

Datenmodelle zur Bearbeitung von Ingenieuraufgaben am Beispiel von Wohnhäusern in Stahlbauweise

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR

vorgelegt von:

André Bubner
aus Cottbus

Weimar 2006

Gutachter: 1. Prof. Dr.-Ing. habil. F. Werner
2. Prof. Dr.-Ing. K. Beucke
3. Prof. Dr.-Ing. G. Pegels

Tag der Disputation: 30.03.2007

Meinen Eltern gewidmet.

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Bauhaus-Universität Weimar. In diesem Zeitraum habe ich unter anderem am Sonderforschungsbereich 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ im Rahmen des Teilprojekts D3¹ mitgewirkt.

Durch die enge Bindung dieser Arbeit an den Konstruktiven Ingenieurbau und an die Bauinformatik besteht deren wesentliche Motivation darin, einen Beitrag zur Intensivierung der Zusammenarbeit dieser Fachbereiche zu leisten.

Meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. habil. F. Werner möchte ich für die Unterstützung, die Anregungen und die vielen wertvollen Diskussionen zu dieser Arbeit sehr herzlich danken.

Außerdem gilt mein Dank den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Professur Stahlbau, insbesondere Dipl.-Ing. T. Friedrich und Dipl.-Ing. A. Teubener.

Schließlich möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. K. Beucke und Prof. Dr.-Ing. G. Pegels für die Begutachtung der vorliegenden Arbeit bedanken.

¹1. Förderperiode: „Digitales Bauwerksmodell als Grundlage der Datenintegrationsebene für Bestandsinformationen“, 2. Förderperiode: „Digitales Bauwerksmodell als Grundlage der Prozessintegration“

Kurzreferat

Modelle bilden die Grundlage der Planung. Sie repräsentieren die zur Bearbeitung erforderlichen Eigenschaften eines Bauwerks in einer an die spezifische Aufgabe angepassten Form. Zwischen den verschiedenen zur Abbildung des Bauwerks eingesetzten Modellen bestehen fachliche Zusammenhänge bezüglich der darin abgebildeten Aspekte. Diese Abhängigkeiten werden in der praktischen Planungsbearbeitung gegenwärtig auf Grundlage von Erfahrungswerten, normativen Vorgaben und vereinfachenden Annahmen berücksichtigt.

Die detailliertere Modellierung von Bauwerkseigenschaften führt zu einer engeren Verzahnung der verschiedenen Modelle. Um eine fachliche Inselbildung zu vermeiden, ist eine entsprechend angepasste Abbildung der zwischen den einzelnen Modellen bestehenden Beziehungen erforderlich.

Mit den steigenden Ansprüchen an eine Bearbeitung von Ingenieuraufgaben gewinnt eine über den Zweck der Bereitstellung ausgewählter Informationen zum Bauwerk und der Unterstützung eines Datenaustauschs zwischen verschiedenen Fachplanern hinausgehende datentechnische Abbildung an Bedeutung. Dies setzt eine Diskussion der Anforderungen an eine solche Beschreibung aus fachlicher Sicht voraus. Die Untersuchung der fachlichen Anforderungen wird am Beispiel von Wohnhäusern in Stahlbauweise geführt.

Abstract

Models form the basis of the planning. They represent the characteristics necessary for the processing of a building in a form suited to the specific task. Between the different models, which are used for the representation of the building, there exist engineer-technical interrelations with regard to the illustrated aspects. At present these dependences are taken into consideration in the practical planning on basis of empirical values, normative guidelines and simplifying assumptions.

The more detailed modelling of the building characteristics leads to a more defined linkage of the different models. To avoid an engineering island formation, there is an accordingly adapted representation of the relations existing between the single models necessary.

With the rising demands on the processing of engineering tasks an data-technical representation wins in importance which realises more than a supply of selected information about the building and the support of a data exchange between different planners. This requires a discussion of the requirements for such a description from an engineer-technical point of view. The investigation of these technical requirements is carried out by the example of residential buildings in steel construction method.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zielstellung	11
1.1	Einführung	11
1.2	Zielstellung	12
2	Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise	15
2.1	Grundlegende Betrachtungen zum Entwurf von Bauwerken	15
2.1.1	Einleitung	15
2.1.2	Bauwerkseigenschaften	15
2.1.3	Randbedingungen aus der Entwurfsbearbeitung	17
2.2	Spezifik der Verwendung von Stahlkonstruktionen	21
2.2.1	Generelle Eigenschaften der Stahlbauweise	21
2.2.2	Verwendete konstruktive Grundkonzepte	22
2.2.3	Industrialisierung der Planung und Fertigung	24
3	Analyse von Fachmodellen	29
3.1	Grundlagen	29
3.2	Generelle Eigenschaften und Anwendung	30
3.3	Eigenschaften von Fachmodellen für die Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise	33
3.3.1	Einführung	33
3.3.2	Abbildung architektonischer Eigenschaften	34
3.3.3	Abbildung von Tragsystemen	35
3.3.4	Abbildung für die numerische Berechnung	39
3.3.5	Abbildung für die Bemessung des Tragwerks	41
3.3.6	Abbildung konstruktiver Eigenschaften	44
3.3.7	Abbildung wärmetechnischer Eigenschaften	47
3.4	Eigenschaften von Beziehungen zwischen Fachmodellen	49
4	Analyse von Datenmodellen	53
4.1	Repräsentation von Fachmodellen durch Datenmodelle	53
4.1.1	Einführung	53
4.1.2	Abbildung von Geometriemodellen	54
4.1.3	Abbildung architektonischer Eigenschaften	55
4.1.4	Abbildung von Tragwerkeigenschaften	57
4.1.5	Abbildung von Modellen für die numerische Berechnung	60
4.1.6	Abbildung von Modellen zur Bemessung des Tragwerks	63
4.1.7	Abbildung wärmetechnischer Eigenschaften	64

4.1.8	Abbildung von Konstruktionsmodellen	66
4.2	Produktdatenmodelle	69
4.2.1	Allgemeines	69
4.2.2	Randbedingungen aus Hersteller- und Anwendersicht	71
4.2.3	Modellierungskonzepte	73
4.2.4	Standardisierte Produktdatenmodelle	76
4.2.5	Dynamische Produktdatenmodelle	83
4.2.6	Schlussfolgerungen und Konsequenzen	85
4.3	Anforderungen an eine datentechnische Abbildung aus fachlicher Sicht	86
5	Realisierung einer experimentellen datentechnischen Repräsentation	91
5.1	Beschreibung der verwendeten Datenmodelle	91
5.1.1	Generelle Bemerkungen	91
5.1.2	Ressourcen Physik und Geometrie	92
5.1.3	Teildatenmodell Tragwerk	95
5.1.4	Teildatenmodell numerische Analyse	100
5.1.5	Teildatenmodell Konstruktion	105
5.1.6	Teildatenmodell Bemessung	110
5.2	Abbildung der Modellbeziehungen	114
5.2.1	Beschreibung der Grundstruktur	114
5.2.2	Anwendungsbeispiel	115
6	Zusammenfassung	123
	Literaturverzeichnis	127
A	Glossar	143
B	Objektdiagramme zum Teildatenmodell Tragwerk	147
C	Objektdiagramme zum Teildatenmodell numerische Analyse	153
D	Objektdiagramme zum Teildatenmodell Konstruktion	159
E	Objektdiagramme zum Teildatenmodell Bemessung	175

Kapitel 1

Einführung und Zielstellung

1.1 Einführung

Modelle bilden die Grundlage der Planung. Sie repräsentieren die zur Bearbeitung erforderlichen Eigenschaften in einer an die spezifische Aufgabe angepassten Form. Dabei ergeben sich Unterschiede im Aufbau, im Abstraktionsgrad und in der Komplexität. Zwischen den verschiedenen zur Abbildung des Bauwerks eingesetzten Modellen bestehen bezüglich der darin abgebildeten Aspekte fachliche Zusammenhänge. Diese Abhängigkeiten werden bei der Bearbeitung zur Zeit größtenteils durch Erfahrungen, normative Vorgaben und vereinfachende Annahmen berücksichtigt.

