oder auch Formschluss. Die Aufgabe dieser Koppelungen ist die Weiterleitung von Lasten vom Ort der Lastaufbringung bis in den Baugrund. Ein erster Schritt zum Aufdecken der Interaktionen innerhalb des Tragwerksplanungsprozesses ist demnach die Lastverfolgung durch das Tragwerk getrennt für verschiedene Einwirkungen. Diese Verfolgung beruht auf der Notwendigkeit einer physischen Verbindung von Tragelementen auf Basis des definierten statischen Systems. Parallel zu dieser Lastverfolgung können die erforderlichen Verbindungsmittel aufgedeckt werden. Für die Beispielstruktur wird diese Lastverfolgung getrennt für die Einwirkungen Wind auf der Fassade, Schnee auf dem Dach und Verkehrslast auf dem Boden aufgeführt. Die Durchführung der Lastverfolgung wird mit Hilfe der in Abbildung 4.4.7 definierten Tragwerkspositionen durchgeführt. Zur Darstellung der Lastweiterleitung und später auch für die Darstellung von Anforderungen und notwendiger Planungsschritte wird die visuelle Modellierungssprache SysML<sup>5</sup> verwandt. SysML hat gegenüber der in der BIM-Methodik

---

<sup>5</sup>„Systems Modeling Language (SysML) ist eine graphische Modellierungssprache, die die Erstellung eines Systemmodells unterstützt. Die Sprache ermöglicht die graphische Darstellung der folgenden Systemelemente:

Strukturelle Anordnungen, Abhängigkeiten, Verbindungen und Klassifizierungen, Beschränkungen oder Constraints von technischen Eigenschaften, Anweisungen zwischen verschiedenen Handlungen, Strukturen, Beschränkungen und Bedingungen (z. B. eine Funktion zugewiesen zu einer Komponente), Bedingungen und ihre Verbindungen mit weiteren Bedingungen, Entwurfselementen und Testfällen.“ (Borrmann et al. 2014, S.25)

angewandten Modellierungssprache IDM<sup>6</sup> die auf der BPMN<sup>7</sup> beruht, den Vorteil, dass auch die Abbildung struktureller Elemente und der Abhängigkeiten zwischen ihnen möglich ist (Borrmann et al., 2014, vgl. S.25). Abbildung 4.5.1 gibt einen Überblick über alle in der Modellierungssprache SysML verfügbaren Diagramme. Die rot hinterlegten Diagramme werden in diesem Kapitel verwendet. Für die Lastverfolgung eignet sich das in Abbildung 4.5.2 erläuterte Sequence Diagramm. Sequence Diagramme werden in der Systemtheorie verwandt, um den Durchlauf von Informationen durch die Teilsysteme eines komplexen Gesamtsystems in zeitlicher Abfolge darzustellen. Diese Darstellungsart wird dadurch adaptiert, dass hier anstatt von Informationen Lasten durch ein System geleitet werden.

Parallel zur Darstellung des Lastflusses werden in Abbildung 4.5.3 die für die spätere konstruktive Ausbildung notwendigen Verbindungsdetails (in der Darstellung mit VD abgekürzt) aufgeführt. Die Lasten werden in diesem Diagramm als Aktoren (Strichmännchendarstellung) angegeben. Dabei wird offensichtlich, dass die Tertiärstruktur, Sekundärstruktur und Primärstruktur von den Lasten sequenziell durchlaufen werden. Die durch Pfeile dargestellten Lastübergänge zwischen den Tragelementen werden im Anschluss in das Diagramm 4.4.13 als Interaktionen integriert. In der sich so ergebenden Darstellung 4.5.4 sind auch die notwendigen noch zu entwickelnden Verbindungsdetails (Pos. VD) beinhaltet. Als Teilgraph können alle definierten Verbindungsdetails der Fassadenelemente bis in das Lager in Abbildung 4.5.5 ausgegeben werden. Diese Übertragung der Lastverfolgung aus Darstellung 4.5.3 in Kanten des Graphen 4.5.4 erfolgt hier nicht automatisiert. Bei größeren Strukturen ist eine Teilautomatisierung möglich und sinnvoll. Ein geeignetes Mittel zur Speicherung, Übertragung und weiteren Analyse der gezeigten Beziehungen stellen Adjazenz- und Design Structure Matrizen dar die in Abschnitt 4.5.1 erläutert werden.

---

<sup>6</sup>„The Information Delivery Manual (IDM), developed by buildingSMART, is a process standard that has been proposed to define information exchanges between any two project team members in an AEC/FM project, with a specific purpose, within a specified stage of the project’s life cycle. The IDM consists of four deliverables:

- IDM Use Case: Defines the activities, project participants, and information exchanges, as required for a specific AEC/FM process.
- IDM Process Map (PM): Displays the relationship between these activities, project participants, and information exchanges.
- IDM Exchange Requirements (ERs): Define the information units, as required for each use-casespecific information exchange.
- IDM Exchange Requirements Models (ERMs): Organize the ERs into Exchange Objects (EOs), that is machine-interpretable data exchange packages.

“ (Mahdavi et al. 2015, S.296)

<sup>7</sup>Die **B**uisness **P**rocess **M**odel and **N**otation-Modellierung konzentriert sich hauptsächlich auf die Modellierung von Geschäftsprozessen (Freund und Rücker, 2012, vgl. S.8)

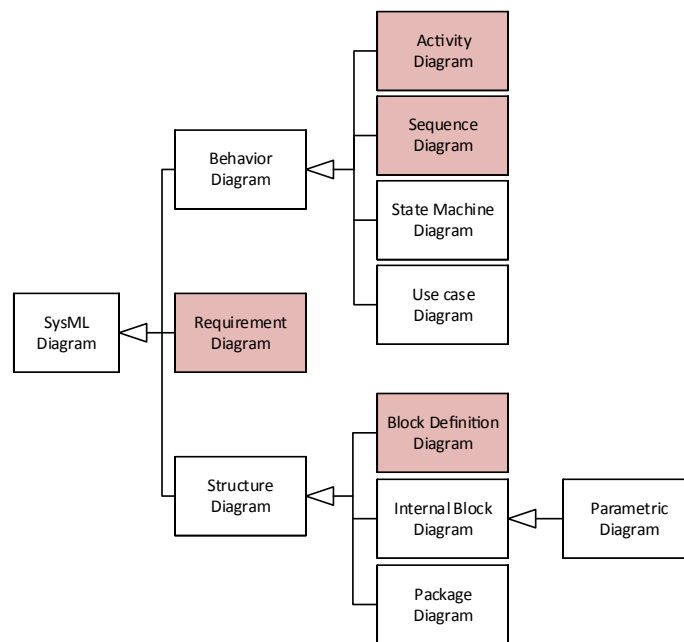


Abbildung 4.5.1: Überblick Diagrammtypen SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)

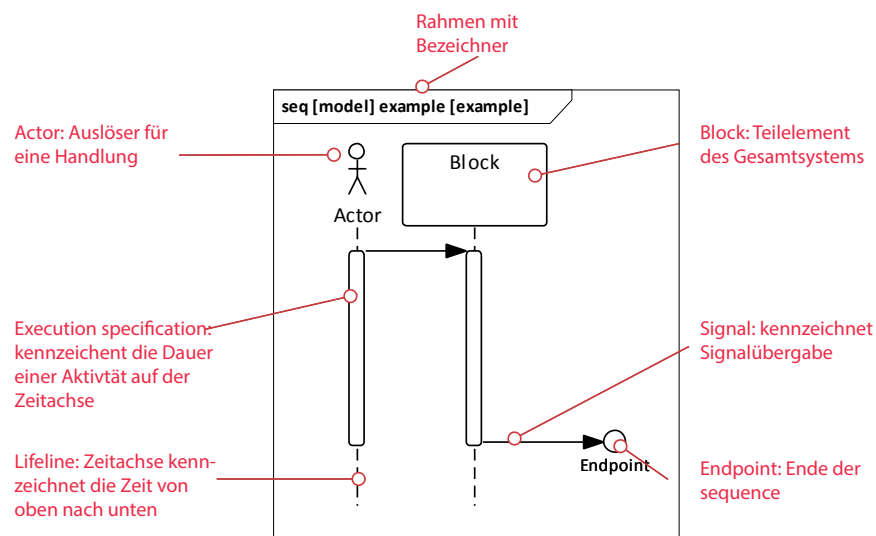


Abbildung 4.5.2: sequence diagram SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)

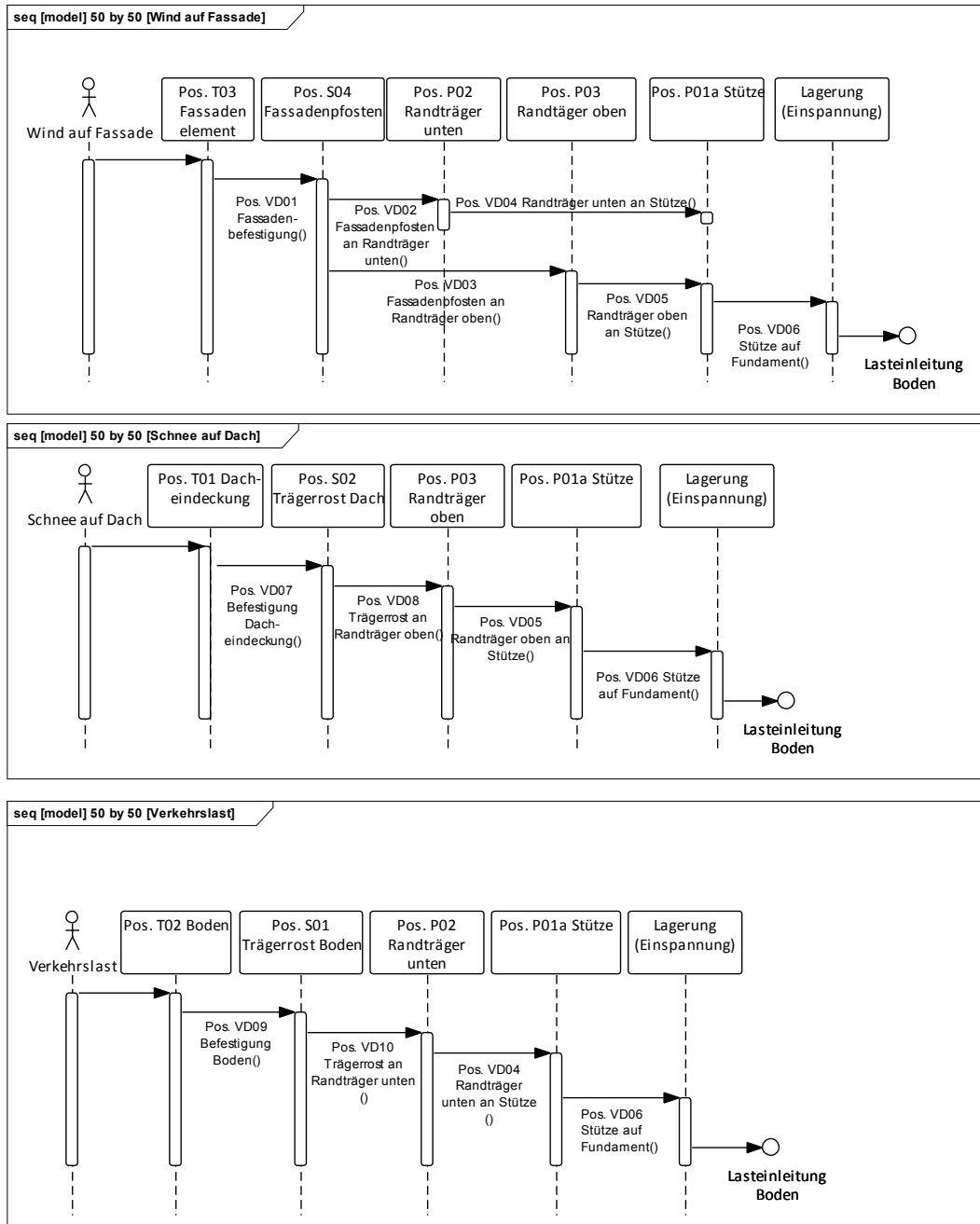


Abbildung 4.5.3: Sequence Diagramm Lastverfolgung Wind, Schnee und Verkehrslast; Eigene Darstellung



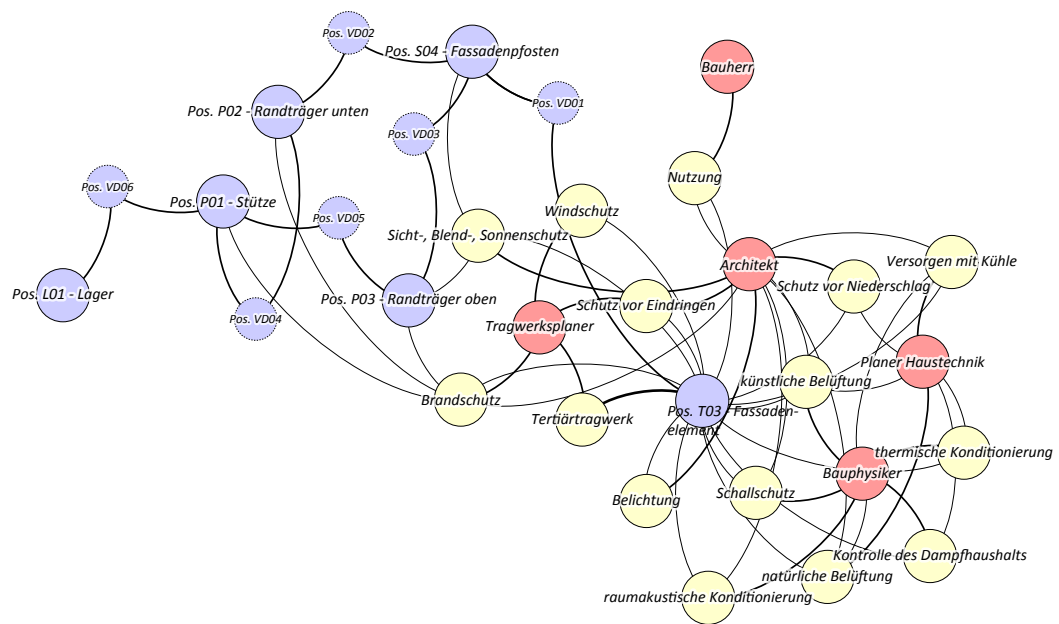


Abbildung 4.5.4: Verantwortlichkeiten der Planer und integrierte benachbarte Bauelemente und Verbindungsdetails; Eigene Darstellung

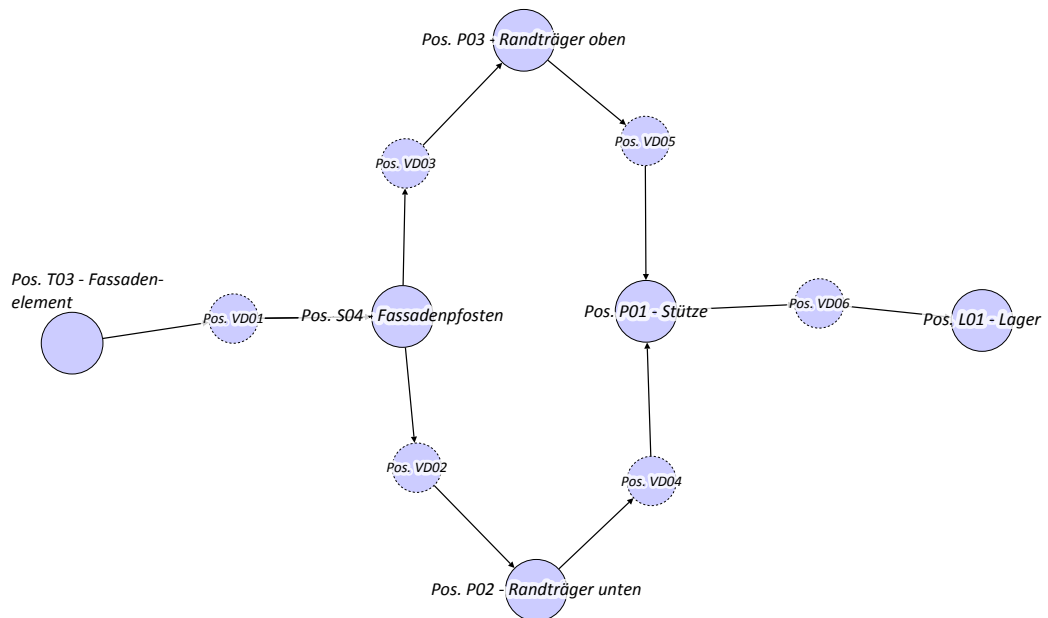


Abbildung 4.5.5: Verbindungsdetails und Bauelemente der Pos. T03 Fassade; Eigene Darstellung

#### 4.5.1 Speicherung und Weiterverarbeitung der Tragwerkinteraktionen mithilfe von Matrizen

Bereits in Abbildung 4.4.11 sind mehr als fünfzig Planungsbeteiligter-Bauwerksfunktionen Zuordnungen zu erkennen. Bei einer möglichen Aufspaltung der Planer auf einzelne Firmen und einer genaueren Spezifizierung der Funktionen sowie der charakteristischen Parameter der Tragwerkselemente sind deutlich mehr Zuordnungen zu erwarten. Eine ausschließliche Ablage der Beziehungen in einer grafischen Darstellung ist dafür nicht mehr ausreichend. Mit Blick auf notwendig werdende automatisierte Analysen müssen die Funktions-Planer Zuordnungen in einer Form aufbereitet werden die von den Verfahren zur Ermittlung von Kantenzusammenhängen in gewichteten Graphen gelesen werden können. Als Behälter, der die genannten Anforderungen erfüllt werden die Adjazenzmatrix<sup>8</sup> und die Design Structure Matrix (DSM) gewählt. Die im Prozessmanagement entwickelte Design Structure Matrix hat den gleichen Aufbau wie eine Adjazenzmatrix (Kreimeyer und Lindemann, 2011, vgl. S.44 ff.) weswegen auch auf der Adjazenzmatrix aufbauende Analysen für die DSM genutzt werden können. Die Design Structure Matrix und deren Verwendung wurden bereits 1981 von Steward (Steward, 1981) umfangreich beschrieben. Seitdem wurden Analysemethoden speziell für die Produktentwicklung (siehe z. B. Maurer (Maurer, Maik und Braun, Thomas, 2008)) erarbeitet und auch in dieser Branche angewandt. Es handelt sich bei der DSM wie bei der Adjazenzmatrix um eine quadratische Matrix mit gleicher Anzahl von Zeilen und Spalten. Sie beinhaltet die systematische Zuordnung von Elementen (Knoten) und ihren Beziehungen (Kanten) untereinander. Beispielsweise ist es möglich die strukturellen Abhängigkeiten der einzelnen Tragelemente eines Tragwerks (wie mittels der Lastverfolgung in Abbildung 4.5.3 ermittelt) in einer solchen Matrix festzuhalten. Sind in der Matrix nur Einsen an der relevanten Stelle eingetragen und damit nur ein Hinweis auf das Vorhandensein einer Interaktion, handelt es sich bei der so erstellten Matrix um eine *binäre* DSM.

In Abbildung 4.5.6 werden die Abhängigkeiten aufgrund der in 4.5.3 aufgezeigten Lastabtragungen als Design Structure Matrix und dem entsprechenden gerichteten

---

<sup>8</sup>„Die nahe liegendste Art für die Darstellung eines schlichten Graphen  $G$  ist eine  $(n \times n)$ -Matrix  $A(G)$ . Hierbei ist der Eintrag  $a_{ij}$  von  $A(G)$  gleich 1, falls es eine Kante von  $e_i$  nach  $e_j$  gibt, andernfalls gleich 0. Da die Matrix  $A(G)$  (Im Folgendem nur noch mit  $A$  bezeichnet) direkt die Nachbarschaft der Ecken widerspiegelt, nennt man sie *Adjazenzmatrix*. Da ihre Einträge nur die beiden Werte 0 und 1 annehmen, kann  $A(G)$  als Boolesche Matrix dargestellt werden. Es lassen sich sowohl gerichtete als auch ungerichtete Graphen darstellen, wobei im letzten Fall die Adjazenzmatrizen symmetrisch sind.“ (Turau und Weyer 2015)

Graphen in Abbildung 4.5.7 dargestellt. Es kommt in dieser Phase nicht darauf an, die strukturellen Interaktionen aller Einwirkungen in die Matrix einzutragen. Umso mehr bereits in dieser Phase integriert werden umso aussagekräftiger sind nachfolgende Analysen. Spätere Anpassungen der in Abbildung 4.5.6 aufgezeigten Beziehungen sind möglich.

Eine mögliche auf der Design Structure Matrix basierende Analysemöglichkeit ist die Suche nach indirekten Abhängigkeiten zwischen den Tragelementen also Abhängigkeiten über Zwischenelemente. Für diese Suche bietet sich die Verwendung der transitiven Hülle unter Nutzung des Warshall-Algorithmus an. Graph 4.5.9 zeigt die mithilfe des Warshall-Algorithmus gefundenen indirekten Abhängigkeiten, die in der Matrix in Abbildung 4.5.8 ergänzt werden. Bei den meisten Tragwerken handelt es sich bei exakter Betrachtung um statisch unbestimmte Tragwerke. Bei solchen Strukturen leitet ein Tragelement Lasten an mehrere an dieses Tragelement anschließende Elemente weiter. Die Verteilung dieser Lasten hängt von der Steifigkeit der benachbarten Elemente und damit von ihren Dimensionen sowie ihrer Materialität ab. Die Beziehung hat also zwei Richtungen und ist demnach ungerichtet, was einem ungerichteten Graph entspricht. Wird dieser ungerichtete Graph mithilfe des Warshall-Algorithmus untersucht käme als Ergebnis heraus, dass alle Tragelemente eine indirekte Beziehung zu jedem anderen Tragelement und zu sich selber haben. Für die zugehörige Adjazenzmatrix bedeutet das, dass alle Zellen besetzt sind. Diese voll besetzte Adjazenzmatrix entspricht der Planungsrealität vieler Tragwerke. Durch diese Tatsache wird deutlich, dass es tiefergehender Methoden bedarf, um die Art und Stärke der umfangreichen Interaktionen genauer zu untersuchen. Ziel dabei ist es, dominante Interaktionen zu ermitteln, um die Komplexität besser beherrschen zu können. Bei der Inter Domain Matrix (IDM) handelt es sich um eine Matrix zur Aufnahme der Interaktionen zwischen verschiedenen Gewerken beziehungsweise Domänen. Wurde aufgrund der Analyse in Abschnitt 4.4.6 festgestellt, dass Bauelemente neben der Lastabtragung weitere Funktionen haben, die durch einen anderen Planer zu verantworten sind, bietet sich folgendes Vorgehen an:

1. Definition einer Design Structure Matrix des anderen Planers.

Hierbei ist bei Funktionen des Ver- und Entsorgens ein vergleichbares Vorgehen wie unter 4.5.3 aufgezeigt denkbar. Dafür müssen alle Positionen wie beispielsweise die einzelnen Komponenten der Heizung, der Wasserversorgung oder der Stromversorgung innerhalb eines Gewerks aufgeführt und ihre Zusammenhänge in einer Design Structure Matrix erfasst werden.

2. Aufstellen einer Inter Domain Matrix

Hierbei können beispielsweise die Positionen interagierender Gewerke innerhalb einer Inter Domain Matrix in Beziehung gesetzt werden. So können sämtliche Durchdringungen oder Anschlüsse von Wasser-, Gas-, Belüftungs- oder Elektroleitungen an lastabtragende Bauelemente in solchen Matrizen erfasst werden.

Haben alle beteiligten Planer für ihr eigenes Gewerk eine Inter Domain Matrix erstellt und werden zwischen den interagierenden Planern Inter Domain Matrizen definiert, können diese Matrizen zu einer alles zusammenführenden Multi Domain Matrix (MDM) gefügt werden. Die MDM hat genau wie die DSM auch einen quadratischen Aufbau. Auf Basis dieser Matrix können verschiedene matrizen-basierte Analysen mit dem Ziel eines optimierten Informationsflusses sowie zur Teambildung durchgeführt werden. Viele der Methoden die ursprünglich für DSM's, also Analysen einzelner Gewerke entwickelt werden, lassen sich aufgrund derselben Struktur auch auf die MDM, also die Repräsentation der Interaktionen des Gesamtbauwerks ansetzen. Eine dieser Methoden, die Sequenzierung, wird im folgenden Abschnitt am Beispiel der DSM aus Bild 4.5.8 durchgeführt.

Beschreibung	Pos. Nr	P01	P02	P03	S01	S02	S04	T01	T02	T03	L01	VD01	VD02	VD03	VD04	VD05	VD06	VD07	VD08	VD09	VD10
Stütze	P01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Randträger unten	P02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Randträger oben	P03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Trägerrost Boden	S01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Trägerrost Dach	S02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Fassadenpfosten	S04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Pos. T01 - Dacheindeckung/-aufbau	T01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Bodenplatten/-aufbau	T02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Fassadenelement	T03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager	L01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD01	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD02	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD03	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD04	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD05	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD06	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD07	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD08	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD09	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4.5.6: Direkte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks in Matrixendarstellung; Eigene Darstellung

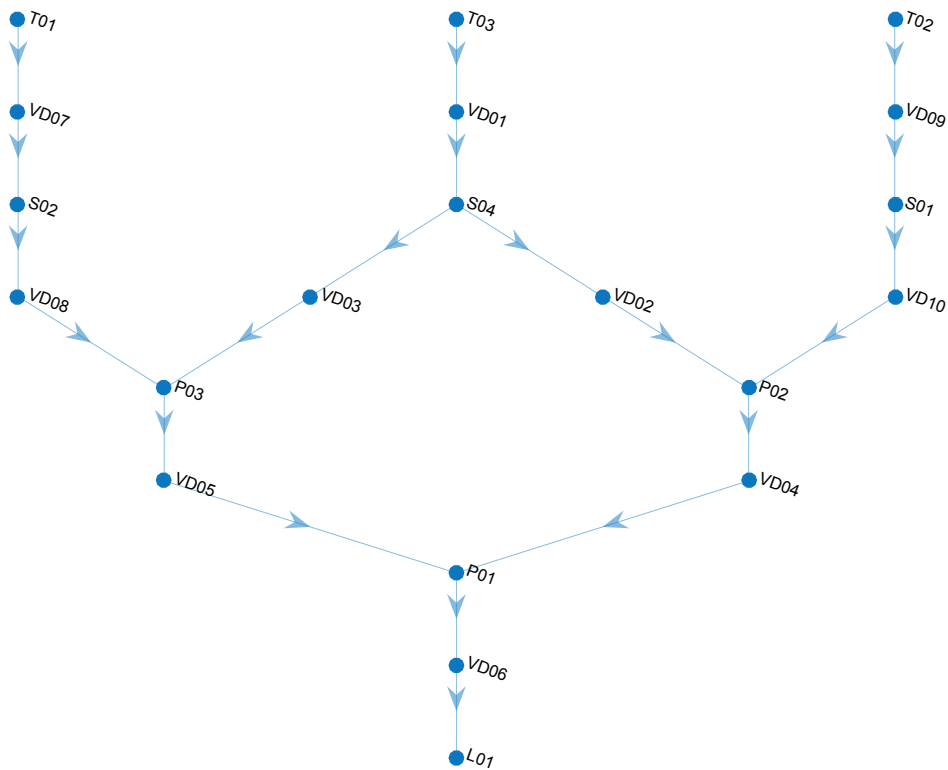


Abbildung 4.5.7: Direkte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungs-  
details des 50 x 50 Tragwerks als Graph; Eigene Darstellung

Beschreibung	Pos. Nr	P01	P02	P03	S01	S02	S04	T01	T02	T03	L01	VD01	VD02	VD03	VD04	VD05	VD06	VD07	VD08	VD09	VD10
Sitze	P01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Randträger unten	P02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Randträger oben	P03	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Trägerrost Boden	S01	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
Trägerrost Dach	S02	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Fassadenpfosten	S04	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Pos. T01 - Dacheindeckung/- aufbau	T01	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Bodenplatten/-aufbau	T02	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
Fassadenelement	T03	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Lager	L01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD01	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD02	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD03	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD04	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD05	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD07	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Verbindungsdetail	VD08	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Verbindungsdetail	VD09	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
Verbindungsdetail	VD10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0

Abbildung 4.5.8: Direkte und indirekte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und  
Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks in Matrixdarstellung; Eigene Darstel-  
lung

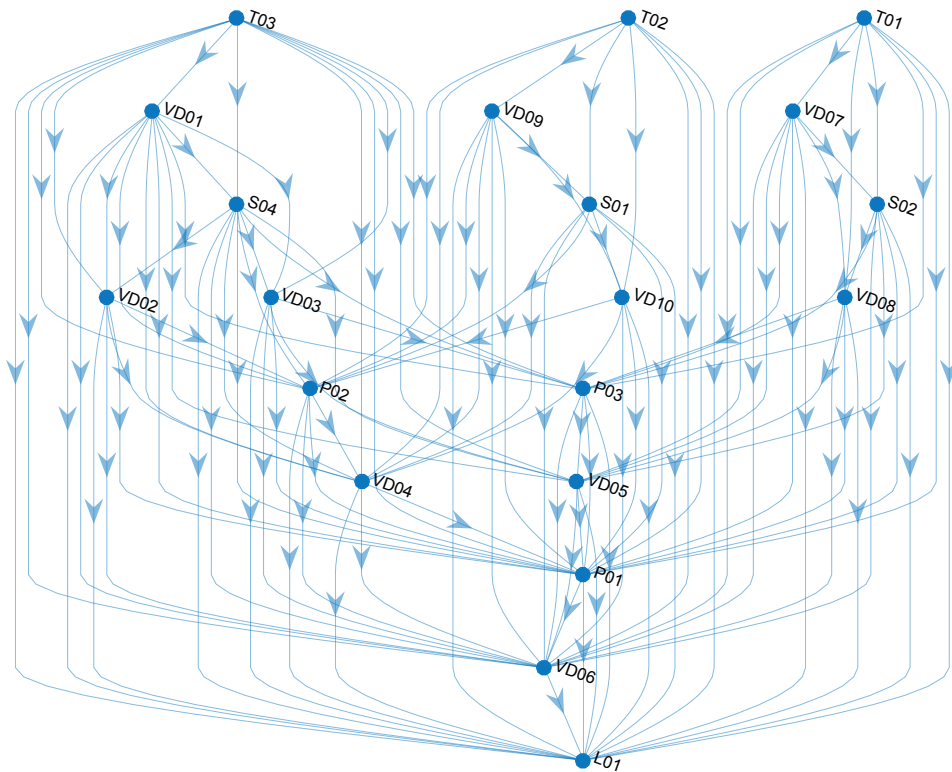


Abbildung 4.5.9: Direkte und indirekte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks als Graph; Eigene Darstellung

#### 4.5.2 Umsortierung der Design Structure Matrizen zur Vorbereitung von Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung

Ziel der folgenden Methode ist es, die Durchführung des Tragwerksplanungsprozesses vorzubereiten. Dabei ist es die Aufgabe, wie in 3.5 beschrieben, die Planungsschleifen bzw. Zirkelbezüge und Planungsrücksprünge gezielt zu reduzieren. Dieses kann mithilfe der Ermittlung der optimalen Reihenfolge der einzelnen Planungsschritte erfolgen. Hier wird die Methode der Sequenzierung von Design Structure Matrizen<sup>9</sup> verwendet. Nach dem Sequenzieren sind die Bauelemente und damit die zugehörigen

<sup>9</sup>„Sequenzierung ist die Neuordnung der DSM-Zeilen und Spalten, sodass die neue DSM-Anordnung keine Zirkelbezüge mehr enthält, wodurch die DSM in eine obere Dreiecksform transformiert wird. Für komplexe Engineering-Systeme ist es höchst unwahrscheinlich, dass eine einfache Zeilen- und Spaltenmanipulation zu einer oberen Dreiecksform führen wird. Deshalb wird versucht, bei der Beseitigung der Zirkelbezüge die Einträge in der Matrix so nahe wie möglich an die Diagonale zu bewegen (diese Form der Matrix wird als Triangularblock bezeichnet). Ebenso ist es möglich, zu erfahren, welche Elemente des Systems möglicherweise nachbearbeitet werden müssen (z. B. in zwei Elemente aufgeteilt oder möglicherweise entfernt), um eine bessere Prozessarchitektur zu erreichen.“ (Lindemann 2016)

Planungsalgorithmen so gruppiert, dass es zwischen den einzelnen Planungsalgorithmen so wenige Zirkelbezüge wie möglich gibt und Planungsrücksprünge somit stark verringert werden. Diese Art der Aufbereitung erlaubt es, bei der Durchführung der Planungsalgorithmen auf eine optimierte Reihenfolge zurückzugreifen und die einzelnen Ingenieure bzw. Ingenieurteams zeitlich optimal einzusetzen. In Darstellung 4.5.10 werden die denkbaren Ingenieurteams den einzelnen Bauteilen und Verbindungsdetails farbig zugeordnet. So zeigt die Abbildung 4.5.10, dass ein Einsatz des *Ingenieurs 2* erst Sinn macht wenn *Ingenieur 1* seine Planung beendet hat, da er beispielsweise für die Planung des Verbindungsdetails VD01 dringend Ergebnisse der Planung des Tragelements T03 (Fassade) benötigt. Die so ermittelte Reihenfolge ist auch visuell in der Darstellung 4.5.9 anhand der Höhenstaffelung und der Verfolgung der beinhaltenden Pfeile nachvollziehbar.

Die Matrix in Abbildung 4.5.10 wurde ausgehend von der Design Structure Matrix in Abbildung 4.5.8 erstellt. Sind auf Grundlage von Erfahrungen oder zusätzlicher Überlegungen bereits Kenntnisse über weitere Interaktionen zwischen den Tragelementen bekannt und sollen diese aufgrund ihrer Signifikanz in die Matrix einbezogen werden, müssen sie in die Design Structure Matrix in Abbildung 4.5.8 vor der Sequenzierung eingepflegt werden. Ein Beispiel hierfür ist die wechselseitige Beziehung<sup>10</sup> zwischen dem Trägerrost des Daches (Pos. S02) und dem oberen Randträger (Pos. P03) aufgrund des Einflusses des Randträgers auf die konstruktive Ausbildung des Trägerrosts sowie des real vorhandenen Einflusses der Steifigkeit und der Lagerung des Trägers auf die Lastabtragung des Trägerrosts. Hier gilt es zu beachten, dass man bei statisch unbestimmten Tragwerken wie auf Seite 105 beschrieben durch eine unreflektierte Überfrachtung mit Beziehungen zu einer vollgefüllten Design Structure Matrix kommt aus der final wenige Erkenntnisse abgeleitet werden können.

---

<sup>10</sup>Hierbei handelt es sich um einen Zirkelbezug.

Pos. Nr	Cluster/ Ingenieur	T01	T02	T03	VD01	VD07	VD09	S01	S02	S04	VD02	VD03	VD08	VD10	P02	P03	VD04	VD05	P01	VD06	L01
T01 Dacheindeckung	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
T02 Bodenplatten/-aufbau		0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
T03 Fassadenelement		0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
VD01 Verbindungsdetail	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
VD07 Verbindungsdetail		0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
VD09 Verbindungsdetail		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
S01 Trägerrost Boden	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
S02 Trägerrost Dach		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1
S04 Fassadenpfosten		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
VD02 Verbindungsdetail	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
VD03 Verbindungsdetail		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
VD08 Verbindungsdetail		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
VD10 Verbindungsdetail		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
P02 Randträger unten	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
P03 Randträger oben		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
VD04 Verbindungsdetail	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
VD05 Verbindungsdetail		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
P01 Säule	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
VD06 Verbindungsdetail	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
L01 Lager	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Abbildung 4.5.10: Sequenzierung und Teambildung der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks; Eigene Darstellung

## 4.6 Anforderungsanalyse und Umgang mit der Komplexität der Planungswerkzeuge

### 4.6.1 Aufgaben, Anforderungen und Wahl von Planungswerkzeugen

In Abschnitt 4.4.5 wird ermittelt welche Bauwerksfunktionen von dem zu planenden Tragwerk zu erfüllen sind und wer für die jeweiligen Bauwerksfunktionen die verantwortlichen Planer sind. In Abschnitt 4.5.2 wird definiert, mit welchen direkten und indirekten Abhängigkeiten innerhalb des Tragsystems zu rechnen ist. Es geht nun darum die geforderten Bauwerksfunktionen als konkrete Eingangsparameter der Planungswerkzeuge zu definieren. Die sich aus den Bauwerksfunktionen ergebenden Anforderungen mit Bezug zu einzelnen Tragelementen werden dadurch sichergestellt, dass die Position, ihre Querschnitte und ihre Materialität entsprechend gewählt werden. Dafür müssen die Bauwerksfunktionen zunächst in Anforderungen und dann Anforderungsparameter übersetzt werden und ihnen die das Tragelement beschreibenden Parameter zugeordnet werden. Hierfür wird in Abschnitt 4.6.2 ein entsprechendes Vorgehen beschrieben. Die so zugeordneten Anforderungsparameter werden anschließend genutzt, um auf analytisch rechnerischem Weg die Erfüllung der Anforderungen nachzuweisen. Diese Analysen werden mittels grundlegender Re-



geln zur Beschreibung von Spannungs- und Verformungszuständen sowie zur Dimensionierung von Tragelementen, die wiederum zu Algorithmen verknüpft werden, durchgeführt.

In Abschnitt 4.7 werden dann alle notwendigen Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung parametrisch abgebildet und entsprechend der in Abschnitt 4.5.2 ermittelten Beziehungen innerhalb des Beispielprojekts zu einem parametrisch-assoziativen Planungssystem gefügt. Der Umgang mit der Komplexität der Planungswerkzeuge bezieht sich hier auf den strukturierten Aufbau des parametrischen-assoziativen Planungssystems und die dann anschließende Analyse der Interaktionen zwischen den einzelnen Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung. Nach Durchlauf aller verknüpften Regeln werden erste Aussagen über die Positionen, Materialität und konstruktive Ausbildung der einzelnen Tragelemente und somit auch des Gesamttragwerks getroffen. Abschließend werden mittels des parametrisierten und assoziierten Planungssystems tiefergehende Sensitivitätsanalysen zu den tragwerksinternen Interaktionen in einer Design Structure Matrix dargestellt und Aussagen über mögliche Optimierungsstrategien getroffen.

#### 4.6.2 Konkretisierung der Anforderungen an die Planungswerkzeuge

Gerber (Gerber, 2010) definiert die Aufgaben an das Tragwerk wie folgt:

Das Tragwerk muss  
einen sicheren Abtrag aller während der Lebensdauer des Bauwerks auftretenden Lasten unter Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit gewährleisten.

Das Tragwerk sollte  
auf ökonomische und ökologische Weise einen Beitrag zur Gestalt und Funktion des Bauwerks leisten.

Das Tragwerk kann  
zur Erfüllung baukonstruktiver oder bauphysikalischer Anforderungen herangezogen werden. (Gerber 2010, S.30)

Diese Aufgaben bzw. Anforderungen sind zunächst noch recht allgemein, müssen aber für die Anwendung der Planungswerkzeuge weiter spezifiziert werden. Aufgrund der später im Planungsprozess nötigen zwingenden Nachvollziehbarkeit der

ursprünglich definierten Anforderungen bietet es sich an, die sich aus der Bauwerksfunktion ergebenden Anforderungen in einer eindeutigen, allgemein verständlichen Art und Weise durchzuführen und zu dokumentieren. Hierfür wird die Verwendung der in Rupp (Rupp, 2009, S.162) dargestellten Schablone (siehe Abbildung 4.6.1) vorgeschlagen. Zu den Vorteilen dieser Schablone äußert sich Alt (Alt, 2012) wie folgt:

Die wichtigsten Vorteile durch den Einsatz der Schablone sind:

- Eindeutigkeit der Anforderungen (weniger Missverständnisse)
- Vollständigkeit der Anforderung (präzise Formulierung)
- Testbarkeit der Anforderung (einfachere Testfallerstellung)
- Jede Anforderung besteht aus nur einem Satz (keine Kettenanforderungen und dadurch bessere Zuordnung der Anforderungen zu Testfällen und Architekturkomponenten)
- Semiformaler Charakter durch Schablone erleichtert die spätere Formalisierung bzw. Erstellung von formalen Verhaltensmodellen.

(Alt 2012, S.14)

Da Anforderungen A-1 und A-2 die einzigen *Muss*-Anforderungen und somit Mindestanforderungen sind, werden diese zunächst als Ausgangspunkt für die erste Dimensionierung des Tragwerks und der Tragelemente verwandt. Die hier noch nicht berücksichtigten Anforderungen decken sich mit den in Darstellung 4.4.8 aufgezeigten weiteren Funktionszuordnungen zu den Tragelementen des Tragwerks. In Abbildung 4.6.3 werden alle bisher gemachten Anforderungen mittels des in der Modellierungssprache SysML enthaltenen Requirement Diagrams, dessen Symbolik in Abbildung 4.6.2 erläutert wird, aufgeführt. Von den Anforderungen A-1 und A-2 werden die genaueren Anforderungen A-1.1 Spannungen, A-1.2 Stabilität, A-2.1 Verformungsbeschränkungen für das Tragwerk und weiter für die Tragelemente und Verbindungsdetails abgeleitet. Weitere Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit wie Forderungen bestimmter Eigenfrequenzen der Gesamtstruktur werden hier nicht berücksichtigt. In dem Requirement Diagram sind neben einer *id* auch bereits die Risiken *risk* vermerkt die entstehen, falls die Verifikation der Funktion nicht erbracht wird. Hier kann zwischen *High*, *Medium* und *Low* definiert werden. Ein weiterer Eintrag betrifft die Art und Weise, mit der der Nachweis der Anforderungserfüllung *VerifyMethod* erbracht werden soll. Seitens SysML wird hier *Analysis*, *Test*, *Inspection* oder *Demonstration* angeboten. Im Fall der Tragwerksplanung wer-

den sich Verifikationsmethoden größtenteils auf die Analyse und Tests beschränken. Aber auch Inspektionen und Demonstrationen sind denkbar.