Die technische und fachliche Entwicklung führt zu einer Zunahme der Komplexität der im Bauwesen zur Bearbeitung von Ingenieuraufgaben eingesetzten Modelle. Diese fachlich hoch spezialisierten Modelle sind in der Anwendung auf ein sehr kleines Gebiet beschränkt. Bei der Abbildung von Bauwerken besteht ein Defizit in der Berücksichtigung modellübergreifender fachlicher Zusammenhänge. Vergleichbar den durch die „islands of automation“ [1] illustrierten Problemen der Automation des Informationsaustausches ergeben sich aus dieser unzureichenden Repräsentation der Modellbeziehungen *islands of engineering*.

Fachplaner können heute zur Bearbeitung von Planungsaufgaben auf eine breite Unterstützung durch entsprechende Anwendungssoftware zurückgreifen. Dabei kommen überwiegend in ihrem Umfang begrenzte, fachspezifisch angepasste Werkzeuge zum Einsatz, die entsprechend des Bedarfs miteinander kombiniert werden. Daraus ergibt sich der Wunsch, die bereits in digitaler Form vorhandenen Daten weiter zu nutzen. Über den Austausch von Planungsdaten hinaus stellt sich die Frage nach einer fachlichen Integration, die eine Beschreibung der spezifischen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Modellen einschließt. Dazu sind sowohl datentechnische als auch fachliche Überlegungen erforderlich.

Aus den Bauwerkseigenschaften selbst, der Planungscharakteristik und den für das Bauwesen typischen Organisationsstrukturen resultieren spezifische Randbedingungen für eine modellhafte Abbildung von Bauwerkseigenschaften.

Bauwerke erfordern im Allgemeinen eine Anpassung an die aus der Nutzung und den örtlichen Gegebenheiten, wie den klimatischen Verhältnissen, Baugrundbedingungen und kulturellen Einflüssen, resultierenden spezifischen Randbedingungen. Der sich daraus ableitende Unikatcharakter dokumentiert sich in einer individuellen Gestaltung sowie Formen- und Bauweisenvielfalt. Charakteristisch für Bauwerke ist des Weiteren eine lange Lebensdauer. Der Einfluss zeitlicher Veränderungen, unter anderem der technischen Entwicklung, trägt zusätzlich zu den spezifischen Planungsrandbedingungen zu einer sehr verschiedenartigen Bausubstanz bei.

Die durch den Unikatcharakter und die lange Lebensdauer eingeschränkte Vergleichbarkeit von Bauwerken erschwert eine auf vorhandenen Lösungen aufbauende evolutionäre Weiterentwicklung und Optimierung von Bauwerksentwürfen. Die Planungsaufgabe ist dementsprechend durch einen hohen Grad an Individualität und durch einen ausgeprägt prototypischen Charakter gekennzeichnet. Die auf Einzelobjekte ausgerichtete Bearbeitung setzt enge zeitliche und finanzielle Rahmenbedingungen für den Bauwerksentwurf, da der erforderliche Entwicklungsaufwand durch eine geringe Stückzahl zu realisierender Objekte getragen werden muss.

Das zur Planung erforderliche Maß an Wissen und Erfahrungen, das mit der fachlichen und technischen Entwicklung ständig erweitert wird, ist verbunden mit einer zunehmenden Spezialisierung der Planer. Die Bearbeitung des Bauwerksentwurfs erfolgt in einem losen, üblicherweise projektspezifischen Verbund verschiedener Fachplaner. Dabei existieren keine festen Organisationsstrukturen, die entsprechende Abhängigkeiten umfassen. Die Verantwortung für eine funktionierende Planungslösung wird auf die einzelnen Bearbeiter aufgeteilt.

Die für die Planung im Bauwesen typischen Randbedingungen erlauben nur sehr eingeschränkt eine Übernahme von Verfahren und Techniken anderer Industriezweige.

1.2 Zielstellung

Die ständig wachsenden Anforderungen an die Bearbeitung von Planungsaufgaben werden unter anderem an

- der Verringerung der zur Bearbeitung verfügbaren Zeit,
- der Erhöhung der geforderten Bearbeitungsgenauigkeit,
- der Zunahme des Umfangs zu berücksichtigender, miteinander in Beziehung stehender baulicher Aspekte

deutlich. Damit verbunden wächst der Anspruch an die fachliche Beschreibung des Bauwerks und die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Fachplaner.

Um die wachsenden, an die Bearbeitung von Ingenieuraufgaben gestellten Anforderungen erfüllen zu können, besteht eine wesentliche Grundlage in einer umfassenden disziplinübergreifenden Abbildung der Bauwerkseigenschaften.

Den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet die Diskussion der Repräsentation von Bauwerkseigenschaften und der daraus resultierenden fachlichen und technischen Anforderungen. Weitere Aspekte der Planungsbearbeitung, wie die Koordinierung der Fachplaner, erfahren im Rahmen dieser Arbeit keine detaillierte Betrachtung.

Das Aufzeigen der Möglichkeiten einer fachlich motivierten Integration ist verbunden mit der Untersuchung, inwieweit der Planer bei der Modellbildung einschließlich der Abbildung der fachlichen Zusammenhänge technisch unterstützt wird. Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet die derzeit übliche Aufteilung einer Repräsentation der Bauwerkseigenschaften auf verschiedene Modelle, die sich sowohl in den abgebildeten Aspekten als auch den zugrunde liegenden Abstraktionen unterscheiden.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Definition von Anforderungen und der Beschreibung von Randbedingungen für eine umfassende Abbildung der Bauwerkseigenschaften. Der Fokus liegt dabei auf der Erarbeitung fachlicher Grundlagen. Die Darstellung technischer Aspekte, zum Beispiel des Managements, der Sicherheit und der Versionierung von Daten, sowie der zur Lösung eingesetzten Technologie beschränkt sich auf die aus baufachlicher Sicht relevanten Fragestellungen.

Die Bearbeitung untergliedert sich in die Analyse

- der aus der Bearbeitung von Bauwerken resultierenden Randbedingungen,
- der Eigenschaften der verwendeten fachlichen Abbildungen von Bauwerkseigenschaften und
- deren rechnerinterner Repräsentation.

Daraus werden in Bezug auf die Planung und den Entwurf von Wohnhäusern in Stahlbauweise entsprechende Anforderungen abgeleitet und exemplarisch an Beispielen dargestellt. Zusammenfassend werden Schlussfolgerungen gezogen, die als Grundlage für weitere Betrachtungen einer umfassenden fachlichen Beschreibung von Bauwerkseigenschaften dienen können.

Kapitel 2

Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise

„Die Projekte des Bauingenieurs sind in der Regel Prototypen ohne ganzheitliche Übertragungsmöglichkeiten von Erfahrungen.“

(Duddeck [2])

2.1 Grundlegende Betrachtungen zum Entwurf von Bauwerken

2.1.1 Einleitung

In diesem Abschnitt sollen die grundlegenden Eigenschaften des Bauwerksentwurfs dargestellt werden. Dabei besteht das Interesse weniger an einer detaillierten Darstellung verschiedener Herangehens- und Vorgehensweisen als vielmehr in der Klärung der bestehenden Randbedingungen in Bezug auf die verwendeten Modelle und deren gegenseitige Abhängigkeiten. Diese Randbedingungen und Abhängigkeiten stellen die Basis für die Ableitung von Anforderungen an eine Bauwerksrepräsentation sowohl aus fachlicher als auch aus datentechnischer Sicht dar, die in den nachfolgenden Kapiteln untersucht werden soll. Es erfolgen zunächst allgemeine Betrachtungen, die in den darauf folgenden Abschnitten für die spezifischen Merkmale von Wohnhäusern in Stahlbauweise erweitert und konkretisiert werden.

2.1.2 Bauwerkseigenschaften

Die Vielgestaltigkeit von Bauwerken spiegelt sich in deren unterschiedlichen Erscheinungsformen wider. Sie lässt sich beispielsweise an Tunneln, Türmen, Staumauern, Brücken, Straßen oder Häusern erkennen (Abb. 2.1).

Jedes dieser Objekte ist bedingt durch die in der Regel erforderlichen individuellen Anpassungen an die Nutzung und standortspezifischen Randbedingungen einzigartig. Einschränkend ist jedoch zu bemerken, dass sich bezogen

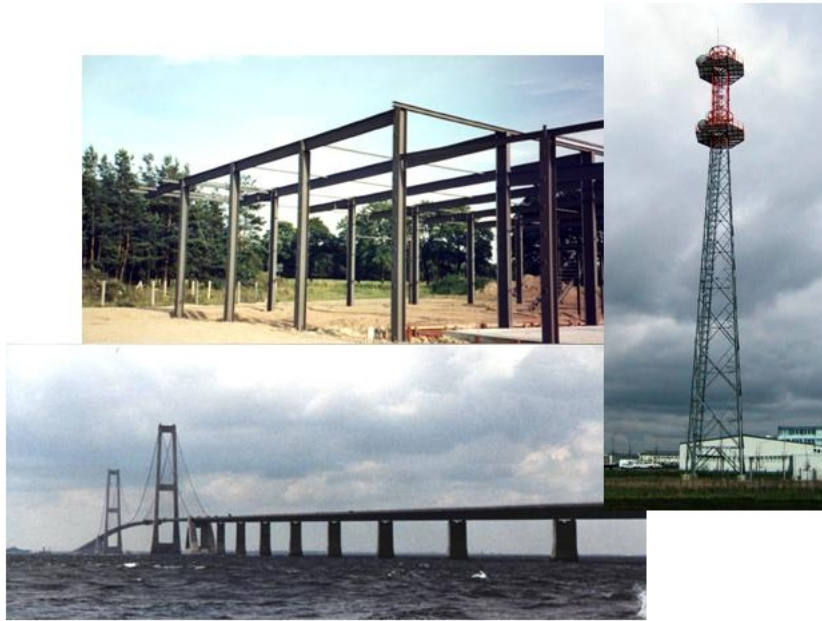


Abbildung 2.1: Vielgestaltigkeit von Bauwerken

auf spezifische Anwendungsgebiete ähnliche Anforderungen ergeben. Daraus resultierend unterliegen Bauwerke, bei denen derartige Randbedingungen vorherrschen, innerhalb dieser Grenzen nur geringfügigen spezifischen Anpassungen. Die sich in der Folge ergebenden ähnlichen Strukturen und Randbedingungen ermöglichen eine weitgehende Vereinheitlichung. Derartige Bauwerke lassen sich insofern recht zutreffend unter der Bezeichnung *gebaute Wiederholungen* zusammenfassen [3]. Der Umfang solcher Vereinheitlichungen wird vor allem durch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte bestimmt (Abb. 2.2).

In der praktischen Anwendung stellen *gebaute Wiederholungen* Ausnahmen dar, da sich die Standardisierung kompletter Bauwerke in den meisten Fällen als zu unflexibel erweist. Eine Vorfertigung konzentriert sich im Wesentlichen auf einzelne Bauteile und kleinere Bauteilgruppen, die sich ihrerseits zu individuellen Lösungen zusammenführen lassen. Auch wenn sich auf dieser Grundlage zumindest Teile der Bausubstanz einer Vereinheitlichung zuführen lassen, bleibt der grundsätzliche Charakter der Einzigartigkeit von Bauwerken nach [4] in *massenhaft gefertigten Unikaten* erhalten.

Nicht zuletzt wegen der im Vergleich zu anderen Industrieprodukten in der Regel langen Lebensdauer weisen Bauwerke besondere Eigenschaften auf. Diese zeigen sich unter anderem in den geringen Stückzahlen vergleichbarer konstruktiver Lösungen. Insbesondere in Bezug auf die zur Verfügung stehenden Erfahrungen ergeben sich besondere Randbedingungen für die Planung, Weiterentwicklung und Optimierung von Entwurfslösungen. Eine weitere Besonderheit von Bauwerken besteht in der Anpassung an die sich während der Lebensdauer ändernden Nutzungsbedingungen und die technische Entwicklung,



Abbildung 2.2: Standardisierung im Wohnungsbau am Beispiel von Plattenbauten

die sich für den gesamten Nutzungszeitraum lediglich in einem sehr begrenzten Umfang vorhersagen lässt.

Techniken und Vorgehensweisen anderer Bereiche, zum Beispiel des Automobilbaus, lassen sich wegen der besonderen Randbedingungen für die Planung von Bauwerken nur sehr eingeschränkt übernehmen.

2.1.3 Randbedingungen aus der Entwurfsbearbeitung

Die Planung unterliegt verschiedenen Einflüssen, die ihrerseits die Rahmenbedingungen für den Einsatz und die Verwendung von Modellen bestimmen.

Projekte im Bauwesen lassen sich nach [5] entsprechend den aus vorangegangenen Projekten vorhandenen Erfahrungen in zwei Gruppen einteilen:

- Projekte mit evolutionärem Charakter, bei denen auf eine Vielzahl vorhandener Lösungen zurückgegriffen werden kann,
- Projekte mit innovativem Charakter, die von Grund auf neue Lösungen erfordern.

Die Projekte der ersten Gruppe unterliegen üblicherweise nur geringfügigen spezifischen Unterschieden. Die aus diesen geringen Abweichungen resultierenden Anforderungen an die Abbildung des Bauwerks erfordern in der Regel keine besonderen Anpassungen, so dass auf bestehende fachliche Modellvorstellungen zurückgegriffen werden kann. Die neuartigen Eigenschaften der zweiten Gruppe sind mit veränderten Vorgehensweisen der Modellbildung und -anwendung verbunden. Dies macht im Allgemeinen eine Überarbeitung oder Erweiterung der

bestehenden fachlichen Konzepte und Strukturen zur Bauwerksbeschreibung erforderlich. Da in den meisten Fällen bewährte und neuartige Technologien gemeinsam in einem Projekt eingesetzt werden, ergibt sich der Charakter der Bauwerksabbildung aus einer Kombination der Eigenschaften beider Gruppen.

Die Planung von Bauwerken erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl miteinander in Beziehung stehender Aspekte, zum Beispiel Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Kosten. Es ergibt sich die Notwendigkeit der Einbindung entsprechender Wissensbereiche (Kompetenzdomänen). Dabei bestehen projektspezifische Unterschiede in der benötigten Anzahl der Wissensbereiche sowie in der Art und im Umfang der Berücksichtigung der zwischen diesen Bereichen bestehenden Zusammenhänge. Der mit diesen Abhängigkeiten verbundene Grad der Integration der fachlichen Konzepte bestimmt maßgeblich die Komplexität der Planungsaufgabe.

Die ständige Zunahme des für die Planung erforderlichen Wissens führt zu erhöhten Anforderungen an die fachliche Qualifikation der Planungsbeteiligten. Die sachgerechte Bearbeitung einer Aufgabe verlangt in zunehmendem Maße eine fachliche Spezialisierung und führt zu einer steigenden Anzahl an der Projektbearbeitung beteiligter Personen. Dies ist mit einer Aufteilung der Verantwortung auf die einzelnen Planer verbunden und betrifft unter anderem die von ihnen eingesetzten Modelle und Methoden (Abb. 2.3).