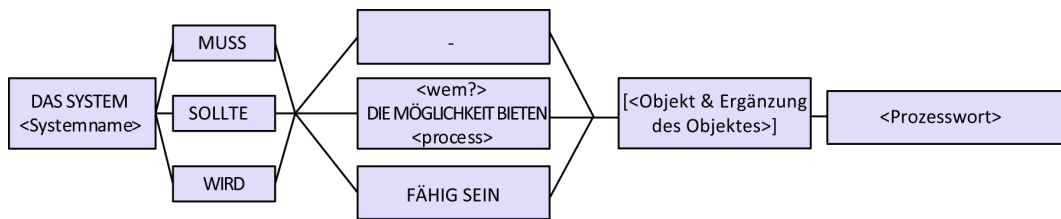


Abbildung 4.6.1: Funktionsschablone; Eigene Darstellung nach Rupp (Rupp, 2009)

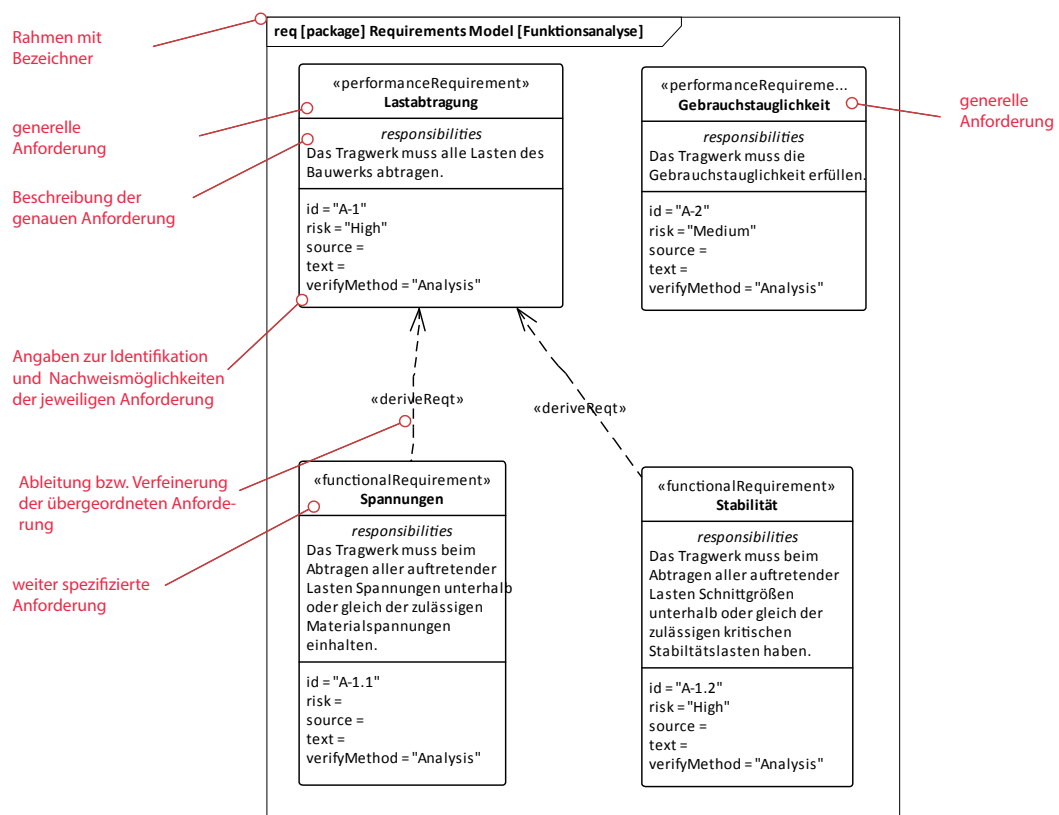


Abbildung 4.6.2: Requirement Diagram SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)

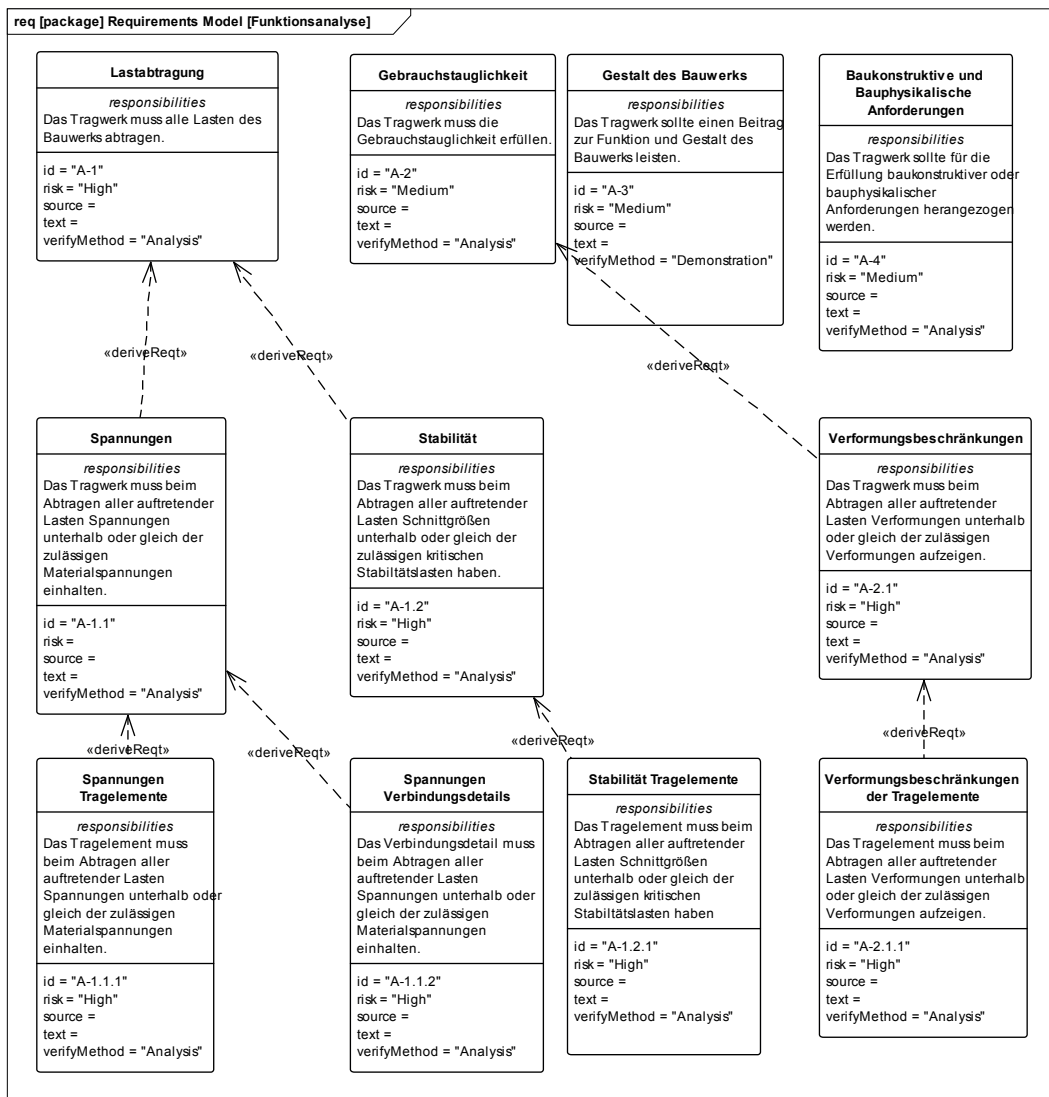


Abbildung 4.6.3: Anforderungen an Tragwerke als Requirement Diagram (SysML);  
Eigene Darstellung

#### 4.6.3 Vorbereitung des Planungssystems

Nachdem im vorherigen Abschnitt die einzuhaltenden Anforderungen ermittelt und in Diagramm 4.6.3 festgehalten werden, werden diese nun den einzelnen Tragelementen und Verbindungsmitteln der 50 x 50 Struktur in Abbildung 4.6.4 zugeordnet. Dabei ist zu erkennen, dass zunächst allen Tragelementen die Anforderung A-1.2.1 (Stabilität der Tragelemente) zugeordnet wird. Diese Nachweise können für alle Tra-

gelemente geführt werden. Es kann sich aber aus der Erfahrung mit Vorgängerprojekten ergeben, dass diese Nachweise nicht für alle Tragelemente maßgebend und deshalb zu vernachlässigen sind. Das Gleiche gilt für Anforderungen A-2.1.1 (Verformungsbeschränkungen der Tragelemente) und A-1.1.1 (Spannungen der Tragelemente). Der Vollständigkeit halber werden diese Anforderungen zunächst komplett aufgeführt.

Die in Abschnitt 4.5.2 vorbereitete Reihenfolge wird in Abbildung 4.6.4 beibehalten. Grund dafür ist, dass im nächsten Schritt die einzelnen Dimensionierungen der Tragelemente und Verbindungsdetails inklusive der Nachweise zur Erfüllung der Anforderungen genau in dieser kausal bedingten Reihenfolge durchgeführt werden. Vor Durchführung der Dimensionierungen mittels des parametrisch-assoziativen Planungssystems werden in dem *Activity Diagramm* in Abbildung 4.6.6 die zur Durchführung der einzelnen Dimensionierungen notwendigen Informationen für den Lastfall Wind auf die Fassade zusammengestellt. Activity Diagramme, deren Symbolik in Abbildung 4.6.5 dargestellt ist, entstammen der Modellierungssprache SysML. Die Dimensionierungen der Elemente S04, VD02, VD03, P02, VD04, P03, VD05, P01a und VD06 werden aus Darstellungsgründen in dem blau markierten Block (siehe Abbildung 4.6.8) zusammengefasst.

Die notwendigen Dimensionierungen beginnen mit einer ersten Annahme bzw. Schätzung der Abmessungen und Lage der Tragelemente und Verbindungsdetails und einer ersten Wahl der Materialien und enden mit der Dimensionierung der Lagerung (Siehe Darstellung 4.6.7 und 4.6.8). Der dargestellte Ablauf stellt einen Idealfall für nur einen einzigen Lastfall dar. Für reale Planungsprozesse sind folgende Änderungen bzw. Ergänzungen zu erwarten:

1. Wenn von vornherein nicht offensichtlich ist, welche Einwirkung die für die Dimensionierung und Materialwahl des jeweiligen Tragelements maßgebend ist, müssen zunächst für alle Einwirkungen (verschiedene Windrichtungen, verschiedene Schneeanhäufungen, Verkehrslasten, Temperaturlasten etc.) die Dimensionierungen durchgeführt werden. Im Anschluss muss eine Dimensionierung und Materialität des Tragelements gewählt werden die alle zwingenden Anforderungen für jede Einwirkung erfüllt. Es wird eine alle Einwirkungen einhüllende Dimensionierung vorgenommen.
2. Kommt als Ergebnis eines Dimensionierungsalgorithmus heraus, dass die eingangs durchgeführten Schätzungen für Lage, Dimensionen und Materialität der Tragelemente nicht bestätigt werden können, müssen die Schätzungen so lange iterativ

revidiert werden, bis der Zirkelbezug aufgelöst ist. Als Folge dessen müssen vorangegangenen Dimensionierungen mit direktem Bezug auf die revidierte Schätzung erneut überprüft werden. Der Zirkelbezug ist dann aufgelöst, wenn weder Dimensionen, Lage noch Materialität geändert werden müssen. Bei der Beispielstruktur lassen sich solche Zirkelbezüge noch mit Probiervverfahren (siehe Abschnitt 2.2.3) auflösen. Bei größeren Strukturen können dafür Ansätze, die in Abschnitt 2.2.3 erwähnten evolutionären Strategien, Anwendung finden.

3. Der Einfluss des Eigengewichts wird in Darstellung 4.6.6 aus Darstellungsgründen nicht integriert. Das Eigengewicht eines Tragelements hat oft einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dimensionierung eines Tragelements. Da das Eigengewicht aber am Anfang einer Dimensionierung steht und die Dimensionen am Ende, besteht hier ein algorithmusinterner Zirkelbezug, der durch iterative Probiervverfahren aufgelöst werden muss.
4. Es ist denkbar dass bei ausreichend Erfahrung mit vergleichbaren Strukturen einzelne Dimensionierungen übersprungen werden können, wenn entsprechende Schätzungen zu den Ergebnissen der übersprungenen Dimensionierungen gemacht werden können. Solche Zirkelbezüge lassen sich in Design Structure Matrizen integrieren. Es gilt aber auch hier, die Diagramme nicht zu überfrachten.

Mit Bezug auf die zu erwartenden Änderungen muss erwähnt werden, dass auch diese Änderungen mittels eines *Activity Diagramm* abgebildet werden können. Allerdings ist eine Darstellung auf Papier dann nur noch großformatig sinnvoll. Die Darstellung auf dem Rechner mittels geeigneter Software mit Zoom- und Filterfunktionen ist hingegen problemlos möglich.

Pos. Nr	Cluster/ Ingenieur	T01	T02	T03	VD01	VD07	VD09	S01	S02	S04	VD02	VD03	VD08	VD10	P02	P03	VD04	VD05	P01	VD06	L01
T01	1	A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1																			
T02		A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1																			
T03			A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1																		
VD01	2				A-1.1.2																
VD07					A-1.1.2																
VD09						A-1.1.2		A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1													
S01	3							A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1													
S02								A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1													
S04								A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1													
VD02	4										A-1.1.2										
VD03											A-1.1.2										
VD08												A-1.1.2									
VD10													A-1.1.2								
P02	5														A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1						
P03															A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1						
VD04																	A-1.1.2				
VD05	6																A-1.1.2				
P01	7																	A-1.1.2			
VD06																			A-1.1.1, A-1.2.1, A-2.1.1		
L01	8																			A-1.1.2	
	9																				A-1.1.2

Abbildung 4.6.4: Zuordnung der Anforderungen an Tragelemente und Verbindungs-  
details; Eigene Darstellung

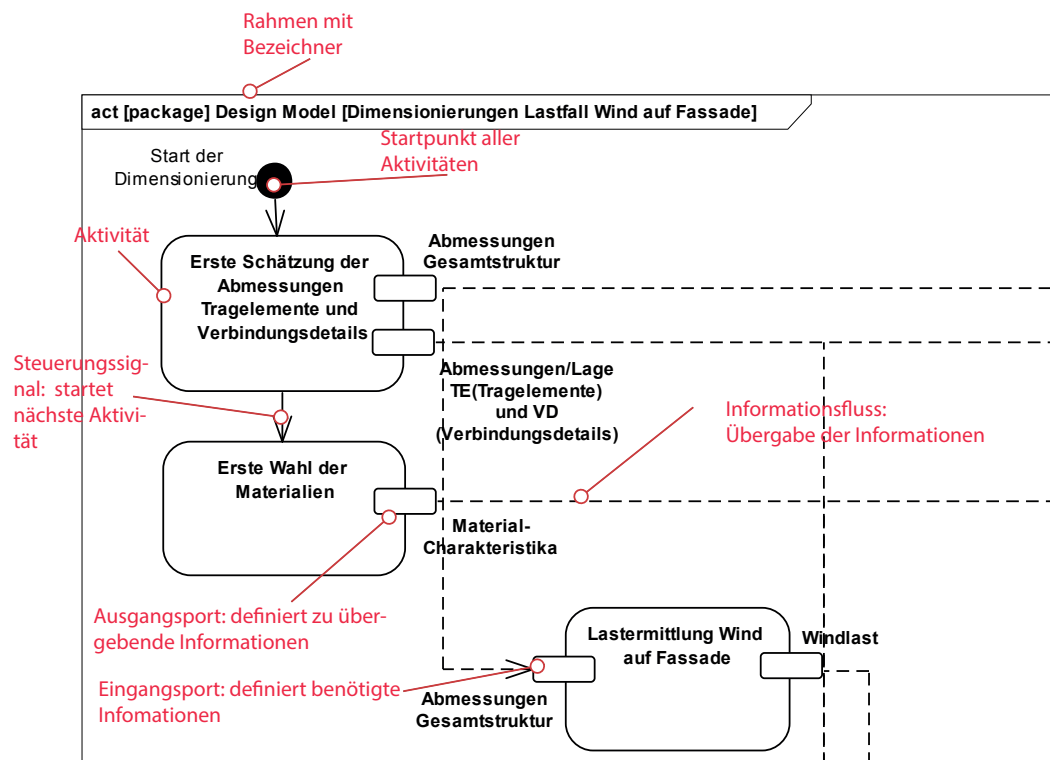


Abbildung 4.6.5: Activity Diagramm SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)



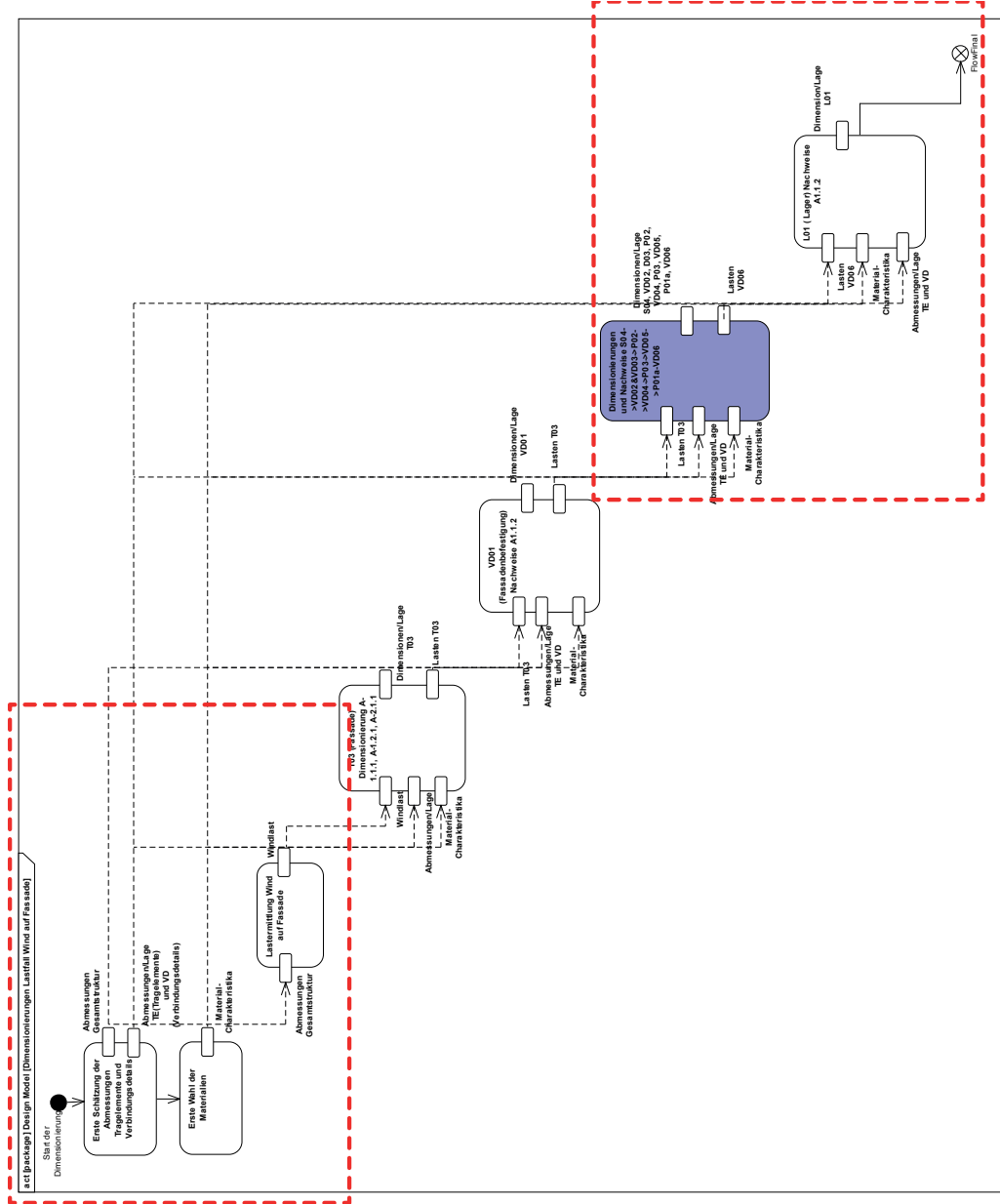


Abbildung 4.6.6: Gesamtdarstellung der notwendigen Dimensionierungen für Lastfall Wind auf Fassade; Eigene Darstellung

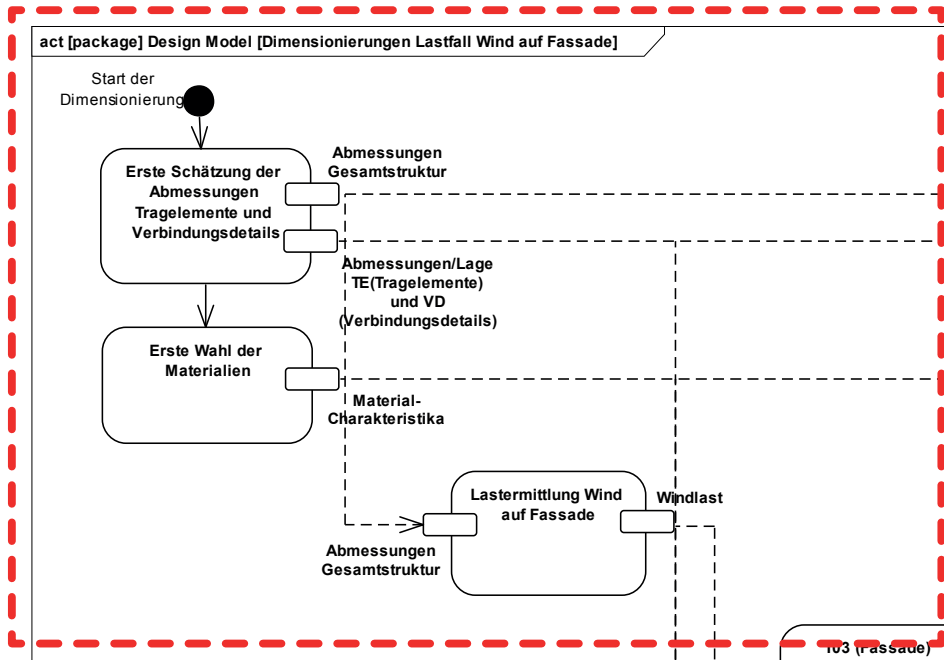


Abbildung 4.6.7: Ausschnitt Darstellung 4.6.6; Eigene Darstellung

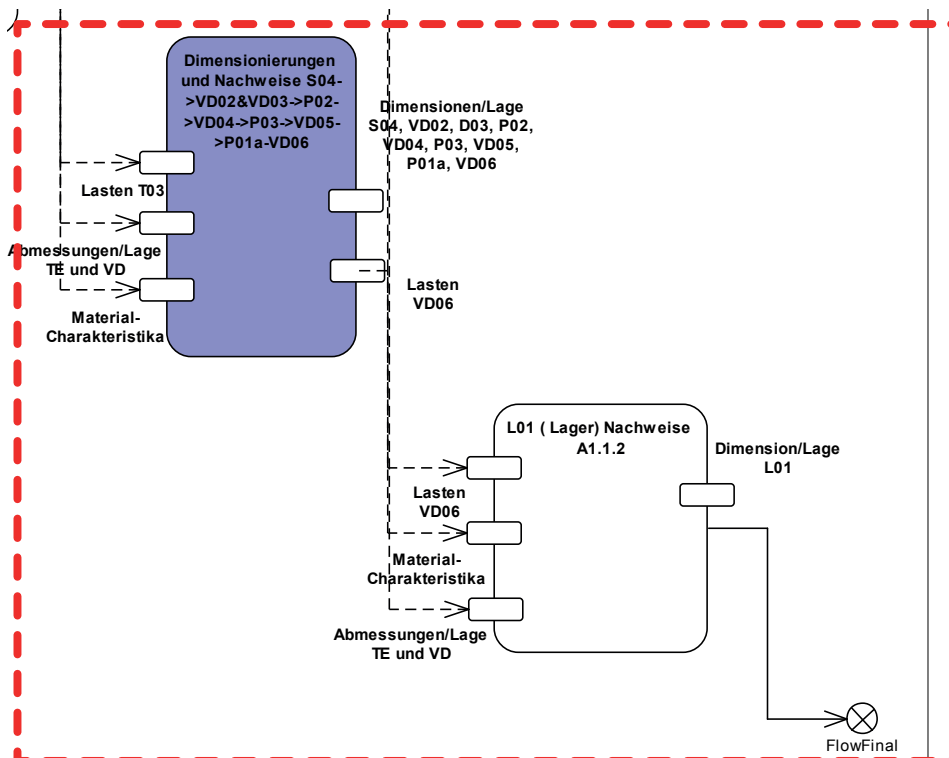


Abbildung 4.6.8: Ausschnitt Darstellung 4.6.6; Eigene Darstellung

## 4.7 Prozessdekomposition und Aufbau eines parametrisch-assoziativen Planungsmodells

### 4.7.1 Prozessdekomposition

Die Analyse komplexer Planungsprozesse beginnt mit der Zerlegung eines realen Prozesses in seine Komponenten. Diese als Dekomposition bezeichnete Zerlegung geht so weit in die Tiefe, bis Abhängigkeiten innerhalb der aufgespaltenen Teilprozesse direkt detektierbar sind. Ziel der Vorbereitung ist es, wie bei den Methoden zur Komplexitätskontrolle in Abschnitt 4.3 und 4.5 den kognitiven Aufwand in diesem Fall für den Aufbau des parametrischen-assoziativen Planungsmodells so weit als möglich zu reduzieren. Dies ist im Laufe der vorangehenden Abschnitte geschehen. Als nächster Schritt erfolgt in Anlehnung an Butz (Butz, Henning, 2011) die Abstraktion des realen Planungsprozesses inklusive Realitätsreduktion. Die Realitätsreduktion äußert sich in einer Vernachlässigung einiger realer Einflüsse bei der Übertragung teilprozessinterner Parameter und Algorithmen. Diese Abstraktion erfolgt bei der parametrisch-assoziativ gestützten Tragwerksplanung in Form des Aufbaus einzelner Algorithmen durch die Bildung von Unterroutrinen aus den durchzuführenden Nachweisen. Harel (Harel und Feldman, 2010) merkt hier in Bezug zu Komplexität folgendes an:

Unter Verwendung von Unterroutrinen ist es möglich, einen komplexen Algorithmus allmählich Schritt für Schritt zu entwickeln. Ein typisches algorithmisches Problem verlangt nach einer vollständig aufgeschlüsselten Lösung, die ausschließlich die erlaubten elementaren Aktionen benutzt. (...)Diese Unterroutrinen können wiederum auf anderen Anweisungen aufbauen, die - weil sie nicht hinreichend elementar sind - wieder als Aufrufe von Unterroutrinen angesehen werden, die einmal geschrieben werden müssen. (Harel und Feldman 2010, S.33)

Es soll in diesem Zusammenhang auch erwähnt werden, dass Harel (Harel und Feldman, 2010, S.32) in Unterroutrinen neben Einsparungen im Umfang der Beschreibung eines Algorithmus auch die Ursache für eine Zunahme der strukturellen Komplexität sieht. Dies sollte eine exakte Dokumentation zur besseren Nachvollziehbarkeit, um den kognitiven Aufwand zu beschränken, nach sich ziehen. Als Beispiele für ver-

nachlässigte Einflüsse bei der Realitätsreduktion nennt Butz (Butz, Henning, 2011) Reibungen, Temperatureffekte und andere nicht lineare Zustandsgrößen die auch für die Tragwerksplanung von Bedeutung sind.

Die potenziellen Auswirkungen vernachlässigter Einflüsse können zum Zeitpunkt der Synthese oftmals nicht in vollem Umfang verstanden werden. Aus diesem Grund müssen bereits erkannte aber bisher nicht berücksichtigte Einflüsse im Planungsprozess festgehalten werden, um eine nachfolgende Integration in die Analyse zu ermöglichen. Diese bei Butz (Butz, Henning, 2011, vgl. S.194) als *Hidden Links* bezeichneten Auswirkungen von vernachlässigten Einflüssen spielen eine wesentliche Rolle beim Verständnis von zunächst nicht offensichtlichen Interaktionen im Tragwerksplanungsprozess. Hidden Links sind gleichbedeutend mit nicht erkannten Zirkelbezügen. Das von Schnetzer (Schnetzer et al., 2006, vgl. S.158.) definierte Restrisiko ist direkt an die noch vorhandene Anzahl der Hidden Links gekoppelt. Die frühzeitige Identifikation dieser versteckten nicht offensichtlichen Interaktionen ist demnach eine Kernaufgabe beim Erkennen von Komplexität mit dem Ziel der Risikominimierung. Hinweise auf Hidden Links tauchen oftmals erst während des realen Planungsprozesses auf. Im Sinne der Komplexitätserkennung ist ein permanentes Einpflegen von erkannten Links eine Aufgabe, die in den parametrisch-assoziativ gestützten Planungsprozess zu integrieren ist. Neu erkannte Links können Ausgangspunkte für das Detektieren weiterer bisher unbekannter Verbindungen sein.

Neben der Detektierung von nicht offensichtlichen Verbindungen die gleichbedeutend mit nicht im Planungssystem abgebildeten Parameterkoppelungen sind, müssen alle bekannten Verbindungen auch bewertet werden. Das wichtigste Kriterium der Bewertung ist die Relevanz für den Output (siehe Darstellung 2.1.1) des gesamten Tragwerksplanungsprozesses. Liegen die Auswirkungen eines Einflussparameters auf den Output des Tragwerksplanungsprozesses unterhalb einer vordefinierten Grenze, ist die Relevanz nicht gegeben und der Einfluss kann im Rahmen der Realitätsreduktion vernachlässigt werden.

Im Zusammenhang mit den kognitiven Fähigkeiten und den Eigenschaften von Komplexen Systemen ist deutlich, dass die zu entwickelnden Methoden für das Erkennen und Bewerten von Komplexität nicht allein auf dem menschlichen Denkvermögen aufbauen sollten. Aus diesem Grund erscheint der Aufbau eines parametrisch-assoziativen Planungssystems als sinnvoll, da hier die in Abschnitt 4.8 beschriebenen Sensitivitätsanalysen und umfangreiche Optimierungen möglich werden.

Ein entscheidender Faktor für die Anzahl der notwendigen Denkschritte für das Erkennen von Parameterzusammenhängen ist die Strukturierung der Darstellung von

assoziierten, parametrischen Algorithmen. Kann die Hierarchie des Systems aus Modellen, Algorithmen und der assoziierenden Parameter so dargestellt werden, dass die kausalen Beziehungen schnell ablesbar sind, verringert sich der kognitive Aufwand gegenüber einer willkürlichen Darstellung. Entsprechend gilt es Darstellungsmethoden bereitzustellen, die die Lesbarkeit der Modell- und Algorithmenbeziehungen verbessern. Ein weiterer Vorteil von parametrischen-assoziativen Planungssystemen ist die Wiederverwertbarkeit von mehreren in vordefinierter Reihenfolge<sup>11</sup> aufeinanderfolgenden Algorithmen, die zu Gruppierungen gefügt werden. Diese Gruppierungen werden in vielen visuellen Programmiersprachen als Cluster und der Vorgang der Gruppierung als Clustern bezeichnet. Die einzelnen Teilschritte beim Aufbau, der Analyse und der anschließenden Anwendung eines parametrisch-assoziativen Planungsmodells für den Lastfall Wind der 50 x 50 Struktur lauten wie folgt:

1. Definition und Dokumentation der zu verwendenden Algorithmen und Parameter
2. Verknüpfen der Parameter mit Algorithmen
3. Analyse der Parameter- und Algorithmenbeziehungen und Detektierung von Hidden Links
4. Neuaufbau der Parameter- und Algorithmenbeziehungen in einer visuellen Programmierumgebung als Parametrisch-assoziatives-Planungssystem
5. Ausführung des parametrisch-assoziativen Planungssystems und räumliche Modellierung
6. Clustern und Wiederverwertung von Algorithmen
7. Sensitivitätsanalysen auf Grundlage eines parametrisch-assoziativen Planungssystems
8. Optimierungen auf Grundlage eines parametrisch-assoziativen Planungssystems

---

<sup>11</sup>Entweder die Algorithmen laufen immer in gleicher Reihenfolge oder auf Basis von Entscheidungen nach einem vordefinierten Schema ab.

#### 4.7.2 Definition und Dokumentation der zu verwendenden Algorithmen und Parameter

Bei der Präzisierung der notwendigen Dimensionierung aus Darstellung 4.6.6 werden die Algorithmen und Parameter mittels des aus der Modellierungssprache SysML entlehnten Block Definition Diagramm verwendet. Es dient im Systems Engineering der Dokumentation von Systembausteinen und deren Beziehungen. Die Bausteine entsprechen in der Tragwerksplanung den notwendigen Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung und Tragwerksparemtern und die Beziehungen dem Informationsaustausch mithilfe von Parametern. Die Algorithmen werden als *constraint blocks* definiert. Diese constraint blocks werden im Systems Engineering verwandt, um wiederzuverwendende Regeln bzw. Algorithmen festzuhalten. Dabei können die Algorithmen in verschiedenen Softwarepaketen bzw. Programmierumgebungen durchgeführt werden. Die Algorithmen können dabei aus weiteren Unteralgorithmen zusammengebaut werden. Um diese Unteralgorithmen zu dokumentieren, können Internal Block Diagramme verwendet werden die in Weilkiens (Weilkiens und Soley, 2014) beschrieben werden.

Die Parameter werden mittels *properties* fixiert die im Systems Engineering zunächst sehr allgemein als Systemeigenschaften definiert werden. In Abbildung 4.7.2 werden die notwendigen Regeln und Parameter zunächst ohne Verknüpfungen dargestellt. Die Bedeutung der einzelnen *properties* (Parameter) wird in der Darstellung über Kommentare eingepflegt. Diese Darstellung kann für das Gesamtprojekt inklusive aller Tragelemente erweitert und analysiert werden. Dies ist dann nur noch großformatig auf Papier möglich, weswegen sich spezielle Softwarepakete für das Systems Engineering zum Aufbau solcher Diagramme anbieten.

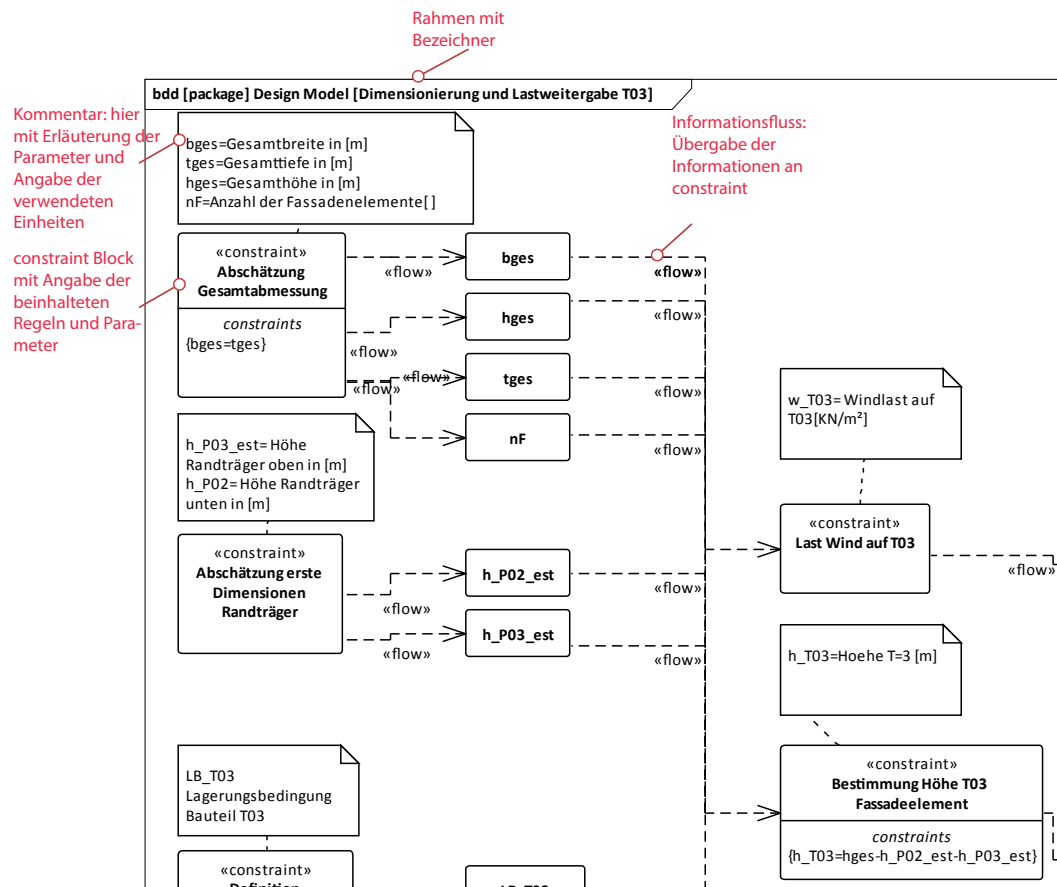


Abbildung 4.7.1: Block Definition Diagramm SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)

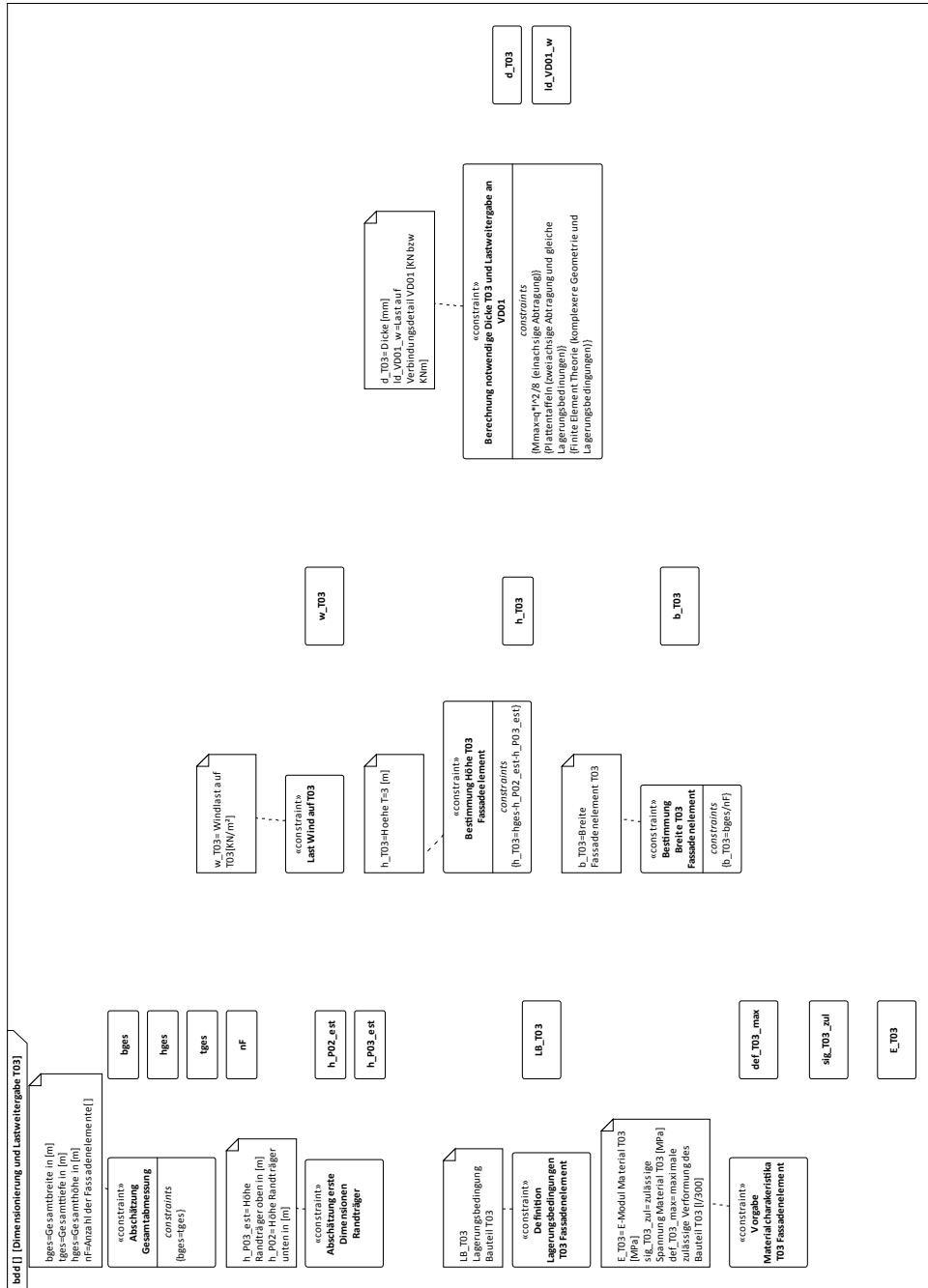


Abbildung 4.7.2: Block Definition Diagramm für die Darstellung von Constraint Blocks und Properties; Eigene Darstellung



### 4.7.3 Verknüpfen der Parameter mit Algorithmen

Im nächsten Schritt wird der Informationsfluss gepflegt. Dieser Informationsfluss wird als flow-Pfeil zwischen den Properties und Constraints geknüpft.