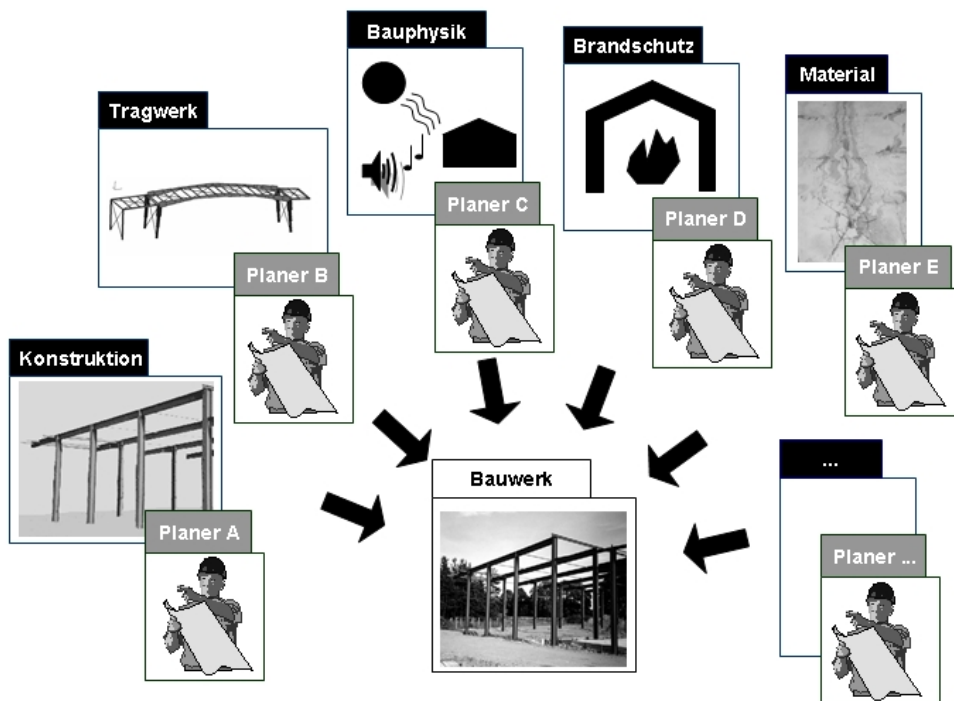


Abbildung 2.3: Fachliche Spezialisierung beim Entwurf von Bauwerken

Der einzelne Fachplaner ist nicht nur für die fachgerechte Bearbeitung seiner Teilaufgabe verantwortlich, sondern darüber hinaus verpflichtet, jedem Beteiligten die Integration seiner Lösung in Bezug auf den Gesamtkontext zu ermöglichen. Eine losgelöste Betrachtung einzelner Aspekte scheidet folglich aus. So ist beispielsweise neben der Standsicherheit eines Tragwerks die Einhaltung konstruktiver Randbedingungen zu überprüfen. Dabei ist sowohl die bauphysikalische Funktion sicherzustellen als auch eine günstige Fertigung und Montage zu gewährleisten.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, erfolgt die Planung von Bauwerken in der Regel für einen im Vergleich zu anderen Industrieprodukten langen Nutzungszeitraum. Änderungen in den dabei zugrunde gelegten Randbedingungen, die unter anderem aus der Nutzung, der Umwelt oder der technischen Entwicklung resultieren können, lassen sich für den gesamten Zeitraum nur sehr eingeschränkt und wenig zuverlässig prognostizieren. Die Entwurfsparameter sind in der Folge mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Der Einfluss aufwändiger Untersuchungen auf die Entwurfslösung ist somit sehr begrenzt.

Bauwerke werden im Allgemeinen, wie ebenfalls in Abschnitt 2.1.2 erläutert, individuell entsprechend spezifischer Anforderungen geplant. Die Möglichkeiten zum Studium einer Entwurfslösung oder zur Beurteilung von Änderungen am bestehenden Bauwerksentwurf an Prototypen oder in einzelnen Testserien sind bedingt durch den Unikatcharakter auf wenige Ausnahmen beschränkt. Vielmehr sind alle Erfahrungen auf Grund der langen Lebensdauer und der durch den Unikatcharakter begrenzten Vergleichbarkeit aus einer verhältnismäßig geringen Anzahl realer Bauobjekte zu extrahieren. Eine evolutionäre, auf bestehenden Lösungen aufbauende Entwicklung erstreckt sich somit über lange Zeiträume und ist nur für wenige Teillösungen zu realisieren (Abb. 2.4).



Abbildung 2.4: Konstruktive Entwicklung am Beispiel von Hallenrahmen (links: 1913 [6], Mitte: 1930 [7], rechts: aktuelle Ausführung)

Die Bearbeitung von Planungsaufgaben erfolgt zu einem großen Teil in Architektur- und Ingenieurbüros kleiner bis mittlerer Größe (Tabelle 2.1). Dies erfordert üblicherweise einen auf ein Projekt begrenzten Zusammenschluss eigen-

ständig agierender Unternehmen. Dabei unterscheiden sich die Unternehmen in der Qualifikation der zur Verfügung stehenden Mitarbeiter, dem angebotenen Leistungsspektrum und der internen Organisation. Die durch die Planer wahrgenommenen Funktionen innerhalb des Planungsprozesses bleiben trotz dieser Unterschiede grundsätzlich erhalten [10, 11].

Unternehmen mit ... Beschäftigten	Zahl der Unternehmen	Beschäftigte in 1.000
1-19	67.993	367
20-49	5.284	160
50-99	1.444	98
100-249	599	86
250-499	113	38
500 u. mehr	55	73
insgesamt	75.488	822

Tabelle 2.1: Unternehmensstruktur 2003 in Deutschland aus [9]

Die Darstellung realer Planungsprozesse für spezifische Projekte ist bedingt durch die flexiblen Organisationsstrukturen, die internen Abläufe und die individuellen Anforderungen und Randbedingungen nur auf einer stark verallgemeinerten Ebene möglich [12]. Aus diesem Grund wird nachfolgend lediglich eine Übersicht über den generellen Ablauf des Entwurfsprozesses gegeben.

Kröplin u.a. beschreiben in [13] den Entwurfsprozess als ein schleifenartiges, iteratives Vorgehen. Die Spirale charakterisiert dabei die Gestaltwerdung des Objektes und seiner Parameter in der Zeit. Diese Vorgehensweise wird auf die Existenz verschiedenartiger Randbedingungen und gleichzeitig zu erfüllender Anforderungen unterschiedlicher Teilbereiche zurückgeführt, die wiederum gegenseitigen Abhängigkeiten unterliegen. Schon zu Beginn werden alle Entwurfsanforderungen in den Entwurfsprozess einbezogen, jedoch mit verschiedener Wichtung. Diese grundsätzliche Beschreibung wird in [14] zu einem

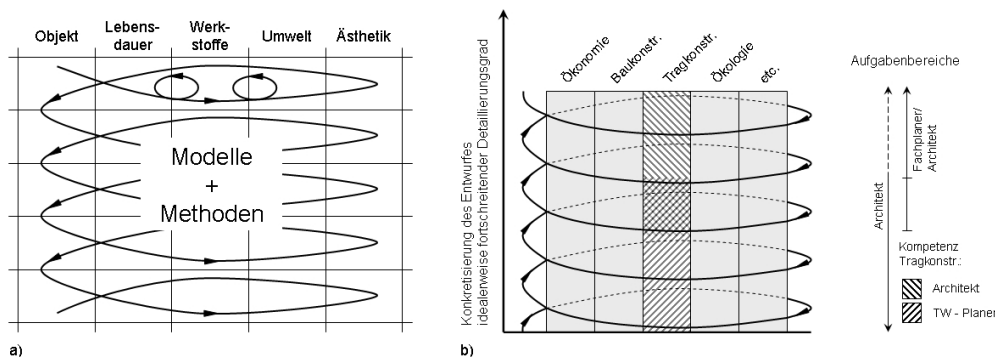


Abbildung 2.5: Entwurfsprozess a) nach Kröplin u.a. [13], b) um Entwurfsphasen erweitertes Modell nach Rottke [14]

Entwurfsphasenmodell erweitert (Abb. 2.5). Die darin dargestellte sequentielle Bearbeitung durch die einzelnen Fachplaner stellt ein idealisiertes Extrem dar. In [15] wird der Entwurfsprozess durch die parallele Verarbeitung in separaten Teilaufgaben, welche gegenseitig in Beziehung zueinander stehen, beschrieben (Abb. 2.6). Beide Vorstellungen, die einer fortlaufenden und die einer vollkom-

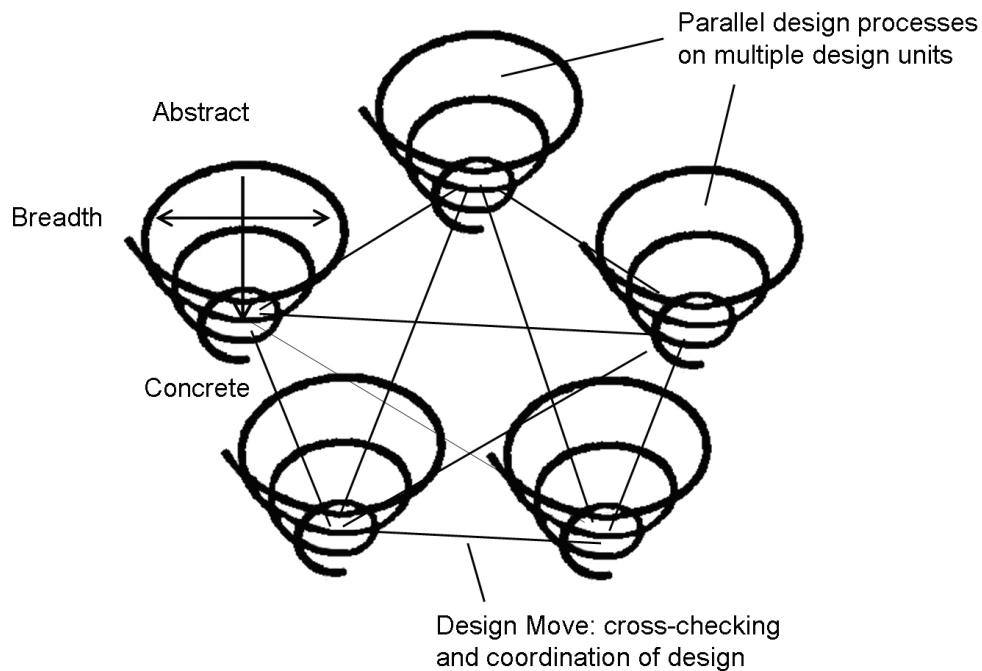


Abbildung 2.6: Darstellung des Entwurfsprozesses aus [15]

men gleichzeitigen Bearbeitung, sind in der Praxis so nur bedingt realisierbar. Es ergeben sich Mischformen der Planung, die sich je nach Erfordernis mehr dem einen oder mehr dem anderen Extrem annähern.

2.2 Spezifik der Verwendung von Stahlkonstruktionen

2.2.1 Generelle Eigenschaften der Stahlbauweise

Unabhängig vom generellen Ablauf ergeben sich für die Planung und den Entwurf von Wohnhäusern in Stahlbauweise charakteristische Randbedingungen entsprechend den spezifischen Eigenschaften des Materials, den verwendeten Bauelementen und den eingesetzten Bauweisen.

Stahl als Werkstoff zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit, Zähigkeit und Steifigkeit aus, was ein geringes Konstruktionsgewicht ermöglicht. Gleichzeitig erfordern die bauphysikalischen Eigenschaften von Stahl besondere Lösungen um allen Anforderungen an den Schall-, Wärme- und Brandschutz gerecht zu

werden.

Stabförmige Bauelemente werden überwiegend aus warmgewalzten, kaltgeformten oder aus Blechen zusammengesetzten Profilen gebildet. Darüber hinaus werden beim Wohnhausbau flächige Bauelemente eingesetzt. Diese bestehen meist aus warmgewalzten, unter Umständen durch Steifen verstärkten oder großflächigen, profilierten, kaltgeformten Blechen. Die flächigen Bauelemente weisen neben der reinen Trag- oftmals auch eine raumbildende Funktion auf.

In Verbindung mit ausgereiften technischen Entwicklungen ermöglicht die Verwendung von Stahl Lösungen, die an die spezifischen Bedürfnisse und Anforderungen aus Planung, Herstellung und Nutzung angepasst sind. Es wird sowohl eine individuelle als auch eine auf vorgefertigten Elementen basierende, stark industriell orientierte Bearbeitung unterstützt. Dementsprechend kann bei der Stahlbauweise auf eine große Formen- und Konstruktionsvielfalt zurückgegriffen werden.

2.2.2 Verwendete konstruktive Grundkonzepte

Die Konstruktion von Wohnhäusern in Stahlbauweise wird hauptsächlich durch die Konzepte des Skelett- und Tafelbaus geprägt. Typische daraus abgeleitete Konstruktionsprinzipien sind die Modul-, Rahmen- und Ständerbauweise.

Wesentliches Merkmal der Rahmenbauweise ist die auf dem Skelettbau basierende Trennung von tragender und raumbildender Funktion und die damit erreichte Unterteilung von Trag-, Hüll- und Trennkonstruktion. Das Tragwerk bilden üblicherweise Rahmen, die aus Walz-, Hohl- oder Leichtbauprofilen zusammengesetzt sind. Durch den transparenten Lastabtrag wird die Ausbildung ähnlicher Randbedingungen für Wand- und Deckensysteme vereinfacht, was gleichzeitig deren industrielle Vorfertigung begünstigt. Neben einer einfachen Montage, die insbesondere durch eine hohe werkstattseitige Vorfertigung ermöglicht wird, bestehen weitere Vorteile in einer filigranen und sehr flexibel einsetzbaren Konstruktion. Die Verwendung weitgespannter Deckenträger erlaubt zudem eine variable, an die jeweiligen Anforderungen angepasste Nutzung der Wohnfläche. Dies gilt insbesondere für Geschossbauten, bei denen sich konstruktiv geringere Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Geschossebenen ergeben (Abb. 2.7) [16, 17, 21].

Mit der Ständerbauweise wird ein anderes Konzept, das des Tafelbaus, verfolgt. Die Konstruktion wird durch gleichzeitig tragende und raumbildende Wand-, Decken- und Dachelemente gebildet. Diese werden typischerweise aus Stahlleichtbauprofilen zusammengesetzt, die durch eine Beplankung stabilisiert werden. Für den Aufbau der Gebäude aus den Grundelementen kommen hauptsächlich zwei Systeme zum Einsatz. Das *Platform*-Konstruktionssystem ist dadurch gekennzeichnet, dass die Wandelemente geschossweise auf den Decken errichtet werden. Beim *Balloon*-Konstruktionssystem hingegen laufen

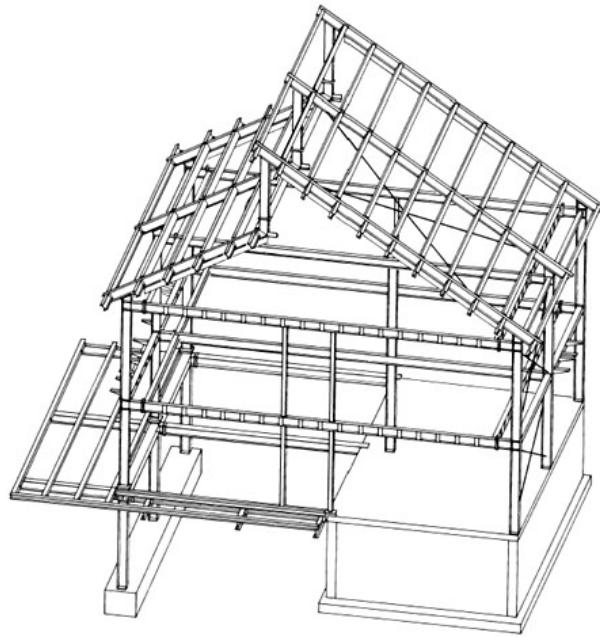


Abbildung 2.7: Doppelhaus in Rudolstadt in Skelettbauweise (Rudolstädter Stahlbau GmbH, Rudolstadt) [23]

die tragenden Stützen und Wandelemente vertikal durch und die Deckenelemente werden eingehängt (Abb. 2.8). Die Vorteile der Ständerbauweise liegen in einem geringen Konstruktionsgewicht und in einer Systematisierung der Konstruktion, die eine industrielle und kostengünstige Fertigung ermöglicht [16, 18, 19, 20].

Durch die Bauelemente werden verschiedene funktionale Aspekte, beispiels-

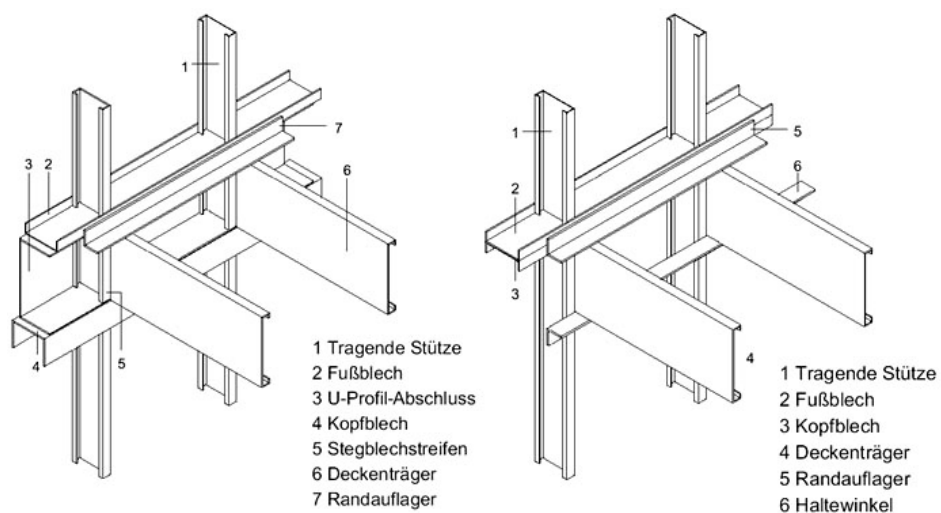


Abbildung 2.8: *Platform*- (links) und *Balloon*-Konstruktionssystem (rechts) [26]

weise der Wärmeschutz, integriert. Dies ermöglicht eine Kosten- und Materialersparnis, die sich jedoch durch die zwischen den funktionalen Aspekten bestehenden Abhängigkeiten in einem erhöhten Planungsaufwand widerspiegelt.