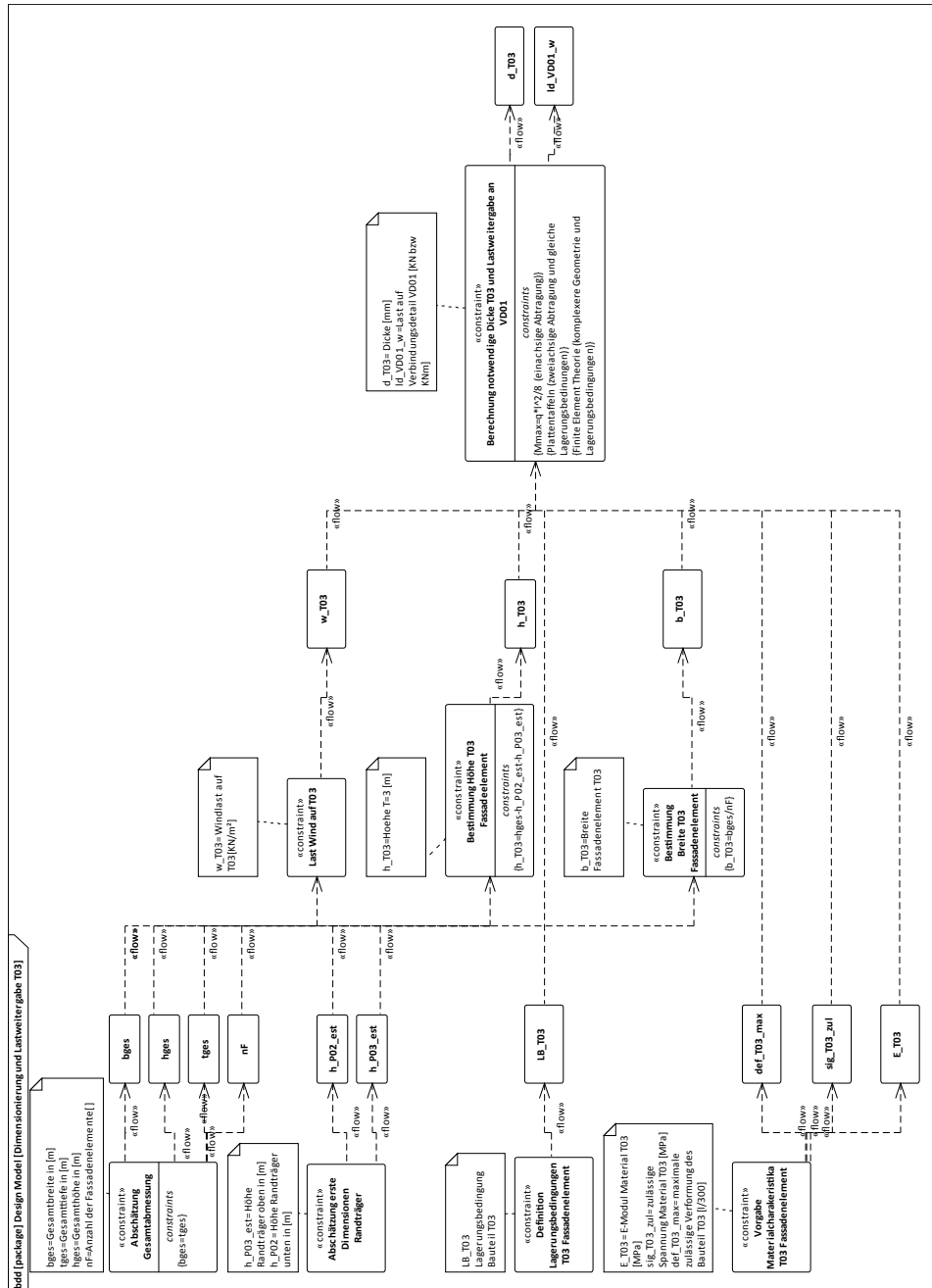


Abbildung 4.7.3: Block Definition Diagramm für die Darstellung von Constraint Blocks und Properties mit Informationsfluss; Eigene Darstellung

#### 4.7.4 Analyse der Parameter- und Algorithmenbeziehungen und Detektierung von indirekten Beziehungen

Die direkten Zusammenhänge zwischen Parametern und Algorithmen werden aus Abbildung 4.7.3 abgeleitet<sup>12</sup>. Bei der Matrix in Abbildung 4.7.4 und entsprechend in Abbildung 4.7.5 sind keine Beziehungen zwischen den Parametern ablesbar.

	b_T03	hges	d_T03	d_T03_est	def_T03_max	E_T03	h_P02_est	h_P03_est	h_T03	hges	LB_T03	ld_VD01_w	nF	sig_T03_zul	hges	w_T03	Abschaetzung erste Dimensionen Randtraeger	Abschaetzung GesamtmaBmessung	Berechnung notwendige Dicke T03 und Lastweitergabe an VD01	Bestimmung Breite T03 Fassadenelement	Bestimmung Hoehe T03 Fassadenelement	Definition Lagerungsbedingungen T03 Fassadenelement	Last Wind auf T03	Schaetzung Dicke T03 Fassadenelement	Vorgabe Materialcharakteristika T03 Fassadenelement	
b_T03																			1							
hges																				1				1		
d_T03																										
d_T03_est																										
def_T03_max																				1						
E_T03																				1						
h_P02_est																					1					
h_P03_est																					1					
h_T03																					1					
hges																					1			1		
LB_T03																				1						
ld_VD01_w																										
nF																					1					
sig_T03_zul																					1					
hges																								1		
w_T03																					1					
Abschaetzung erste Dimensionen Randtraeger							1	1																		
Abschaetzung GesamtmaBmessung		1							1			1		1												
Berechnung notwendige Dicke T03 und Lastweitergabe an VD01			1									1														
Bestimmung Breite T03 Fassadenelement	1																									
Bestimmung Hoehe T03 Fassadenelement									1																	
Definition Lagerungsbedingungen T03 Fassadenelement										1																
Last Wind auf T03																1										
Schaetzung Dicke T03 Fassadenelement				1																						
Vorgabe Materialcharakteristika T03 Fassadenelement					1	1								1												

Abbildung 4.7.4: Matrix der direkten Abhängigkeiten; Eigene Darstellung

<sup>12</sup>Dies kann manuell oder über direkt in Softwarepaketen des Systems Engineering implementierten Matrizenableitungen geschehen.

Nach Bildung der transitiven Hülle verändert sich die Abhängigkeitsmatrix in Abbildung 4.7.7 sodass auch indirekte Abhängigkeiten abgelesen werden können. Im blau hinterlegten Bereich finden sich die Parameterabhängigkeiten. Darstellung 4.7.6 gibt die indirekten Beziehungen als direkte Pfeilverbindungen innerhalb des Graphen wieder.

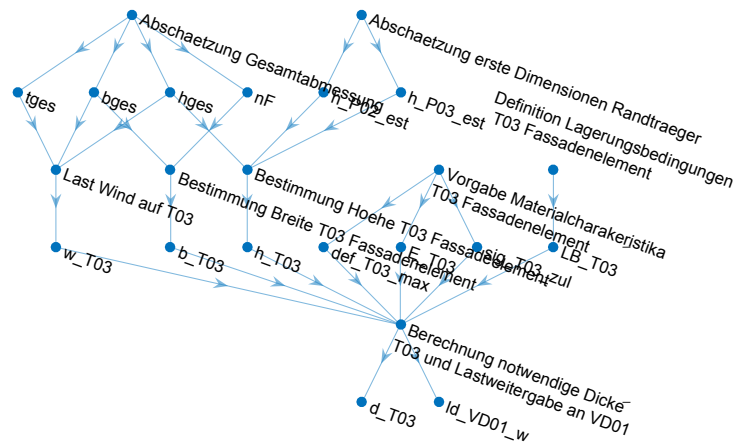


Abbildung 4.7.5: Graph-Darstellung der direkten Beziehungen Dimensionierung T03; Eigene Darstellung

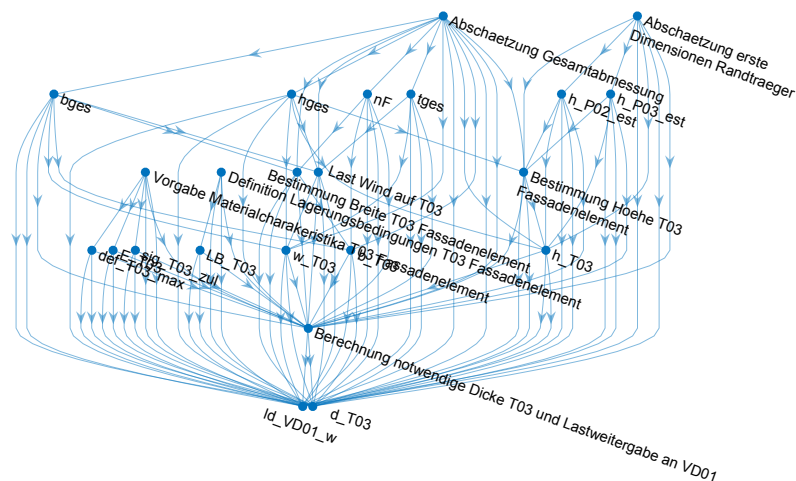


Abbildung 4.7.6: Graph-Darstellung der direkten und indirekten Beziehungen Dimensionierung T03; Eigene Darstellung

	b_T03	bges	d_T03	def_T03_max	E_T03	h_P02_est	h_P03_est	h_T03	hges	lB_T03	ld_VD01_w	nF	sig_T03_zul	tges	w_T03	Abschaetzung erste Dimensionen Randtraeger	Abschaetzung Gesamtabmessung	Berechnung notwendige Dicke T03 und Lastweitergabe an VD01	Bestimmung Breite T03 Fassadenelement	Bestimmung Hoehe T03 Fassadenelement	Definition Lagerungsbedingungen T03 Fassadenelement	Last Wind auf T03	Vorgabe Materialcharakteristika T03 Fassadenelement
b_T03			1								1							1					
bges	1		1												1			1	1				1
d_T03																							
def_T03_max			1								1							1					
E_T03			1								1							1					
h_P02_est			1				1			1								1		1			
h_P03_est			1				1			1								1		1			
h_T03			1							1								1					
hges			1					1		1					1			1		1			1
lB_T03			1							1								1					
ld_VD01_w																							
nF	1		1									1						1	1				
sig_T03_zul			1								1								1				
tges			1								1				1			1					1
w_T03			1								1							1					
Abschaetzung erste Dimensionen Randtraeger			1			1	1	1			1							1		1			
Abschaetzung Gesamtabmessung	1	1	1					1	1	1	1			1	1			1	1	1			1
Berechnung notwendige Dicke T03 und Lastweitergabe an VD01			1								1							1	1	1			1
Bestimmung Breite T03 Fassadenelement	1		1								1												
Bestimmung Hoehe T03 Fassadenelement			1				1				1												
Definition Lagerungsbedingungen T03 Fassadenelement			1							1	1												
Last Wind auf T03			1								1				1								
Vorgabe Materialcharakteristika T03 Fassadenelement			1	1	1						1		1										

Abbildung 4.7.7: Matrix der direkten und indirekten Abhängigkeiten; Eigene Darstellung

#### 4.7.5 Aufbau der Parameter- und Algorithmenbeziehungen in einer Programmierumgebung

Für die Umsetzung der in Abbildung 4.7.3 definierten Constraints eignen sich verschiedene Softwareumgebungen. Für einfache Dimensionierungen reichen die Möglichkeiten einer Tabellenkalkulation aus. Sollen umfangreiche Sensitivitätsanalysen und Optimierungen durchgeführt werden, müssen entsprechende Werkzeuge zur Be-

arbeitung numerischer Operationen auf Matrizenbasis herangezogen werden. Für eine direkte Visualisierung der Dimensionierungsergebnisse bieten sich in CAD-Umgebungen integrierte Programmiersprachen, visuelle Programmieraufsätze oder auch die Einbindung von Routinen über eine API<sup>13</sup> an. Des Weiteren können auch diverse Mischformen für den Aufbau parametrisch-assoziativer Planungssysteme verwendet werden. Die Wahl der Werkzeuge richtet sich hier nach den Anforderungen der späteren Bewertung der Ergebnisse. Soll das Planungssystem aus verschiedenen spezialisierten Programmpaketen verknüpft werden, um beispielsweise automatisierte, modellübergreifende Optimierungen oder Sensitivitätsanalysen durchzuführen, sind weitere Überlegungen zur Übergabe der Parameter notwendig. Für das Beispielprojekt wird das parametrisch-assoziative Planungssystem in der textbasierten Programmierumgebung Matlab<sup>®</sup> beispielhaft umgesetzt. Die so ermittelten Dimensionen werden anschließend mithilfe des visuellen Programmieraufsatzes Grasshopper<sup>®</sup> für Rhinoceros<sup>®</sup> visualisiert. Aus Gründen der Darstellung werden hier ausschließlich die beiden Elemente Fassade (T03) und Fassadenpfosten (S04) dimensioniert und die Dimensionierungen verknüpft.

Darstellung 4.7.8 und 4.7.9 zeigen die Übersicht über den Gesamtprozess inklusive der Dokumentation der einzelnen Befehle. Die Eingangsparameter werden über den Sammelparameter *varin* in die Programmierung eingebracht. Diese Variable wird als Matrix direkt aus einem Tabellenverarbeitungsprogramm eingelesen. Dieses Vorgehen wird gewählt, um im weiteren Ablauf automatisierte Sensitivitätsanalysen zu erlauben. Bei der Zeile

```
d_T03 = Dimensionierung_Ausgabe_Lasten_T03(b_T03, h_T03, w_T03,  
def_T03max, sigma_T03alow, E_T03);
```

handelt es sich um den Aufruf einer Unteroutine zur Dimensionierung der Glasplatte (Fassadenelement T03). Diese Unteroutine wird in Abbildung 4.7.10 dargestellt. Als erste grobe Näherung wird auf Grundlage der Streifenmethode von Marcus (Marcus, 1929) die Dimensionierung einer ESG-Scheibe unter Berücksichtigung der zulässigen Spannung<sup>14</sup> für ESG (50 MPa) und der zulässigen relativen Verformung (Spannweite/100) durchgeführt. Des Weiteren gibt es mehrere Hilfsroutinen sowie eine Unteroutine zur Dimensionierung des Fassadenpfostens.

```
t_S04 = Dimensionierung_S04(h_T03, lin_load_approx_S04,
```

<sup>13</sup>„Application Programming Interface, Programmierschnittstelle bei CAx- und EDM/PDM-Systemen zur Erweiterung der Leistungsfähigkeit auf der Systemebene (im Unterschied zu der Erweiterung durch Makros und Kommandofolgen, die überwiegend auf der Ebene der Benutzerschnittstelle durchgeführt wird.)“ (Vajna et al. 2009, S.492)

<sup>14</sup>Da es für den Glasbau bisher keinen Eurocode und keine DIN Norm gibt, die vergleichbar zum Sicherheitskonzept im Stahl-, Holz- oder Massivbau ist, wird hier mit zulässigen Spannungen gearbeitet. Im Membranbau findet das Konzept der zulässigen Spannungen ebenfalls Anwendung.

*sigma\_S04alow, d\_S04, def\_S04max, E\_S04*);

Bei dieser Routine wird die Breite des zu dimensionierenden Rechteckprofils mit 20 mm vorgegeben, die aus konstruktiven Gründen gewählt wird. Des Weiteren fließen die angenäherte Linienlast, das E-Modul des Materials (Edelstahl), die erlaubte Verformung, die Dimensionen und die zulässige Spannung des Materials in die Dimensionierung ein. Da in dieser Analyse noch keine Stabilitätsnachweise wie Biegedrillknicken enthalten sind, wird die zulässige Spannung reduziert. Als statisches System wird ein Einfeldträger angenommen. Weitere statische Systeme sind über Verzweigungen innerhalb der Unterroutine möglich und über die Verwendung einer Variablen für die Freiheitsgrade ansteuerbar. Abschließend werden die Massen für die Elemente T03 (Fassadenelement) und S04 (Fassadenpfosten aus Edelstahl) berechnet und gewichtet. Diese Gewichtungsfaktoren sind beispielhaft eingeführt, um die Massen vergleichen zu können. Damit lassen sich beispielsweise unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Ausstöße für die Herstellung der einzelnen Bauteile oder auch der Aufwand für die einzelnen Materialien berücksichtigen. Die Reduktion der gewichteten Gesamtmasse wird im folgenden Abschnitt als Optimierungsziel definiert.

```

%Abschaetzung_Gesamtabmessungen%

bges=varin(i,2); % Gesamtbreite in mm

hges=varin(i,13); % Gesamthoehe in mm

tges=bges; % Gesamttiefe mm

nF=varin(i,19); % Anzahl der Fassadenunterteilungen keine Einheit

% Abschaetzung_Dimensionen_Randtraeger %

h_P02_est=varin(i,9); % Hoehe Randtraeger P02 in mm

h_P03_est=varin(i,10); % Hoehe Randtraeger P03 in mm

% Definitionen Lagerungsbedingungen %

LB_T03=varin(i,14); % hier als Platzhalter für andere Lagerungsarten benutzt wird
nicht verwendet

% Vorgabe Materialcharakteristika T03 Fassadenelement %

def_T03max=varin(i,6); % zulaessige relative Verformung keine Einheit

sigma_T03aloew=varin(i,23); % zulaessige Glasspannung (hier ESG -
EinScheibensicherheitsGlas) in N/mm²

E_T03=varin(i,8); % N/mm²

sg_Glas=varin(i,20); % spezifisches Gewicht Glas in Kg/mm³

%Vorgabe Materialcharakteristika S04 Fassadenpfosten%

def_S04max=varin(i,5);%

sigma_S04aloew=varin(i,22); % Zulaessige Spannungen für S04 aus S235 um 30%
reduziert wegen nicht berücksichtigter Stabilitaetsnachweise in N/mm²

E_S04=varin(i,7); %E-Modul Stahl in N/mm²

sg_Stahl=varin(i,21);%spezifisches Gewicht Stahl in Kg/mm³

%Vorgabe Dimensionen S04 Fassadenpfosten%

d_S04=varin(i,3); % Dicke Rechteckprofil Fassadenpfosten S04 konstruktiv gewaehlt

%Vorgabe Windlast%

w_T03=varin(i,26); %N/mm² entspricht 1.5KN/m²

%Bestimmung_Hoehe_Fassadenelement T03%

h_T03=Bestimmung_Hoehe_Fassadenelement_T03(hges,h_P02_est,h_P03_est);%mm

```

Abbildung 4.7.8: Gesamttablauf und Dokumentation der Matlab-Programmierung Teil I; Eigene Darstellung

```

%Bestimmung Breite Fassadenelement T0%

b_T03 = Bestimmung_Breite_Fassadenelement_T0(bges,nF);%mm

%Dimensionierung T03 und Ausgabe Lasten

d_T03=Dimensionierung_Ausgabe_Lasten_T03(b_T03,h_T03,w_T03,def_T03max,sigma_T03aloe
w,E_T03); %mm

%Lastermittlung für VD01 und S04

lin_load_approx_S04 = Lastermittlung_VD01_und_S04(w_T03,b_T03,h_T03);

%Dimensionierung S04

t_S04 =
Dimensionierung_S04(h_T03,lin_load_approx_S04,sigma_S04aloe
w,d_S04,def_S04max,E_S04);

%Ermittlung Massen

Wichtung_Glas=varin(i,27);

Wichtung_Stahl=varin(i,28);

Masse_Glas=sg_Glas*h_T03*bges*d_T03;

Masse_Glas_gew=Masse_Glas*Wichtung_Glas;

Masse_Stahl=(nF+1)*sg_Stahl*h_T03*d_S04*t_S04;

Masse_Stahl_gew=Masse_Stahl*Wichtung_Stahl;

Masse_gew=Masse_Glas_gew+Masse_Stahl_gew;

```

Abbildung 4.7.9: Gesamtablauf und Dokumentation der Matlab-Programmierung Teil II; Eigene Darstellung



```

function G = Dimensionierung_Ausgabe_Lasten_T03(A,B,C,D,E,F)
b_T03=A; %Uebergabe Breite
h_T03=B; %Uebergabe Hoehe
w_T03=C; %Uebergabe Windlast
def_T03max=D; %Uebergabe zulaessige Verformung
sigma_T03alow=E; %Uebergabe zulaessige Spannung
E_T03=F; %Uebergabe E Modul
%Dimensionierung T03 und Ausgabe Lasten
d_T03=1;% Definition Mindestdicke 1 mm
epsilon=b_T03/h_T03;%[ ] Verhaeltnis Hoehe zu Breite
kappa=epsilon^4/(1+epsilon^4);%[ ] Hilfwert zur Beruecksichtigung des Hohe zu Breite
Verhaeltnisses
p_x=w_T03*kappa; %N/mm² Ermittlung Anteil der Last in X-Richtung
p_y=w_T03*(1-kappa);%N/mm² Ermittlung Anteil der Last in Y-Richtung
mx_max=p_x*b_T03^2/8;%Nmm Ermittlung maximales Biegemoment in Abtragsrichtung x
my_max=p_y*h_T03^2/8;%Nmm Ermittlung maximales Biegemoment in Abtragsrichtung x
util_T03=1.1; %Startdefinition der Ausnutzung fuer Schleifenkonstruktion
def_max_rel=def_T03max+1; %Startdefinition der Verformung fuer Schleifenkonstruktion
while((util_T03>1)&&(def_max_rel>def_T03max)) %Definition Durchlaufkriterium Schleife
d_T03=d_T03+1;%mm Iterative Dickenzunahme
W_T03= d_T03^2/6*1;%mm³ Ermittlung Widerstandsmoment
I_T03=d_T03^3/12*1;%mm⁴ Ermittlung Flaechentraegheitsmoment
sigma_x= mx_max/W_T03; %N/mm² Spannung in x-Richtung
sigma_y= my_max/W_T03; %N/mm² Spannung in y-Richtung
sigma_max_1= (sigma_x+sigma_y)/2+((sigma_x-sigma_y)^2)^0.5;%N/mm² Ermittlung
Hauptspannung sigma 1
sigma_max_2= (sigma_x+sigma_y)/2-((sigma_x-sigma_y)^2)^0.5;%N/mm² Ermittlung
Hauptspannung sigma 2
sigma_max=max(sigma_max_1,sigma_max_2);%N/mm² Ermittlung maßgebende Hauptspannung
util_T03=sigma_max/sigma_T03alow;% Berechnung Ausnutzung
def_max=p_x*1*b_T03^4/E_T03/I_T03*5/384;%mm Ermittlung Durchbiegung
def_max_rel=def_max/b_T03; %mm Ermittlung Durchsenkung bezogen auf Spannweite
end %Ende der Schleife
G=d_T03; %Uebergabe der Berechneten Mindestdicke

```

Abbildung 4.7.10: Unterroutine zur Dimensionierung der Glasscheibe nach Marcus (Marcus, 1929); Eigene Darstellung

## 4.8 Korrelations- und Sensitivitätsanalysen auf Grundlage des parametrisch-assoziativen Planungssystems

Auf Grundlage des nun verfügbaren parametrisch-assoziativen Planungssystems ist es möglich, gezielt Korrelationsanalysen durchzuführen. Hierfür werden Eingangsparameter gezielt verändert und die Auswirkungen auf ausgewählte andere Parameter des Systems analysiert.

Für dieses Vorgehen wird eine Schleifenkonstruktion um die Gesamtstruktur in Abbildung 4.7.8 gelegt und die Eingangswerte die in der Sammelvariable *varin* abgelegt werden jeweils um -20%, -10%, +10% und +20% verändert. Die Schleifenkonstruktion ist in Abbildung 4.7.8 rot hinterlegt. Die Ergebnisse werden in der Variable *varout* abgelegt. Anschließend wird ein möglicher Zusammenhang zwischen der prozentual veränderten Variablen durch Bildung des aus der deskriptiven Statistik bekannten Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman<sup>15</sup>, dessen Ermittlung in Abbildung 4.8.2 grau hinterlegt ist, untersucht. Diese Koeffizienten werden in einer DSM-Matrix (Abbildung 4.8.1) abgelegt. Dieses Vorgehen ist an die von Joshi (Joshi, 2010, S.269) beschriebene Anwendung der Brute-Force-Methode angelehnt. Ein Spearman Koeffizient von 1 bedeutet, dass ein *streng monotoner Zusammenhang* zwischen dem veränderten Koeffizienten und der Variablen in der Matrix besteht. Eine 0 steht für *kein Zusammenhang* und wird in der Matrix als leeres Feld markiert. Die -1 weist auf einen indirekt monotonen Zusammenhang hin. Bei allen Werten zwischen 1 und -1 bestehen direkte und indirekte Zusammenhänge die aber nicht streng monoton sind.

Es lassen sich nun qualifizierte Aussagen über die Parameterzusammenhänge treffen. Es wird damit möglich, Aussagen über die Auswirkungen einzelner Eingangsparameter auf die im vorangegangenen Abschnitt definierte gewichtete Gesamtmasse abzugeben. Für genauere Aussagen lassen sich parallel zur Ermittlung der Korrelationen die Verläufe mit Bezug zu den einzelnen Eingangsparametern in Diagrammform ausgeben. Abbildung 4.8.3 zeigt die Zusammenhänge zwischen einigen ausgewählten Eingangsparametern und den gewichteten Massen. Beispielsweise findet sich in der Matrix in Abbildung 4.8.1 für den Zusammenhang zwischen  $nF$  (Anzahl der

---

<sup>15</sup> „Ein häufig berechnetes Maß für den Zusammenhang ordinalskaliertter Variablen ist die Rangkorrelation nach Spearman (*Spearman's rs*) auch *Spearman's ρ* (sprich: Rho) genannt wird. Diese Korrelation entspricht der Produkt-Moment-Korrelation der Ränge zweier Variablen. Wenn die Rangreihen aus ursprünglich metrischen Variablen abgeleitet wurden, misst die Spearman'sche Rangkorrelation den Grad eines monotonen Zusammenhangs zwischen den ursprünglichen Variablen.“ (Holling und Gediga 2011, S.176)

Fassadenunterteilung) und der gewichteten Stahlmasse der Wert 1,0, der auf einen streng monotonen Zusammenhang hinweist. Für den Zusammenhang zwischen  $nF$  und der gewichteten Glasmasse findet man in der Matrix den Wert -0,8, der für einen nicht streng monotonen Zusammenhang steht. Der Verlauf in dem zugehörigen Diagramm bestätigt den berechneten Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman, da ein nicht-linearer Zusammenhang klar ablesbar ist. Die Ursache dieses Verlaufs ist biaxiale Lastabtragung der Glasscheibe, die durch Verwendung der Streifenmethode von Marcus (Marcus, 1929) in die Bemessung gebracht wird. Eine schmalere Glasscheibe führt bei gleicher Scheibenhöhe nicht zwangsläufig zu einer dünneren Glasscheibe, da die Lastabtragung weniger biaxial sondern immer stärker uniaxial erfolgt. Ein Blick in den Dimensionierungsablauf in Abbildung 4.7.10 zeigt speziell bei der Ermittlung der Variablen  $kappa$  klar diesen nicht-linearen Zusammenhang der dann über die Ermittlung der Schnittgrößen noch verstärkt wird.

	b_T03	bges	d_S04	d_T03	def_S04max	def_T03max	E_S04	E_T03	h_P02_est	h_P03_est	h_S04	h_T03	hges	LB_T03	lin_load_approx_S04	Masse_gew	Masse_Glas	Masse_Stahl	nF	sg_Glas	sg_Stahl	sigma_S04alow	sigma_T03alow	t_S04	tges	w_T03	Wichtung_Glas	Wichtung_Stahl	Masse_Glas_gew	Masse_Stahl_gew			
b_T03																																	
bges	1,0	1,0		0,7											-1,0	0,9	0,9	-1,0						-1,0	1,0					0,9	-1,0		
d_S04			1,0													1,0	1,0							-1,0						1,0			
d_T03																																	
def_S04max					1,0											-1,0	-1,0							-1,0							-1,0		
def_T03max						1,0																											
E_S04																																	
E_T03																																	
h_P02_est				0,0				1,0	-1,0	-1,0					-1,0	-0,9	-0,4	-1,0						-1,0						-0,4	-1,0		
h_P03_est				0,0				1,0	-1,0	-1,0					-1,0	-0,9	-0,4	-1,0						-1,0						-0,4	-1,0		
h_S04																																	
h_T03																																	
hges				-0,1						1,0	1,0	1,0			1,0	1,0	0,7	1,0						1,0					0,7	1,0			
LB_T03																																	
lin_load_approx_S04																																	
Masse_gew																																	
Masse_Glas																																	
Masse_Stahl																																	
nF	-1,0			-0,8											1,0	-0,7	-0,8	1,0	1,0					1,0					-0,8	1,0			
sg_Glas																																	
sg_Stahl																																	
sigma_S04alow																							1,0										
sigma_T03alow				-0,9												-0,9	-0,9							1,0						-0,9			
t_S04																																	
tges																																	
w_T03																																	
Wichtung_Glas																1,0											1,0			1,0			
Wichtung_Stahl																1,0												1,0		1,0			
Masse_Glas_gew																																	
Masse_Stahl_gew																																	

Abbildung 4.8.1: Korrelationskoeffizient in einer Matrix; Eigene Darstellung

```

for i=1:1:5
%Abschaetzung_Gesamtabmessungen%
bges=varin(i,2); % Gesamtbreite in mm
...
...
...
%Ermittlung Massen
Wichtung_Glas=varin(i,27);
Wichtung_Stahl=varin(i,28);
Masse_Glas=sg_Glas*h_T03*bges*d_T03;
Masse_Glas_gew=Masse_Glas*Wichtung_Glas;
Masse_Stahl=(nF+1)*sg_Stahl*h_T03*d_S04*t_S04;
Masse_Stahl_gew=Masse_Stahl*Wichtung_Stahl;
Masse_gew=Masse_Glas_gew+Masse_Stahl_gew;

%Schreiben Analysematrix
varout(i,1)=b_T03;
varout(i,2)=bges;
varout(i,3)=d_S04;
varout(i,4)=d_T03;
varout(i,5)=def_S04max;
varout(i,6)=def_T03max;
varout(i,7)=E_S04;
varout(i,8)=E_T03;
varout(i,9)=h_P02_est;
varout(i,10)=h_P03_est;
varout(i,11)=h_T03;
varout(i,12)=h_T03;
varout(i,13)=hges;
varout(i,14)=LB_T03;
varout(i,15)=lin_load_approx_S04;
varout(i,16)=Masse_gew;
varout(i,17)=Masse_Glas;
varout(i,18)=Masse_Stahl;
varout(i,19)=nF;
varout(i,20)=sg_Glas;
varout(i,21)=sg_Stahl;
varout(i,22)=sigma_S04alow;
varout(i,23)=sigma_T03alow;
varout(i,24)=t_S04;
varout(i,25)=tges;
varout(i,26)=w_T03;
varout(i,27)=Wichtung_Glas;
varout(i,28)=Wichtung_Stahl;
varout(i,29)=Masse_Glas_gew;
varout(i,30)=Masse_Stahl_gew;
i=i+1;
end
a=varout(1:5,28);
a=a';
for k=1:1:30
b=varout(1:30,k);
b=b';
[RHO,PVAL] = corr(a',b', 'Type', 'Spearman');
koef(k)=RHO;
end

```

Abbildung 4.8.2: Ermittlung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman; Eigene Darstellung

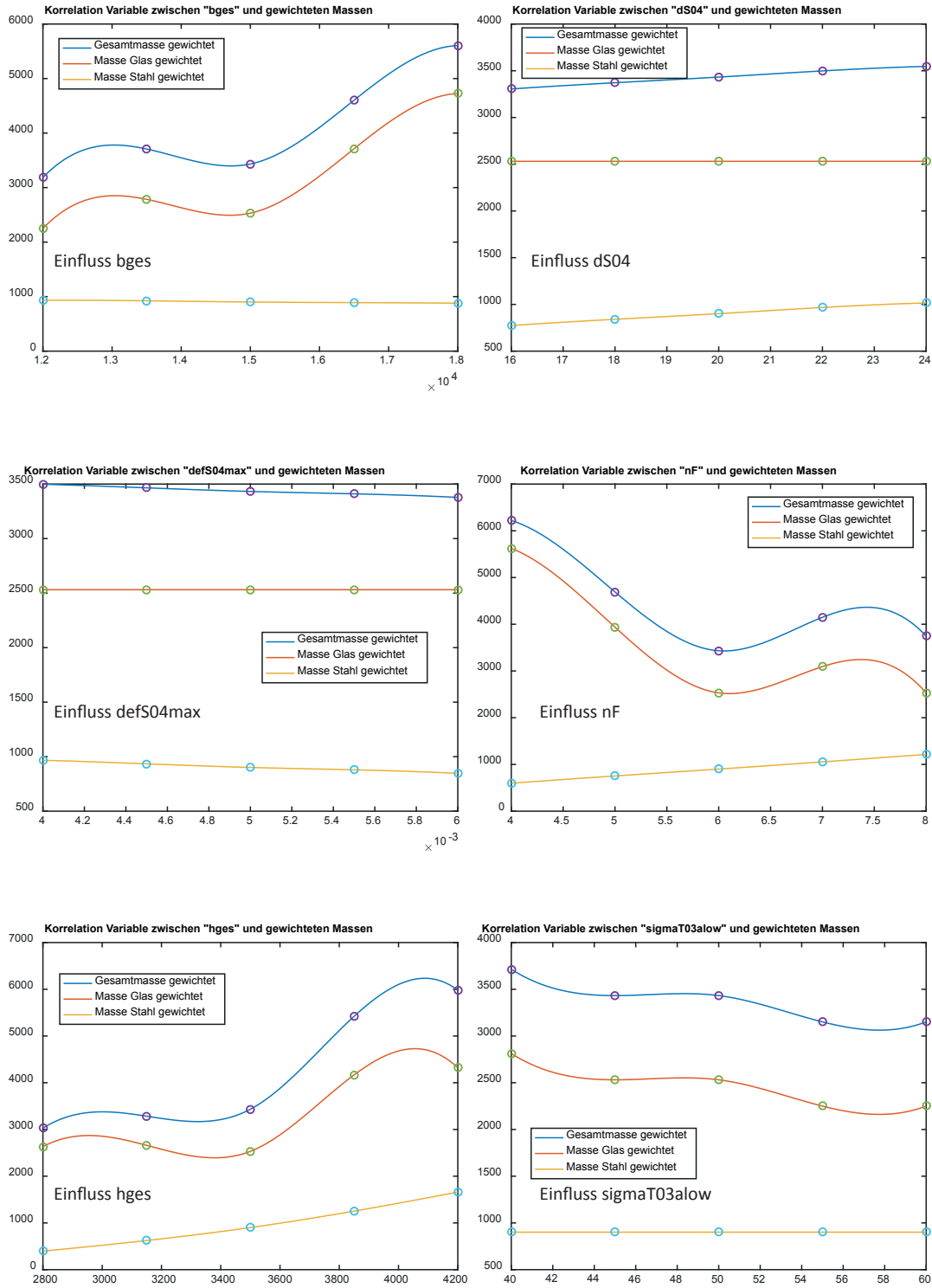


Abbildung 4.8.3: Diagrammdarstellungen der Parameterzusammenhänge; Eigene Darstellung

## 4.9 Optimierungen auf Grundlage eines parametrisch-assoziativen Planungssystems

Für Optimierungen wie bei der gewichteten Gesamtmasse der Fassade des Beispielprojekts sind Optimierungsstrategien wie evolutionäre Strategien auf Basis des beschriebenen parametrisch-assoziativen Planungssystems möglich. Dafür kann die für die Sensitivitätsanalyse aufgebaute Schleifenkonstruktion mit weiteren Algorithmen zur Definition und automatisierten Berechnung von neuen Parametersätzen und deren automatisierter Auswertung erweitert werden. Auf ein solches Vorgehen wird hier nicht weiter eingegangen aber auf das Buch von Gerdes (Gerdes et al., 2004) verwiesen. Stattdessen wird der Einfluss des Parameters  $nF$  noch detaillierter visualisiert, um die Entscheidung über eine optimale Wahl dieses Parameters zu treffen. Das Diagramm 4.9.1 zeigt zwei Extremwerte, die mit roten Kreisen eingerahmt werden. Die Unterteilung der Fassade in 13 Teile ( $nF=13$ ) zeigt hierbei die niedrigste gewichtete Gesamtmasse. Ein weiterer Kandidat für eine sinnvolle Fassadenunterteilung wäre die Unterteilung in sechs Elemente.

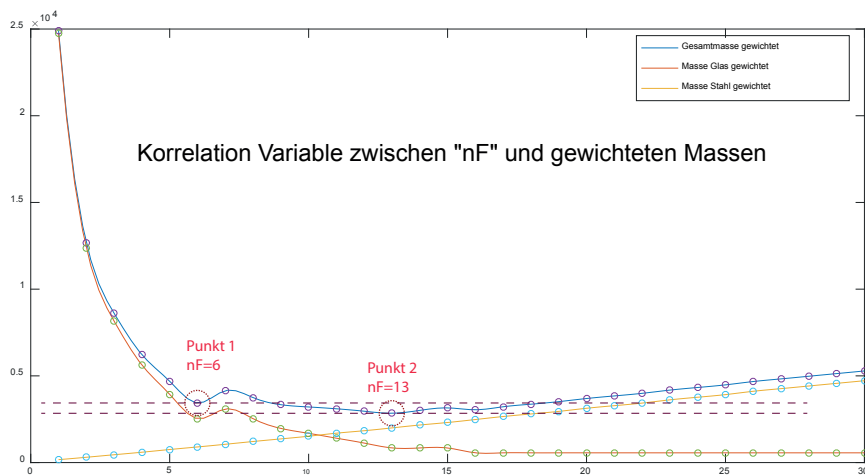
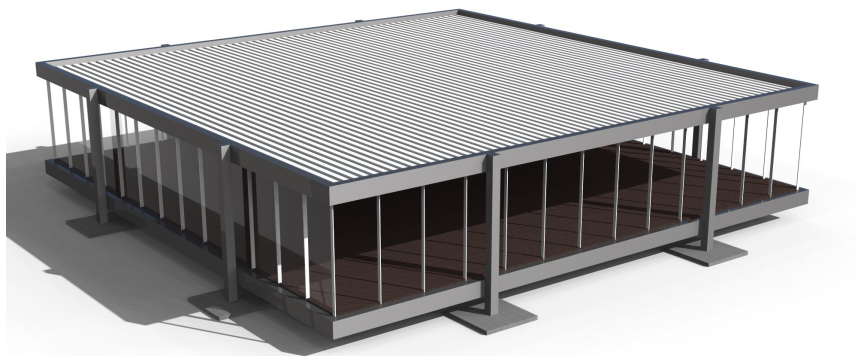


Abbildung 4.9.1: Graph-Darstellung der direkten Beziehungen Dimensionierung T03; Eigene Darstellung

Bei dieser Unterteilung der Fassade zeigen die Glasscheiben aufgrund der fast quadratischen Geometrie ein optimales biaxiales Tragverhalten. Diese beiden Vorschläge können wie in Abbildung 4.9.2 gezeigt visualisiert und beispielsweise mit dem Architekten und dem Auftraggeber diskutiert werden, da die Entscheidung hier auch auf Grundlage schwer quantifizierbarer Kriterien denkbar ist. Somit wird es durch

den ebenfalls parametrisierten Aufbau der Geometrie und die anschließende Visualisierung und die Anbindung an die Dimensionierung möglich, schnell eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

Unterteilung in 13 Elemente



Unterteilung in 6 Elemente

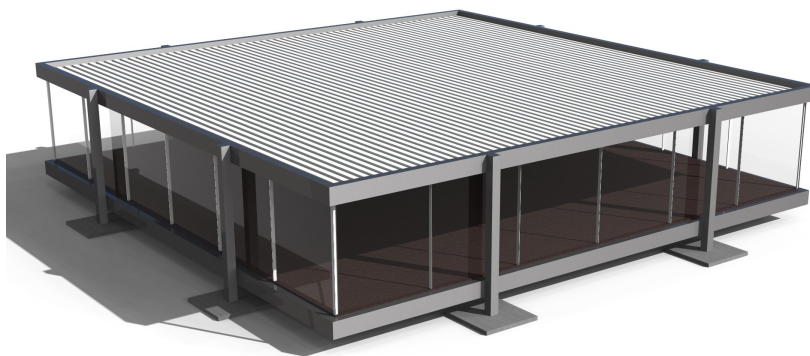


Abbildung 4.9.2: Darstellung von Varianten der Fassendunteilung; Eigene Darstellung

## 4.10 Verallgemeinerung der Methoden

Im Folgenden werden Aussagen zur Generalisierung der in diesem Kapitel dargelegten Methoden getroffen und reflektiert. Ziel ist es, die Methoden in Kapitel 5 im Gesamtplanungsprozess zu verorten und im Kapitel 6 auf ein reales Projekt anzuwenden.

### Gesamtplanungsprozess

In Abschnitt 4.3.1 werden die Kernaufgaben des Komplexitätsmanagements für die Ebene des Gesamtplanungsprozesses aufgeführt und am Beispielprojekt angewandt. Die Ausgangsidee hier ist es, die für die Beherrschung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses notwendigen Interaktionen zwischen den Planungsbeteiligten aufzudecken, Rückschlüsse auf kommunikative Lücken und Auswirkungen auf den Gesamtplanungsprozess zu gewinnen. Im Folgenden wird das Vorgehen für die Komplexitätsbeherrschung des Gesamtplanungsprozesses wiedergeben und anschließend allgemeingültige Aussagen getroffen. Wie in Abschnitt 3.3 definiert, ist die Komplexität des Gesamtplanungsprozesses allgemein direkt abhängig von der Anzahl der notwendigen Domänen und der an dem Projekt beteiligten Bauherrn und Prüfinstanzen. Die Anzahl der Domänen wiederum richtet sich nach den in Abschnitt 4.3.1 definierten, konstruktiv umzusetzenden Funktionen des Bauwerks. Dieser Erkenntnis folgend, wird bei jedem zu planenden Projekt damit begonnen, alle vom Bauwerk zu erfüllenden Funktionen aufzunehmen. Diese Funktionen sowie die Nutzung werden in einem Graphen kreisförmig angeordnet, als Knoten entsprechend der Graphentheorie dargestellt. Graphen werden verwendet, um Objekte und die Beziehungen zwischen ihnen abzubilden. Als Objekte im Zusammenhang mit der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses werden unabhängig vom konkreten zu planenden Bauwerk die zu erfüllenden Funktionen, die zugehörigen Fachplaner aufgrund der Fokussierung auf die Tragwerksplanung die Tragelemente definiert. Auch nicht tragende Elemente werden in diesem Sinne als Objekte angesehen. Diese werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Es wird aber davon ausgegangen, dass sie für andere Gewerke auf die gleiche Art und Weise in einem Graphen integrierbar sind. Die kreisförmige Anordnung ist eine mögliche Anordnung die es erlaubt jeden Knoten des Graphen mit einem beliebigen anderen Knoten eindeutig mit einer Kante, das heißt, ohne eine Kollision der Kante mit einem dritten Knoten zu verbinden. Die die



Tragfunktion erfüllenden Unterfunktionen werden generell dem Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk als deren Stellvertreter zugeordnet. Als allgemeingültige Ausgangspunkte für die Aufstellung der zu erfüllenden Funktionen werden neben der im Beispielprojekt verwendeten Quelle Moro (Moro et al., 2009) die in Abschnitt 1.8.1 aufgeführten Prüflisten der DIN 18205 (Deutsches Institut für Normung, 1996) und bereits erstellte Projektspezifikationen verwandt. Mithilfe der Prüflisten der DIN 18205 (Deutsches Institut für Normung, 1996) ist es möglich, für alle Bauwerkstypen eine Bedarfsplanung durchzuführen und daraus die zu erfüllenden Funktionen abzuleiten.

Die erarbeiteten zu erfüllenden Funktionen werden in diesem Schritt bei jedem Bauwerk Fachplanern zugeordnet, die für die Planung und den Nachweis der Funktionen verantwortlich sind. Als generelle Grundlage für diese Zuordnung sind neben Erkenntnissen aus Vorgängerprojekten auch die in den Anlagen der HOAI (Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung, 2013) aufgeführten Leistungsbilder der einzelnen Planer anwendbar. Die für die Erfüllung der Funktion verantwortlichen Fachplaner werden in den Graphen mit den bereits dargestellten zu erfüllenden Funktionen und der Nutzung integriert und über Kanten mit den jeweiligen Funktionen verbunden. Die Kanten werden mit der Verantwortlichkeit des Planers entsprechenden Verben beschriftet. Eine wichtige Erkenntnis aus der Anwendung am Beispielprojekt ist es, diese Verben vorab zu definieren und auf das unbedingt nötige Maß zu beschränken um Unklarheiten zu vermeiden.

Eine elementare Aufgabe beim Komplexitätsmanagement ist, wie von Malik (Malik, 2002) erwähnt, das Herstellen einer rationalen Ordnung. Dieser Aufgabe folgend, wird in der Konzeptionsphase des Tragwerks eine hierarchische Grobstrukturierung der Elemente des Bauwerks vorgenommen. Dafür werden die Tragsysteme entsprechend des gewünschten Tragverhaltens gewählt und der von ihnen zu erfüllenden Aufgabe den Hierarchieebenen Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk zugeordnet. In diesem Schritt werden ebenfalls Eigenschaften der Tragsysteme wie Materialien und Schätzungen zu den Grobabmessungen definiert. Für die Wahl des Tragsystems wird neben Erkenntnissen aus vergleichbaren gebauten Strukturen auch Grundlagenliteratur wie Büttner (Büttner und Hampe, 1977) oder Engel (Engel, 1997) herangezogen. Für die Schätzungen der Grobabmessungen werden Analysen von vergleichbaren ausgeführten Beispielprojekten und auf Spannweiten beruhende Faustformeln, wie bei Block (Block et al., 2013), Widjaja (Widjaja, 2013) oder Hess (Hess et al., 2012) aufgeführt, verwandt.

Das Tragwerk wird im folgenden Schritt in einzelne Tragelemente aufgelöst. Neben der Auflösung in einzelne Tragelemente, die bei jedem Bauwerk durchführbar ist, müssen in diesem Schritt generelle Überlegungen zu der Verbindung der Tragelemente durchgeführt werden. Hierbei werden abhängig von der Materialwahl geeignete konstruktive Lösungen entsprechend der gewählten Lagerungsbedingungen und zu erfüllenden Freiheitsgrade abgeschätzt. Als Ausgangspunkt für die Suche nach geeigneten Details bieten sich neben gebauten Beispielen Literaturquellen wie Schittich (Schittich et al., 2006) an. Eine weitere Aufgabe in dieser Phase kommt der Definition der relevanten Einwirkungen in ihrer Art, Richtung und Größe zu. Für die Definition der Einwirkungen werden in Bezug auf die Örtlichkeit die regionalen Normen wie der in Deutschland geltende Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke (Deutsches Institut für Normung, 2010) oder bei fehlenden Normen auch Versuche wie Windkanalversuche herangezogen. Final werden den einzelnen Tragelementen Positionsnummern zugeordnet.

Die Zuweisungen von Funktionen zu den Tragelementen erfolgten ebenfalls wie bei der Zuordnung der Planer zu Funktionen mit der gleichen Begründung der eindeutig ablesbaren Zuordnung in einer kreisförmigen Anordnung durch das Einfügen von Kanten, die entsprechend der Art der Funktionsgewährleistung mit Substantiven beschrieben werden. Eine generelle Erkenntnis in diesem Schritt ist es, dass es sinnvoll ist, die für die jeweiligen Funktionen verantwortlichen Planer bereits in diesem Schritt in die Zuordnung einzubeziehen, insofern sie bereits seitens des Bauherrn definiert wurden. Bei der anschließenden Zuordnung von Fachplanern zu Tragelementen werden alle definierten Knoten und Kanten in einem Graphen dargestellt bevor durch uninformierte Suchalgorithmen Zusammenhänge zwischen Planern und Tragelementen aufgedeckt werden. Auf Grundlage dieser Zusammenhänge werden nun all jene Knoten die in Verbindung stehen mit einem Knoten der einen Planer, eine Funktion oder ein Tragelement repräsentiert, sowie alle Kanten visualisiert und mithilfe des ForceAtlas2 Algorithmus zueinander angeordnet, um die Interpretation der Darstellung zu erleichtern. Erste Rückschlüsse auf kommunikative Lücken und Auswirkungen auf den Planungsprozess sowie erste Aussagen über den notwendigen Informationsaustausch zwischen den Fachplanern auf Grundlage der erzeugten Darstellungen werden im nächsten Schritt getroffen. Diese Aussagen müssen folgend in einen konkreten Informationsaustausch münden. So werden alle einem Tragelement zugeordneten Fachplaner zusammengeführt um Kompromisse hinsichtlich der finalen Dimensionen, der zu verwendenden Materialien, eventueller Durchdringungen oder der exakten Position des jeweiligen Bauteils zu finden. Bei Fachplanern bei

denen Interaktionen mit Tragelementen erkannt wurden, werden gezielt Anfragen hinsichtlich ihrer Anforderungen an das Tragelement gestellt. Automatisierungen solcher Anfragen werden durch eine Aufbereitung der Graphen möglich. Diese Möglichkeit wird in Abschnitt 7.3 erneut aufgenommen.

Da jedes Bauwerk einen vorab definierten Nutzen erfüllen muss und sich dieser bei jedem Bauwerk in konkreten zu erfüllenden Funktionen manifestiert, die von zuordenbaren Fachplanern zu verantworten und zu planen sind sowie aufgrund des Eigengewichts auch mindestens ein Tragelement für die Lastabtragung des Eigengewichts zuständig ist, ist für jedes Bauwerk eine Funktions-Fachplaner-Tragelement Zuordnung durch einen Graphen durchführbar. Im Minimalfall gibt es nur einen Bauherrn, ein Tragelement plus die zugehörigen Lager bzw. Fundamente und als einzigen Fachplaner den Tragwerksplaner. Dies wäre beispielsweise bei einer als Einfeldträger ausgeführten monolithischen Fußgängerbrücke der Fall, die den Nutzen hat ein Hindernis stützenfrei zu überwinden und dafür die Tragfunktion für ihr Eigengewicht und die zusätzlichen Betretungslasten erfüllen muss. Es bleibt somit allgemein festzustellen, dass die beschriebenen Methoden zur Beherrschung der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses aufgrund der formulierten Erkenntnisse für alle von Tragwerksplanern zu bearbeitenden Bauwerke anwendbar sind.

### Tragwerksplanungsprozess

Für die methodische Umsetzung der Beherrschung des Tragwerksplanungsprozesses müssen die Interaktionen innerhalb des Tragwerks aufgedeckt und im Tragwerksplanungsprozess berücksichtigt werden. Die in Abschnitt 4.5 durchgeführte Methode beruht auf der Tatsache, dass Tragelemente dadurch interagieren, dass zwischen ihnen die aus Einwirkungen resultierenden Lasten übertragen werden. Für das Nachvollziehen dieser Lastübertragung, die auch als Lastfluss bezeichnet wird, werden Sequence Diagramme der Modellierungssprache SysML verwandt. Sequence Diagramme werden im Systems Engineering für die Darstellung von Informationsflüssen herangezogen und im Kontext der Tragwerksplanung für die Verfolgung des Lastflusses verwandt. Die Diagramme erlauben es, den Lastfluss aufgrund des definierten Aufbaus detailliert wiederzugeben und festzuhalten. Die in den Diagrammen definierten Interaktionen werden im Folgenden in Graphen dargestellt und in entsprechende Matrizen übertragen. Die Überführung der Interaktionen wird am Beispielprojekt mittels des Austauschs über das csv<sup>16</sup>-Format durchgeführt und ist

---

<sup>16</sup>Comma-separated values

auch für große Strukturen mit vielen Tragelementen anwendbar. Da dieser Vorgang durch einige manuelle Eingriffe Risiken für Fehler bietet, sind generell Weiterentwicklungen hinsichtlich einer automatisierten Übertragung notwendig. Bei den zur Speicherung der Interaktionen verwandten Matrizen handelt es sich um Adjazenz- bzw. Design Structure Matrizen. Auf Grundlage der erzeugten Matrizen wird mithilfe des Warshall-Algorithmus die transitive Hülle der Matrizen berechnet, welche die auf der initialen Lastverfolgung beruhenden indirekten Interaktionen zwischen den Bauteilen enthält. Wie in Abschnitt 4.5.1 erwähnt, handelt es sich bei vielen Tragwerken um statisch unbestimmte Strukturen. Bei diesen Strukturen bestehen nicht nur Interaktionen in Richtung des Lastflusses, sondern auch in der entgegengesetzten Richtung aufgrund von Steifigkeitseinflüssen auf die Lastverteilung im Tragwerk. Bei statisch bestimmten Tragwerken handelt es sich bei den den Lastfluss darstellenden Graphen um gerichtete, bei statisch unbestimmten demnach um ungerichtete Graphen. Es wird generell erwartet, dass durch Analysen der Design Structure Matrizen verschiedener Strukturen Erkenntnisse über die Komplexität der zugehörigen Tragwerksplanungsprozesse gewonnen werden können. Diese Überlegung wird in Abschnitt 7.3 als weiterführende Fragestellung definiert.

Die Design Structure Matrizen, welche die direkten und nach Anwendung des Warshall-Algorithmus erkannten, indirekten Interaktionen zwischen den Tragelementen enthalten werden mithilfe der Sequenzierung so umgeordnet, dass möglichst wenig Zirkelbezüge, die sich durch Spiegelungen an der Diagonalen der Matrix manifestieren, enthalten sind. Dies erfolgt mit dem Ziel der Vorbereitung eines möglichst effektiven folgenden Einsatzes der Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung. Sowohl auf dem Gebiet der Graphen als auch der Design Structure Matrizen bestehen weitere umfangreiche hier nicht betrachtete Analysemethoden, von deren Anwendung bei der Analyse der Komplexität der Tragwerksplanung weitere Erkenntnisse erwartet werden.

Da jedes Tragwerk Einwirkungen widerstehen muss und aus mindestens einem Tragelement sowie den zugehörigen Lagern besteht, werden Lasten vom Ort der Lasteinwirkung durch die bzw. das Tragelement in den Baugrund abgeleitet. Der Weg der Last von der Einwirkung in den Untergrund, der sogenannte Lastfluss, lässt sich bei jedem Tragwerk unter Verwendung der dargestellten Sequenz Diagramme festhalten. Bei statisch unbestimmten Systemen ist dieser Weg nicht eindeutig, da sich Lasten in Abhängigkeit der Steifigkeiten der im Lastfluss nachfolgenden Tragelemente aufteilen. Die Verbindung zweier Tragelemente bzw. zugeordneter Verbindungsdetails ist ein eindeutiges Indiz für das Vorhandensein einer Interaktion zwischen den Ele-

menten, die bei der Beherrschung der Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses berücksichtigt werden muss. Unabhängig vom Tragsystem oder der konkreten Detaillierung der gewählten Tragelemente können diese als Objekte im Sinne der Graphentheorie betrachtet und damit als Knoten dargestellt werden. Ebenso lassen sich für jedes Tragwerk die interstrukturellen Interaktionen aufgrund des Lastflusses als Kanten im Sinne der Graphentheorie festhalten. Jeder Graph lässt sich als Adjazenzmatrix bzw. Design Structure Matrix wiedergeben, was folglich dazu führt, dass auch die auf Design Structure Matrizen beruhenden Algorithmen, wie der Warshall Algorithmus anwendbar sind. Die durch dessen Anwendung erzeugten transitiven Hüllen sind für jede Design Structure Matrix erzeugbar und aus diesem Grund auch für alle Matrizen die lastflussbezogenen direkten und indirekten Interaktionen beinhaltenden. Die Methode der Sequenzierung ist unabhängig von Füllgrad und der Position der Einträge in der Design Structure Matrix durchführbar. Es ist festzuhalten, dass wenn der Lastfluss von der Einwirkung bis in Baugrund mittels eines Sequence Diagramms festgehalten werden kann, alle in diesem Kapitel entwickelten Methoden zur Beherrschung der Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses anwendbar sind.

### Planungswerkzeuge

Um die auf dem Zusammenspiel verschiedener in der Tragwerksplanung verwendeter Planungswerkzeuge beruhende Komplexität zu beherrschen, wird das Ziel des strukturierten Aufbaus und der Verknüpfung verschiedener Planungswerkzeuge verfolgt. Ausgangspunkt hierbei ist eine detaillierte Aufbereitung der von allen Tragelementen zu erfüllenden Tragfunktion. Hierfür werden mithilfe einer Funktionsschablone Requirement Diagramme der Modellierungssprache SysML mit spezifischen Anforderungen an das Tragwerk erstellt. Die definierten Anforderungen werden einzelnen Tragelementen zugeordnet und auf Grundlage einer durch Sequenzierung umgeordneten Design Structure Matrix der Tragelemente angeordnet. Den nachzuweisenden Anforderungen werden konkrete Aktivitäten zugeordnet und in Activity Diagramme eingetragen. Bis zu diesem Punkt spielt die Art<sup>17</sup> der später zu verwendenden Planungswerkzeuge noch keine Rolle, da die bisherige Darstellung der Aktivitäten unabhängig von den Werkzeugen ist. Dieses Vorgehen lässt sich generell unabhängig von Tragwerkstyp und -größe durchführen. Bereits das Aufstellen der Diagramme

---

<sup>17</sup>Es kann sich dabei um Handrechnungen, Skizzen aber auch komplexe Modellierungen wie Finite Element Modelle handeln.

führt nach der Erfahrung mit dem Beispielprojekt beim Ersteller zu einem tieferen Bewusstsein über die durchzuführende Planungsaufgabe und folgt damit der in Kapitel 1.4 definierten Aufgabe der Erweiterung des Verständnisses des Tragwerksplanungsprozesses. Der Darstellung in Diagrammform sind je nach Art des verwendeten Mediums Grenzen gesetzt. So ist davon auszugehen, dass eine gesamthafte Darstellung in Papierform für größere Strukturen nicht mehr möglich ist und auf die Darstellung auf Monitoren oder vergleichbaren Medien ausgewichen werden muss. Die Aktivitäten werden in Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung überführt und mittels Block Definition Diagrammen dargestellt. Dabei werden die von den einzelnen Algorithmen benötigten Eingangsparameter, deren Ausgänge sowie die jeweiligen Interaktionen definiert. Auch hier wird ein umfangreicher Erkenntnisgewinn hinsichtlich der zu bewältigenden Planungsaufgabe erreicht. Die definierten Interaktionen zwischen den einzelnen Planungswerkzeugen werden nun in Matrizenform gebracht und auf weitere indirekte Beziehungen hin untersucht. Durch die Darstellung in Matrizenform werden auch bei vierteiligen Tragwerken keine signifikanten Einschränkungen bei der Abbildung der Interaktionen erwartet. Im Beispielprojekt werden die sukzessive definierten Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung inklusive der ihnen zugeordneten Parameter in einer Programmierumgebung umgesetzt. Bei größeren Tragwerken ist davon auszugehen, dass diese Umsetzung nicht mehr in einer einzigen Programmierumgebung oder mittels einer Softwareumgebung bewerkstelligt werden kann. Müssen für Tragelemente spezialisierte Planungswerkzeuge verwendet werden, sind weitere Überlegungen hinsichtlich der Informationsübergabe zwischen ihnen und einer möglichen Assoziativität zwischen den verschiedenen Planungswerkzeugen notwendig. Werden die Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung mittels parametrisch-assoziativer Modellierung durchgeführt, ergibt sich die Möglichkeit von Korrelations- und Sensitivitätsanalysen. Hierfür wurde für das Beispielprojekt ein auf der Brute-Force Methode beruhendes Vorgehen gewählt, dessen Ergebnisse dann unter Anwendung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman ausgewertet wurden. Da die Brute-Force Methode ein funktionierendes aber rechenintensives Vorgehen darstellt, sollten weitere mögliche Vorgehensweisen für größere Strukturen untersucht werden. Mithilfe des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman können Aussagen über die Qualität von strukturellen Interaktionen getroffen werden, jedoch werden auch Defizite hinsichtlich der Präzision der Aussagen gesehen. Beide Themen werden in Abschnitt 7.3 aufgegriffen.

Die Erkenntnisse der Sensitivitäts- und Korrelationsanalyse werden im Beispielprojekt für nachfolgende Überlegungen zur Optimierung des Tragwerks verwandt. Spe-

ziell die Darstellung von tragwerksinternen Zusammenhängen in Matrizenform wie in Abbildung 4.8.1 verspricht auch die Anwendbarkeit auf vielteilige große Strukturen wie Stadiendächer oder Flughäfen.

Geht man davon aus, dass für jedes Tragwerk die zu erfüllenden Anforderungen detailliert vorab definiert werden, ist es möglich, diese in einem Requirement Diagramm abzubilden. Werden diese Anforderungen einzelnen Tragelementen zugeordnet und im Sinne der Betrachtung der notwendigen Informationsein- und -ausgänge aufbereitet, lassen sich aus der Zuordnung die notwendigen mittels der Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung durchzuführenden Aktivitäten ableiten. Wurde die kausale Verkettung der Aktivitäten auf Grundlage einer bereits sequenzierten Design Structure Matrix der Tragelemente entwickelt, lässt sich hieraus ein Effektivitätsgewinn gegenüber einer nicht auf einer sequenzierten Matrix beruhenden Vorgehensweise ableiten, da die auf Zirkelbezügen beruhende mehrfache Durchführung einzelner Planungsalgorithmen reduziert oder sogar vermieden werden kann. Somit wird davon ausgegangen, dass bei der Durchführung der in diesem Kapitel entwickelten Methoden für jedes Tragwerk die Aufbereitung der notwendigen Planungsaktivitäten möglich ist und dass eine Effektivitätssteigerung bei deren Durchführung durch die Berücksichtigung einer vorab sequenzierten Design Structure Matrix der Tragelemente erreicht werden kann. Insofern bei einem Tragwerk die Planungsalgorithmen mittels parametrisch-assoziativer Modellierung umgesetzt werden, lassen sich Sensitivitätsanalysen durchführen. Folgt man dabei der beschriebenen Brute-Force Methode und wertet diese mit dem Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman aus, lassen sich Aussagen zu einem möglichen Vorgehen bei der Optimierung der Tragwerke ableiten.





# 5

## Integration der Komplexitätskontrolle in die Tragwerksplanung

## 5.1 Verortung von komplexitätsinduzierten Problemen und Zuordnung von Lösungsmethoden des Komplexitätsmanagements

In Kapitel 4 wird der Tragwerksplanungsprozess sukzessive in Teilprozesse und final in Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung zerlegt und so aufbereitet, dass Methoden der Komplexitätskontrolle angewandt werden können. Eine Idee hierbei ist es, die Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung mit Hilfe von geeigneten generischen Methoden und Modellen weitestgehend zu flexibilisieren (*parametrisieren*) und durch geeignete Methoden zu verknüpfen (*assoziiieren*). Ziel dabei ist es nicht, den Tragwerksplanungsprozess zu einer voll automatisierten Blackbox zu entwickeln, die es erlaubt ohne umfangreiches Fachwissen Tragwerksplanung zu betreiben. Auch in Zukunft müssen wichtige Entscheidungen vom Planer gefällt und vor allem verantwortet werden. Auch soll die direkte Kommunikation zwischen den verschiedenen Planungsbeteiligten nicht reduziert werden. Der verbale Austausch von Informationen ist gerade wegen seines Interpretationsbedarfs von enormem Wert. Es ist vielmehr das Ziel tiefere Einblicke in die Abhängigkeiten im Planungsprozess aufzudecken, um das Bewusstsein der Planer auf diese Abhängigkeiten zu schärfen und Werkzeuge hierfür bereitzustellen. Die in der SIA (siehe Abbildung 1.8.2) dargestellte grundlegende Abfolge der Planungsteilleistungen wird als richtig erachtet. Allerdings müssen Anpassungen an die zunehmenden Anforderungen digital gestützter Planung und die Integration von Prinzipien des Komplexitätsmanagements erfolgen. Bereits 1977 schreibt Büttner (Büttner und Hampe, 1977) mit Blick auf den Tragwerksentwurf folgendes:

Die Grenzen der Tätigkeitsbereiche von Mensch und Maschine verschoben und verschieben sich ständig. Es ist abzusehen, daß in allernächster Zukunft die Bestimmung des Schöpferischen im Entwurfsprozeß neuen Inhalt erfahren kann und mancher Vorgang, der heute noch als schöpferische Äußerung menschlicher Intuition empfunden wird, als Lösung einer formalisierbaren Entwicklungssituation der Maschine übertragen wird.

Immer aber wird der Mensch unentbehrlicher Gestalter des Entwurfsprozesses bleiben.

Seine Stellung zu und in diesem Prozeß entwickelt sich jedoch von der undifferenzierten Mischung aus Routinearbeit und schöpferischem Wir-

ken zum qualifizierten Vorbereiter der Prozesse und zum überlegenen, schöpferischen Entwerfer, der, befreit von Routinearbeit, die Maschine als Hilfsinstrument zur Lösung der von ihm gestellten Aufgabe einsetzt. (Büttner und Hampe 1977, S.16)

Die von Büttner erwähnte *allernächste Zukunft* ist eingetreten. Die erhoffte *Befreiung von Routinearbeit* ist durch die Übertragung *formalisierbarer Entwicklungssituationen*, die gleichbedeutend mit der Parametrisierung von Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung (siehe Abschnitt 1.6) ist in Teilen Realität. Andere notwendige Routinen in der Tragwerksplanung sind hinzugekommen, die wiederum in direktem Zusammenhang mit dem Ideal des *qualifizierten Vorbereiters der Prozesse* gesehen werden können. Ein wichtiger Teil der Vorbereitung der Tragwerksplanung ist die Voraussage der zukünftigen Ereignisse. Diese Ereignisse sind direkte Folgen der komplexen Interaktionen, die in Kapitel 3 beschrieben werden. Die in Kapitel 4 aufgezeigten Methoden zum Umgang mit den Beziehungen müssen nun in der Tragwerksplanung integriert werden. Die Notwendigkeit der Integration des Komplexitätsmanagements in den Planungsprozess ist somit auch mit der zunehmenden Automatisierung in der Tragwerksplanung verbunden. In Abschnitt 1.3.5 werden einige beispielhafte Probleme aufgeführt die in Zusammenhang mit der Komplexität der Tragwerksplanung stehen. In den folgenden Abschnitten werden diese Probleme im Tragwerksplanungsprozess auf Basis der HOAI (Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung, 2013) und der SIA (SIA, 2014) aufgenommen und verortet. Die in der SIA erwarteten Ergebnisse der einzelnen Phasen werden angegeben und anschließend wird ein denkbarer Lösungsansatz aus den in Kapitel 4 erörterten Methoden diskutiert. Die Problemstellungen werden wie in Abschnitt 1.3.5 unterteilt.

## 5.2 Expertenwissen und Kompetenz

In Abschnitt 1.3.5 werden dem Bereich folgende Probleme zugeordnet:

- a. Nicht alle nötigen Experten werden im frühen Stadium der Planung komplexer Projekte eingebunden. Kompetenz bleibt ungenutzt.
- b. Erfolgreiche Lösungsvarianten/-strategien für gleichartig komplexe Aufgabenstellungen auf Basis von Expertenwissen können nicht oder nur stark beschränkt

gespeichert und in einem neuen Projekt wiederverwendet werden.

- c. In Vorgängerprojekten detektierte Probleme werden bei gleichartig komplexen Entwurfskonstellationen nicht automatisch gemeldet. Genauso wenig wird ein Wiederholen gleichartiger Fehler vermieden.

Bezüglich der, dem Komplexitätsbereich des Gesamtplanungsprozesses zuzuordnenden, Problemstellung a. erwarten sowohl die HOAI (Anlage 14) als auch die SIA (2. Vorstudien) eine Mithilfe des Objektplaners und Tragwerksplaners bei der Auswahl geeigneter Fachplaner. Die SIA fordert konkrete Verzeichnisse mit geeigneten Planern. Ein möglicher Lösungsansatz zum Ermitteln der notwendigen Experten ist eine Identifikation der Bauwerksfunktionen wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben. Sind für vergleichbare Projekte schon Darstellungen wie die in Abbildung 4.4.1 erarbeitet worden, werden diese wiederverwendet und angepasst. Sind den Bauwerksfunktionen des Vorgängerprojekts bereits Planer eventuell schon konkrete Unternehmer zugeordnet worden, ist dies eine optimale Ausgangslage zur Einbindung der notwendigen Experten in einem frühen Stadium der Planung. Sind keine Informationen aus vergleichbaren Vorgängerprojekten vorhanden, ist dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen Vorgehen zum Erstellen eines Graphen wie in Abbildung 4.4.2 aufgezeigt zu folgen. Der so erstellte Graph kann dann wiederum in eine Matrix bzw. Liste überführt werden und als Ausgangspunkt für die folgende Planung dienen. Die Erstellung von Graphen wie in Abbildung 4.4.13 ist bereits vor der Durchführung der eigentlichen Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung auch unter Berücksichtigung von Gewichtungen der einzelnen Zuordnung möglich. Somit wird es schon in frühen Planungsphasen, wie der Leistungsphase 1 der HOAI, möglich Aussagen zu den für das Projekt notwendigen Experten zu treffen. Im Kontext der Problemstellung b. und c., die sowohl den Komplexitätsbereichen Gesamtplanungsprozess und Tragwerksplanungsprozess zuzuordnen sind, werden in der HOAI in der Leistungsphase 1 vom Objektplaner Machbarkeitsstudien und von Tragwerksplaner in der LPH 2 Vergleichsberechnungen für mehrere Lösungsmöglichkeiten erwartet. Die SIA fordert in der strategischen Planung Lösungsalternativen und deren Bewertung in Form von Skizzen, Beschreibungen und Plänen. Gleichartig komplexe Entwurfskonstellationen können sich zunächst über ähnliche notwendige Bauwerksfunktionen finden lassen. Gibt es große Übereinstimmungen bei den Bauwerksfunktionen, sind auch ähnliche Interaktionen auf der Ebene der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Komplexität des Gesamtplanungsprozesses zu erwarten. Um aus Problemen aus Vorgängerprojekten zu lernen, ist es eine Voraussetzung, dass die im Vorgängerprojekt detektierten

Probleme auch konkreten Interaktionen zugeordnet werden. Ist dies erfolgt, können nach Betrachtung einer Graphendarstellung und der den Interaktionen, beispielsweise in Form von Kommentaren, zugeordneten Problembeschreibungen Rückschlüsse auf potenzielle aktuelle Probleme getroffen und das Wiederholen von Fehlern vermieden werden. Mithilfe eines solchen Vorgehens können einzelne Lösungsstrategien ausgeschlossen oder anders bewertet werden. Genauso wie auf der Ebene des Gesamtplanungsprozesses lassen sich auf der Ebene des Tragwerksplanungsprozesses Interaktionsprobleme bezogen auf einzelne Interaktionen dokumentieren und für neue Projekte analysieren. Konzepte zur Analyse auf Gleichartigkeit von Tragwerken werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Ein Hinweis könnte aber ein ähnliches Verhältnis der Anzahl von Knoten (Tragelementen) zu der Anzahl von Ecken (Interaktionen zwischen den Elementen) sein. Mit Bezug auf die in Abschnitt 4.7.4 erwähnte transitive Hülle wird vermutet, dass ähnlich komplexe Tragwerke auch ähnlich voll- oder dünn-besetzte transitive Hüllen mit den tragwerksinternen Interaktionen besitzen. Diese Vermutung wird hier nicht weiter untersucht, aber in Abschnitt 7.3 nochmals aufgegriffen.

### 5.3 Verfügbarkeit und Genauigkeit von Informationen

Bezüglich der Verfügbarkeit und Genauigkeit von Informationen ergeben sich folgende Probleme:

- a. Die Gewinnung von Erkenntnissen über das Tragverhalten und die Dimensionen des Tragwerks von komplexen Strukturen brauchen zu lange, um ein nachprüfbares Feedback über verschiedene Lösungsmöglichkeiten an den Objektplaner geben zu können.
- b. Das komplizierte Verhalten von realen Strukturen wird in den ersten Analysemodellen unzureichend abgebildet.
- c. Planungsentscheidungen müssen auf Basis geschätzter Informationen bzw. Annahmen getroffen werden.
- d. Bei der Voranalyse des Tragwerks müssen Entscheidungen über Lasten, Lagerungen und Bodenkennwerte geschätzt werden, da konkrete Informationen zu Beginn des Projektes noch nicht vorhanden sind.

- e. Die Planungstiefe in frühen Planungsphasen ist zu gering um genügend zuverlässige Informationen über spätere Planungsinteraktionen und das Erreichen der Planungsziele zu geben.

Die HOAI erwartet in der LPH 2 in Bezug auf den aufgeführten Problemblock eine Beratung in statisch-konstruktiver Hinsicht sowie nachprüfbar Berechnungen vom Tragwerksplaner. Die SIA erwartet konkrete Vorstudien mit Skizzen, Visualisierungen und planerische und gestalterische Lösungsansätze inklusive dem Nachweis der Machbarkeit. Die Fragen fallen in die beiden Komplexitätsbereiche Tragwerksplanungsprozess und Komplexität der Planungswerkzeuge, somit werden auch die Lösungen hier gesucht. Ein möglicher Ansatz zum Gewinnen schneller Erkenntnisse über das Tragverhalten bietet der Einsatz von generischen Methoden für die Modellierung von Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung. Wie in dem Beispiel in Abbildung 4.7.10 können Dimensionierungen von Platten, Einfeldträgern oder anderen Tragelementen programmiert und in Bibliotheken abgelegt werden. Bei einem neuen Projekt können diese vorgefertigten Algorithmen verknüpft und damit erste Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Durch die in Abschnitt 4.8 beschriebene Korrelationsanalyse können Zusammenhänge über das Tragverhalten analysiert und visualisiert werden. Durch die Flexibilität von parametrisch-assoziativen Modellen können die Auswirkungen der Veränderungen von Randbedingungen und Eingangsparametern der Planungsalgorithmen, wie Lasten oder Bodenkennwerte, schnell ermittelt werden. Die Genauigkeit dieser Informationen hängt von der Genauigkeit der Planungsmethoden der Tragwerksplanung ab. Diese kann im Laufe der Planung durch die Verfeinerung der Algorithmen vergrößert werden.

## 5.4 Verantwortlichkeiten und Abstimmungsbedarf

Hier ergeben sich folgende Probleme:

- a. Zwingender Abstimmungsbedarf mit am Projekt beteiligten Fachplanern wird nicht automatisch erkannt. Die fehlende frühe Abstimmung und adäquate Abstimmungskonzepte pflanzen sich folgend in der Modellierung des Tragwerks fort.
- b. Verantwortlichkeiten für Schnittstellen im Planungsprozess werden zum Planungsbeginn nicht ausreichend präzise definiert.

- c. Die Geometrie des Gesamtbauwerks wird über die Disziplingrenzen hinweg ungenau und unzureichend beschrieben und abgestimmt.

Hier werden die Methoden aus dem Komplexitätsbereich der Planungswerkzeuge verwendet, um den zwingenden Abstimmungsbedarf und Verantwortlichkeiten für Schnittstellen aufzudecken. In Leistungsphase 2 wird bezüglich Problemstellung a. vom Objektplaner das Analysieren der Grundlagen, Abstimmen der Leistungen mit den fachlich an der Planung Beteiligten sowie ein Abstimmen der Zielvorstellungen und Hinweisen auf Zielkonflikte gefordert. Der Tragwerksplaner muss in der LPH 3 eine Tragwerkslösung, unter Beachtung der durch die Objektplanung integrierten Fachplanungen, bis zum konstruktiven Entwurf erarbeiten und ebenfalls Zielvorstellungen abstimmen und auf Zielkonflikte hinweisen. In der SIA sind bezüglich des genannten Problemkomplexes als Ergebnisse Organisations- und Vorgehensvarianten im Aufbau der Projektorganisation und des Planerteams aufgeführt. Eine Vorgehensweise für diese Problemstellungen beginnt mit der in Abschnitt 4.6.2 erläuterten Funktionsanalyse und führt optimaler Weise zu einer Darstellung wie in Abbildung 4.6.6. Im Activity Diagramm (Abbildung 4.6.6) sind zunächst nur notwendige Dimensionierungen als Beispiel für Aktivitäten aufgeführt. In einem Activity Diagramm der visuellen Modellierungssprache SysML sind aber generell viele verschiedene Aktivitäten aufnehmbar. In Abbildung 4.6.6 werden jeder Aktivität Eingangsinformationen und Ausgangsinformationen zugeordnet und der Informationsfluss durch Pfeile markiert. Kann ein Eingang noch nicht mit einem Informationsflusspfeil belegt werden oder es gibt mehrere sich widersprechende Informationsflüsse, wird der noch ungenügende Abstimmungsbedarf offensichtlich. Aktivitäten die noch nicht mit einem oder mehreren Informationseingängen belegt sind lassen sich mithilfe von Filterfunktionen in Programmumgebungen zur Erstellung von SysML Diagrammen, wie beispielsweise Enterprise Architect<sup>®</sup>, detektieren und anschließend zwischen den Planern kommunizieren. Bezüglich der unzureichenden Schnittstellendefinition Problem b. werden in der SIA Organisations- und Vorgehensvarianten erwartet. Aufbauend auf einem Activity Diagramm wie in Abbildung 4.6.6 lassen sich den einzelnen Informationsübergängen (durch Pfeile gekennzeichnet) konkrete Informationen über Schnittstellen zwischen den einzelnen Aktivitäten und damit den jeweils verantwortlichen Planern der jeweiligen Aktivitäten zuordnen. Die wichtigsten festzuhaltenden Informationen sind:

1. Absender der Information

2. Ausgangsaktivität der Information
3. Empfänger der Information
4. Empfangende Aktivität der Information
5. Inhalt und Umfang der durch die Schnittstellen übergebenen Information
6. Format der zu übergebenden Information
7. Zeitpunkt beziehungsweise Häufigkeit der Informationsübergabe

Der Zeitpunkt kann dabei sowohl auf ein konkretes Datum als auch auf ein kausales Ereignis bezogen werden. Ist zwischen einzelnen Planungsbeteiligten ein iteratives Vorgehen während der Planung nötig, kann auch der Informationsaustausch als iterativ definiert werden. Bei dem Format kann man auf konkrete proprietäre Dateiformate oder die Inhalte von Zeichnungen zurückgreifen. Wird ein Activity Diagramm in einem Softwaremodellierungswerkzeug erstellt, lassen sich die Schnittstellen über Kommentare definieren und auch in Textform ausgeben. Bei Problem c. wird in der LPH 2 der HOAI eine 3-D oder 4-D Gebäudemodellbearbeitung (Building Information Modelling BIM) erwartet. Die SIA definiert Pläne, Beschriebe und Modelle als erwartete Ergebnisse bezüglich des Problems c.. Es ist in vielen aktuellen Bauprojekten Standard geometrische Daten über zweidimensionale Pläne zu übergeben. Oft werden dreidimensionale digitale Modelle in Form proprietärer Formate übergeben. Vereinzelt werden BIM-Modelle genutzt. Bei der Übergabe mittels Plänen entstehen Mess- und Interpretationsfehler. Werden Geometrien über räumliche Modelle übergeben, entstehen aufgrund von Umwandlungen zwischen verschiedenen Programmpaketen kleinere Abweichungen und Ungenauigkeiten. Sowohl bei der Planübergabe aber auch bei der Übergabe mittels räumlicher Geometrien ist das genaue Vorgehen bei der Erzeugung der Geometrie nicht mehr nachvollziehbar. Treten Probleme bei der konstruktiven Umsetzung auf und werden Änderungen der Geometrie notwendig, ist gerade bei komplexeren Geometrien diese Nachvollziehbarkeit von großer Bedeutung. Eine Möglichkeit die Nachvollziehbarkeit sicherzustellen ist die Übergabe der Bildungsvorschriften der Geometrie im Sinne von generischen Methoden. Dabei werden einzelne geometrische Operationen, wie *Zeichne einen Kreis mit Zentrum  $x$ ,  $y$ ,  $z$  und Radius  $r$* , festgehalten. In einem Block Definition Diagramm wie in Abbildung 4.7.3 lassen sich solche Bildungsvorschriften und deren Verknüpfungen festhalten. Die Bildungsvorschriften lassen sich anschließend von jedem Planer



in seinem bevorzugten Programm erzeugen. Besonders hilfreich sind dabei visuelle Programmieraufsätze von CAD und BIM Programmen wie Grasshopper<sup>®</sup> oder Dynamo<sup>®</sup>. Die Problemstellungen dieses Bereichs fallen hauptsächlich in den Bereich der Komplexität des Gesamtplanungsprozesses, werden aber mit Methoden aller definierten Komplexitätsbereiche bearbeitet.

## 5.5 Variantenuntersuchungen und Optimierung

- a. Disziplinübergreifende Optimierungen und Variantenuntersuchungen sind aufgrund unzureichender durchgängiger Modellanbindungen und fehlender Konzepte nicht möglich.

Von der Objektplanung werden in der LPH 2 das Erarbeiten der Vorplanung, Untersuchen, Darstellen und Bewerten von Varianten nach gleichen Anforderungen und Zeichnungen im Maßstab nach Art und Größe des Objekts erwartet. Der Tragwerksplaner hat als Aufgabe das Untersuchen alternativer Lösungsansätze nach verschiedenen Anforderungen einschließlich Kostenbewertung sowie das Aufstellen von Vergleichsberechnungen für mehrere Lösungsmöglichkeiten unter verschiedenen Objektbedingungen. Die SIA definiert die Darstellung verschiedener Lösungsstrategien sowie Beschriebe, Skizzen, Pläne verschiedener Lösungsstrategien (inkl. deren Bewertung) als Ziele bezüglich Variantenuntersuchungen. Hier werden Methoden aus dem Bereich des Komplexitätsbereichs der Planungswerkzeuge verwendet, um die zwischen einzelnen Modellen zu übergebenden Informationen präzise zu definieren. Ein denkbarer Ausgangspunkt für die Überwindung des genannten Hindernisses wird in der Zerlegung der Planungsprozesse der einzelnen Planer bis auf die Ebene eines Block Definition Diagramm gesehen (Abbildung 4.7.3). Hier können die planungsdisziplinübergreifenden Parameterübergaben detailliert definiert werden. Damit ist die Grundlage zur Anwendung der in Abschnitt 2.2.3 erwähnten direkten Suchmethoden oder evolutionären Strategien vorhanden. Voraussetzung dabei ist, dass alle für die Optimierung relevanten Planungsalgorithmen der einzelnen Planer eingebunden werden können. Eine große zu überwindende Schwelle stellt die exakt definierte Übergabe der entsprechenden Parameter zwischen den einzelnen Planern dar.

Gerade bei der Verwendung von evolutionären Strategien zur Optimierung eines Tragwerks müssen sehr viele Parameterkonstellationen berechnet und ausgewertet werden um im Anschluss neue besser angepasste Parameterkonstellationen zu er-

zeugen. Da man hier in den Optimierungsvorgang nur sehr gering eingreifen kann, ist eine vorherige transparente Definition mittels einer Diagramm-Darstellung hilfreich. Somit werden hier Lösungsansätze aus dem Bereich der Komplexität der Planungswerkzeuge zum Einsatz kommen.

## 5.6 Anpassungen und fehlende Planung

- a. Veränderungen in der Planung einzelner Fachplaner werden nur langsam oder unvollständig in die laufende Planung anderer Planungsbeteiligter eingearbeitet, da sie oftmals nicht zeitnah kommuniziert werden.
- b. Bisher fehlende Planungsleistungen werden nicht automatisch erkannt.
- c. Unerwartete Fertigungs- und Montagetoleranzen werden im laufenden Planungsprozess nicht mehr in die Modelle eingepflegt. Auswirkungen der Montage bzw. Bauwerkserstellung auf die strukturelle Integrität werden in frühen Planungsphasen mit unzureichenden Sicherheiten berücksichtigt.