Durch die Kombination beider Bauweisen wird eine weitere Anpassung an die spezifische Anwendung ermöglicht. Solche Mischbauweisen werden unter anderem für die Bildung von Raumzellen eingesetzt. Bei der dabei angewendeten Modulbauweise bildet ein Rahmen die Grundstruktur, während der Raumabschluss auf Grundlage eines Ständerwerks erfolgt (Abb. 2.9) [16, 22].



Abbildung 2.9: Raumeinheiten in Modulbauweise (ALHO Systembau GmbH, Morsbach)

2.2.3 Industrialisierung der Planung und Fertigung

Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten konstruktiven Grundkonzepte sind nicht auf den Einsatz im Bereich individueller Einzellösungen beschränkt, sondern eignen sich in besonderem Maße als Grundlage einer industriell ausgerichteten Planung und Fertigung. Maßgebliche Eigenschaften bestehen in

- geringem Gewicht,
- großen möglichen Spannweiten,
- Elementierbarkeit der Konstruktion.

Dementsprechend ergeben sich Möglichkeiten zur Realisierung günstiger Transporteigenschaften sowie der Definition ähnlicher Randbedingungen für Bauelemente und Bauelementegruppen. Die daraus resultierenden Vorteile bezüglich einer Industrialisierung liegen in der Unterstützung einer Systematisierung von Entwurfslösungen und der Vorfertigung von Konstruktionseinheiten.

Das Ziel einer strukturierten Aufbereitung von Entwurfslösungen ist, die durch den Planer festzulegenden Entwurfparameter basierend auf einer Systematisierung auf eine geringe Anzahl charakteristischer Größen zu reduzieren. Ein Beispiel dafür ist durch die typisierten Verbindungen des deutschen Ausschusses für Stahlbau [24, 25] gegeben.

Die Vielfalt konstruktiver Varianten von Wohnhäusern in Stahlbauweise stellt hohe Anforderungen an die Definition zweckmäßiger Randbedingungen für Planung und Ausführung. Diese müssen ein Funktionieren der Lösung innerhalb vorgegebener Grenzen sicherstellen, ohne dass dafür eine detaillierte Betrachtung aller Einflussgrößen notwendig wird. Dabei ist üblicherweise eine im Vergleich zur individuellen Einzellösung detailliertere Betrachtung erforderlich, bei der einer integrativen Bearbeitung und Optimierung eine größere Bedeutung zukommt. Ein Mehraufwand bei der Entwicklung ist unumgänglich.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil von Stahlkonstruktionen besteht in der Möglichkeit der Vorfertigung von Bauelementen. Dies ist im Allgemeinen mit kürzeren Bauzeiten, einer kostengünstigeren und qualitativ höherwertigeren Fertigung verbunden. Über die werkstattseitige Montage individueller Einzellösungen hinaus ermöglicht eine industriell ausgerichtete Fertigung eine noch konsequentere Nutzung dieser Vorzüge.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvolle Umsetzung ist das Vorhandensein großer Stückzahlen gleichartiger Elemente. Um eine dementsprechende Fertigung zu ermöglichen, ist

- die Definition zweckmäßiger Baugruppen, die unkompliziert in Vorfertigung, Transport und Verarbeitung sind und
- eine Reduktion der Variantenvielfalt auf wenige standardisierte Grundelemente

erforderlich. Dies wird beispielsweise an der Modulbauweise deutlich. Im Vergleich zu anderen Bauweisen zeichnet sich diese durch einen sehr hohen Vorfertigungsgrad aus. Dieser beträgt in Einzelfällen bis zu 95% und wird durch die Bildung weitestgehend eigenständiger und komplett ausgestatteter modularer Einheiten erreicht (Abb. 2.10). Durch die geringfügigen Anpassungsmöglichkeiten sind die zum Teil erheblichen Kosteneinsparungen auf einen sehr kleinen Anwendungsbereich beschränkt, der sich durch gleichartige Randbedingungen und entsprechende Stückzahlen auszeichnet.

Im Bereich der modularen Vorfertigung von Wohnhäusern nimmt Japan mit Herstellern wie *Sekisui* und *Toyota Homes* eine weltweite Ausnahmestellung ein. Die Stückzahlen der dort industriell, vergleichbar mit dem Automobilbau, gefertigten Module liegen in der Größenordnung von ca. 150.000 Einheiten jährlich (Abb. 2.11). Auch in Deutschland werden entsprechende Ansätze durch verschiedene Forschungs- und Entwicklungsvorhaben verfolgt, zum Beispiel *BAUHAUS2000* [27] oder *Mehrgenerationenhaus Menden* [28]. Diese sollen insbesondere dazu beitragen, die Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit der Stahlbauweisen im Wohnungsbau, deren Marktanteil zur Zeit unter 1% [16] liegt, zu erhöhen. Nicht zuletzt wegen der geringen Stückzahlen (Tabelle 2.2) ist derzeit eine Investition in entsprechende Fertigungsanlagen, die durch die

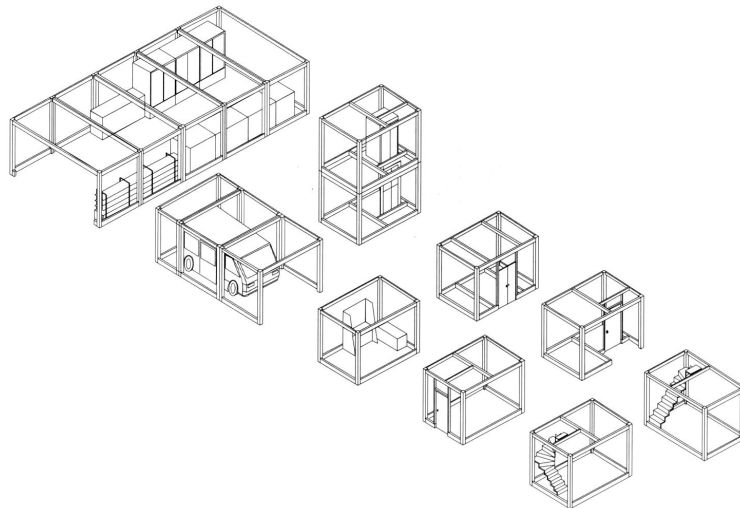


Abbildung 2.10: Bildung modularer Grundelemente [26]

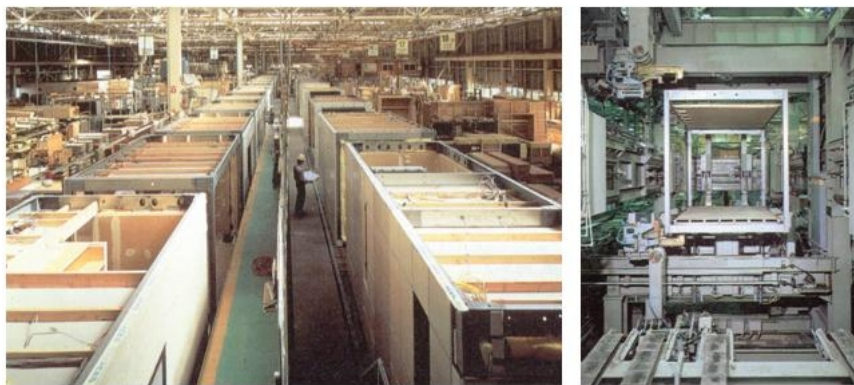


Abbildung 2.11: Industrielle Fertigung von Raummodulen (Sekisui Heim, Japan)

im Vergleich zu anderen Bauweisen geringeren Stückkosten getragen werden müsste, auf dem europäischen Markt mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko verbunden [29].