Im Kontext des Problems a. erwartet die HOAI vom Objektplaner in LPH 2 ein Analysieren der Grundlagen, das Abstimmen der Leistungen mit den fachlich an der Planung Beteiligten, das Bereitstellen der Arbeitsergebnisse als Grundlage für die anderen an der Planung fachlich Beteiligten sowie Koordination und Integration von deren Leistungen. Vom Tragwerksplaner ist eine Tragwerkslösung unter Beachtung der durch die Objektplanung integrierten Fachplanungen bis zum konstruktiven Entwurf mit zeichnerischer Darstellung gefordert. Die SIA geht von der Entwicklung eines detaillierten Informationskonzeptes inklusive der Organisation des Planerteams und eines Aufgabenbeschriebs sowie ein Nachführen der Ausführungsunterlagen aus. Der erste denkbare Schritt ist die Bildung einer Design Structure Matrix wie in Abschnitt 4.7.4 erläutert. Jeder Fachplaner sollte eine solche Design Structure Matrix wie in Abbildung 4.7.7 über die Analyse der strukturellen Abhängigkeiten oder wie in Abbildung 4.8.1 über die Korrelationsanalyse eines parametrischen Planungssystems für sein eigenes Gewerk erstellen. Auf Grundlage von Visualisierungen wie in Abbildung 4.4.13 können die Schnittstellen zwischen verschiedenen Gewerken aufgedeckt werden. Diese Schnittstellen zwischen jeweils zwei Fachplanern manifestieren sich in Parameterabhängigkeiten die in einer auf Seite 105 beschriebenen Inter Domain Matrix festgehalten werden können. Mit Hilfe der verschiedenen Abhängigkeitsmatrizen

und den IDM's kann nun eine Multi Domain Matrix (siehe Seite 106) gebildet werden. Wird nun die transitive Hülle dieser MDM gebildet, sind auch alle indirekten Parameterbeziehungen detektierbar. Ändert nun ein Planer im Laufe seiner Planung den Wert eines Parameters, kann in der MDM abgelesen werden, welchen Einfluss diese Änderung auf Parameter hat, die auch andere Fachdisziplinen beeinflussen. Optimalerweise sollte die transitive Hülle der MDM mit einer BIM-Umgebung verknüpft werden, sodass Auswirkungen direkt visualisiert und Warnungen ausgegeben werden können. Mit Fokus auf den nicht erkannten fehlenden Planungsleistungen (Problem b.) findet sich in der HOAI (LPH 2) die Forderung nach dem Analysieren der Grundlagen, Abstimmen der Leistungen mit den fachlich an der Planung Beteiligten, Abstimmen der Zielvorstellungen sowie Hinweisen auf Zielkonflikte. Die SIA geht in diesem Zusammenhang gezielter von einem integralen Umsetzen der Konzepte in ein Vorprojekt mit geeigneter Darstellung aus. Es sollen Pläne, Beschriebe, Modelle, Gefährdungsbilder, Nutzungsvereinbarung, Berichte zur Umweltverträglichkeit und Nachweise bereitgestellt werden. Wurden wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, die notwendigen Funktionalitäten zusammengestellt und es kann einer oder mehreren Funktionen kein konkreter Planer oder eine Firma zugeordnet werden, ist das ein sicheres Indiz für das Fehlen von Planungsleistungen. Nach dem Aufbau eines Graphen wie in Abbildung 4.4.2 ist die Planungslücke durch eine fehlende Linie aus dem Graphen ablesbar. In der Graphentheorie würde man bei der bisher ungeplanten Funktion von einem isolierten Knoten sprechen. Solche lassen sich automatisiert auffinden. Durch die Übersetzung des Graphen der Funktion-Planer Zuordnung in eine Adjazenzmatrix lässt sich das Fehlen von Planung dann durch eine leere Zeile bzw. Spalte aufdecken. Auch wenn einer Funktion ein konkreter Planer zugeordnet wird, können notwendige Planungen fehlen. Sind Funktionen noch keinem konkreten Tragwerkelement zugeordnet, ist das Fehlen von Planung wahrscheinlich. Dies lässt sich wiederum durch die Suche nach isolierten Knoten in einem Graphen der Funktion-Tragelements Zuordnung untersuchen.

Die nächste Suchrichtung betrifft dann die in Abbildung 4.6.4 aufgeführten Anforderungen. Liegt für die Einhaltung der den einzelnen Tragelementen zugeordneten Anforderungen bisher kein Nachweis vor, ist ebenfalls von einer fehlenden Planung auszugehen. Für das Problem c. wird vom Tragwerksplaner in LPH 2 ein Beraten in statisch-konstruktiver Hinsicht unter Berücksichtigung der Belange der Standsicherheit, der Gebrauchsfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit erwartet. In LPH 3 muss der Tragwerksplaner die ingenieurtechnische Kontrolle der Ausführung des Tragwerks auf Übereinstimmung mit den geprüften statischen Unterlagen vornehmen. In

der SIA ist hierzu in der Realisierungsphase nur das Nachführen der Ausführungsunterlagen definiert.

Ein möglicher Ansatz zum frühzeitigen Aufdecken der Auswirkungen von Toleranzen bietet die in Abschnitt 4.8 beschriebene Sensitivitätsanalyse auf Grundlage eines parametrisch-assoziativen Planungssystems. Hierbei sind Auswirkungen von toleranzabhängigen geometrischen Eingangsparametern des Planungssystems zu untersuchen. Sind Korrelationen zur konstruktiven Ausbildung einzelner Tragelemente detektierbar, sollte bei der Dimensionierung der Tragelemente ein entsprechender Sicherheitspuffer berücksichtigt werden, wenn mit einer nicht toleranzbehafteten Geometrie weiter geplant werden soll. Die Größe des notwendigen Sicherheitspuffers sollte auf Basis der eingangs beschriebenen Sensitivitätsanalyse definiert werden. Mögliche Montagetoleranzen lassen sich in einer FEM-Analyse beispielsweise über Lagerverschiebungen oder imperfekte Geometrien von Tragelementen abbilden.

Sind nach der Fertigung einzelner Tragelemente oder der als Lager dienenden Betonstrukturen bereits Vermessungsergebnisse vorhanden, lassen sich diese in ein mit generativen Methoden erstelltes Geometriemodell integrieren und an assoziierte Planungsmodelle zur FEM-Analyse oder Ableitung von Konstruktionsplänen weitergeben.

# 6

## **Beispielhafte Implementierung von Methoden der Komplexitätskontrolle in der Tragwerksplanung**

## 6.1 Vorgehen

Im folgenden Kapitel wird am Beispiel eines realen Angebotsprojekts aus dem Bereich des Membranbaus die exemplarische Anwendung der in Kapitel 4 dargelegten Methoden durchgeführt. Nach der Projektbeschreibung werden, unterteilt nach den Ebenen der Komplexität (Gesamtplanungsprozess, Tragwerksplanungsprozess und Planungswerkzeuge), Methoden zum Beschreiben, Aufdecken und Visualisieren von Interaktionen angewandt.

## 6.2 Projektbeschreibung

Bei dem Projekt (siehe Abbildung 6.2.1) handelt es sich um ein Gesamtprojekt aus mehreren verschieden großen Teilprojekten innerhalb eines Vergnügungsparks in Südostasien. Das Projekt befindet sich in direkter Meeresnähe in exponierter Lage.



Abbildung 6.2.1: Projekt Ocean Park - Entwurf; Aedas Limited Hong Kong

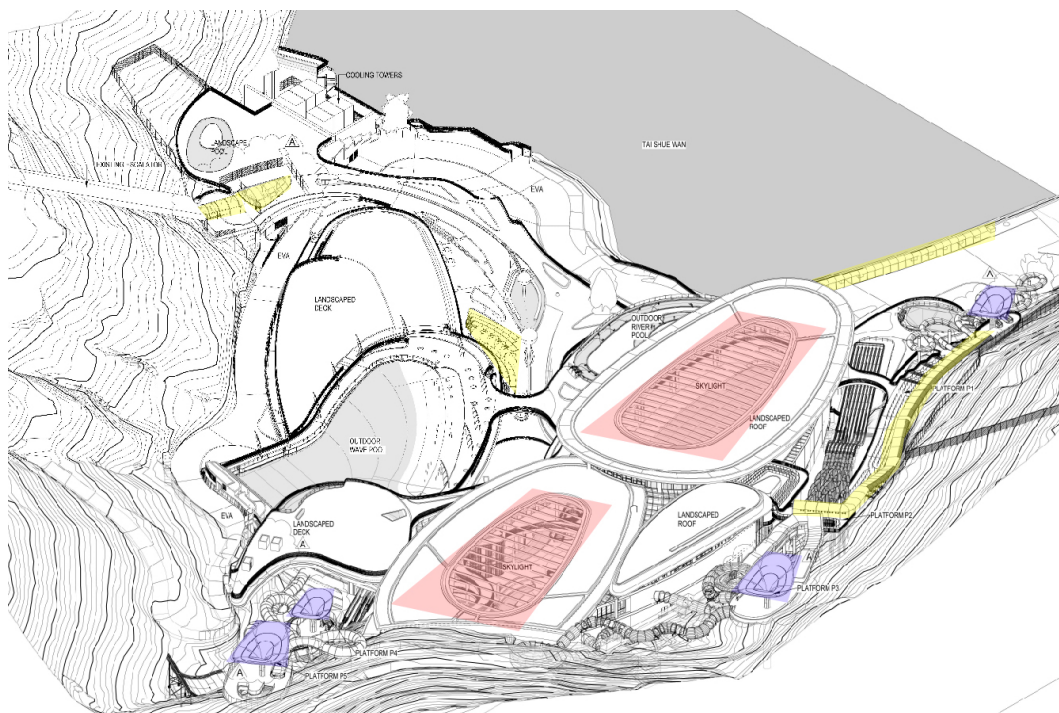


Abbildung 6.2.2: Projekt Ocean Park - Teilstrukturen; Aedas Limited Hong Kong

Die verschiedenen zu bearbeitenden Teilstrukturen finden sich in Abbildung 6.2.2. Bei den rot gekennzeichneten Strukturen handelt es sich um zwei Schwimmbadüberdachungen mit jeweils  $1700 \text{ m}^2$  und  $1100 \text{ m}^2$  aus ETFE<sup>1</sup>-Kissen. Die ETFE-Kissen spannen zwischen Stahlbögen mit 30 cm Breite und variabler Höhe, die wiederum auf einer Stahlbetonstruktur aufliegen. Die blau markierten Strukturen sind filigrane Stahlstrukturen mit einer PTFE<sup>2</sup>-Membran als Hüllmaterial. Die vier, als *inverted umbrellas* bezeichneten, Strukturen haben variable Größen. Nicht weiter betrachtet werden die gelb gekennzeichneten Überdachungen, die ebenfalls mit einer PTFE-Membran überspannt werden.

Aufgrund der größeren Anzahl von Planungsbeteiligten werden Methoden des Komplexitätsmanagements für den Bereich des Gesamtplanungsprozesses anhand der ETFE-Strukturen erläutert. Der Einsatz von Methoden des Komplexitätsmanagements der Planungswerkzeuge und des Tragwerksplanungsprozesses wird auf Grundlage der blau markierten Strukturen beschrieben.

<sup>1</sup>Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer

<sup>2</sup>Polytetrafluorethylen

### 6.3 Komplexität des Gesamtplanungsprozesses - Funktionen und Projektbeteiligte

In der Angebotsphase gab es die Anforderung ein Konzept für den Informationsfluss und einen Überblick des notwendigen Informationsaustauschs speziell für die ETFE-Strukturen zwischen den einzelnen Planern zu erarbeiten. Ursache hierfür ist die sehr geringe zur Verfügung stehende Planungszeit. Es geht hierbei um die in Abschnitt 3.1 erwähnten externen Interaktionen. Zum Aufbau werden zunächst die notwendigen zu erfüllenden Funktionen gesammelt und in Abbildung 6.3.2 zusammengestellt. Hier werden die Gliederungselemente des Gesamttragwerks, Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk wie in Abschnitt 4.4.1 als Stellvertreter der ihnen zugeordneten vier Unterfunktionen der Tragfunktion verwandt. Im Anschluss wird in Abbildung 6.3.3 den Funktionen ein spezifischer Planer zugeordnet. Nach Anknüpfung der Funktionen an die einzelnen, in Abbildung 6.3.1 dargestellten, Tragelemente (siehe Abbildung 6.3.4) wird in Abbildung 6.3.5 der Lastabtrag zwischen den einzelnen Tragelementen visualisiert. Der Lastabtrag erfolgt von links nach rechts.

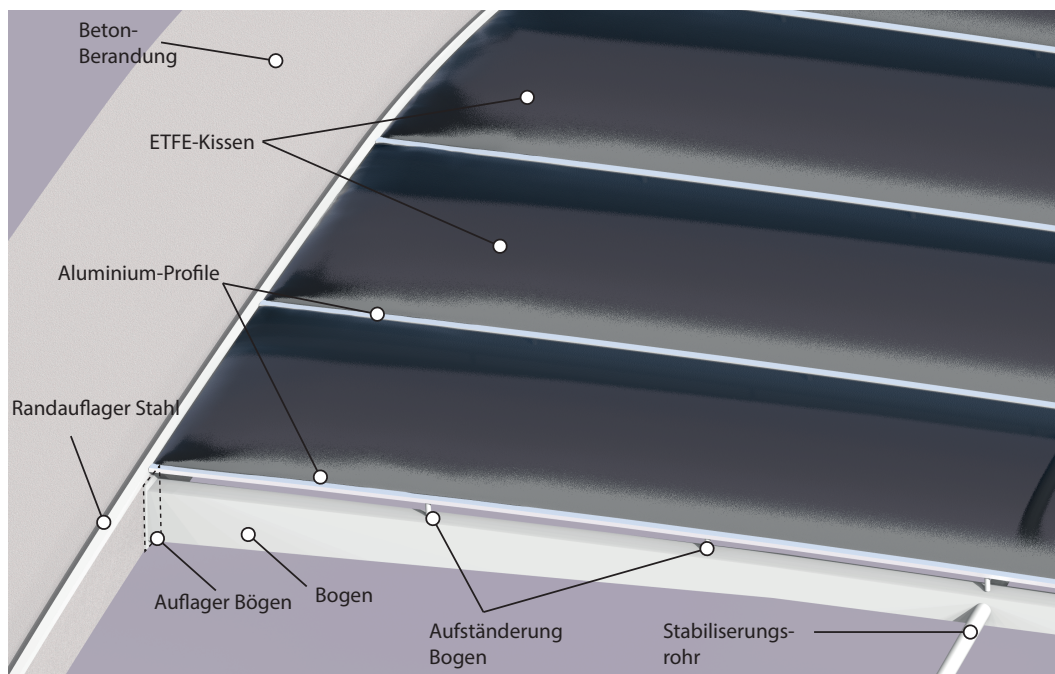


Abbildung 6.3.1: Projekt Ocean Park - Ausschnitt Tragelemente; Eigene Darstellung



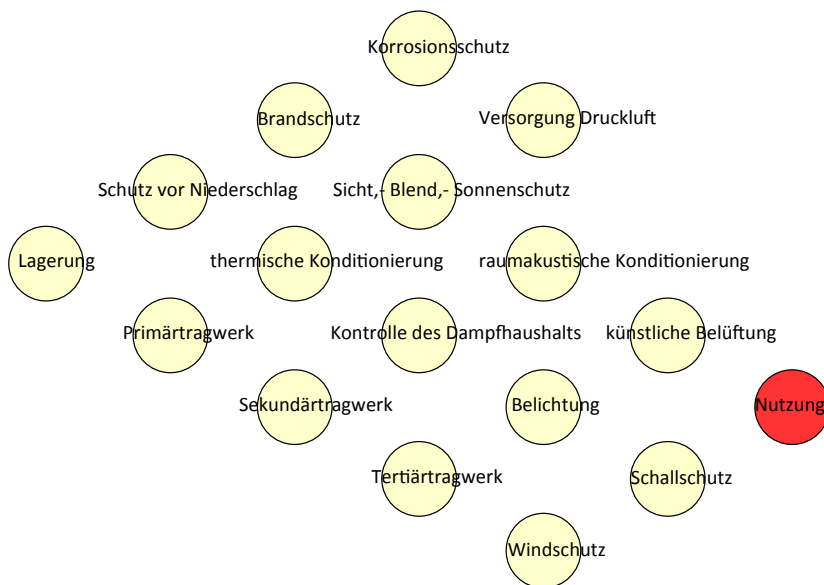


Abbildung 6.3.2: Projekt Ocean Park - zu erfüllende Funktionen; Eigene Darstellung

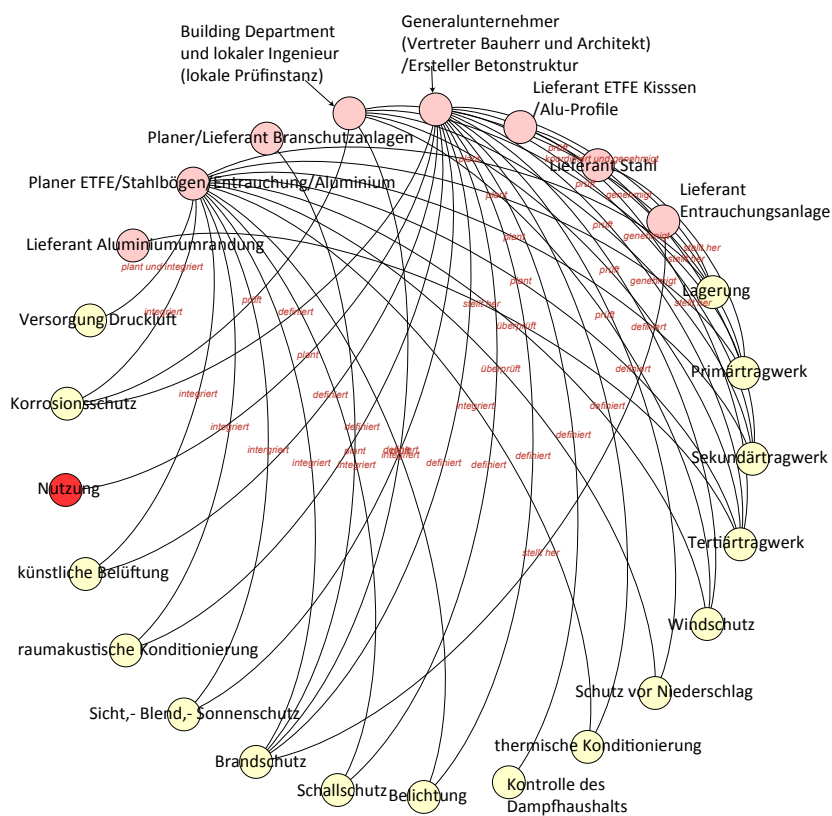


Abbildung 6.3.3: Projekt Ocean Park - Zuordnung der Projektbeteiligten zu Funktionen; Eigene Darstellung

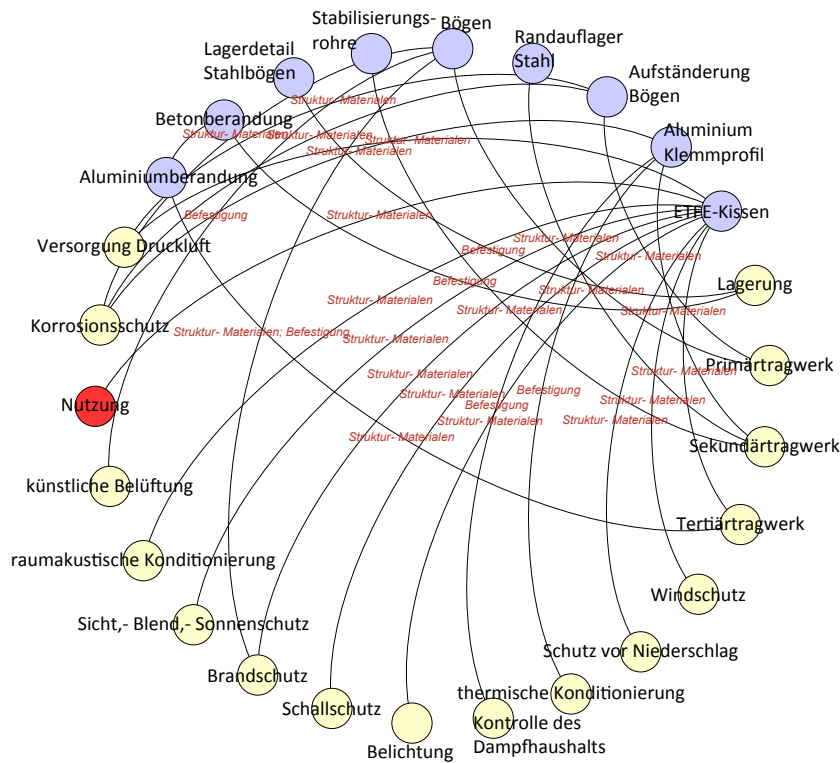


Abbildung 6.3.4: Projekt Ocean Park - Zuordnung Funktion zu Tragelementen; Eigene Darstellung

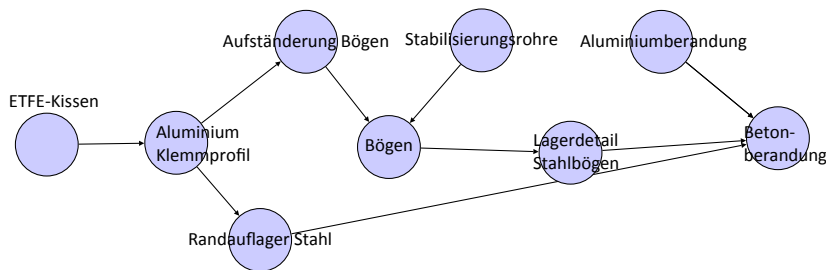


Abbildung 6.3.5: Projekt Ocean Park - Lastabtrag; Eigene Darstellung

Dem Lastabtrag folgend werden, beginnend mit den ETFE-Kissen, separat für jedes Tragelement Graphen erstellt. Diese Diagramme zeigen die Funktionen und beteiligte Planer. Auf Grundlage der Graphen wird die Reihenfolge und der nötige Inhalt des Informationsaustausches abgeleitet. Graph 6.3.6 zeigt alle mit dem ETFE-Kissen verknüpften Funktionen und Planer. Dieser Graph wird ohne unterschiedliche Gewichtung mithilfe des ForceAtlas2 Algorithmus erzeugt. Im nächsten Schritt werden ausgewählte Beziehungen gewichtet.

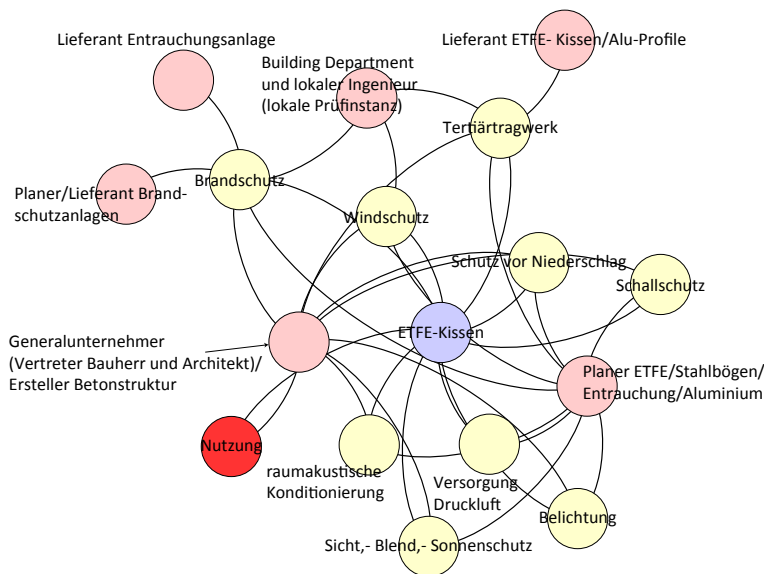


Abbildung 6.3.6: Projekt Ocean Park - Funktionen und Planer ETFE-Kissen; Eigene Darstellung

Der lokalen Prüfinstanz kommt eine dominante Bedeutung zu, da sie die finale Genehmigung gibt. Deswegen wird den Prüfbeziehungen in Graph 6.3.7 die Gewichtung 10 zugewiesen.

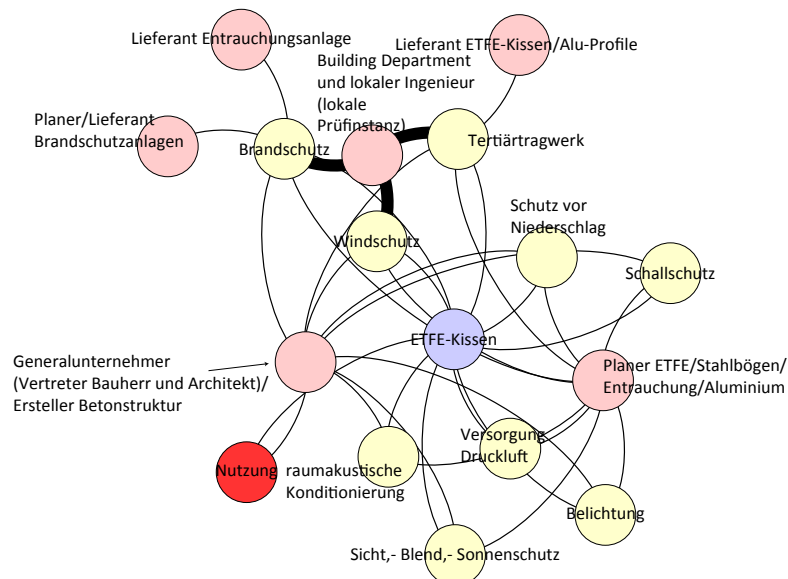


Abbildung 6.3.7: Projekt Ocean Park - Funktionen und Planer ETFE-Kissen gewichtet, Eigene Darstellung

Der maßgebenden Bedeutung der ETFE-Kissen als Tertiärtragwerk wird in Graph 6.3.8 Rechnung getragen. In diesem Graph wird deutlich, dass drei Beteiligte geometrisch am nächsten am blauen Knoten (ETFE-Kissen) liegen und somit den größten Einfluss auf die finale Ausbildung dieses Kissens haben. Für diese Beteiligten werden in Graph 6.3.9 die abzustimmenden Funktionen dargestellt.

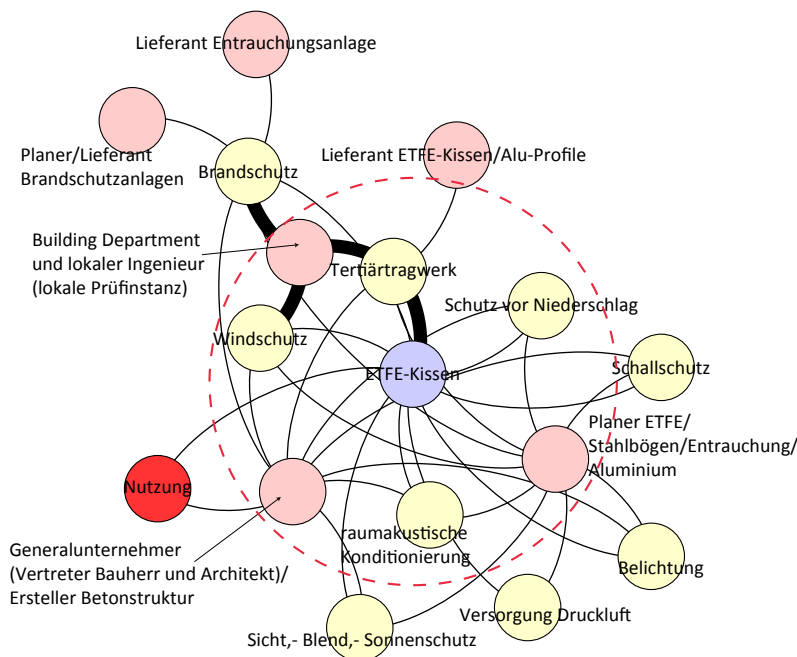


Abbildung 6.3.8: Projekt Ocean Park - ETFE-Kissen Gewichtung des Tertiärtragwerks; Eigene Darstellung

Auf Grundlage dieses Graphen können, auf die ETFE-Kissenstruktur bezogen, die notwendigen sicherzustellenden Funktionen für die Planungsbeteiligten in tabellarischer Form aufbereitet werden. Diese Tabelle findet sich in Abbildung 6.3.10. In der Tabelle werden den Funktionen aller vorab definierten Tragelemente Charakteristika sowie die zu definierenden Parameter und die verantwortlichen Planungsbeteiligten zugeordnet. Diese Tabelle kann als Ausgangspunkt für Gespräche, RFI's<sup>3</sup>, RFC's<sup>4</sup> oder jegliche andere Form des Informationsaustauschs verwendet werden. Solange die definierten Parameter nicht auf konkrete Werte fixiert und von allen Planungs-

<sup>3</sup>Request For Information

<sup>4</sup>Request For Comments

beteiligten akzeptiert werden, ist die Planung unvollständig und nicht beendet. Die Vielzahl der zu definierenden Parameter deutet bereits darauf hin, dass es Konflikte zwischen diesen Parametern oder den Parametern anderer Tragelemente geben könnte und diese durch Kompromisse gelöst werden müssen. Die Zusammenhänge zwischen den zu definierenden Parametern und einzelnen Beteiligten werden in Form einer Design Structure Matrix in Abbildung 6.3.11 aufgeführt. Wird von einem der beteiligten Planer ein in der Matrix aufgeführter Parameter geändert, können durch geeignete Mechanismen automatische Meldungen erzeugt und allen Beteiligten ein Kommunikationsbedarf mitgeteilt werden. Zum Auffinden sich daraus ergebender Kompromisse können dann beispielsweise Methoden der Pareto-Optimierung verwendet werden. Wie der Planer, in diesem Fall der Planer für ETFE/Stahlbögen/Entrauchung und Aluminium, diese Kompromisse in seiner eigenen Planung umsetzt, fällt in den Bereich der internen Prozesskomplexität.

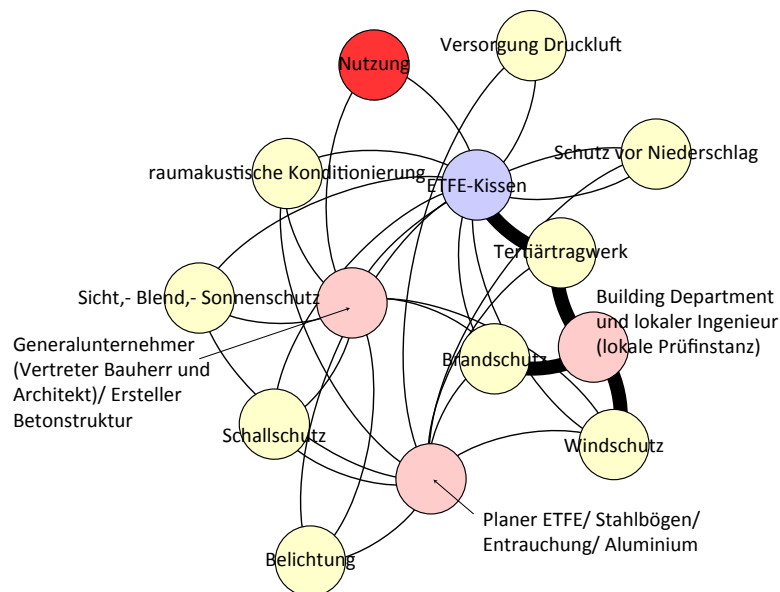


Abbildung 6.3.9: Projekt Ocean Park - ETFE-Kissen abzustimmende Funktionen; Eigene Darstellung

Vorbereitung Informationsaustausch zwischen Planungsbeteiligten				
Tragelement	ausgewählte zu gewährende Funktionen	maßgebende Charakteristika/ Stichpunkte	relevante Parameter	zugeordnete Beteiligte
ETFE-Kissen	Belichtung	Lichtdurchlässigkeit	Transluzenz TR_ETFE in [%]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
	Brandschutz	Brandverhalten	Schmelztemperatur T_sch,ETFE in [C°]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Planer/Lieferant Brandschutzanlagen; Lokale Prüfstanz; Lieferant Entrauchungsanlage
	raumakustische Konditionierung	schallabsorbierende Eigenschaften	Absorptionsgrad a_ETFE in[%]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
	Schutz vor Niederschlag	Wasserdurchlässigkeit	Wasseraufnahmekoeffizient w_ETFE in [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sub>0,5</sub> )]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
	Sicht-, Blend- und Sonnenschutz	Bedruckung ETFE	Transluzenz TR_ETFE in [%]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
	Tertiärtragwerk	Dicke ETFE; Vorspannung ETFE; Innendruck; Spannweiten; Lasten; Lagerreaktionen	Spannweiten s_ETFE in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz;
			Dicke t_ETFE in [µm]	
Innendruck p_in,ETFE in [Pa]				
Windsog w_s in [KN/m <sup>2</sup> ]				
Winddruck w_D in [KN/m <sup>2</sup> ]				
Verkehrslasten II in [KN/m <sup>2</sup> ]				
Versorgung Druckluft	Anschluss Druckversorgung; notwendiger Innendruck	Eigengewicht dl_ETFE in [KN/m <sup>2</sup> ]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium	
		Auflagerreaktionen in I_tert2sek in [KN/m]		
		Innendruck p_in,ETFE in [Pa]		
Aluminiumprofil	Sekundärtragwerk	Querschnittsdimensionen; Spannweiten; Lasten aus Tertiärtragwerk; Lagerreaktionen	Höhe Profil h_ALP in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz
			Breite Profil b_ALP in [mm]	
thermische Konditionierung	Wärmedurchgang Profil; Höhe Profil; Dimensionen Profil	Wärmedurchgangskoeffizient u_ALP in W/(m <sup>2</sup> ·K)	Höhe Profil h_ALP in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
			Breite Profil b_ALP in [mm]	
Aufständerung	Primärtragwerk	Querschnittsdimensionen; Länge Aufständerung; Lasten aus Sekundärtragwerk; Lagerreaktionen	Höhe Profil h_Aufst in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Breite Profil b_Aufst in [mm]	
Versorgung Druckluft	Durchdringung Druckleitung	Durchdringung Druckleitung	Länge L_Aufst in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
			Lasten aus ALP in I_ssek2prim in [KN/m un KNm]	
Randaufleger Stahl	Sekundärtragwerk	Querschnittsdimensionen; Abstand Befestigung; Lasten aus Tertiärtragwerk; Lagerreaktionen	Höhe Profil h_Rand in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Breite Profil b_Rand in [mm]	
Bogen	Primärtragwerk	Querschnittsdimensionen; Spannweite; Lasten aus Sekundärtragwerk; Lagerreaktionen	Wandstärke Profil t_Rand in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Abstand Befestigung d_Bef in [mm]	
künstliche Belüftung	Durchdringung und Befestigung elektrischer Leitungen	Durchdringung und Befestigung elektrischer Leitungen	Lasten aus ETFE in I_tert2sek in [KN/m]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium
			Auflagerreaktionen in I_Aufst2Bog in [KN und KNm]	
Brandschutz	Durchdringung und Befestigung von Sprengleranlagen	Durchdringung und Befestigung von Sprengleranlagen	Auflagerreaktionen in I_Bog2Lager in [KN und KNm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Planer/Lieferant Brandschutzanlagen; Lokale Prüfstanz; Lieferant Entrauchungsanlage
			Durchmesser Durchdringung d_durch, Bog in [mm]	
Stabilisierungsrohre	Sekundärtragwerk	Querschnittsdimensionen; Spannweite; Lasten aus Primärtragwerk; Lagerreaktionen	Durchmesser Profil d_Stabil in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Wandstärke Profil t_Stabil in [mm]	
Lagerdetail Stahlbogen	Lagerung	Plattendicke; Plattengröße; Anzahl Verankerungselemente; Schweißnahtdicke	Spannweite s_Stabil in [mm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Auflagerreaktionen in I_Bog2Stabil in [KN und KNm]	
Betonberandung	Lagerung	Dimensionen Beton; Materialgüte Beton; Bewehrung	Auflagerreaktionen in I_Stabi2Beton in [KN und KNm]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Dicke Platte t_Lager in [mm]	
Höhe Platte h_Lager in [mm]	Breite Platte b_Lager in [mm]	Anzahl Verankerungselemente n_verank in [ ]	Betondruckfestigkeit f_c,d in [N/mm <sup>2</sup> ]	Generalunternehmer; Planer ETFE/Stahlbögen/Entrauchung / Aluminium; Lokale Prüfstanz, Lieferant Stahl
			Bewehrungsgrad bg_ in [t/m <sup>2</sup> ]	

Abbildung 6.3.10: Projekt Ocean Park - Auszug DSM Planungsbeteiligte-relevante Parameter; Eigene Darstellung

	Generalunternehmer	Planer ETFE/Stahlbögen/ Entrauchung / Aluminium	Lokale Prüfinstanz	Planer/Lieferant Brandschutzanlagen	Lieferant Entrauchungsanlage	Lieferant Stahl
TR_ETFE	x	x				
T_sch,ETFE	x	x	x	x	x	
a_ETFE	x	x				
w_ETFE	x	x				
s_ETFE	x	x				
t_ETFE	x	x				
p_in,ETFE	x	x				
w_S	x	x				
w_D	x	x				
II	x	x				
dl_ETFE	x	x				
I_tert2sek	x	x				
lec_ETFE	x	x				
d_o	x	x				
h_ALP	x	x	x			
b_ALP	x	x	x			
s_ALP	x	x	x			
I_tert2sek	x	x	x			
I_sek2prim	x	x	x			
u_ALP	x	x				
h_ALP	x	x				
b_ALP	x	x				
h_Aufst	x	x	x			x
b_Aufst	x	x	x			x
I_Aufst	x	x	x			x
I_sek2prim	x	x	x			x
I_Aufst2Bog	x	x	x			x
d_durch, Aufst		x				
h_Rand	x	x	x			x
b_Rand	x	x	x			x
t_Rand	x	x	x			x
d_Bef	x	x	x			x
I_tert2sek	x	x	x			x
I_Rand	x	x	x			x
h_Bog	x	x	x			x
b_Bog	x	x	x			x
t_Bog	x	x	x			x
s_Bog	x	x	x			x
I_Aufst2Bog	x	x	x			x
I_Bog2Stabil	x	x	x			x
I_Bog2Lager	x	x	x			x
d_durch, Bog	x	x	x	x	x	x
d_Stabil	x	x	x			x
t_Stabil	x	x	x			x
s_Stabil	x	x	x			x
I_Bog2Stabil	x	x	x			x
I_Stabi2Beton	x	x	x			x
t_Lager	x	x	x			x
h_Lager	x	x	x			x
b_Lager	x	x	x			x
n_verank	x	x	x			x
t_Schweiß_Lager	x	x	x			x
d_Beton	x	x	x			x
f_c,d	x	x	x			x
bg_in	x	x	x			x

Abbildung 6.3.11: Projekt Ocean Park - Auszug DSM Planungsbeteiligte relevante Parameter; Eigene Darstellung

## 6.4 Vorbereitung Analyse der Tragwerksinteraktionen und Handhabung der Planungswerkzeuge

### 6.4.1 Vorüberlegung

Die in Abbildung 6.2.2 blau markierten vier Teilstrukturen des Projekts haben das gleiche Konstruktionsprinzip aber andere Dimensionen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass weitere gleichartige Strukturen innerhalb des Vergnügungsparks aufgestellt werden. Aufgrund der Gleichartigkeit der Strukturen wird ein generatives Geometriemodell aufgebaut. Im Anschluss wird dieses in ein Finites Element Modell überführt und auf dessen Basis Sensitivitätsanalysen durchgeführt um Erkenntnisse über Tragwerksinteraktionen zu gewinnen. Beim Aufbau des generativen Geometriemodells wird eine hohe Anzahl einzelner Teilschritte und Verknüpfungen zwischen ihnen erwartet. Der Umgang mit der Komplexität der Planungswerkzeuge (siehe S. 69) ist hier für die Untersuchung der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Komplexität des Tragwerksplanungsprozesses unerlässlich. Zur Vorbereitung des Aufbaus des generativen Modells wird deshalb der Diagrammtyp Activity Diagramm der Modellierungssprache SysML verwendet, um bereits vor Aufbau einen ersten Überblick über die notwendigen einzelnen Subroutinen zu erhalten. Ein weiterer Nutzen dieser Dokumentationsweise ist die spätere schnellere Nachvollziehbarkeit des generativen Geometriemodells. Hierbei kommt es zu einem, gegenüber einer unsortierten Darstellung, verringertem kognitiven Aufwand, da weniger Denkschritte benötigt werden, um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilroutinen zu erkennen. Dieser verringerte Aufwand spielt dann eine große Rolle, wenn einzelne Teile für vergleichbare Aufgaben wiederverwertet werden sollen. Ein Activity Diagramm kann neben einer Hilfe zur Strukturierung auch als Grundlage für die Aufteilung von einzelnen Subroutinen auf verschiedene Modellersteller verwendet werden.

### 6.4.2 Beschreibung der Strukturen

Die Strukturen überspannen Flächen von  $150 \text{ m}^2$  bis  $310 \text{ m}^2$ . Die Hauptstruktur besteht aus Stahlrohren (S355) während die Eindeckung aus einer PTFE-Membran erstellt wird. Die Hauptlast für diese Struktur sind hohe Grundwindgeschwindigkeiten in Höhe von  $240 \text{ km/h}$ . Die Entwässerung erfolgt zentral zwischen den Stützelemen-



ten. Die PTFE-Membranen sollen direkt zwischen Dachrand und Stützelementen aufgespannt werden.

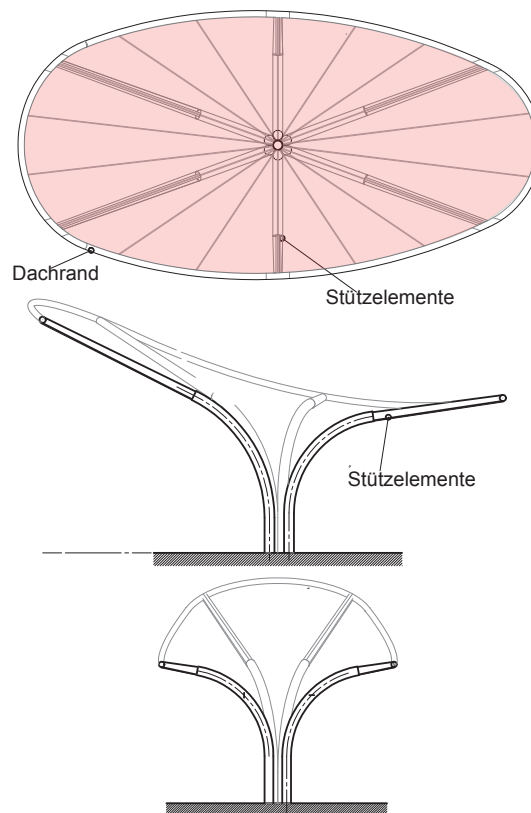


Abbildung 6.4.1: Projekt Ocean Park - Strukturen *inverted roof*; Eigene Darstellung

#### 6.4.3 Vorbereitung und Aufbau des parametrisch-assoziativen Geometriemodells und Anbindung an die FEM-Umgebung

##### Modellvorbereitung

Vor Aufbau des Modells werden zunächst alle nötigen Schritte als Aktivitäten in dem Activity Diagramm in Abbildung 6.4.2 dargestellt. Die einzelnen Aktivitäten können zunächst unsortiert erstellt und dann mit den notwendigen zu übergebenden Parametern verknüpft und geordnet werden. Durch Umsortierung im Sinne der kausalen Zusammenhänge wird die Lesbarkeit deutlich verbessert. Durch Übertragung des Activity Diagramms in eine DSM-Matrix ließe sich hier auch das in Abschnitt 4.5.2 beschriebene Vorgehen der Sequenzierung durchführen, was für größere Modelle sinnvoll erscheint.

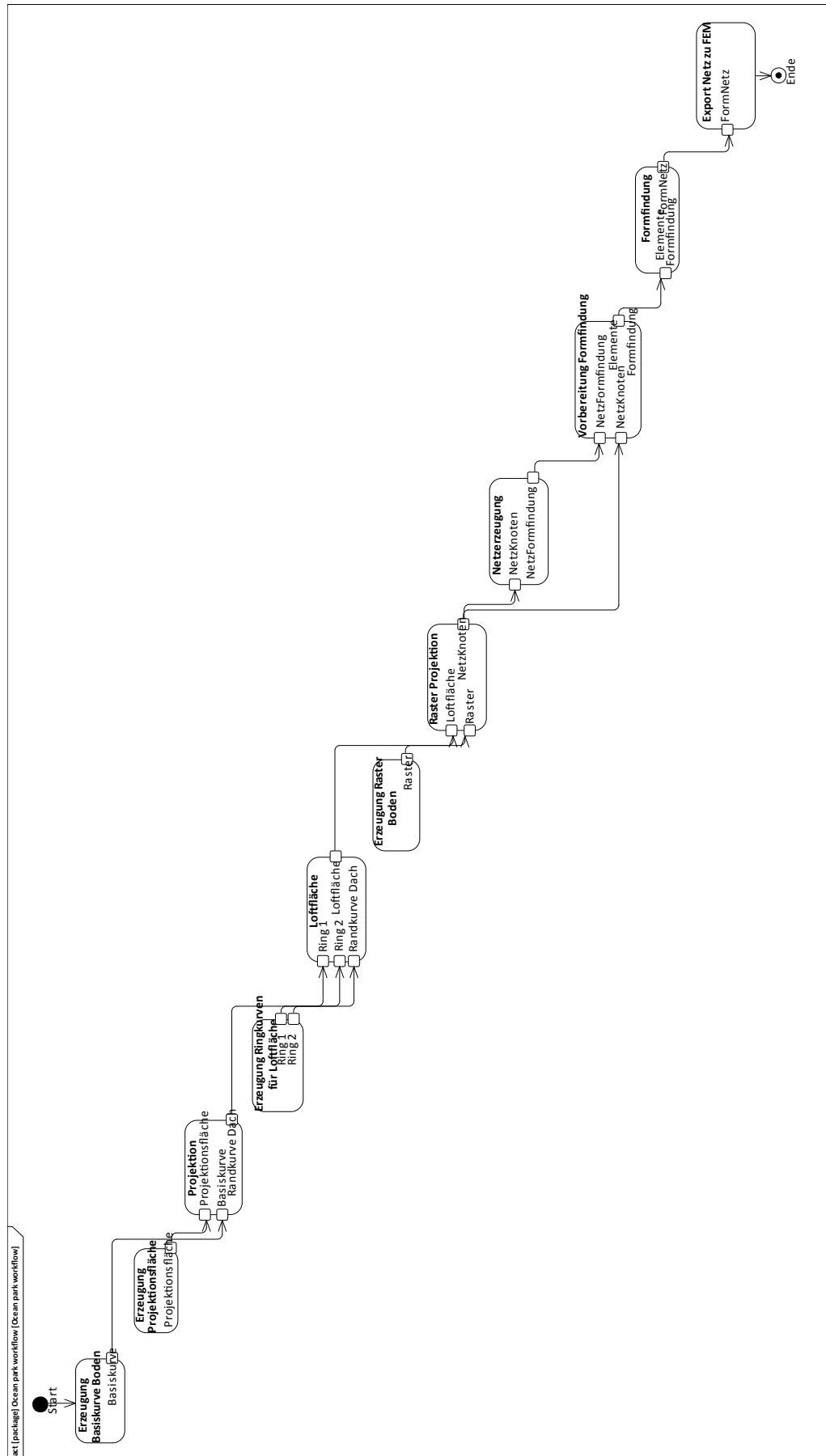


Abbildung 6.4.2: Vorbereitung generatives Modell für Strukturtyp *inverted roof*;  
Eigene Darstellung

#### 6.4.4 Umsetzung des generativen Geometriemodells

Wie in Abschnitt 4.7.5 beschrieben, kann der Aufbau eines parametrisch-assoziativen Planungsmodells, zu dem auch das zu erstellende generative Geometriemodell zählt, mittels verschiedener Programmpakete aufgebaut werden. Kriterien für die Softwarewahl bei der zu untersuchenden Struktur waren die folgenden:

1. direkte visuelle Kontrolle der erzeugten Geometrie in Bezug auf optische Erscheinung und Krümmungsverhältnisse
2. Möglichkeit der Formfindung mit direkter Einflussnahme auf die Steuerungsparameter der Geometrie
3. Möglichkeit der Übergabe der erzeugten Geometrie an eine für die Analyse von Membranstrukturen ausgelegte Software
4. spätere Durchführung einer Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter

Alle Kriterien werden von dem visuellen Programmieraufsatz Grasshopper<sup>®</sup> für Rhinoceros<sup>®</sup> sowie weiteren Aufsätzen erfüllt. Abbildung 6.4.3 zeigt die Gesamtschaltung innerhalb von Grasshopper<sup>®</sup>. Hier werden Subroutinen zu Clustern gefügt und direkt veränderbare Parameter linksseitig angeordnet, um eine bessere Lesbarkeit zu erreichen. Bei der Anordnung der einzelnen Cluster wird die gleiche Struktur wie in Abbildung 6.4.2 gewählt. Es wird darauf geachtet, dass alle Ausgangsparameter, die für einen anderen Algorithmus Eingangsparameter sind, die gleiche Bezeichnung besitzen. In Abbildung 6.4.3 werden die zugehörigen grafischen Repräsentationen der einzelnen Cluster ergänzt. Die so erzeugte Geometrie wird final an die FEM-Umgebung Strand7<sup>®</sup> mittels des dxf-Formats<sup>5</sup> übergeben. Der Aufbau und die Elemente des FE-Modells werden im Abschnitt 6.5.2 erläutert.

---

<sup>5</sup>Drawing Interchange File Format



## 6.5 Analyse der Tragwerkskomplexität mithilfe von Sensitivitätsanalysen

### 6.5.1 Vorüberlegung

Für die Gewinnung von Erkenntnissen über die Interaktionen innerhalb der Tragstruktur werden beispielhaft zwei zu analysierende Parameter ausgewählt und Auswirkungen ihrer Änderung auf Gewicht, Spannungen und Verformungen der Struktur untersucht. Der erste Parameter ist die Höhe der Gesamtstruktur, die über die Höhe der Projektionsfläche (siehe Abbildung 6.4.3) gesteuert wird. Der zweite Parameter ist der Durchmesser der Struktur am Verankerungspunkt am Boden. Für die Sensitivitätsanalyse werden die Ausgangswerte dieser Parameter jeweils um  $-2\%$ ,  $-1\%$ ,  $+1\%$  und  $+2\%$  geändert. Es müssen demnach neun verschiedene Geometrien untersucht werden. Um Fehler beim Abgleich von Materialcharakteristika oder Querschnittsdimensionen direkt auszuschließen, werden alle neun Strukturen in der gleichen Berechnungsdatei (siehe Abbildung 6.5.1) analysiert.

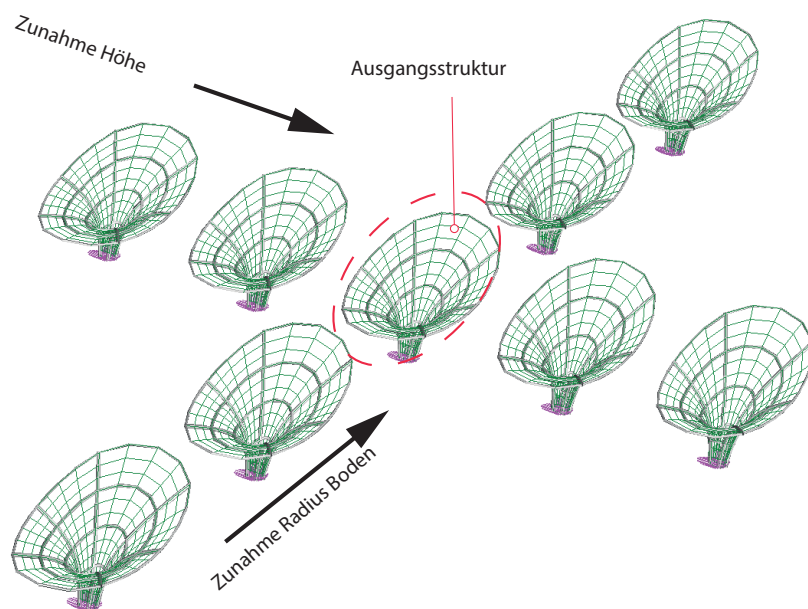


Abbildung 6.5.1: Neun variierende Tragwerksgeometrien; Eigene Darstellung

### 6.5.2 Aufbau des FEM-Modells

Nach einer ersten Analyse des in Abbildung 6.5.2 dargestellten FE-Modells stellt sich der Wind in x-Richtung, sowohl für die Spannungen in den Stahlelementen als auch in den Membranelementen, als maßgebend heraus. Der angesetzte Winddruck (Staudruck) entspricht einer Windgeschwindigkeit von 240 km/h und als  $c_p$ -Wert<sup>6</sup> wird in erster Näherung  $1,3^7$  angesetzt. Neben dieser ersten sehr wichtigen Erkenntnis werden die Profilquerschnitte so festgelegt, dass die Auslastung nur bei zwei Drittel (66%) liegt. Grund für diesen Sicherheitspuffer sind in dieser Phase noch nicht berücksichtigte konstruktive Einflüsse, wie beispielsweise der exzentrische Anschluss der Membran sowie fehlende Kenntnisse über die genauen Winddruckverteilungen mit einem maßgebenden Einfluss. Um weitere Erkenntnisse mit Blick auf die Strukturkomplexität zu gewinnen wird auf Grundlage der neun verschiedenen Geometrievarianten eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

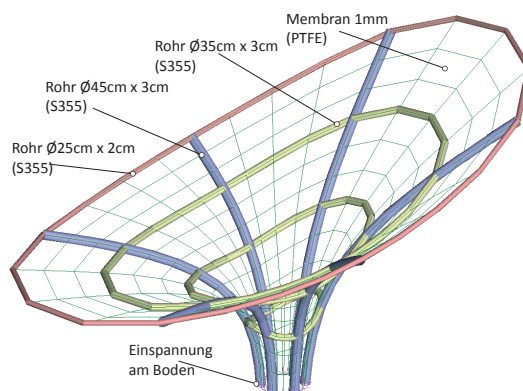


Abbildung 6.5.2: Elemente statisches Modell; Eigene Darstellung

### 6.5.3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

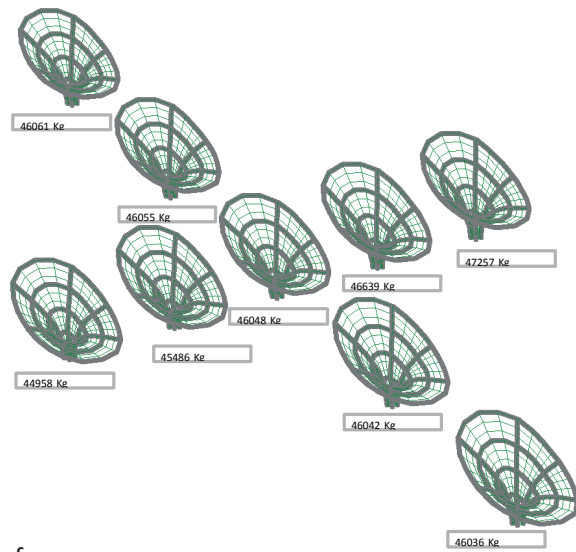
Nach Berechnung der neun Geometrievarianten werden für die drei verschiedenen Querschnitte die Von-Mises-Spannungen<sup>8</sup>, die Verformungen, die maximalen Hauptspannungen der Membran sowie die Massen berechnet und in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Berechnungsergebnisse werden für eine weitere Analyse in Tabellenform (Abbildung 6.5.5) übertragen.

<sup>6</sup>dimensionsloser Druckbeiwert

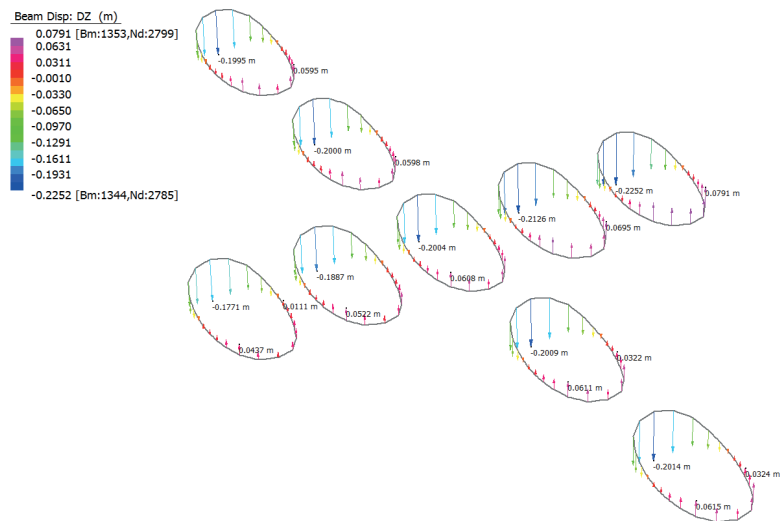
<sup>7</sup> $0,8(\text{Luv-seitiger Druck})+0,5(\text{Lee-seitiger Sog})=1,3$

<sup>8</sup>Vergleichsspannungen nach der Gestaltänderungshypothese

Vergleich der Massen



Vergleich der Verformungen



Vergleich Spannungen Rand

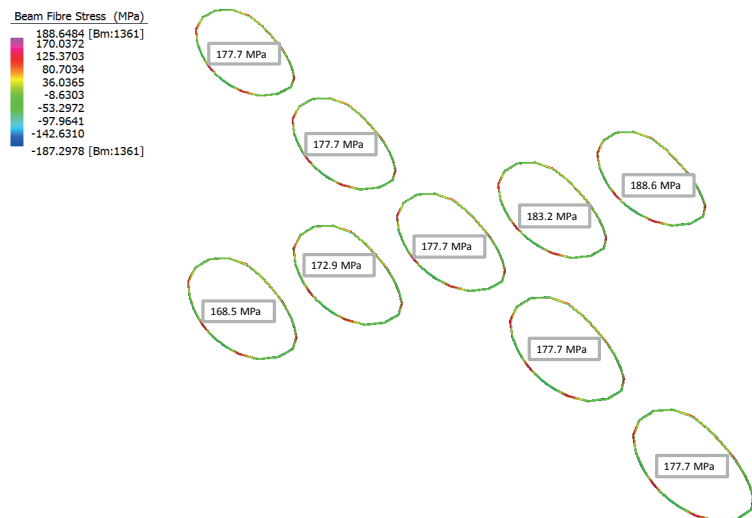
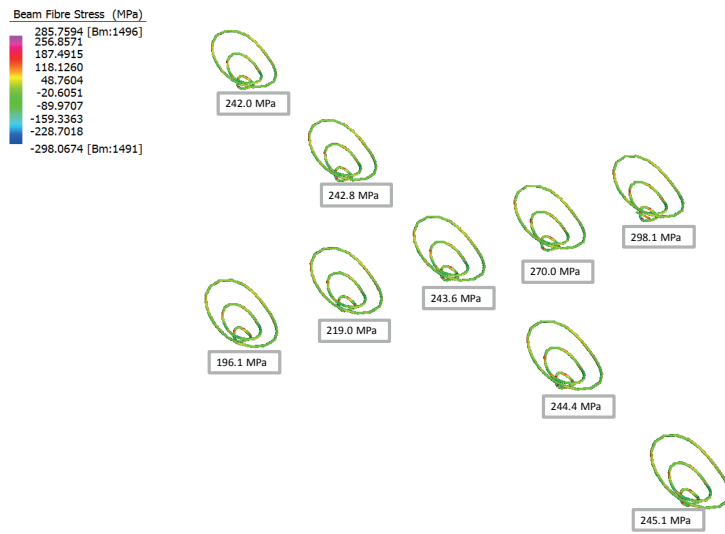
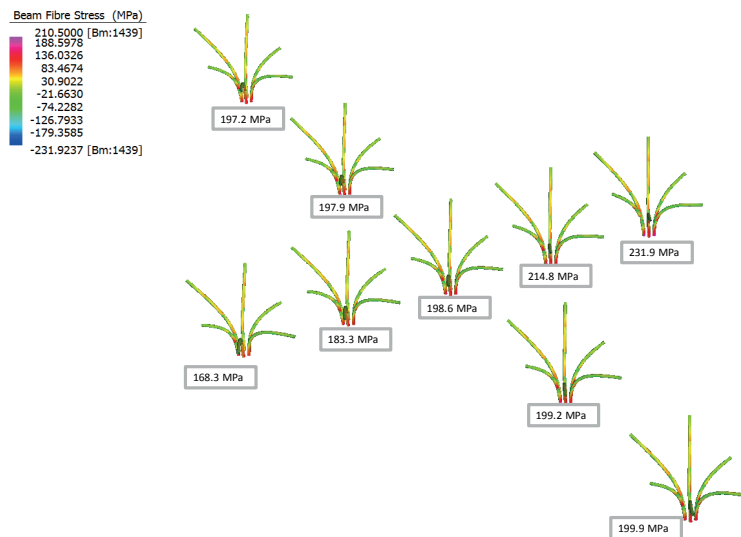


Abbildung 6.5.3: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Teil I; Eigene Darstellung

### Vergleich der Spannungen Rippelemente



### Vergleich der Spannungen Hauptstützen



### Vergleich der Hauptspannungen Membran

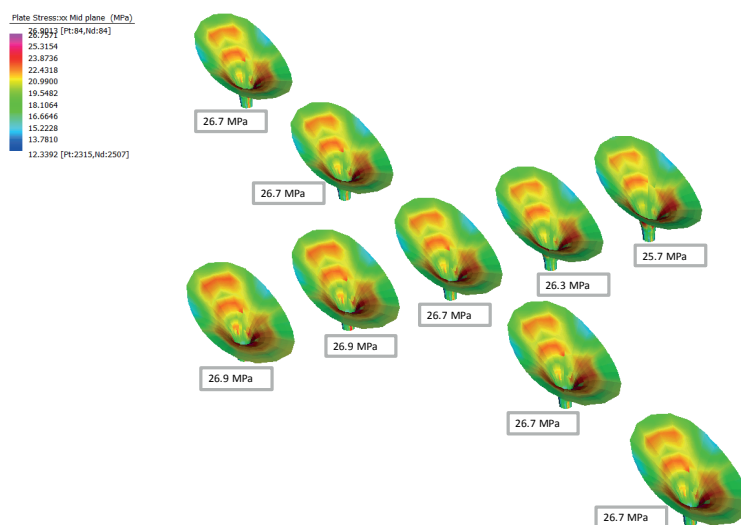
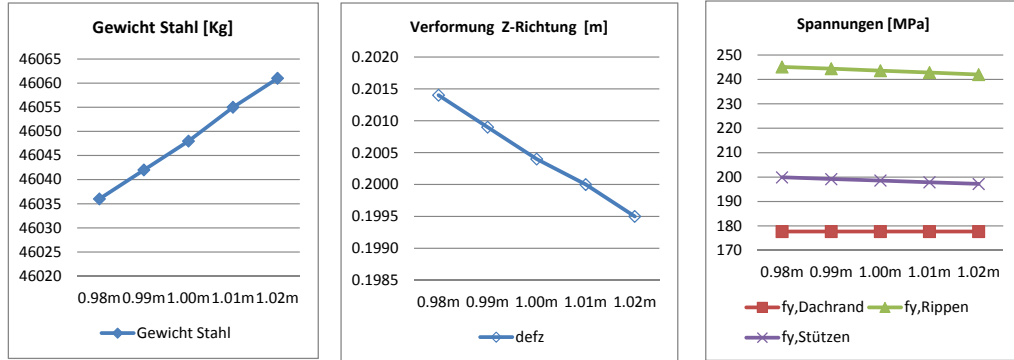


Abbildung 6.5.4: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Teil II; Eigene Darstellung



**Einfluss der Änderung des Radius Ring**

Radius Ring	$\Delta R_{\text{Ring}}$	Gewicht Stahl	$\Delta \text{Gewicht} / \Delta R_{\text{Ring}}$	$\text{def}_z$	$\Delta \text{def}_z / \Delta R_{\text{Ring}}$	$f_{y,\text{Dachrand}}$	$\Delta f_{y,\text{Dachrand}} / \Delta R_{\text{Ring}}$	$f_{y,\text{Rippen}}$	$\Delta f_{y,\text{Rippen}} / \Delta R_{\text{Ring}}$	$f_{y,\text{Stützen}}$	$\Delta f_{y,\text{Stützen}} / \Delta R_{\text{Ring}}$
[m]	[m]	[Kg]	[kg/m]	[m]	[m/m]	[Mpa]	[Mpa/m]	[Mpa]	[Mpa/m]	[Mpa]	[Mpa/m]
0.98m		46036		0.2014		177.7		245.1		199.9	
0.99m	0.01	46042	600	0.2009	-0.05	177.7	0	244.4	-70	199.2	-70
1.00m	0.01	46048	600	0.2004	-0.05	177.7	0	243.6	-80	198.6	-60
1.01m	0.01	46055	700	0.2000	-0.04	177.7	0	242.8	-80	197.9	-70
1.02m	0.01	46061	600	0.1995	-0.05	177.7	0	242	-80	197.2	-70



**Einfluss Änderung der Höhe der Projektionsfläche**

Z-Koordinate Projektionsfläche	$\Delta R_{\text{Ring}}$	Gewicht Stahl	$\Delta \text{Gewicht} / \Delta Z$	$\text{def}_z$	$\Delta \text{def}_z / \Delta Z$	$f_{y,\text{Dachrand}}$	$\Delta f_{y,\text{Dachrand}} / \Delta Z$	$f_{y,\text{Rippen}}$	$\Delta f_{y,\text{Rippen}} / \Delta Z$	$f_{y,\text{Stützen}}$	$\Delta f_{y,\text{Stützen}} / \Delta Z$
[m]	[cm]	[Kg]	[kg/m]	[m]	[m/m]	[Mpa]	[Mpa/m]	[Mpa]	[Mpa/m]	[Mpa]	[Mpa/m]
56.84m		44958		0.1771		168.5		196.1		168.3	
57.42m		45486	527.42	0.1887	0.02	172.9	7.59	219	39.48	183.3	25.86
58.00m		46048	561.42	0.2004	0.0202	177.7	8.28	243.6	42.41	198.6	26.38
58.58m		46639	590.42	0.2126	0.021	183.2	9.48	270	45.52	214.8	27.93
59.16m		47257	617.42	0.2252	0.0217	188.6	9.31	298.1	48.45	231.9	29.48

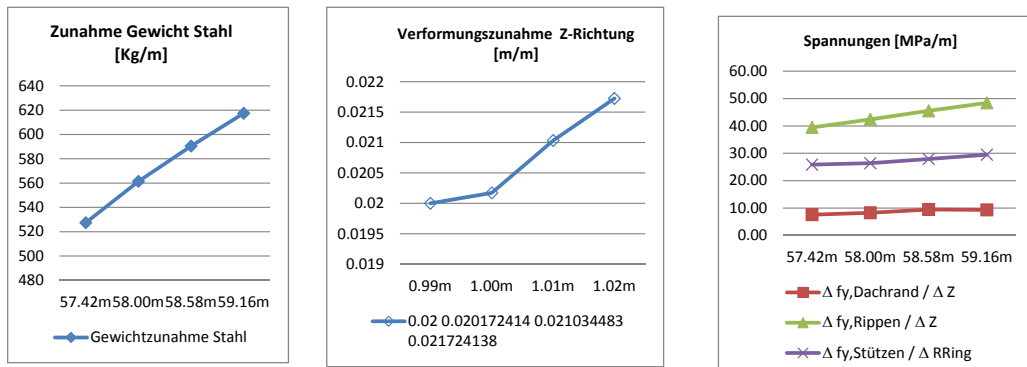
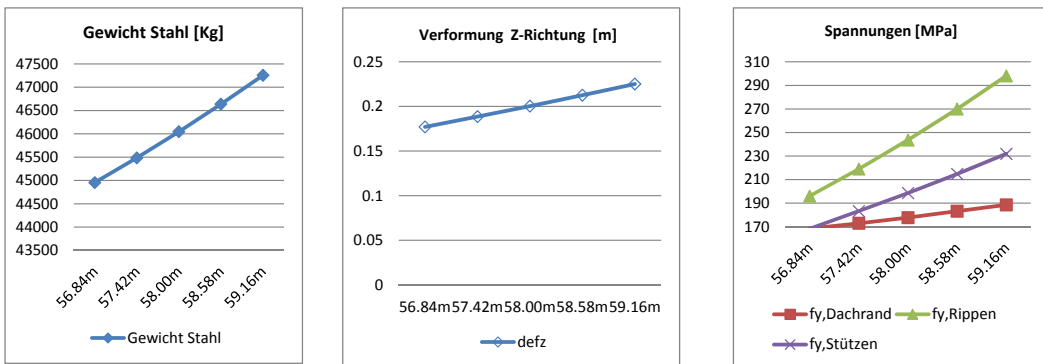


Abbildung 6.5.5: Auswertung Sensitivitätsanalyse in tabellarischer Form; Eigene Darstellung

#### 6.5.4 Ergebnisinterpretation der Sensitivitätsanalyse

##### Änderung des Radius der Struktur am Boden

Für die Analyse wird aufgrund der Eindeutigkeit auf die Bildung des unter Abschnitt 4.8 verwendeten Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman verzichtet. Die Auswertung der Zahlenwerte und Liniendiagramme in Abbildung 6.5.5 lässt folgende Schlüsse zu:

1. Zwischen dem Radius der Struktur und den Membranspannungen besteht im untersuchten Bereich ein vernachlässigbarer Zusammenhang.
2. Zwischen dem Radius der Struktur und dem Stahlgewicht besteht ein direkt proportionaler Zusammenhang.
3. Zwischen dem Radius der Struktur und den Verformungen des Dachrandes besteht ein direkt proportionaler Zusammenhang.
4. Zwischen dem Radius der Struktur und den Spannungen des Dachrandes besteht im untersuchten Bereich ein vernachlässigbarer Zusammenhang.
5. Zwischen dem Radius der Struktur und den Spannungen der Rippen und Stützen besteht ein direkt proportionaler Zusammenhang.

##### Änderung der Höhe der Struktur

Bei der Analyse der ermittelten Zusammenhänge werden zusätzlich zu den Zusammenhängen zwischen den veränderlichen Parametern und den untersuchten Größen auch noch die diskreten Steigungen der Kurven ermittelt. Diese Steigungen erlauben, genauere Aussagen über die Proportionalität der Größen zu treffen. Auf Grundlage der Diagramme und Abbildungen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Zwischen der Höhe der Struktur und den Membranspannungen besteht im untersuchten Bereich ein vernachlässigbarer Zusammenhang.
2. Zwischen der Höhe der Struktur und dem Stahlgewicht besteht ein direkt überproportionaler Zusammenhang.
3. Zwischen der Höhe der Struktur und den Verformungen des Dachrandes besteht ein direkt überproportionaler Zusammenhang.

4. Zwischen der Höhe der Struktur und den Spannungen des Dachrandes, der Rippen und Stützen besteht ein direkt überproportionaler Zusammenhang.

#### 6.5.5 Gewonnene Erkenntnisse über die Komplexität der Tragstruktur

Auf Grundlage der Auswertung der Sensitivitätsanalyse können für die zwei untersuchten Parameter konkrete Aussagen über die Auswirkungen auf für die Planung relevante Kenngrößen gemacht werden. Diese Aussagen können in Entscheidungen über Änderungen für anschließende Optimierungen des Tragwerks einfließen. Durch Extrapolation der Erkenntnisse können Grenzwerte der untersuchten Parameter, wie zum Beispiel die maximale Höhe der Struktur, abgeschätzt werden. Noch nicht berücksichtigte konstruktive Einflüsse sowie unbekanntes, für die Planung relevante, Kenngrößen werden hier durch einen Sicherheitsfaktor integriert.



# 7

## Schlussbetrachtung

## 7.1 Überprüfung der Hypothese

### 7.1.1 Hypothese

*Die Anwendung von Methoden der Graphentheorie, der Systemmodellierung und der parametrisch-assoziativen Modellierung für die Komplexitätskontrolle unterstützt die Reduzierung von in der Planungskomplexität begründeten Risiken bei Entwurf, Analyse und Konstruktion von Tragwerken.*

### 7.1.2 Vorgehen und Teilfragen

Für die Evaluierung der in dieser Arbeit erläuterten Methoden werden Antworten auf die in Abschnitt 1.5 definierten Fragen (S. 20 bis S. 22) gegeben. Dazu werden diese im Folgenden nochmals, getrennt nach Risikobereichen, aufgeführt und zu ihnen Stellung genommen. Abschließend wird eine Aussage zur Prüfung der Hypothese getroffen.

#### 1. Nichterfüllung der Bauwerksfunktionen

- a. *Können die erforderlichen Interaktionen zwischen Planungsbeteiligten die für die Umsetzung des Tragwerks unter Erfüllung aller geforderten Bauwerksfunktionen notwendig sind durch Verwendung der Konzepte früher aufgedeckt werden?*

Die Gefahr der Nichterfüllung einzelner Bauwerksfunktionen ist dann gegeben, wenn Anforderungen an einzelne Bauelemente durch nicht abgestimmte Parameter nicht befriedigt werden. Um dem entgegenzuwirken sollte eine Funktionsanalyse, wie in Abschnitt 4.6.2 beschrieben, schon zu Beginn der Planung durchgeführt werden. Jeder dieser Funktionen können, wie am realen Beispiel (Abbildung 6.3.10) beschrieben, konkrete Parameter sowie die dafür verantwortlichen Fachplaner zugeordnet werden. Dabei wird deutlich, welche Planer bezüglich welcher Funktion und welcher Parameter kommunizieren (interagieren) müssen. Wie am Beispiel in Abschnitt 6.3 gezeigt wird, kann diese Analyse bereits in einer sehr frühen Planungsphase erfolgen.

#### 2. Nicht ausreichende Planungszeit und Planungsqualität

- a. *Lässt sich der Planungsprozess durch die Verwendung der erarbeiteten Konzepte optimieren und die personellen Ressourcen effizienter einsetzen?*

Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, können durch die Analyse der interstrukturellen Zusammenhänge auf Basis von Sequenzdiagrammen zur Lastverfolgung die Beziehungen der einzelnen Bauelemente in einer Design Structure Matrix abgelegt werden. Die so erzeugte Design Structure Matrix bietet die Möglichkeit der Sequenzierung, sodass die Planungsalgorithmen zur Dimensionierung der einzelnen Tragelemente in eine optimale Reihenfolge gebracht werden können (siehe Abbildung 4.5.10). Durch dieses Vorgehen werden Wartezeiten für notwendige Informationen verringert und Ingenieurkapazitäten zeitlich sinnvoller eingesetzt. Die Qualität der Planung wird dabei nicht negativ beeinflusst.

- b. *Können negative Auswirkungen auf die Qualität des zu erstellenden Bauwerks früher aufgedeckt werden?*

Die Qualität des zu erstellenden Bauwerks lässt sich direkt an die Erfüllung der definierten Anforderungen knüpfen. Durch Durchführung einer wie Abschnitt 4.6.2 beschriebenen Anforderungsanalyse können die zu erfüllenden Funktionen detailliert in frühen Phasen aufgedeckt werden. Werden diese Funktionen wie in der Abbildung 6.3.10 an konkrete Parameter geknüpft, lassen sich wahrscheinliche Auswirkungen auf die Qualität als Änderungen der verknüpften Parameter detektieren.

### 3. Änderungen von Planungsgrundlagen und Planungszielen

- a. *Lassen sich durch eine bessere Komplexitätskontrolle die Auswirkungen von Änderungen der Planungsumgebung schneller und besser abschätzen?*

Auf eine Änderung der in Abbildung 2.1.2 gezeigten Prozessumgebung kann mithilfe der beschriebenen Methoden wie folgt reagiert werden:

- i. Ändern sich einzelne Planungsbeteiligte, kann durch Anwendung von Suchfragen auf das Graphen-Netzwerk (siehe Abbildung 4.4.11) aus den so gewonnenen Graphen (siehe Abbildung 4.4.4) direkt abgelesen werden, für welche Funktionen der neue Planer zuständig ist. Nach weiterer Analyse der Funktions-Parameter-Zuordnungen lässt sich ermitteln, welche Parameter erneut abgestimmt werden müssen.
- ii. Auf Änderungen von Arbeitsmaterialien, wie Planungswerkzeugen, kann durch das frühe Aufstellen von Aktivitätsdiagrammen (wie Abbildung 4.6.6 oder Abbildung 6.4.2) schnell reagiert werden da wesentliche Ein-

und Ausgänge bereits allgemein definiert sind.

- iii. Spätere Anpassungen von Grobabmessungen bilden den Standardersatzfall für parametrisch-assoziative Planungssysteme. Durch die generische Modellierung können die veränderten Eingangsparameter direkt verarbeitet werden.
- iv. Veränderte Planungsgrundlagen wie Normen oder Richtlinien werden sich zu einem großen Teil auf veränderte Lasten oder zulässige Spannungen und Verformungen beziehen. Sowohl die geänderten Lasten als auch die geänderten Grenzwerte lassen sich durch das flexible parametrisch-assoziative Planungssystem direkt ändern und alle notwendigen Neudimensionierungen direkt durchführen.

#### 4. Änderungen der Planungswerkzeuge

- a. *Sind notwendige Änderungen von Planungswerkzeugen durch Methoden der Komplexitätskontrolle schneller in den Planungsprozess implementierbar?*

Ein schnelle Anpassung ist durch eine verbesserte Vorbereitung der Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung möglich.

#### 5. Änderungen von Bauprodukten

- a. *Sind die Auswirkungen von notwendigen Bauproduktänderungen auf die resultierende Umplanung durch Methoden der Komplexitätskontrolle schneller aufdeckbar?*

Materialänderungen werden sich voranging auf die Erfüllung vorab definierter Anforderungen auswirken. Die Erfüllung ist zumeist an spezielle, als Planungsparameter definierbare, Materialcharakteristika gekoppelt. Werden diese nun innerhalb des parametrisch-assoziativen Planungssystems im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse geändert und anschließend durch Analysen der deskriptiven Statistik auf Korrelationen untersucht (siehe Abschnitt 4.8) können die Auswirkungen schnell und effizient direkt abgelesen werden.

### 7.1.3 Verifizierung

Durch Anwendung der in Kapitel 4 erläuterten Methoden zur Komplexitätskontrolle werden in jeder der in Kapitel 3 beschriebenen Ebenen der Komplexität (Gesamtplanungsprozess - Tragwerksplanungsprozess - Planungswerkzeuge) Reduktionen des kognitiven Aufwands beim Erkennen von komplexitätsinduzierten Planungsrisiken



erreicht. Die mögliche Verortung der aufgezeigten Methoden in der Tragwerksplanung und die Anwendbarkeit auf Probleme während der Durchführung der Tragwerksplanung wird in Kapitel 5.1 beschrieben. Eine abschließende Anwendung des Komplexitätsmanagements auf ein reales Projekt weist nach, dass folgende Ergebnisse bezogen auf die einzelnen Komplexitätsebenen erzielt werden:

1. Gesamtplanungsprozess:

Der notwendige Informationsaustausch zwischen den einzelnen beteiligten Planern und Autoritäten wird zu einem großen Teil schon in der Angebotsphase ermittelt und konkret vorbereitet. Planungsrisiken werden durch die koordiniertere Kommunikation früher aufgedeckt. Ebenfalls sinkt das Risiko relevante zu erfüllende Bauwerksfunktionen zu spät in die Planung miteinzubeziehen.

2. Tragwerksplanungsprozess:

Die im realen Beispiel dargestellte Sensitivitätsanalyse erlaubt es, in einem frühen Stadium fundierte Aussagen über die Auswirkungen der Änderung einzelner Parameter für die zu planende Struktur zu treffen. Diese Aussagen unterstützen bei der Wahl der folgenden Entwurfs- bzw. Geometrieadjustierungen. Planungsschritte in nicht erfolversprechender Richtung werden dadurch reduziert und unnötige Planungsschleifen und Rücksprünge vermieden.

3. Planungswerkzeuge:

Durch die Vorbereitung der durchzuführenden Planungsschritte wird die Reihenfolge der einzelnen Planungsschritte optimiert. Dadurch ergibt sich eine zeitliche Straffung des gesamten Planungsprozesses. Die frühzeitige Definition der notwendigen Informationen erlaubt es, Informationslücken bereits vor der Durchführung der Planung aufzudecken und zu beseitigen. Da die einzelnen Planungsschritte zunächst unabhängig von Planungswerkzeugen definiert werden, wird diese erste Definition auch bei einer Änderung von Planungswerkzeugen verwendet. Somit reduziert sich die Zeit, die für die Anpassung der Planungswerkzeuge verwendet werden muss.

Da alle im vorherigen Abschnitt aufgeführten Fragen positiv beantwortet und sowohl die Anwendbarkeit als auch der planungsrisikoreduzierende Einfluss der beschriebenen Methoden nachgewiesen werden können, gilt die Hypothese als bestätigt.

## 7.2 Zusammenfassung

Die Arbeit mit 198 Seiten gliedert sich in sieben Kapitel die inhaltlich aufeinander aufbauen. Angehängt an diese Kapitel finden sich ein Anhang, das Glossar, die Abbildungsnachweise, das Literaturverzeichnis und ein Sachwortindex. Thematisch bilden Kapitel 1 bis 3 mit der Aufbereitung der Aufgabenstellung, Formulierung der Hypothese, dem Aufzeigen von Lösungsansätzen, der Darlegung des Charakters der Tragwerksplanung und ausführlichen Darstellungen der Komplexität in der Tragwerksplanung den theoretischen Unterbau der Arbeit. Kapitel 4 bis 6 beschäftigen sich mit der Entwicklung von Konzepten zur Beantwortung der Aufgabenstellung, der Verortung der Methoden des Komplexitätsmanagements im Tragwerksplanungsprozess sowie der Anwendung der Methoden auf ein reales Planungsprojekt in einer frühen Projektphase. Im Kapitel 7 werden dann der theoretische Unterbau und die Erkenntnisse aus der Entwicklung und Anwendung von Konzepten des Komplexitätsmanagements durch die Verifizierung der eingangs formulierten Hypothese und den finalen Überblick über die Verbindung zwischen den einzelnen Kapiteln zusammengeführt. Die detaillierten Inhalte der einzelnen Kapitel und die Überleitungen zwischen ihnen werden im Folgendem dargelegt:

### Kapitel 1: 40 Seiten

Kapitel 1 beginnt mit einer thematischen Einführung und der Erläuterung der Motivation dieser Arbeit. Als Hauptgründe aktueller komplexitätsinduzierter Probleme in Bezug auf die Tragwerksplanung werden verschiedene Sichtweisen und Anforderungen der einzelnen mit dem Tragwerksplaner interagierenden Planer an die Strukturierung des Bauwerks sowie die Heterogenität der Planungslandschaft genannt. Aktuelle Entwicklungen sowohl in Richtung eines zentralen Koordinationsmodells als auch hinsichtlich der Verknüpfung von einzelnen Fachmodellen werden hinterfragt. Die nach wie vor bestehende Verantwortlichkeit der einzelnen Planer, ihre Rolle als Aufdecker und Beurteiler von Risiken sowie der Einfluss individueller kognitiver Fähigkeiten finden Erwähnung. Durch Ausführungen zu aktuell in der Öffentlichkeit diskutierten Projekten und der Empfehlungen der Arbeitsgruppe des Bundesministeriums für Verkehr und Infrastruktur zur *Komplexitätsbeherrschung bei Großprojekten* wird die Motivation dieser Arbeit weiter untermauert. Zur Verortung der Arbeit innerhalb aktueller Regeln, Richtlinien und Beschreibungen des Planungsprozesses

im Hochbau werden diese genannt und ihr Bezug zur Arbeit kommentiert. Der folgende Teilabschnitt beschäftigt sich mit einer detaillierten Aufbereitung komplexitätsbezogener Probleme der Planungspraxis. Dies geschieht unter Zuhilfenahme verschiedener zur Verfügung stehender Quellen, wie Buchbeiträge, Fachartikel und Umfragen. Aus den einzelnen Quellen werden Auszüge beziehungsweise zentrale Aussagen wiedergegeben und mit Blick auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit besprochen. Um umfangreichere Aussagen zu wiederkehrenden Problemen innerhalb der Tragwerksplanung zu bekommen, werden eigene Projekterfahrungen in konkrete Problemstellungen übersetzt. Aufbauend auf den untersuchten Quellen und aufgeführten Problemstellungen wird im nächsten Teilabschnitt die Forschungslücke definiert, die wiederum in eine Hypothese überführt wird. Nach Nennung von Lösungsansätzen wird der aktuelle Stand der Forschung durch Aufführung themenverwandter Arbeiten und der Beurteilung der Relevanz mit Blick auf die genannten Lösungsansätze aufgezeigt. Ergänzt wird der Stand der Forschung durch eine Aufführung von Normen, Regeln und Richtlinien aus dem Umfeld der Arbeit. Den Abschluss findet das Kapitel durch die Darstellung des folgenden Vorgehens und der Gliederung der Arbeit.