Gebäudeart	D-West (inkl. Berlin-West)		D-Ost (inkl. Berlin-Ost)	
	2004	04/03 in %	2004	04/03 in %
Einfamilienhäuser	110.287	-13,3	24.452	-13,5
Zweifamilienhäuser	28.314	-13,8	3.804	-13,9
Mehrfamilienhäuser	63.396	-0,3	5.061	-19,0
Summe	201.997		33.317	

Tabelle 2.2: Baugenehmigungen für den Neubau von Wohnhäusern in Deutschland aus [9]

Die Erschließung eines breiteren Anwendungsbereiches für die industrielle Fertigung innerhalb des Wohnhausbaus in Stahlbauweise erfordert eine flexibel anpassbare Konstruktion, deren Basis aus nur wenigen Grundelementen besteht. Nur so können die Vorteile einer industriellen Vorfertigung genutzt werden. Weitere Anforderungen bestehen nach *Lehner* [30] in der Gewährleistung großer Gestaltungsfreiheit, leichtem Umbau und der Integration der verschiedenen funktionalen Bauwerksaspekte. Dies setzt planerisch aufbereitete Entwurfslösungen zur Reduktion der Variantenvielfalt voraus. Darüber hinaus ist eine Abstimmung entsprechend den Möglichkeiten der Vorfertigung typisierter Elemente erforderlich. Zur Umsetzung dieser Aufgabe muss ein standardisiertes und elementiertes Grundkonzept erstellt werden, durch das ein Bausystem beschrieben wird. Dieses beinhaltet neben den Bauteilen und deren Abmessungen die Anschluss- und Verbindungsstrukturen. Durch die einzelnen Hersteller werden verschiedene, im Allgemeinen untereinander nicht kompatible Systeme angeboten. Eine Verringerung der Varianten- und Konstruktionsvielfalt wird über die Gesamtheit der Bauwerke betrachtet folglich nicht erreicht. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken, besteht in der Entwicklung offener Systeme, die über die Herstellergrenzen hinweg miteinander kombinierbar sind. Ein solches System ist derzeit jedoch noch nicht verfügbar.

Generell ist eine industriell ausgerichtete Planung und Fertigung mit einer Reduktion der Variantenvielfalt in Bezug auf die Funktion und Ausführung der Konstruktionselemente verbunden. Dabei zeigt sich, dass der Umfang einer Typisierung und die damit verbundene Spezialisierung baulicher Lösungen durch wirtschaftliche Aspekte begrenzt wird. Unabhängig davon wird durch eine Vereinheitlichung die Anzahl verschiedenartiger Elemente und die erforderliche Detaillierung verringert, was die fachliche Repräsentation erleichtert.

Darüber hinaus ist mit einer Industrialisierung eine Aufteilung des Entwurfsprozesses in zwei Bereiche,

- die Entwicklung und
- die Anwendung

typisierter Komponenten, verbunden. Durch die Vorwegnahme komplexer Entwurfsentscheidungen in der Entwicklung wird der nachfolgende Planungsaufwand stark reduziert und die Anwendung durch den Planer vereinfacht. Die Möglichkeiten einer spezifischen Anpassung bzw. Einflussnahme auf die Gestaltung konstruktiver Lösungen werden dabei durch die existierenden Anwendungsgrenzen stark eingeschränkt.

Durch die Entkopplung vom allgemeinen Planungsprozess eines Bauwerks ergeben sich für die Entwicklung typisierter Komponenten veränderte Randbedingungen. Die Bearbeitung der Elemente erfolgt üblicherweise firmenintern. Somit entfällt der bei der allgemeinen Bauwerksbearbeitung übliche Wechsel der Planungsbeteiligten, was bedingt durch die so erreichte Kontinuität in der Zusammenarbeit die Planung erleichtert [31]. Die Unabhängigkeit vom spezifischen Bauwerk bietet darüber hinaus bessere Möglichkeiten einer Optimierung der Produkteigenschaften und der Fertigung auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungen.

Kapitel 3

Analyse von Fachmodellen

“Der geschulte Mann erstrebt in jedem Fachgebiet keine größere Genauigkeit, als es das Wesen des Gegenstandes vernünftigerweise zulässt.“

(Aristoteles)

3.1 Grundlagen

Die Grundlage der im vorangegangenen Kapitel erläuterten Planung bilden Fachmodelle. Diesen kommt die Aufgabe zu, spezifische Eigenschaften eines Bauwerks und seiner Umgebung in geeigneter Art und Weise zu repräsentieren.

Der Begriff des Fachmodells wird im Bauwesen üblicherweise unabhängig davon verwendet, ob es sich um eine allgemeine fachliche Darstellung oder die spezifische Repräsentation der Bauwerkseigenschaften eines konkreten Bauwerks handelt. Für die weitere Bearbeitung ist an dieser Stelle eine begriffliche Unterscheidung sinnvoll. Dabei wird das allgemeine, die fachlichen Modellvorstellungen¹ und Modellierungskonzepte² beschreibende Modell als Fachmodell bezeichnet. Dieses bildet die Grundlage zur Abbildung fachspezifischer Modellinhalte, also der konkreten Ausprägung eines Fachmodells. Die Fachmodelle beschreiben somit die wesentlichen Grundelemente und fachlichen Zusammenhänge für die Repräsentation der Bauwerkseigenschaften. Der Begriff Modell wird als Oberbegriff für die Bedeutungen Fachmodell und dessen konkrete Ausprägung verwendet.

Die eingesetzten Modelle sollen

- den Fachplaner beim Erlangen eines allgemeinen Verständnisses über das Bauwerksverhalten und bei der Erklärung der Bauwerksreaktionen unterstützen,
- den damit verbunden Erkenntniszuwachs fördern,

¹Modellvorstellung: Fachspezifische Annahme, die der Beschreibung von Modellinhalten zugrunde liegt.

²Modellierungskonzept: Beschreibt ein fachspezifisches Grundprinzip bzw. eine Vorlage zur Abbildung von Bauwerkseigenschaften im Rahmen der Modellbildung.

- zur Prognose der Eigenschaften eines Bauwerks im gesamten Lebenszyklus dienen.

Die Beschreibung eines Bauwerks und seiner Umwelt erfolgt aus Gründen der fachlichen Komplexität durch unterschiedliche Fachmodelle. Diese einzelne Bauwerksaspekte repräsentierenden Teilfachmodelle sind auf einen spezifischen Anwendungsbereich und Verwendungszweck, beispielsweise die Abbildung von Lasten, Materialien oder Tragwerkseigenschaften, zugeschnitten. Weitere Unterschiede in den Teilfachmodellen können darüber hinaus im Umfang der abgebildeten Bauwerkseigenschaften und den repräsentierten Bauwerksteilen bestehen.

Entsprechend dem spezifischen Verwendungszweck werden an die Fachmodelle unterschiedliche Anforderungen bezüglich der benötigten Aussagen und erforderlichen Genauigkeiten gestellt. Damit verbunden sind unterschiedliche fachliche Konzepte, die sich durch verschiedene Strukturierungen, Detaillierungs- und Formalisierungsgrade auszeichnen.

Die Analyse der Fachmodelle, die die Basis der Repräsentation von Bauwerkeigenschaften darstellen, ist als Ausgangspunkt für die Entwicklung geeigneter Datenstrukturen von grundlegender Bedeutung. Weitere Randbedingungen für die technische Umsetzung einer umfassenden Abbildung der Bauwerkseigenschaften resultieren aus dem Umgang mit den Fachmodellen und deren Anwendung zur Beschreibung von konkreten Eigenschaften eines spezifischen Bauwerks. Dabei ist insbesondere die Art und Weise der Zuordnung verschiedener fachlicher Aspekte auf abstrakter und konkreter Modellebene³ von Interesse.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Eigenschaften von Fachmodellen und deren Anwendung allgemein und spezifisch in Bezug auf die Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise erläutert. Darauf aufbauend wird am Ende des Kapitels auf die Eigenschaften von Beziehungen zwischen Fachmodellen eingegangen.

3.2 Generelle Eigenschaften und Anwendung

Nach [32] lassen sich Modelle des konstruktiven Ingenieurbaus im Wesentlichen zwei Gruppen zuordnen. Die erste Gruppe, die der *Forschungsmodelle*, umfasst Modelle, die dem Erhalt eines grundlegenden Verständnisses dienen. Dabei erfordert das Finden und die Verifikation von Gesetzmäßigkeiten eine möglichst realitätsnahe Abbildung. Die eingesetzten Fachmodelle zeichnen sich durch

- eine weitgehende Übereinstimmung der auf Grundlage des Modells erzielten Aussagen mit den Beobachtungen und

³Die Fachmodelle beschreiben die abstrakte, die fachlichen Inhalte die konkrete Modellebene.