## Kapitel 2: 22 Seiten

Die Bereitstellung vertiefter Betrachtungen über den Charakter der Tragwerksplanung stellt die zentrale Aufgabe des zweiten Kapitels dar. Beginnend mit der Interpretation der Tragwerksplanung als Prozess und der zugehörigen Prozessumgebung werden die Eigenschaften und Anforderungen an den Tragwerksplanungsprozess betrachtet. Hier wird die Tragwerksplanung als iterativer, dynamischer Optimierungsprozess mit zunehmender Konkretisierung interpretiert. Als wichtige Anforderung und definierende Randbedingung wird auch das dezentrale Umfeld herausgearbeitet. Im nächsten Abschnitt stehen die kognitiven Belastungen und Einflüsse auf den Tragwerksplaner im Mittelpunkt. Sowohl die Analyse des Charakters der Tragwerksplanung als auch die Einwirkungen auf den Tragwerksplaner selber bereiten die Untersuchungen zu den konkreten Ebenen und Auswirkung der Planungskomplexität im nächsten Kapitel vor.

## Kapitel 3: 12 Seiten

Nach Aufbereitung der drei definierten Ebenen der Komplexität in der Tragwerksplanung, Gesamtplanungsprozess - Tragwerksplanungsprozess - Planungswerkzeuge, wird eine eigene Definition der Komplexität erarbeitet. Die wesentlichen Komplexitätsmerkmale Konnektivität, Varietät und Dynamik und die Parallelen zu chaotischen Systemen werden besprochen. Diese Komplexitätsmerkmale werden anschließend als konkrete Komplexitätsfaktoren für jede der drei erwähnten Komplexitätsebenen der Tragwerksplanung aufbereitet. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich genauer mit der Korrelation zwischen den Komplexitätsebenen. Dies geschieht als Vorbereitung der Darlegung der Methoden der Komplexitätskontrolle in Kapitel 4 und deren Verortung in Kapitel 5.

## Kapitel 4: 76 Seiten

Auf Grundlage der die Komplexität beeinflussenden Charakteristika des Tragwerksplanungsprozesses Kapitel 2 und der Beschreibung der Komplexitätsfaktoren Kapitel 3 werden nun Konzepte und das konkrete Vorgehen zum Auflösen der in Kapitel 1 definierten Forschungslücke mithilfe einer Beispielstruktur aufgezeigt. Im einzelnen werden Methoden der Graphentheorie, der Netzwerkanalyse und der ForceAtlas2-Algorithmus zur Analyse der Planungsprozesskomplexität verwandt. Diese Methoden werden basierend auf der Grundidee der Zuordnung der Beziehungen zwischen Planer, Bauwerksfunktionen und Tragelementen durchgeführt. Bei den Beziehungen zwischen Planer und Bauwerksfunktionen handelt es sich um Verantwortlichkeiten. Die Bauwerksfunktionen wiederum werden Tragelementen zugeordnet. Erste Rückschlüsse auf kommunikative Lücken und Auswirkungen auf den Planungsprozess auf Grundlage der dargelegten Methoden werden im nächsten Abschnitt besprochen. Zur Analyse des Tragwerks findet zunächst eine Lastverfolgung für verschiedene Lasten über vorab definierte Tragelemente und Verbindungsdetails statt. Hierfür wird der Diagrammtyp Sequence Diagramm der Modellierungssprache SysML aus dem Bereich des Systems Engineerings verwandt. Die so ermittelten Beziehungen zwischen einzelnen Tragelementen werden anschließend mithilfe eines Graphen dargestellt. Die Speicherung der bisher für das Beispielprojekt ermittelten Interaktionen mithilfe der Design Structure Matrix wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Hierbei wird auch auf die matrixbasierte Ermittlung der transitiven Hülle mithilfe des

Warshall Algorithmus eingegangen. Die so ermittelten indirekten Beziehungen werden anschließend visualisiert. Eine Darlegung, wie auf Grundlage der Ermittlung der transitiven Hülle durch Sequenzierung eine Optimierung der Reihenfolge der Planungsalgorithmen erfolgen kann, findet nachfolgend statt.

Der nächste Abschnitt widmet sich dem Umgang mit der Komplexität der Planungswerkzeuge. Ausgangspunkt hierfür ist eine detaillierte Anforderungsanalyse des zu planenden Tragwerks auf Grundlage einer im Requirements Engineering verwendeten Schablone und der Aufbereitung durch ein wiederum dem Systems Engineering entlehnten Requirements Diagramm. Folgend wird ausgehend von dem erzeugten Requirements Diagramm ein parametrisch-assoziatives Planungssystem vorbereitet und aufgebaut. Die Vorbereitung stützt sich auf die Darstellung der notwendigen Planungsalgorithmen mithilfe eines Activity Diagramms inklusive der notwendigen Parameterübergaben. Der Aufbau beginnt mit einer detaillierten Definition der einzelnen Regeln mithilfe eines Block Definition Diagramms. Durch Überführung und Analyse dieses Block Definition Diagramms in eine Design Structure Matrix wird es bereits hier möglich konkrete Aussagen über Parameter und Algorithmeninteraktionen vor Ausführung der Planungsalgorithmen der Tragwerksplanung abzugeben. Durch den Aufbau des parametrisch-assoziativen Planungssystems in einer Programmierumgebung werden gezielte Sensitivitätsanalysen mit dem Fokus auf Auswirkung der Änderungen einzelner Parameter durchgeführt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden mithilfe des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman aus der deskriptiven Statistik ausgewertet und in Diagrammen dargestellt. Ausgehend von den durchgeführten Sensitivitätsanalysen wird eine Aufwandsoptimierung durchgeführt. Dieses Kapitel wird mit der Induktion der entwickelten Methoden abgeschlossen.

Kapitel 5: 12 Seiten

Die mögliche Anwendung der in Kapitel 4 erarbeiteten Methoden im Tragwerksplanungsprozess wird in diesem Kapitel besprochen. Die in Abschnitt 1.3.5 aufgeführten Problemstellungen und Problemkomplexe werden hierfür in der Tragwerksplanung verortet und ihnen mögliche Lösungsansätze zugeordnet.

## Kapitel 6: 24 Seiten

Am Beispiel eines sich in einer frühen Phase befindlichen Projekts der Tragwerksplanung werden in diesem Kapitel in Kapitel 4 aufgezeigte Methoden des Komplexitätsmanagements angewandt. Nach einer Projektbeschreibung werden die in Kapitel 3 definierten Komplexitätsebenen auf Interaktionen zwischen Projektbeteiligten und Tragelementen durchsucht. Die strukturierte Vorbereitung und der Aufbau eines parametrisch-assoziativen Planungssystems werden durchgeführt. Ausgehend von dem Planungssystem werden einzelne Sensitivitätsanalysen durchgeführt und die gewonnenen Erkenntnisse ausgewertet.

## Kapitel 7: 12 Seiten

Das dreigeteilte Kapitel beginnt mit der Auswertung der in Kapitel 1 formulierten Hypothese. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Kapitel 4 bis Kapitel 6. Im zweiten Teil werden die durchgeführten Betrachtungen, erarbeiteten Methoden sowie die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Im letzten Abschnitt werden sich aus der Arbeit ergebende offene Fragestellungen und Perspektiven auf Weiterentwicklungen und weiterführende Forschungsarbeiten besprochen.

### 7.3 Weiterführende Fragestellungen

In allen Kapiteln der Arbeit finden sich Ansätze zu weiterführenden Fragestellungen sowie Perspektiven für weitere Forschungsarbeiten. Die während der Bearbeitung aufgetretenen Fragen lauten wie folgt:

1. In welcher Art und Weise können Methoden des Komplexitätsmanagements und die erarbeiteten Charakteristika besser in Normen und Richtlinien wie der HOAI integriert werden?
2. Wie lassen sich Erkenntnisse über die kognitive Belastung und Einflüsse auf den Tragwerksplaner in die Ausbildung von Ingenieuren und Architekten integrieren, um diese besser auf die Berufspraxis vorzubereiten?
3. Lassen sich durch den Vergleich der Anzahl von Knoten und Ecken in einer

Graphendarstellung der Planer-Funktions-Tragelement-Interaktionen bzw. deren Überführung in eine Design Structure Matrix Analogien zwischen zwei verschiedenen Projekten erkennen?

4. Wie lassen sich durch nachträgliche Analysen des Informationsaustauschs durchgeführter Projekte Rückschlüsse auf den zu erwarteten Informationsaustausch eines vergleichbaren aktuellen Projekts ziehen?
5. Welche Möglichkeiten bestehen Interaktionsdarstellungen, wie Graphen und Design Structure Matrizen, in eine BIM-Umgebung einzubinden bzw. diese aus einer BIM-Umgebung projektbegleitend abzuleiten?
6. Wie können Planungsdokumente, wie Pläne, statische Berechnung, Materialbescheinigungen, an konkrete Charakteristika von Tragelementen (Parameter) angebunden werden, dass bei Änderung von Parametern ein Revisionsbedarf automatisiert detektiert werden kann? Wie lässt sich dieses Vorgehen in eine BIM-Umgebung oder ein aktuelles cloud-basiertes Dokumentenverwaltungssystem integrieren?
7. Durch welchen Workflow lassen sich die von einzelnen Planern erstellten Design Structure Matrizen für Tragelementparameter optimal zusammen führen?
8. Welche Aussagen lassen sich durch die Analyse der Besetzungsstruktur von Design Structure Matrizen mit der Darstellung aller Tragelementinteraktionen auf die Komplexität des Tragverhaltens ableiten?
9. Wie lässt sich die Methode der Sequenzierung in Programme zur Projektsteuerung integrieren und wie kann daraus wiederum eine Anbindung an die BIM-Umgebung geschaffen werden?
10. Wie lassen sich Programme zur Softwaremodellierung besser an die Anforderungen des Tragwerksplanungsprozesses anpassen? Wie können die notwendigen Activity-, Block Definition-, Sequence- und Requirements Diagramme schneller erstellt werden?
11. Wie lassen sich Sensitivitätsanalysen innerhalb parametrisch-assoziativer Planungssysteme und FEM-Umgebungen und deren Auswertungen schneller durchführen? Gibt es präzisere Hilfsmittel als den Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman um Rückschlüsse auf Korrelationen zwischen Parametern aufzudecken und konkrete Aussagen über Zusammenhänge zu treffen?

12. Welche Problemstellungen treten bei der realen Integration der Werkstattplanung in ein parametrisch-assoziatives Planungssystem auf? Wie könnte der Workflow für ein solches Vorgehen aussehen? Wie wird dabei mit den Brüchen zwischen verschiedenen Softwareumgebungen im Detail umgegangen?
13. Wie lassen sich mit Hilfe eines aus verschiedenen Softwareumgebungen (wie eigenständige Werkzeuge für den generischen Geometrieaufbau, FEM und Werkstattplanung) aufgebauten parametrisch-assoziativen Planungssystems softwareübergreifende Sensitivitätsanalysen und Tragwerksoptimierungen mit Hilfe von evolutionären Algorithmen durchführen?

Die Beantwortung dieser Fragen kann das in dieser Arbeit gesteckte Ziel der Vermeidung und Reduktion von Planungsrücksprüngen, Planungsschleifen und letztendlich Planungsrisiken weiter vorantreiben. Der als Ursache von Planungsrisiken identifizierten fehlenden rechtzeitigen Verfügbarkeit von Kenntnissen über Interaktionen zwischen Planern und den Tragwerksbestandteilen bis auf die Ebene der Planungsdokumente kann durch die Weiterverfolgung der genannten Fragestellungen umfangreich entgegengetreten werden.



# Genutzte Software

## *Texterstellung und Layout*

- MiKTeX 2.9 (<https://miktex.org/>)
- TeXstudio (<http://www.texstudio.org/>)
- TechnixCenter (<http://www.techniccenter.org/>)
- Adobe Illustrator (<http://www.adobe.com/products/illustrator.html>)
- Adobe Photoshop (<http://www.adobe.com/products/photoshop.html>)
- OpenOffice (<http://www.openoffice.org/de/>)

## *CAD und Rendering*

- Rhinoceros 3D (<https://www.rhino3d.com/>)
- Grasshoper 3D plus diverse PlugIns (<http://www.grasshopper3d.com/>)
- Flamingo nXt (<http://www.flamingo3d.com/de/>)

## *Netzwerkanalyse und Darstellung*

- Gephi (<https://gephi.org/>)
- Matlab (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>)

## *Finite Element Analyse*

- Strand7 (<http://www.strand7.com/>)



# Glossar

## **Bauwerk**

Bauwerk ist ein Teil der gebauten Umwelt mit relativer Selbstständigkeit seiner Funktion und Erscheinungsform. (Büttner und Hampe 1977, S.10)

## **Bauwerksmodell**

Das Building Information Model ist das Bauwerksmodell, welches während des Planungsprozesses in zumeist dreidimensionalen, bauteilorientierten Softwaresystemen (BIM-fähige Software) erstellt wird. Dabei ist bei dem Begriff Bauwerksmodell nicht von einem monolithischen Gesamtmodell auszugehen, sondern von der Koordination der Modelle der einzelnen beteiligten Fachplaner (Architekturmodell, Tragwerksmodell, TGA-Modell, etc.). Diese Modelle werden fachspezifische Bauwerksmodelle, kurz Fachmodelle, genannt. (Egger et al. 2014, S.87)

## **BIM-Building Information Modeling**

Bauwerksinformationsmodellierung

Arbeitsweise, bei der das räumliche Bauteilgefüge in einem digitalen Bauwerksinformationsmodell erfasst wird, wobei die Räume und Bauteile der baulichen und technischen Anlagen durch ihre charakteristischen Eigenschaften und durch ihre Beziehungen untereinander beschrieben werden. Anmerkung 1 zum Begriff: BIM dient der Strukturierung, der Visualisierung, der Ableitung sowie dem Austausch von Gebäude-, Bauteil- und Anlageninformationen. (Deutsches Institut für Normung 2015a, S.6)

## **Graphentheorie**

Graphen sind mathematische Modelle für netzartige Strukturen in Natur und Technik. Dazu zählen Straßennetze, Computernetze, elektrische

Schaltungen, Programmablaufpläne, Wasser- und Gasleitungsnetze, chemische Moleküle oder wirtschaftliche Verflechtungsbeziehungen. Allen diesen Netzen ist eine Grundeigenschaft gemeinsam. Sie bestehen stets aus zwei verschiedenartigen Mengen von Objekten. Die Objekte der ersten Art sind zum Beispiel Orte im Straßennetz oder Computer. Sie werden durch Objekte der zweiten Art verbunden. Das sind zum Beispiel Straßen oder Übertragungsleitungen. In der Sprache der Graphentheorie werden wir diese Objekte als Knoten und Kanten eines Graphen bezeichnen. (Tittmann 2011, S.11)

## **Interaktion**

### *Soziale Interaktion*

Unter einer Interaktion kann zunächst die Einwirkung verschiedener Personen aufeinander verstanden werden, ohne dass dieser Einwirkung notwendiger Weise eine diesbezügliche Absicht, ein Plan oder auch nur das Wissen der Betroffenen darüber unterstellt werden muss. (Schuler 2004, S.57)

### *Interaktion in der Beschreibung von Systemen*

Die Interaktion von Objekten ist geprägt vom Nachrichtenaustausch zwischen den beteiligten Objekten, welcher durch Methodenaufrufe realisiert wird. (Podolsky 2000, S.179)

## **Kognitive Funktionen**

Unter kognitiven Funktionen versteht man bewusste und unbewusste Vorgänge, die bei der Verarbeitung externer und interner Informationen ablaufen. Erkennen, Vorstellen, Denken, Gedächtnis, Handlungsplanung und Kommunikation. In ihrer Gesamtheit umfassen diese Leistungen:

- integrative, multisensorische und erfahrungsgeleitete Wahrnehmungsprozesse;
- Vorgänge, die sowohl das Erkennen als auch die kontextgerechte Wertung von Objekten, Personen sowie Ereignissen umfassen;
- Prozesse, die sich bewusst oder unbewusst auf der Grundlage interner Repräsentationen (Modellvorstellungen, Hypothesen etc.) vollziehen;

- Prozesse die Aufmerksamkeit, Erwartungshaltungen und aktives Erkunden der Reizsituation voraussetzen sowie
- „mentale Aktivitäten“ wie Gedächtnis und Denken.

(Volz 2000, S.9)

### **Kognitive Fähigkeiten**

Kognitive Fähigkeiten sind die Fähigkeiten, die mit der zentralen Informationsverarbeitung verbunden sind, wie z. B. Abrufen aus dem Gedächtnis, Lenken der Aufmerksamkeit, Wahrnehmung über sensorische Informationen, Denken, Treffen von Entscheidungen, Lösen von Problemen und Sprache. Kognition bezieht sich auf die geistigen Aktivitäten beim Erfassen und Verarbeiten von Informationen. Mit dem Alter kann eine allgemeine Abnahme der kognitiven Leistungen beobachtet werden. (Deutsches Institut für Normung 2014a, S.152)

### **Modell**

Abbild oder Nachbildung eines Originals, wobei das Modell nicht alle Eigenschaften des Originals aufweist (würde es alle Eigenschaften aufweisen, wäre es ein Klon). Modelle sind abstrakte, materielle oder immaterielle Gebilde, die geschaffen werden, um für einen bestimmten Zweck (Modellzweck) ein Original zu repräsentieren. Das Original kann dabei selbst ein Modell sein. (Vajna et al. 2009, S.505)

### **Partialmodell**

Im Verlauf eines Bauprojektes erstellen die Projektteilnehmer eine Vielzahl von Fachmodellen, um das Bauwerk, seine Erstellung und seine Nutzung zu planen und zu dokumentieren. Jedes dieser Fachmodelle stellt einen Teil des Bauwerks und seines Lebenszyklus dar und wird entsprechend auch als Teilmodell bezeichnet.

Zur Verwaltung können Teilmodelle hinsichtlich verschiedener Aspekte klassifiziert werden. Wichtige Klassifikationsdimensionen stellen insbesondere die Dömänen, Zonen, Detaillierungen und Phasen dar. (Willenbacher 2002, S.53)

### **Produktentwicklung**

Die *(Neu-)Produktentwicklung* (bzw. der Produktinnovationsprozess) hat die Aufgabe, ein konkretes Produkt auf Basis von Wissen und Fähigkeiten auf technologischem und Markt- bzw. kundenbezogenem Gebiet hervorzubringen. Ergebnis der Produktentwicklung ist die Einführung eines neuen Produktes in den Markt, welches als *Produktinnovation* bzw. *Neuprodukt* bezeichnet wird, die aus der Sicht des Unternehmens eine Neuerung darstellen. Im Laufe der Produktentwicklung werden Unsicherheiten, insbesondere in den Bereichen Technik und Markt, reduziert. Dies geschieht in der Regel in der Form von *(Innovations-)projekten*. (Verworn 2005, S.13)

### Requirements Engineering

Die Bezeichnung *Requirements-Engineering* hat zwei, wenn auch verwandte, so doch wohl zu unterscheidende Bedeutungsvarianten. Das Wort steht einmal für alle konkreten Aktivitäten am Beginn einer Systementwicklung, die auf eine Präzisierung der Problemstellung abzielen. Ebenso steht es aber auch für eine ganze Teildisziplin im Grenzbereich zwischen Informatik und Anwendungswissenschaften. (Partsch 1998, S.20)

### System

Ein System besteht aus einer Menge von Systemelementen und deren Beziehungen untereinander (gegenseitige Beeinflussung). Das System wird durch eine Systemgrenze (Hüllfläche) von der Umgebung (vom Umgebungssystem) abgegrenzt oder abgegrenzt betrachtet. Ein *offenes System* besitzt zusätzliche Beziehungen mit der Umgebung durch Eingänge und Ausgänge, welche die Systemgrenze durchdringen. Durch gezielte Auswahl (Betrachtung) der Menge und Eigenschaften der Systemelemente und Beziehungen sowie durch entsprechende Festlegung der Systemgrenze entsteht ein abgegrenztes, geordnetes Ganzes, das einem bestimmten Zweck dient. Diese Definition erlaubt auch die Interpretation, dass ein (mathematisches) Modell eines Originals wiederum als System aufgefasst werden kann.

Elemente und System sind relative Begriffe: Die Systemelemente können selbst wiederum als Systeme betrachtet werden, die aus Elementen und Beziehungen bestehen. Ein System kann andererseits Element eines übergeordneten Systems sein. (Vajna et al. 2009, S.514)

## Systems Engineering

Systems Engineering (SE) beinhaltet eine Reihe von Tätigkeiten, die auf Grundlage der wahrgenommenen betrieblichen Erfordernisse und mithilfe eines strukturierten Ansatzes darauf ausgerichtet sind:

- dieses Erfordernis in Fachsprache zu beschreiben;
- dieses Erfordernis schrittweise in eine Systemlösung zu überführen;
- auf jeder Stufe zu zeigen, dass dieses System den Erfordernissen entspricht.

Systems Engineering:

- berücksichtigt das System als Ganzes und in sämtlichen Zuständen seines Lebenszyklus;
- stellt ein Gerüst bereit, um unterschiedliche technische Aufgabenbereiche (Elektronik, Datenverarbeitung, Mechanik, Ergonomie usw.) und einige Unternehmensfunktionen (Konstruktion, Herstellung, Logistik, Prüfungen usw.) zu verbinden, ohne notwendigerweise in diese Aufgabenbereiche und Funktionen einzugreifen;
- ist auf die umfassende Optimierung der Lösung innerhalb eines Bereichs ausgerichtet, der Vorgaben unterliegt (Kosten, Zeitplan, Leistung, Strategie usw.), die durch das Programm-Management erstellt wurden;
- stellt die Abstimmung zwischen sämtlichen Komponenten der Lösung (funktionale und physische Schnittstellen) sicher.

(Deutsches Institut für Normung 2015b, S.5)

## Systemtheorie

Die Allgemeine Systemtheorie beschreibt die drei Aspekte von Systemen. Das sind der funktionale, der strukturelle und der hierarchische Systemaspekt. Beim funktionalen Aspekt geht es um den Blick von aussen auf das System, also den Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen des Systems. Die inneren Zusammenhänge des Systems werden dabei nicht betrachtet.

Beim strukturalen Aspekt geht es um die Betrachtung des Systems als Gesamtheit mit einander in Beziehung stehender Teilelemente und der daraus resultierenden Systemeigenschaften. Der hierarchische Aspekt beinhaltet die Tatsache, dass Teile eines Systems für sich selber auch als System verstanden werden können. Es entsteht also eine Hierarchie von Teil-

oder Subsystemen bis hin zum Supersystem. Die Konzentration auf die Subsysteme ermöglicht eine detailliertere Erklärung des Systems, wohin gegen die Fokussierung auf das Supersystem Erkenntnisse über dessen Bedeutung im größeren Umfeld des Systems zulässt. Es lassen sich somit Details als auch übergeordnete Zusammenhänge analysieren.

Die drei Aspekte lassen sich gut mit einander verknüpfen. Beginnend mit der Beschreibung oder Analyse der funktionellen Anforderungen wird nachfolgend der innere Aufbau des Systems untersucht der die Funktionen bereitstellt um abschließend die Integration des Systems in sein Umfeld zu beurteilen. (Ropohl 2009, vgl. S.75 ff.)

### **Tragelement**

Bekanntlich interpretieren wir die Welt, in welcher wir leben, geometrisch als dreidimensional, präziser: als dreidimensionalen *Euklidischen Raum* E3. (...) Alle Körper werden in der Mechanik als materielle Teilräume des E3 definiert, wobei erst die Materialfüllung sie zu Trägern physikalischer Größen erhebt. Daher sind auch alle Tragelemente, aus denen Tragwerke zusammengesetzt sind, dreidimensionale Strukturen. (...) Viele Tragelemente füllen Teilräume des E3 aus, welche näherungsweise flächenhaft (zweidimensional) oder sogar linienhaft (eindimensional) gestaltet sind, je nach Dominanz zweier Abmessung oder einer. (Krätzig et al. 1999, S.2 f.)

### **Tragstruktur**

Tragstruktur ist ein unter dem Aspekt der Tragfunktion abstrahiertes Modell des Tragwerks. (Büttner und Hampe 1977, S.10)

### **Tragsystem**

Tragsystem ist die aus dem Tragwerk, seiner Umwelt und seiner Funktion gebildete Einheit von Tragwerkselementen, Tragwerkskopplungen und der innerhalb des Tragwerkes und der Umwelt vorhandenen Wechselwirkungen zur Realisierung der Tragfunktion. (Büttner und Hampe 1977, S.10)

### **Tragverhalten**

Tragverhalten ist der konkrete Ausdruck der Tragqualität einer Tragstruktur für vorgegebene Kräfte und andere Wirkungen. (Büttner und Hampe 1977, S. 11)



## Tragwerk

Tragwerk ist der Teil des Bauwerkes, der die zur Sicherung der Bauwerksfunktion erforderliche Tragfunktion übernimmt. (Büttner und Hampe 1977, S.10)

## Transitive Hülle

Interpretiert man die binäre Erreichbarkeitsmatrix  $\mathbf{E}$  eines Graphen  $G$  als Adjazenzmatrix, so steht diese für einen als transitive Hülle bezeichneten Graphen, der die selben Knoten hat wie der ursprüngliche Graph  $G$ , aber eventuell zusätzliche Kanten. Die zusätzlichen Kanten ergänzen den ursprünglichen Graphen zu einem Graphen, bei dem jeder Knoten, der von einem anderen Knoten erreichbar ist, nun durch eine Kante mit diesem direkt verbunden ist. Ein Graph  $G$  ist genau dann stark zusammenhängend, wenn seine transitive Hülle vollständig ist.  $\mathbf{E}$  enthält dann keine 0, dementsprechend ist jeder Knoten von  $G$  von jedem anderen aus erreichbar. (Ernst et al. 2015, S.566)

## Volumenmodell

*Volumenmodelle* sind in der Lage, Volumen vollständig zu beschreiben und im Zusammenhang mit einer Materialkennung auch Körper eindeutig zu definieren. Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Volumenmodellen:

- Körperorientiertes Volumenmodell, CSG-Modell (Constructive Solid Geometry) genannt und
- flächenorientiertes Volumenmodell, auch als B-Rep-Modell (Boundary Representation) bezeichnet.

Beim *körperorientierten Volumenmodell* (CSG-Modell) wird das Objekt aus einzelnen, einfachen Grundkörpern (Quader, Zylinder, Kegel, Torus usw.) zusammengesetzt und dann mengentheoretisch zu einem komplexeren Gebilde verknüpft. Die angewandte Verknüpfungsvorschrift (Boolescher Baum) ist unverzichtbarer Bestandteil der Datenstruktur.(...)

Das *flächenorientierte Volumenmodell* (B.Rep-Modell) geht von Flächen aus, die mit Hilfe von Punkten und Kanten definiert werden und in ihrer Verknüpfung als umschließende Grenzflächen das Volumen des Objekts beschreiben. Eine Materialkennung in Form eines senkrecht auf

ihnen stehenden Vektors lässt auch den Raum erkennen, der mit Material gefüllt sein soll, wodurch sich der entscheidende Unterschied zum „Closed Volume“ des Flächenmodells ergibt. (Pahl et al. 2003, S.81 f.)

### Warshall-Algorithmus

Warshall-Algorithmus zum Auffinden kürzester Wege in einem Graphen  
 Nummeriere die Knoten des Graphen von 1 bis n durch und trage die Längen der Wege von Knoten i zu Knoten j in eine Erreichbarkeitsmatrix  $e_{ij}$  ein. Existiert kein solcher direkter Weg, trage „unendlich“ ein.

WIEDERHOLE für k=1 bis n

WIEDERHOLE für i=1 bis n

WIEDERHOLE für j=1 bis n

WENN  $(e_{ik} + e_{kj}) < e_{ij}$

DANN Setze  $e_{ij} = e_{ik} + e_{kj}$

Ersetze die zu  $e_{ij}$  gehörende Knotenliste durch die Knotenliste, die durch Verbinden der zu  $e_{ik}$  und zu  $e_{kj}$  gehörenden Knotenlisten entsteht.

ENDE

Aus der Formulierung des Washall-Algorithmus geht hervor, dass die Erreichbarkeitsmatrix in drei ineinandergeschachtelten Schleifen berechnet wird, so dass bei n Knoten  $n^3$  Operationen erforderlich sind. Die Komplexität ist damit nur von der Ordnung  $O(n^3)$ . (Ernst 2000, S.633)

# Abbildungsnachweise

1.1.1	Elbphilharmonie Hamburg 2014, Quelle: René Wolf . . . . .	2
1.1.2	Dezentrale Planung und zentrale Koordination von Informationen: aus Egger (Egger et al., 2014) . . . . .	3
1.1.3	Flughafen Berlin Brandenburg „Willy Brandt“ 2013 Quelle; alliance//dpa . . . . .	7
1.8.1	Darstellung des Ablaufplans einer Bauplanung und Ausführung mit zugehöriger Einordnung der Leistungsphasen nach HOAI und der Zuordnung der Zuständigkeiten der am Bau Beteiligten; nach De- ckelmann und Franke (2002) . . . . .	33
1.8.2	Teilphasen und Teilphasenziele nach (SIA, 2014) . . . . .	34
1.8.3	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach (Verein Deutscher Ingenieure, 1993) . . . . .	35
1.8.4	Prüflistenunterteilungen der DIN 18205; Eigene Darstellung nach (Deutsches Institut für Normung, 1996) . . . . .	36
1.9.1	Überblick ausgewählte Verbindungen zwischen den Kapiteln der Ar- beit; Eigene Darstellung . . . . .	39
2.1.1	Prozess als Turtle Diagramm; Eigene Darstellung in Anlehnung an Hinsch (Hinsch, 2014) . . . . .	43
2.1.2	Tragwerksplanung als Turtle Diagramm; Eigene Darstellung . . . . .	43

2.2.1	Philosophy of Design nach (Asimow, 1962) . . . . .	49
2.2.2	Ikonisches Modell des Entwurfsprozesses; Eigene Darstellung in Anlehnung an Rowe (Rowe, 1987) . . . . .	50
2.2.3	Zyklischer Durchlauf und bidirektionale Beziehungen der Planungsmodelle; Eigene Darstellung . . . . .	53
2.3.1	Typisches Verhalten von Menschen in komplexen Situationen; Eigene Darstellung in Anlehnung an Dörner (Dörner, 1997) . . . . .	59
2.3.2	Faktoren die den kognitiven Aufwand beeinflussen nach Longo (Longo und Barrett, 2010) . . . . .	60
3.2.1	Komplexität (Merkmale der Systemstruktur) nach Patzak (Patzak, 1982) . . . . .	65
3.5.1	Allgemeine Komplexitätsfaktoren von Systemen; Eigene Darstellung	71
3.5.2	Komplexitätsfaktoren des Gesamtplanungsprozesses; Eigene Darstellung . . . . .	71
3.5.3	Komplexitätsfaktoren des Tragwerksplanungsprozesses; Eigene Darstellung . . . . .	72
3.5.4	Komplexitätsfaktoren der Planungswerkzeuge; Eigene Darstellung .	72
3.6.1	Korrelationen der Komplexitätsfaktoren; Eigene Darstellung . . . .	74
4.2.1	Core House, Mies van der Rohe (Chicago History Museum Research Center, 2016a) . . . . .	80
4.2.2	Core House Variante, Mies van der Rohe (Chicago History Museum Research Center, 2016b) . . . . .	80
4.2.3	Nationalgalerie Berlin, Mies van der Rohe (Wikipedia, 2016) . . . .	81

4.4.1	Beispielhafte Verortung des Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerks im Zusammenhang mit den Hauptfunktionen und der Nutzung eines Bauwerks; Eigene Darstellung . . . . .	86
4.4.2	Zuordnung der Verantwortlichkeiten zu Projektbeteiligten; Eigene Darstellung . . . . .	88
4.4.3	Einzelzuordnung Verantwortlichkeit Sicht-, Blend- und Sonnenschutz zum Architekten; Eigene Darstellung . . . . .	89
4.4.4	Verantwortlichkeiten des Tragwerksplaners; Eigene Darstellung . . .	89
4.4.5	Grobstrukturierung des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe; Eigene Darstellung . . . . .	90
4.4.6	Schwerachsen der Haupttragelemente am Beispiel des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe; Eigene Darstellung . . . . .	91
4.4.7	Positionen des 50 x 50 Gebäudes von Mies van der Rohe; Eigene Darstellung . . . . .	91
4.4.8	Zuordnung Funktionen-Tragelemente; Eigene Darstellung . . . . .	92
4.4.9	Zuordnung Funktionsbeziehung Pos. T02 Boden; Eigene Darstellung	93
4.4.10	Zuordnung Funktionsbeziehungen Sicht- Blend- Sonnenschutz; Eigene Darstellung . . . . .	93
4.4.11	Überblick Zusammenhänge Planungsbeteiligte-Bauwerksfunktionen-Tragwerksstruktur; Eigene Darstellung . . . . .	94
4.4.12	Verantwortlichkeiten Tragwerksplaner; Eigene Darstellung . . . . .	95
4.4.13	Verantwortlichkeiten der Planer für die Fassadenelemente; Eigene Darstellung . . . . .	97
4.5.1	Überblick Diagrammtypen SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008) . . . . .	101
4.5.2	sequence diagram SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)	101

4.5.3	Sequence Diagramm Lastverfolgung Wind, Schnee und Verkehrslast; Eigene Darstellung . . . . .	102
4.5.4	Verantwortlichkeiten der Planer und integrierte benachbarte Bauelemente und Verbindungsdetails; Eigene Darstellung . . . . .	103
4.5.5	Verbindungsdetails und Bauelemente der Pos. T03 Fassade; Eigene Darstellung . . . . .	103
4.5.6	Direkte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerk in Matrizendarstellung; Eigene Darstellung	106
4.5.7	Direkte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerk als Graph; Eigene Darstellung . . . . .	107
4.5.8	Direkte und indirekte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks in Matrizendarstellung; Eigene Darstellung . . . . .	107
4.5.9	Direkte und indirekte Abhängigkeiten der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks als Graph; Eigene Darstellung . . . . .	108
4.5.10	Sequenzierung und Teambildung der Haupttragelemente und Verbindungsdetails des 50 x 50 Tragwerks; Eigene Darstellung . . . . .	110
4.6.1	Funktionsschablone; Eigene Darstellung nach Rupp (Rupp, 2009) .	113
4.6.2	Requirement Diagram SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008) . . . . .	113
4.6.3	Anforderungen an Tragwerke als Requirement Diagram (SysML); Eigene Darstellung . . . . .	114
4.6.4	Zuordnung der Anforderungen an Tragelemente und Verbindungsdetails; Eigene Darstellung . . . . .	117
4.6.5	Activity Diagramm SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008)	118

4.6.6	Gesamtdarstellung der notwendigen Dimensionierungen für Lastfall Wind auf Fassade; Eigene Darstellung . . . . .	119
4.6.7	Ausschnitt Darstellung 4.6.6; Eigene Darstellung . . . . .	120
4.6.8	Ausschnitt Darstellung 4.6.6; Eigene Darstellung . . . . .	120
4.7.1	Block Definition Diagramm SysML nach Friedenthal (Friedenthal et al., 2008) . . . . .	125
4.7.2	Block Definition Diagramm für die Darstellung von Constraint Blocks und Properties; Eigene Darstellung . . . . .	126
4.7.3	Block Definition Diagramm für die Darstellung von Constraint Blocks und Properties mit Informationsfluss; Eigene Darstellung . .	127
4.7.4	Matrix der direkten Abhängigkeiten; Eigene Darstellung . . . . .	128
4.7.5	Graph-Darstellung der direkten Beziehungen Dimensionierung T03; Eigene Darstellung . . . . .	129
4.7.6	Graph-Darstellung der direkten und indirekten Beziehungen Dimensionierung T03; Eigene Darstellung . . . . .	129
4.7.7	Matrix der direkten und indirekten Abhängigkeiten; Eigene Darstellung . . . . .	130
4.7.8	Gesamtablauf und Dokumentation der Matlab-Programmierung Teil I; Eigene Darstellung . . . . .	133
4.7.9	Gesamtablauf und Dokumentation der Matlab-Programmierung Teil II; Eigene Darstellung . . . . .	134
4.7.10	Unterroutine zur Dimensionierung der Glasscheibe nach Marcus (Marcus, 1929); Eigene Darstellung . . . . .	135
4.8.1	Korrelationskoeffizient in einer Matrix; Eigene Darstellung . . . . .	137
4.8.2	Ermittlung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman; Eigene Darstellung . . . . .	138

4.8.3	Diagrammdarstellungen der Parameterzusammenhänge; Eigene Darstellung . . . . .	139
4.9.1	Graph-Darstellung der direkten Beziehungen Dimensionierung T03; Eigene Darstellung . . . . .	140
4.9.2	Darstellung von Varianten der Fassendunterteilung; Eigene Darstellung	141
6.2.1	Projekt Ocean Park - Entwurf; Aedas Limited Hong Kong . . . . .	164
6.2.2	Projekt Ocean Park - Teilstrukturen; Aedas Limited Hong Kong . .	165
6.3.1	Projekt Ocean Park Ausschnitt - Tragelemente; Eigene Darstellung	166
6.3.2	Projekt Ocean Park - zu erfüllende Funktionen; Eigene Darstellung	167
6.3.3	Projekt Ocean Park - Zuordnung der Projektbeteiligten zu Funktionen; Eigene Darstellung . . . . .	167
6.3.4	Projekt Ocean Park - Zuordnung Funktion zu Tragelementen; Eigene Darstellung . . . . .	168
6.3.5	Projekt Ocean Park - Lastabtrag; Eigene Darstellung . . . . .	168
6.3.6	Projekt Ocean Park - Funktionen und Planer ETFE-Kissen; Eigene Darstellung . . . . .	169
6.3.7	Projekt Ocean Park - Funktionen und Planer ETFE-Kissen gewichtet, Eigene Darstellung . . . . .	169
6.3.8	Projekt Ocean Park - ETFE-Kissen Gewichtung des Tertiärtragwerks; Eigene Darstellung . . . . .	170
6.3.9	Projekt Ocean Park - ETFE-Kissen abzustimmende Funktionen; Eigene Darstellung . . . . .	171
6.3.10	Projekt Ocean Park - Auszug DSM Planungsbeteiligte-relevante Parameter; Eigene Darstellung . . . . .	172



6.3.11	Projekt Ocean Park - Auszug DSM Planungsbeteiligte-relevante Parameter; Eigene Darstellung . . . . .	173
6.4.1	Projekt Ocean Park - Strukturen <i>inverted roof</i> ; Eigene Darstellung	175
6.4.2	Vorbereitung generatives Modell für Strukturtyp <i>inverted roof</i> ; Eigene Darstellung . . . . .	176
6.4.3	Vorbereitung generatives Modell für Strukturtyp <i>inverted roof</i> ; Eigene Darstellung . . . . .	178
6.5.1	Neun variierende Tragwerksgeometrien; Eigene Darstellung . . . . .	179
6.5.2	Elemente statisches Modell; Eigene Darstellung . . . . .	180
6.5.3	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Teil I; Eigene Darstellung . . . . .	181
6.5.4	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Teil II; Eigene Darstellung . . . . .	182
6.5.5	Auswertung Sensitivitätsanalyse in tabellarischer Form; Eigene Darstellung . . . . .	183



# Literaturverzeichnis

- Abulawi, J. (2012). *Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3D-CAD-Modellen*. Helmut-Schmidt-Universität, Bibliothek, Hamburg.
- Akintola, Y., Senthilkumar, V., und Root, D. S. (2015). Identification of Process, Team and Tool Dependencies in Building Information Modelling (BIM) Implementation using Multi-Domain Mapping (MDM) – A Theoretical Framework. In Browning, T. R., editor, *Modeling and managing complex systems*, pages 65–74. Hanser, München.
- Albrecht, M. (2014). *Building Information Modeling (BIM) in der Planung von Bauleistungen*. disserta Verlag, Hamburg.
- Alt, O. (2012). *Modell-basierte Systementwicklung mit SysML: In der Praxis*. Hanser, Carl, München.
- Altenbach, H. (2012). *Kontinuumsmechanik: Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. Springer, Berlin, 2. Aufl. edition.
- Argyris, J. H., Faust, G., und Haase, M. (1995). *Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. Vieweg, Berlin Heidelberg.
- Asimow, M. (1962). *Introduction to design*. Prentice-Hall series in engineering design. Prentice-Hall, Engelwoods Cliffs, USA.
- Beer, C. d. (2008). *Untersuchung der Dynamik von selbststeuernden Prozessen in produktionslogistischen Systemen anhand ereignisdiskreter Simulationsmodelle*, volume Bd. 9 of *Schriftenreihe: Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik*. Gito, Berlin.

- Benker, H. (2003). *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen: Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXCEL*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BIM Forum (2017). Level of Development Specification Version: 2017 Part I. <http://bimforum.org/wp-content/uploads/2017/11/L0D-Spec-2017-Part-I-2017-11-07-1.pdf>. geprüft am 18.02.2018.
- Block, P., Gengnagel, C., und Peters, S. (2013). *Faustformel Tragwerksentwurf*. Dt. Verl.-Anst, München, 1. Aufl. edition.
- Boehm, B. (1986). A spiral model of software development and enhancement. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 11(4): pages 22–42.
- Borrmann, A., Fischer, O., Dori, G., und Wild, M. (2014). *Intelligente Brücke - Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse*, volume Heft B 104 of *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen - Brücken- und Ingenieurbau (B)*. Fachverlag NW, Bremen.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., und Beetz, J., editors (2015). *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Both, P. v. (2006). *Ein systemisches Projektmodell für eine kooperative Planung komplexer Unikate*. Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe.
- Both, P. v., Koch, V., und Kindsvater, A. (2013). *BIM - Potentiale, Hemmnisse und Handlungsplan: Analyse der Potentiale und Hemmnisse bei der Umsetzung der integrierten Planungsmethodik Building Information Modeling - BIM - in der deutschen Baubranche und Ableitung eines Handlungsplanes zur Verbesserung der Wettbewerbssituation*, volume F 2844 of *Forschungsinitiative ZukunftBau*. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart.
- Brath, R. und Jonker, D. (2015). *Graph analysis and visualization: Discovering business opportunity in linked data*. John Wiley & Sons, Indianapolis, IN, USA.
- Braun, S., Rieck, A., und Köhler-Hammer, C. (2015). Ergebnisse der BIM-Studie für Planer und Ausführende: »Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden«.

[http://www.detail.de/fileadmin/uploads/BIM-Studie\\_CKH\\_\\_150706.pdf](http://www.detail.de/fileadmin/uploads/BIM-Studie_CKH__150706.pdf).  
geprüft am 18.02.2018.

Bubner, A. und Thierfelder, J. (2000). Austausch von planungsrelevanten Daten im Stahlbau.

[https://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2005/639/pdf/055p\\_Bubner.pdf](https://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2005/639/pdf/055p_Bubner.pdf).  
geprüft am 18.02.2018.

Bundesingenieurkammer und Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung (2013). *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen: Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, HOAI; [Textausgabe mit amtlicher Begründung]*. Wolters Kluwer, Juli 2013 edition.

Bürgerschaft Hamburg (2014). Bericht des Parlamentarischen Untersuchungsausschusses Elbphilharmonie.

<https://www.buergerschaft-hh.de/ParlDok/dokument/44803/bericht-des-parlamentarischen-untersuchungsausschusses-%E2%80%99Eelbphilharmonie%E2%80%9C.pdf>. geprüft am 18.02.2018.

Büttner, O. und Hampe, E. (1977). *Analyse der natürlichen und gebauten Umwelt: Mit 58 Tafeln*, volume / Oskar Büttner; Erhard Hampe ; Bd. 1 of *Bauwerk, Tragwerk, Tragstruktur*. Verl. für Bauwesen, Berlin.

Butz, Henning (2011). Systemkomplexität methodisch erkennen und vermeiden. In Jochem, R., editor, *Anforderungsmanagement in der Produktentwicklung*, pages 183–217. Symposion Publ.

Chicago History Museum Research Center (2016a).

<http://chsmedia.org/media/hb/01/HB15412a.jpg>. geprüft am 27.12.2016.

Chicago History Museum Research Center (2016b).

<http://chsmedia.org/media/hb/01/HB15412b.jpg>. geprüft am 27.12.2016.

Clark, R. C., Nguyen, F., und Sweller, J. (2011). *Efficiency in Learning: Evidence-Based Guidelines to Manage Cognitive Load*. Wiley, San Francisco, USA.

Coenders, J. L. (op. 2011). *NetworkedDesign - next generation infrastructure for computational design*. VSSD - TU Delft, Delft, Niederlande.

- Colombo, L. F. (2012). *Theoretical Projects, Nature & Significance: through the Case Study of Mies van der Rohe's Work*. Faculty of Architecture, Building, and Planning, Australien.
- Davis, D. (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. Dissertation, RMIT University, Melbourne, Australien.
- Deckelmann, G. und Franke, L. (2002). *Baukonstruktion im Planungsprozess: Vom Entwurf zur Detailplanung; mit 334 Abbildungen und 58 Tabellen*. Vieweg Studium. Vieweg, Wiesbaden, 1. Aufl. edition.
- Deutsches Institut für Normung (1996). *Bedarfsplanung im Bauwesen: DIN 18205*, volume DIN 18205 of *Deutsche Norm*. Beuth, Berlin, April 1996 edition.
- Deutsches Institut für Normung (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*, volume DIN EN 1991-1-1 of *Deutsche Norm*. Beuth, Berlin, dezember 2010 edition.
- Deutsches Institut für Normung (2014a). Ergonomische Daten und Leitlinien für die Anwendung des ISO/IEC Guide 71 für Produkte und Dienstleistungen zur Berücksichtigung der Belange älterer und behinderter Menschen (ISO/TR 22411:2008); Deutsche Fassung CEN ISO/TR 22411:2011.
- Deutsches Institut für Normung (2014b). Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2006).
- Deutsches Institut für Normung (2015a). *DIN SPEC 91400: Building Information Modeling (BIM) – Klassifikation nach STLB-Bau*, volume ICS 35.240.50;. Beuth Verlag Berlin, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung (2015b). *Luft- und Raumfahrt - Programm-Management - Leitfaden für das Management von Systems Engineering*. Number DIN EN 9277:2015-12. Beuth Verlag Berlin, Berlin.
- Dörner, D. (1997). *The logic of failure: Recognizing and avoiding error in complex situations*. Perseus Books, New York, NY, USA.
- Ebert, C. (2012). *Systematisches Requirements Engineering: Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten*. Dpunkt, Heidelberg.
- Edmonds, B. M. (1999). Syntactic measures of complexity.  
<http://bruce.edmonds.name/thesis/>. geprüft am 18.02.2018.

- Egger, M., Przybylo, J., Liebich, T., und Hausknecht, K. (2014). BIM-Leitfaden für Deutschland. [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?__blob=publicationFile). geprüft am 18.02.2018.
- Engel, H. (1997). *Tragsysteme*. Verlag Gerd Hatje, Berlin.
- Engels, G. (2016). Modellierungssprache — Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Sprache/Modellierungssprache>. geprüft am 26.02.2016.
- Ernst, H. (2000). *Grundlagen und Konzepte der Informatik: Eine Einführung in die Informatik ausgehend von den fundamentalen Grundlagen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Ernst, H., Schmidt, J., und Beneken, G. (2015). *Grundkurs Informatik: Grundlagen und Konzepte für die erfolgreiche IT-Praxis - eine umfassende, praxisorientierte Einführung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 5., vollst. überarb. Aufl. edition.
- Freund, J. und Rücker, B. (2012). *Praxishandbuch BPMN 2.0*. Hanser, München, 3., erw. Aufl. edition.
- Friedenthal, S., Moore, A., und Steiner, R. (2008). *A practical guide to SysML: Systems Model Language*. The MK / OMG Press. Elsevier/Morgan Kaufmann, Burlington, Mass.
- Fuchs, M., Perla, M., Lehnert, J., und Niederberger, K. (2013). Integrierte Planung im Industriebau. *Bautechnik*, 90(10): pages 622–625.
- Gerber, H. (2010). *Bewertung der Qualität von Tragwerken*. Logos-Verlag, Berlin.
- Gerdes, I., Klawonn, F., und Kruse, R. (2004). *Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen; [mit Online-Service zum Buch]*. Computational intelligence. Vieweg, Wiesbaden, 1. Aufl. edition.
- Gerkan, M. v. (2013). *Black Box BER: Vom Flughafen Berlin Brandenburg und anderen Großbaustellen; wie Deutschland seine Zukunft verbaut*. Quadriga, Berlin.

- Gerstenmaier, J. und Banyard, P. (1995). *Einführung in die Kognitionspsychologie: Mit ... 9 Tabellen*, volume 8086 of *UTB*. Reinhardt Verlag, München.
- Geyer, P. (2009). *Multidisziplinäre Entwurfsoptimierung für das Bauwesen*. Technische Universität Berlin und Fakultät VI - (Zusammenschluss der ehemaligen Fakultäten "Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften" sowie "Architektur Umwelt Gesellschaft". Fakultät VI - (Zusammenschluss ehemaliger Fakultäten) -ohne Zuordnung zu einem Institut-, Berlin.
- Girmscheid, G. (2014). *Projektentwicklung in der Bauwirtschaft-prozessorientiert: Wege zur Win-Win-Situation für Auftraggeber und Auftragnehmer*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 4. Aufl. 2014 edition.
- Harel, D. und Feldman, Y. A. (2010). *Algorithmik: Die Kunst des Rechnens*. Springer.
- Hausladen, G. und Tichelmann, K. (2009). *Ausbau Atlas: Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik [Hrsg.: Institut f. internationale Architektur-Dokumentation]*. Edition Detail. Institut f. internationale Architektur-Dokumentation, München, 1. Aufl. edition.
- Hess, R., Schlaich, J., Schneider, K.-J., Volz, H., Widjaja, E., Ing, S.-J. \_\_, und Ing, W. \_\_. (2012). *Entwurfshilfen für Architekten und Bauingenieure: Faustformeln für die Vorbemessung, Vorbemessungstabellen, Bauwerksaussteifung*. Bauwerk. Beuth, Berlin, 2nd ed. edition.
- Hinsch, M. (2014). *Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie: Ein Praxisleitfaden für die Luftfahrtnorm EN 9100*. Springer Vieweg.
- Holling, H. und Gediga, G. (2011). *Statistik - deskriptive Verfahren*. Hogrefe Verlag, Göttingen, 1. Aufl. edition.
- Hudson, R. (2010). *Strategies for Parametric Design in Architecture: An application of practice led research*. Dissertation, University of Bath, Bath, UK.
- Jacomy, M., Venturini, T., Heymann, S., und Bastian, M. (2014). ForceAtlas2, a Continuous Graph Layout Algorithm for Handy Network Visualization Designed for the Gephi Software. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098679#references>. geprüft am 18.02.2018.



- Jäger, W. (2009). *Mauerwerk-Kalender 2009: Ausführung Instandsetzung Lehmmauerwerk*. Wiley.
- Joshi, B. K. (2010). *Data structures and algorithms in C++*. Tata McGraw Hill Education, New Delhi.
- Jungwirth, J., Scholz, M., Deinhard, R., und Schneider, M. (2015). BIM in der Verkehrsinfrastruktur. In *BIM - Building Information Modeling*, volume 2015, November of *Ernst & Sohn Special*, pages 68–73. Ernst & Sohn, Berlin.
- Knippers, J. (2014). Integriertes Entwerfen im digitalen Prozess. *Bautechnik*, 91(4): 257–261.
- Krätzig, W. B., Wittek, U., Harte, R., und Meskouris, K. (1999). *Tragwerke 1: Theorie und Berechnungsmethoden statisch bestimmter Stabtragwerke*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin and Heidelberg, vierte auflage edition.
- Kreimeyer, M. und Lindemann, U. (2011). *Complexity metrics in engineering design: Managing the structure of design processes*. Springer.
- Lindemann, P. U. (2016). Sequencing a DSM. <http://www.dsmweb.org/en/understand-dsm/technical-dsm-tutorial0/clustering.html>. geprüft am 1.1.2017.
- Longo, L. und Barrett, S. (2010). A Computational Analysis of Cognitive Effort. In Nguyen, Ngoc Thanh und Le, Manh Thanh und Świątek, Jerzy, editor, *Intelligent Information and Database Systems: Second International Conference, ACIIDS, Hue City, Vietnam, March 24-26, 2010. Proceedings, Part II*, volume 5991 of *Computer Science (Springer-11645)*, pages 65–74. Springer, Berlin Heidelberg und Springer e-books.
- Ludwig, R. (2005). *Komplexitätsbeherrschung in der wertschöpfungspartnerschaftsübergreifenden Produktspezifikationserstellung bei unvollkommenen Informationen durch Simplifizierungsregeln*. PhD thesis, Universität Stuttgart.
- Mahdavi, A., Martens, B., und Scherer, R. J. (2015). *EWork and eBusiness in architecture, engineering and construction: Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2014), Vienna, Austria, 17-19 September 2014*. CRC Press, Boca Raton, USA.

- Malik, F. (2002). *Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme*. Haupt, 7., durchges. aufl. edition.
- Marcus, H. (1929). *Die vereinfachte Berechnung biegsamer Platten*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, zweite, erweiterte auflage edition.
- Maurer, Maik und Braun, Thomas (2008). *Structural Complexity Management*. Springer.
- Mesarovic, M. (1964). *General systems theory: Views on general systems theory; Proceedings of the 2nd systems symposium apr 1963*. Wiley.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, (63(2)):p. 81–p. 97.
- Moro, J. L., Alihodzic, B., und Rottner, M. (2009). *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail: Band 1 Grundlagen*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Nagl, M. und Westfechtel, B. (2003). *Modelle, Werkzeuge und Infrastrukturen zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen: Symposium*. Wiley-VCH.
- Nöldgen, M., Zilleßen, K., Müllers, I., und Hehle, T. (2014). Einsatz von BIM im Hochbau – Effekte auf die Tragwerksplanung. *Bautechnik*, 91(4): 251–256.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., und Grote, K.-H. (2003). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., 5., neu bearbeitete und erweiterte auflage edition.
- Partsch, H. (1998). *Requirements-Engineering systematisch: Modellbildung für softwaregestützte Systeme*. Springer, Berlin und Heidelberg.
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Springer-Verlag.
- Plass, J. L., Moreno, R., und Brünken, R. (2010). *Cognitive Load Theory*. Cambridge University Press.
- Podolsky, M. (2000). *Ein durchgängiger, integrierter Ansatz für den Entwurf objektorientierter, workflow-basierter Systeme*. Informatik. Utz, Wiss.

- Przybylo, J. und Schreyer, M., editors (2016). *BIM - Einstieg kompakt für Bauunternehmer: BIM-Methoden für die Bauausführung*. Bauwesen. Beuth Verlag GmbH, Berlin and Wien and Zürich, 1. auflage edition.
- Püstow, M. (2015). Reformkommission Bau von Großprojekten: Komplexität beherrschen - kostengerecht, termintreu und effizient, Endbericht.  
[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/reformkommission-bau-grossprojekte-endbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/reformkommission-bau-grossprojekte-endbericht.pdf?__blob=publicationFile). geprüft am 18.02.2018.
- Rank, E., Romberg, R., und Niggel, A. K. (2007). Volumenorientierte Modellierung als Grundlage einer vernetzt-kooperativen Planung im Konstruktiven Ingenieurbau. In Rüppel, U., editor, *Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau: Grundlagen, Methoden, Anwendung und Perspektiven zur vernetzten Ingenieurkooperation ; mit ... 4 Tabellen*, pages 295-319. Springer.
- Rolvink, A., Mueller, C., und Coenders, J. (2014). *State on the art of computational tools for conceptual structural design*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. KIT Scientific Publishing, s.l.
- Rowe, P. G. (1987). *Design thinking*. MIT Press, Cambridge, USA.
- Rücksteiner, F. (1989). *Entscheidungsfindung in der Forschung und Entwicklung: Problematik, Grundlagen u. dynam. Aspekte: Zugl.: Hagen, Fernuniv., Diss., 1988*, volume Bd. 4 of *Hagener betriebswirtschaftliche Abhandlungen*. Physica-Verl., Heidelberg.
- Rupp, C. (2009). *Requirements-Engineering und -Management: Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis*. Hanser, 5., aktualisierte und erw. aufl. edition.
- Rüppel, U., editor (2007). *Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau: Grundlagen, Methoden, Anwendung und Perspektiven zur vernetzten Ingenieurkooperation ; mit ... 4 Tabellen*. Springer.
- Scherer, R. und Schapke, S.-E. (2014). *Informationssysteme im Bauwesen 1*. Springer, Berlin Heidelberg.

- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., und Sobek, W. (2006). *Glasbau Atlas*. DETAIL Konstruktionsatlanten. Birkhäuser, Basel and s.l., 2.überarb. und erw. Aufl. edition.
- Schleicher, M. (2012). *Komplexitätsmanagement bei der Baupreisermittlung im Schlüsselfertigbau*, volume 20 of *Schriftenreihe Bauwirtschaft. I Forschung*. Kassel University Press.
- Schnetzer, H., Andresen, K., und Eitel, M. (2006). Elbphilharmonie Hamburg: Grundsätzliche Überlegungen zur Zusammenarbeit Ingenieur - Architekt. *Die Bautechnik : Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau*, 83(3): 157–166.
- Schuler, H. (2004). *Organisationspsychologie - Gruppe und Organisation*, volume Band 4 of *Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich D, Praxisgebiete. Serie 3, Wirtschafts-, Organisations- und Arbeitspsychologie*. Hogrefe, [neuausg.] edition.
- SIA (2014). *SIA 112 Modell Bauplanung: Verständigungsnorm = Modèle: étude et conduite de projet*, volume 508 112, Ed. 2014, DE of *Schweizer Norm - SN*. SIA, [ausgabe] 2014 edition.
- Simmendinger, H. (2013). *HOAI 2013: Praxisleitfaden für Ingenieure und Architekten; inkl. Verordnungstext*. BfB Baurecht für Bauingenieure. Ernst.
- Steward, D. V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, EM-28(3): 71–74.
- Storz, R. (2009). *Fachdidaktik - Seminar Mathematik: [Mathematikunterricht für die Sekundarstufe I kompetent planen, durchführen und reflektieren]*. Pro Business, Berlin, 1. Aufl. edition.
- Sweller, J., Ayres, P., und Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer New York.
- Tessmann, O. (2008). *Collaborative design procedures for architects and engineers*. Books on Demand, 1. Aufl. edition.
- Tittmann, P. (2011). *Graphentheorie: Eine anwendungsorientierte Einführung ; mit zahlreichen Beispielen und 80 Aufgaben*. Mathematik-Studienhilfen. Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., München, 2., aktualisierte Auflage edition.

- Turau, V. und Weyer, C. (2015). *Algorithmische Graphentheorie*. De Gruyter, Berlin, 4 edition.
- Vajna, S., Weber, C., und Hehenberger, P. (2009). *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. Springer, Berlin, 2., völlig neu bearb. Aufl. edition.
- Verein Deutscher Ingenieure (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte: Systematic approach to the development and design of technical systems and products*, volume 2221 of *VDI-Richtlinien*. VDI-Verl., Mai 1993 edition.
- Verein Deutscher Ingenieure (2016). Richtlinie VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.  
<https://www.vdi.de/technik/fachthemen/produkt-und-prozessgestaltung/fachbereiche/produktentwicklung-und-mechatronik/themen/rilis-methodik/-vdi-2221-methodik-zum-entwickeln-und-konstruieren/technischer-systeme-und-produkte/>. geprüft am 27.02.2016.
- Verworn, B. (2005). *Die frühen Phasen der Produktentwicklung: Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik: Zugl.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2004*. Gabler Edition Wissenschaft : Forschungs-, Entwicklungs-, Innovations-Management. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 1. Aufl. edition.
- Volz, H.-P. (2000). *Kognitive Prozesse — eine Einführung*. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Weilkiens, T. und Soley, R. M. (2014). *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design*. Dpunkt, 3., überarb. u. akt. Aufl., rev. Ausg. edition.
- Widjaja, E. (2013). *Baustatik - einfach und anschaulich: Baustatische Grundlagen, Faustformeln, Wind- und Schneelasten nach Eurocode*. Bauwerk BBB. Beuth, Berlin and Wien and Zürich, 4., überarb. Aufl. edition.
- Wiedemann, J. (2013). *Leichtbau: Band 2: Konstruktion*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Wikipedia (2016). Nationalgalerie (Berlin) — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.  
[https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nationalgalerie\\_\(Berlin\)&oldid=160890389](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nationalgalerie_(Berlin)&oldid=160890389). geprüft am 27.01.2016.

- Willenbacher, H. (2002). *Interaktive verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierung als Integrationsplattform für den Bauwerkslebenszyklus*. Dissertation, Bauhaus Universität Weimar.
- Zieta, O., von Both, P., Fischer, N., Gramazio, F., Kohler, M., Hegner, H.-D., Lepik, A., Rieck, A., Schlegel, M., Schuler, M., und Thierstein, A. (2011). *Positionen zur Zukunft des Bauens: Methoden, Ziele, Ausblicke*. Detail Institut f. Intern. Architektur-Dok and De Gruyter.

# Sachverzeichnis

- 3D-Konstruktion, 13
- Abhängigkeiten
  - direkte, 5
  - indirekte, 5
- Ableitung, 4
- Ablesbarkeit der Einflüsse, 86
- Abstimmungsbedarf, 18, 156
- Abstraktion, 121
- Abstraktionsniveau, 42
- Activity Diagram, 174
- Activity Diagramm, 115, 116, 157
- Adjazenzmatrix, 104
- Aktoren, 100
- Algorithmen, 124
- Algorithmus, 69, 121, 177
- Allgemeinverständlichkeit, 112
- Analysemodelle, 18, 155
- Anforderungen des Gesamtbauwerks,
  - 47
- Anforderungsparameter, 110
- Angebotsprojekt, 164
- Angst, 60
- Arbeitsgedächtnis, 58, 59
- Artefakte, 46
- Assoziativität, 66
- Aufgaben des Tragwerks, 111
- Ausgangsinformationen, 46
- Automatisierte Analysen, 104
- Automatisierte Sensitivitätsanalysen,
  - 131
- Baufortschrittbegleitende Planung, 2
- Baugroßprojekte, 19
- Baugrund, 99
- Baukonstruktive Anforderungen, 111
- Bauphysikalische Anforderungen, 111
- Baupraxis, 44
- Bauproduktbereitstellung, 22
- Bauprodukte, 22
- Bauteilknoten, 96
- Bauwerk, 2, 3
- Bauwerksfunktionen, 21, 76, 84, 110,
  - 154
- Bauwerksmodell, 3, 9
- Bauwerksmodellierung, 15
- Bedürfnisformulierung, 44
- Bedarfsanalyse, 31
- Bedarfsplanung, 32, 44
- Beispielprojekt, 78
- Beschreibung der Planungsschritte,
  - 98
- Bewusstsein der Planer, 152
- Beziehungsgeflecht, 23

- Beziehungsgewichtung, 93
- Biaxiale Lastabtragung, 137
- Bidirektionale Beziehungen, 54
- Bidirektionale Informationsflüsse, 67
- Bildungsvorschrift, 158
- BIM, 12, 22, 158
- BIM-Methodik, 6, 27
- BIM-Modell, 98
- BIM-Umgebung, 161
- Binäre DSM, 104
- Black-Box, 152
- Block Definition Diagramm, 124
- Boolsche Variablen, 46
- Breitensuche, 94
- Brute-Force-Methode, 136
- Chaotisches System, 65
- Charakter der Tragwerksplanung, 42
- Charakteristika eines Tragelements, 73
- Clash Detection, 4
- Cloud, 4
- Cluster, 177
- Clustern, 123
- Cognitive load theory, 56
- Constraint blocks, 124
- Constraints, 130
- Core House, 78
- Darstellungsmethoden, 123
- Dekomposition, 121
- Denkschritte, 122
- Design Structure Matrix, 171
- Deskriptive Statistik, 7, 136
- Detaillierungsgrad, 32, 67
- Detaillierungsstufen, 79
- Detailnachweise, 12
- Dezentrale Planung, 3
- Dezentraler Gesamtplanungsprozess, 55
- Dezentraler Planungsprozess, 24
- Differenzierbare Funktionen, 52
- Dimensionierung von Tragelementen, 54
- Dimensionierungsalgorithmen, 77
- Dimensionierungsalgorithmus, 46
- DIN 18205, 32, 45
- Direkte Kommunikation, 152
- Direkte Suchmethoden, 52, 159
- Direkte Zusammenhänge, 128
- Disziplinübergreifende Probleme, 28
- Disziplingrenzen, 18, 157
- Dominante Interaktionen, 105
- DSM, 24, 27, 105, 111
- Durchdringungen, 106
- Dynamik, 66
- Dynamisches Systemverhalten, 70
- E-Modul, 98
- Einfluss des Planers, 95
- Einflussreihenfolge, 96
- Eingangsinformationen, 46
- Einhüllende Dimensionierung, 115
- Einkapselung, 54
- Entscheidungsgrundlage, 141
- Entwurfsgedanke, 51
- Entwurfsoptimierung, 25
- Entwurfsprozess, 27, 49
- Erkennen von Abhängigkeiten, 88
- Erkenntnisgewinn, 59
- ETFE, 166
- Evaluierung, 24
- Evolutionäre Strategien, 52, 140, 159
- Experten, 154
- Expertenwissen, 8, 17, 45



- Externe Interaktionen, 166
- Externe Komplexität, 64
- Extrinsische kognitive Belastung, 57
- Fachdisziplinen, 161
- Fachplaner, 45
- Fachplanern, 2
- Fassadenlasten, 78
- Fehlende Planung, 160
- FEM, 12, 162, 174
- Fertigungseffizienz, 10
- Flexible Modellierung, 77
- ForceAtlas2 Algorithmus, 95, 98
- Fortschritt der Planung, 70
- Frühzeitige Identifikation, 122
- Fraunhofer Institut, 14
- Freiheitsgrade, 73, 91, 132
- Fucon 4.0, 14
- Funktionelle Zuordnungen, 98
- Funktionellen Anforderungen, 47
- Funktionen Gesamtbauwerk, 2
- Funktions-Fachplaner Beziehung, 45
- Funktions-Planer Zuordnungen, 104
- Funktionsanalyse, 157
- Funktionsanforderungen, 32
- Funktionsbeschreibung, 46
- Funktionsbeziehung, 92
- Funktionsgewährleistung, 92
- Funktionszuordnung, 92, 112
- Ganzheitlich-systemische Denkweise, 25
- Gebäudefunktionen, 8
- Gebäudekomplexität, 87
- Gebrauchstauglichkeit, 111, 112
- Gedankenmodelle, 9
- Generatives Geometriemodell, 30, 77, 174
- Generische Methoden, 51, 152, 156
- Geometrieparameter, 77
- Geometrische Nichtlinearität, 68
- Germane load, 57
- Gesamtbauwerk, 106
- Gesamtgebilde, 82
- Gesamtmodell, 12
- Geschätzte Informationen, 18, 155
- Gewichtungsfaktoren, 51, 132
- Gleichartige Fehler, 17, 154
- Gliederungsstrategien, 2
- Gradientenverfahren, 52
- Graphendarstellung, 155
- Graphentheorie, 7, 19, 23, 24, 76, 94, 188
- Grasshopper<sup>®</sup>, 131
- Großprojekte, 6
- Grobabmessungen, 46
- Grobstruktur, 45
- Grobstrukturierung des Tragwerks, 89
- Grundlagenermittlung, 44
- Gruppierungen, 123
- Haustechnik, 87
- Heterogenität, 4
- Hidden Links, 122, 123
- Hierarchie, 123
- Hierarchische Struktur, 82
- Hilfsroutinen, 131
- HOAI, 8, 16, 44, 87, 153
- Hypothese, 20
- IDM, 105
- Implementierung, 24
- Inakzeptable Zustände, 82
- Indirekte Abhängigkeiten, 83, 105, 129
- Indirekte Einflüsse, 86

- Informationsaustausch, 11, 16, 92, 96, 98, 124, 168
- Informationsfluss, 157
- Innovative Probleme, 50
- Integrale Planung, 8, 26
- Integrierte Planung, 12
- Inter Domain Matrix, 105, 106, 160
- Interagierende Planer, 106
- Interaktionen, 2, 42, 55
- Interaktionsprobleme, 155
- Interaktiver Zyklus, 51
- Internal Block Diagramme, 124
- Interne Komplexität, 64
- Internetbasierten Projektumgebung, 26
- Interpretationsbedarf, 152
- Interpretationsfehler, 158
- Intrinsische kognitive Belastung, 57
- Isolierter Knoten, 161
- Iterativ Optimierung, 49
- Iterative Planungsverläufe, 67
- Iterative Planungszyklen, 11
- Iterative Probiervverfahren, 116
- Iterative Prozesse, 54
- Iterativer Charakter, 31, 50
- Iterativer Planungsablauf, 30
- Iterativer Prozess, 70
- Iteratives Vorgehen, 158
  
- Juristische Verantwortlichkeit, 4
  
- Kausal bedingte Reihenfolge, 115
- Kausale Abhängigkeiten, 31
- Kausale Beziehungen, 123
- Kausale Verkettung, 47
- Kausales Ereignis, 158
- Kernaufgabe, 122
- Kernaufgabe des Bauingenieurs, 5
  
- Klärung der Ziele, 32
- Kognitive Belastung, 56, 59
- Kognitive Einflüsse, 56
- Kognitive Funktionen, 4
- Kognitiven Fähigkeiten, 122
- Kognitiver Aufwand, 59, 76, 88, 121
- Kollaborative Arbeitsweisen, 13
- Kollisionskontrollen, 5
- Kommentare, 124
- Kommunikationsbedarf, 171
- Kommunikative Lücken, 97
- Kompetenz, 17, 153
- Komplexe Systeme, 26
- Komplexitätsbeherrschung, 27, 81, 83
- Komplexitätseffekte, 26
- Komplexitätsfaktoren, 64
- Komplexitätsgrad, 79
- Komplexitätshandhabung, 28
- Komplexitätskontrolle, 2, 42, 49
- Komplexitätsmanagements, 8
- Komplexitätstreiber, 64
- Kompromisse, 171
- Konkretisierung, 50
- Konstruktionsmodell, 23
- Konstruktionspläne, 162
- Konstruktionsprinzip, 174
- Konstruktive Kopplungen, 99
- Konstruktive Umsetzung, 158
- Konstruktiven Gründe, 132
- Konzeptionierung des Tragwerks, 90
- Koordinationsmodell, 4
- Koordinierungsmodell, 25
- Korrelationen, 162
- Korrelationsanalyse, 136, 156
- Korrelierende Ebenen der Komplexität, 64

- Kybernetisch, 51
- Lösungsalternativen, 45
- Lösungsmöglichkeiten, 17, 155
- Lagerungsbedingungen, 22, 91, 144
- Lastübergänge, 100
- Lastabtrag, 166, 168
- Lastaufbringung, 99
- Lastfluss, 100
- Lastverfolgung, 99, 104
- Lebensdauer, 111
- Leistungsbilder, 31
- Lernendes Systems, 51
- Lesbarkeit, 123, 177
- Massenproduktion, 78
- Materialeigenschaften, 46
- Materialwahl, 98
- Matrizenableitung, 128
- Matrizenmethoden, 45
- MDM, 27, 106
- Mehrkriterienoptimierung, 51
- Mensch und Maschine, 152
- Menschliches Denkvermögen, 122
- Mies van der Rohe, 78
- Millersche Zahl, 58
- Modell Checking, 5
- Modellierungssprache, 23, 99
- Modellinteraktionen, 24
- Montageplanung, 53
- Motivation, 2
- Multi Domain Matrix, 106
- Multi DomainMatrix, 161
- Myron Goldsmith, 78
- Nachbearbeitungsaufwand, 12
- Nachvollziehbarkeit, 21, 111, 121, 158
- Neugier, 60
- Nicht-lineare Zustandsgrößen, 122
- Nicht-linearer Planungsprozess, 5
- Nicht-linearer Zusammenhang, 137
- Nicht-lineares Tragverhalten, 52
- Nichtlineare Beziehung, 69
- Normen, 31
- Notwendige Planung, 98
- Objektplaner, 44
- Optimale Parameterwahl, 140
- Optimierung, 122, 140
- Optimierungsstrategien, 111
- Optimum, 8
- Organisationsmodell, 25
- Papierbasierte Arbeitsabläufe, 11
- Parameterabhängigkeiten, 129
- Parameterbeziehungen, 73
- Parameterkoppelungen, 122
- Parameterzusammenhänge, 52, 122, 136
- Parametrie, 66
- Parametrisch-assoziative Modellierung, 7
- Parametrisch-assoziatives Modell, 29
- Parametrisch-assoziatives Planungssystem, 69
- Parametrische Betrachtungen, 78
- Parametrische Modelle, 29
- Parametrischer Entwurf, 29
- Pareto-Optimierung, 49, 51, 171
- Partialmodell, 3, 4, 26
- Permanente Änderungen, 98
- Physische Koppelungen, 67
- Planung, 55
- Planungsabsicht, 44
- Planungsalgorithmen, 46, 60, 109

- Planungsalgorithmen der
  - Tragwerksplanung, 23, 98, 152
- Planungsaufgabe, 78
- Planungsdisziplinen, 42
- Planungsgrundlagen, 21
- Planungsinteraktionen, 18, 156
- Planungskomplexität, 8, 12, 47
- Planungskooperation, 6, 19
- Planungsmethoden, 78, 98
- Planungspraxis, 3, 8, 98
- Planungsprozess, 21
- Planungsprozessumgebung, 22
- Planungspuffer, 56
- Planungsqualität, 21
- Planungsrücksprünge, 26, 47, 108
- Planungsrisiken, 4, 59
- Planungsschleifen, 108
- Planungsschritte, 51, 108
- Planungssicherheit, 56
- Planungsteilprozesse, 23, 51
- Planungswerkzeuge, 15, 22
- Planungszeit, 21
- Planungsziele, 21, 47
- Planungszuständigkeiten, 82
- Positionstatik, 12
- Potentielle Interaktionen, 32
- Präzisierung, 54
- Präzisierung des Tragwerks, 90
- Primärtragsystem, 90
- Probierverfahren, 50
- Probleme
  - komplexitätsinduzierte, 16
- Produktivitätssteigerung, 10
- Projektierung, 31
- Properties, 124
- Proprietäre Dateiformate, 158
- Prozessabhängigkeiten, 29
- Prozessdekomposition, 121
- Prozesskomplexität, 154, 171
- Prozessumgebung, 42
- Prozessumgestaltung, 23
- Qualitätsniveau, 9
- Räumliche Geometrie, 158
- Räumliche Kollisionen, 4
- Rückkopplungen, 54
- Rational geltende Ordnung, 82
- Realitätsreduktion, 121, 122
- Reibung, 122
- Reibungskoeffizient, 73
- Relevante Einwirkungen, 91
- Relevanz, 122
- Requirement Diagram, 112, 113
- Restrisiko, 5, 122
- Revidierte Schätzung, 116
- Rheologische Modellierung, 68
- Rhinoceros<sup>®</sup>, 131
- Richtlinien, 31
- Risikominimierung, 122
- Rolle des Ingenieurs, 12
- Sammelvariable, 136
- Schädigungsmechanismen, 27
- Schätzungen der Dimensionen, 90
- Schätzwerte, 46
- Schleifenkonstruktion, 136, 140
- Schnittstellen, 18, 156
- Seilklemme, 69
- Sekundärtragsystem, 90
- Sensitivität, 16, 77
- Sensitivitätsanalyse, 24, 77, 122, 130, 174

- Sequence Diagramm, 100, 102
- Sequenzielles Vorgehen, 11
- Sequenzieren, 108
- Sequenzierung, 106, 175
- SIA 112, 8, 44, 153
- Sicherheitspuffer, 180
- Sieben Plagen des Bauens, 6
- Softwaremodellierungswerkzeug, 158
- Spannungen, 115
- Spannungszustände, 67
- Spartenübergreifende
  - Planungsleistungen, 31
- Spearman, 136
- Spiralmodell, 53
- Störungen, 19
- Stützenfreiheit, 79
- Statisch unbestimmte Tragwerke, 105
- Statische Berechnung, 91
- Statisches System, 77, 90, 99, 132
- Strategische Partnerschaft, 12
- Streifenmethode von Marcus, 131
- Strukturelle Abhängigkeiten, 27
- Strukturelle Interaktionen , 77
- Strukturelle Komplexität, 121
- Strukturelle Nichtlinearität, 68
- Strukturierter Aufbau, 111
- Strukturierungsphase, 83
- Subroutinen, 174
- Synthese, 122
- SysML, 23, 25, 27, 99, 112, 115, 174
- System, 67
- Systemauswirkungen, 65
- Systembausteine, 124
- Systemeigenschaften, 124
- Systemisches Projektmodell, 25
- Systemkomponenten, 67
- Systemmodelle, 76
- Systemmodellierung, 19, 188
- Systems Engineering, 7, 23, 77, 124, 128
- Systemtheorie, 7, 23, 25, 100
- Systemvariablen, 65
- Technische Gebäudeausrüstung, 87
- Teilautomatisierung, 100
- Teilleistungen, 8
- Temperatureffekte, 122
- Tertiärtragsystem, 90
- Textbasierte Programmierung, 131
- Tiefensuche, 94
- Tragelemente, 16, 45, 91, 98
- Tragelementsdimensionen, 77
- Tragstruktur, 45
- Tragsystem, 90
- Tragverhalten, 52
- Tragwerksdimensionierung, 46
- Tragwerksgeometrie, 77
- Tragwerksinteraktionen, 174
- Tragwerkslösung, 52
- Tragwerksplanungsprozess, 5, 23, 99, 108
- Tragwerkssystem, 11
- Transitive Hülle, 105, 155, 161
- Turtle Diagramm, 42
- Umfragen, 13
- Umsetzbarkeit, 21
- Ungenauigkeiten, 158
- Uninformierte Suchalgorithmen, 94
- Unsicherheit, 65
- Unteralgorithmen, 124
- Unterroutine, 131
- Updates, 22

- Varianten, 46
- VDI 2221, 32
- Verantwortlichkeiten, 87
- Verantwortung, 5, 152
- Verbindungsmittel, 99
- Vergleichbare Projekte, 90
- Verhaltensmuster, 26
- Verifikationsmethoden, 113
- Vernetzung, 31
- Visuelle Modellierungssprache, 157
- Visueller Programmieraufsatz, 131, 159
- Vollbesetzte Adjazenzmatrix, 105
- Volumenmodell, 4, 98
- Volumenmodellierung, 5, 73
- Voranalyse, 18, 155
- Vorbereitungsaufwand, 12
- Vorgängerprojekt, 45, 154
- Vorgehensvarianten, 157
- Vorspannung, 68
- Warshall Algorithmus, 105
- Wiederverwertbarkeit, 123
- Willkürliche Darstellung, 123
- Windeffekte, 58
- Zeitraumen, 21
- Zirkelbezüge, 19, 69, 83, 86, 108
- Zweidimensionale Zeichnungen, 98
- Zyklischer Durchlauf, 53

# Beruflicher Werdegang

## Ausbildung

- 1983-1991, Polytechnische Oberschule Fritz Reuter, Schwerin
- 1991-1994, Lessing Gymnasium Schwerin
- 1995-2002, Studium Dipl.-Ing. Bauwesen an der TU München
- 2008-2013, Aufbaustudium Master of Computational Engineering (M.-Eng) an der Beuth Hochschule Berlin
- 2014-2016 Zertifikat Hochschullehre der Bayerischen Universitäten - Vertiefungsstufe "Pro Lehre intensiv"
- 2013-2018 Promotion an der TU München

## Tätigkeiten

- 2003-2004, Tragwerksplaner bei Ingenieurgemeinschaft Flächentragwerke, Reichenau
- 2004-2005 Tragwerksplaner bei SEELE GmbH & Co. KG., Gersthofen
- 2005-2010 Tragwerksplaner bei Ingenieurgemeinschaft Flächentragwerke, Reichenau
- 2010 Sachverständiger für fliegende Bauten/Bautechnik TÜV Süd, München
- 2011-2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel, TU München
- 2011 freier Mitarbeiter TÜV Süd Industrie Service GmbH, München
- 2011-2016 freier Mitarbeiter Ingenieurgemeinschaft Flächentragwerke, Reichenau
- 2012-2016 Teilzeittätigkeit bei ChAP-Ingenieurbüro für Baustatik, Fürstentfeldbruck
- 2013-2016 akademischer Rat am Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel, TU München
- seit 2016 Korrekturassistent am Lehrstuhl für Tragwerksplanung Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel und Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde Prof. Dipl. Ing. Florian Musso, TU München
- seit 2016 Technischer Projektleiter und Leiter BIM-Task-Force bei PFEIFER Seil- und Hebetchnik GmbH, Memmingen



## Publikationen

- Eversmann, P., A. Ihde, (2018). Laminated glass connection details: towards homogeneous material joints in glass. Proceedings of the Challenging Glass 6 Conference. Delft University of Technology, 2018, abstract accepted.
- Ihde, A., Grunwald, G., Schlögl, C., und Hermeking, T. (2017). Preliminary information flow analysis of a tender project in Southeast Asia: Before clash analysis. In Bögle, A. and Grohmann, M., editors, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017: Interfaces: architecture.engineering.science.
- Ihde, A., Hermeking, T., Schlögl, C., Grunwald, G., und Jenni, M. (2017). Interdisciplinary interaction analysis at the realisation process of an exemplary retractable structure in Doha. In Creativity and Collaboration, volume 108 of IABSE symposium report, pages 140-141, Zurich. IABSE.
- Eversmann, P., Ehret, P., und Ihde, A. (2017). Curved-folding of thin aluminium plates: towards structural-panel shells. In Bögle, A. and Grohmann, M., editors, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017: Interfaces: architecture.engineering.science.
- Eversmann, P., Ihde, A., and Louter, C. (2016). Low Cost Double Curvature - Exploratory Computational Modelling, FE-analysis and Prototyping of Cold-Bent Glass. In Belis, Bos, and Louter, editors, CGC5, Challenging Glass 295 5 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, pages 81-92.
- Eversmann, P., Schling, E., Ihde, A., and Lauter, C. (2016). Low-Cost Double Curvature. In Kawaguchi, K., Ohsaki, M., and Takeuchi, T., editors, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016 - Spatial Structures in the 21st Century, Tokyo.
- Schling, E., Barthel, R., Ihde, A., Tutsch, J., and Huth, S. (2015). Bending-Activated Tensegrity. In International Association for Shell and Spatial Structures, editor, IASS2015 Annual International Symposium on Future Visions, Den Haag. KIVI.
- Schling, E., Barthel, R., Ihde, André, Tusch, Joram, und Huth, S. (October 2015). BENDING-ACTIVATED TENSEGRITY. In Oñate, E., Bletzinger, K.-U., und Kröplin, B., editors, Textile Composites and Inflatable Structures VII, pages 233-246. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona.
- Dürr, H., Ihde, A., und Stephan, S. (2007). Architect-Engineer+ Manufacturer,

a necessary cooperation for designing + building Freeform (NURBS) surfaces and spaces. In Shell and spatial structures, Venice.

## Auszeichnungen

- 2009 Crystal Achievement Award from the Glass Magazine category *Most Innovative Decorative Glass Application: Commercial - Projekt: Vortex Mall of Arabia* bei Ingenieurgemeinschaft Flächentragwerke Reichenau zusammen mit APG International Inc.

## Forschungsaufenthalte

- 2014 - Lehrstuhl für Tragwerksentwurf Prof. Dr. Joseph Schwartz an der ETH Zürich
- 2015 - Department of Architecture and Civil Engineering an der University of Bath