- einen im Allgemeinen bedingt durch die Spezialisierung sehr engen Anwendungsbereich

aus. Modelle deren Anwendungsgebiet schwerpunktmäßig in der praktischen Verwendung zur Vorhersage von Bauwerkseigenschaften liegt, lassen sich in einer zweiten Gruppe, den *technischen Modellen*⁴, zusammenfassen. Deren Hauptmerkmale bestehen in der

- Übersichtlichkeit,
- einfachen Handhabbarkeit und
- im Vergleich zur ersten Gruppe geringen Komplexität.

Mit diesen Modellen ist ein breiter Anwendungsbereich unter Betrachtung einzelner signifikanter Phänomene abzudecken. Die Beschreibung erfolgt auf der Grundlage einer geringen Anzahl wesentlicher Parameter. Eine weitreichende Übereinstimmung mit der Realität ist von untergeordneter Bedeutung. Aus den weitgehenden Vereinfachungen resultieren Unsicherheiten bezüglich sekundärer Effekte, die durch konstruktive Erfahrung abgedeckt werden müssen. Weitere Vereinfachungen ergeben sich aus der idealisierten Abbildung des Tragwerks, der Einwirkungen und Grenzfälle sowie durch das Ausnutzen von Streubereichen.

Die Klassifikation in Ingenieur- und Forschungsmodelle lässt sich grundsätzlich auch auf andere ingenieurtechnisch ausgerichtete Bereiche im Bauwesen übertragen. Entsprechend den konkreten Anforderungen an die Modellierung ergibt sich in der praktischen Anwendung ein fließender Übergang zwischen beiden Modellgruppen.

Die Modellbildung, die die Wahl eines Fachmodells und die konkrete Modellierung umfasst, unterliegt fachlichen Anforderungen und technischen Randbedingungen. Die Anforderungen bestehen aus fachlicher Sicht im Wesentlichen in der Handhabbarkeit, Robustheit und Sensitivität der Modelle sowie in der angestrebten Qualität der auf der Grundlage der Modelle ermittelten Aussagen. Die Qualität der Aussagen wird durch deren Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit charakterisiert. Die technischen Randbedingungen werden überwiegend durch die verfügbare Rechenkapazität und die vorhandenen Werkzeuge bestimmt. Darüber hinaus bestehen ökonomische Zwänge, die die Art der Modellabbildung beeinflussen. Folglich wird die Art der Modellabbildung durch ein Abwägen von Aufwand und Nutzen bestimmt. Diesen Prozess beschreibt *Schlaich* [34] wie folgt: „Das Finden oder Wählen des für den jeweiligen Zweck oder mehrere Zwecke gleichzeitig geeigneten Modells ist ein rational-intuitiver Abschnitt innerhalb des ganzen Planungsprozesses, der hinsichtlich seiner Wirkung und seines Charakters dem des Entwerfens vergleichbar ist.“

⁴Die technischen Modelle werden auch als Ingenieur- oder Praxismodelle bezeichnet.

Auf Grund des Prognose- und Prototypencharakters der Planungsaufgaben bestehen viele Unwägbarkeiten bezüglich der Modelle im Bauwesen, was für den baupraktischen Bereich üblicherweise hohe Abstraktionsgrade zulässt. Daraus resultiert eine Arbeitsweise die *Dewitz* und *Tönsing* in [35] wie folgt zusammenfassen: „Oft ist es am effektivsten, mit einfachen Überschlagsrechnungen zu überschaubaren und nachvollziehbaren Ergebnissen zu kommen ...“.

Die sich während der Planung ändernden Randbedingungen, wie Detaillierung, verfügbare Informationen und konkretisierte Zielvorgaben, dokumentieren sich in den eingesetzten Fachmodellen. Dies zeigt sich neben einer unterschiedlichen Strukturierung und voneinander abweichenden Komplexität in der Art der Modellvorstellungen und Modellierungskonzepte. Genügen beispielsweise zu Beginn der Bearbeitung noch einfache Skizzen, die grundlegende Ideen festhalten, erfordert die weitere Bearbeitung eine detaillierte Abbildung der Eigenschaften einzelner Bauteile.

Resultierend aus dem hohen Grad der Spezialisierung im konstruktiven Ingenieurbau (vgl. Abschn. 2.1.3) ergeben sich aus dem Anwendungsgebiet weitere, zusätzlich zu denen des Planungsprozesses bestehende Unterschiede in den Eigenschaften der Fachmodelle. Beispielsweise wird das Bauwerk üblicherweise durch den Architekten in weiten Teilen der Planung raumorientiert (siehe zum Beispiel [36, 57]), durch den Tragwerksplaner nach Bauteilen (vgl. [5, 35]) und durch Bauwirtschaftler in Kostengruppen (zum Beispiel nach DIN 276 [37]) untergliedert. Eine detaillierte Darstellung der Eigenschaften ausgewählter Fachmodelle erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels.

Die Bearbeitung eines fachlichen Aspekts einer Planungsaufgabe durch den Ingenieur erfolgt in der Regel unter Nutzung verschiedener Modelle. Dabei werden sowohl Fachmodelle unterschiedlicher Abstraktionsgrade eingesetzt als auch die auf einem Fachmodell basierende Modellierung variiert. Dies erfolgt zum Einen zur Verifikation, um Unsicherheiten der Modellbildung zu verringern, wie sie unter anderem aus Vereinfachungen resultieren. Andererseits wird damit das Ziel verfolgt, die Komplexität der eingesetzten Modelle zu vermindern, um den Erstellungsaufwand zu reduzieren und die Handhabbarkeit zu erhöhen. Die Genauigkeit der Modelle wird gezielt durch auf relevante Teilbereiche beschränkte, detailliertere Modellierungen verbessert. Die sich aus der technischen Entwicklung eröffnenden Möglichkeiten des Einsatzes immer aufwändigerer Fachmodelle und Modellierungen sind gleichzeitig mit der Zunahme an fachlicher Komplexität der Modelle verbunden. Daraus resultieren hohe Anforderungen an das fachliche Verständnis der Planer.

Unterweger sieht in seiner Arbeit zur „Leistungsfähigkeit einfacher Stabmodelle“ [38] bezogen auf den Brückenbau einen gestiegenen Druck, zunehmend komplexe Modelle auf Basis der Methode der Finiten Elemente aus dem wissenschaftlichen Umfeld direkt für die globale Berechnung von Systemen zu übernehmen. Neben *Duddeck* [2] stellt auch er den Nutzen unter den gegebene

nen Randbedingungen und dem erheblich höheren Aufwand in Frage. Beide sehen jedoch den wesentlichen Kritikpunkt dieser Entwicklung in der zunehmenden Inselbildung aus der isolierten Betrachtung spezieller Probleme der Forschung, die den Anforderungen der Praxis an die Bewertung des Gesamtsystems nicht gerecht werden.⁵

Neben der Wahl der für die Aufgabe angemessenen Fachmodelle obliegt es dem Fachplaner, die zwischen den Teilmodellen bestehenden gegenseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in geeigneter Art und Weise zu berücksichtigen. Die Beurteilung des Bauwerks als umfassendes Ganzes erfordert das Zusammenführen verschiedener, aus Teilmodellen bestehender Einzelkomponenten entsprechend spezifischer Anforderungen. Der Modellsynthese, als zugleich komplexem und anspruchsvollem Teil der Modellbildung, kommt in der praktischen Anwendung oftmals eine zu geringe Beachtung zu (vgl. Abschn. 1.1). So führt beispielsweise die Verbindung stark vereinfachter und hoch komplexer Modelle ebenso zu wenig zuverlässigen Aussagen wie eine zu stark abstrahierende, losgelöste Betrachtung der einzelnen Teilaspekte. In diesem Zusammenhang ist darüber hinaus zu beachten, dass die Qualität der aus einem Modell erhaltenen Aussagen unter anderem durch die verfügbaren Eingangsdaten, Streubreiten der Eingangsparameter und Unwägbarkeiten beeinflusst wird und nicht beliebig durch die Verwendung komplexerer Modelle steigerbar ist.

Die erfolgte allgemeine Darstellung der Eigenschaften von Fachmodellen soll im nachfolgenden Abschnitt für die spezifische Anwendung zur Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise konkretisiert werden.

3.3 Eigenschaften von Fachmodellen für die Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise

3.3.1 Einführung

Im Vordergrund des Interesses stehen in dieser Arbeit Untersuchungen zu Fachmodellen aus dem Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus. Darüber hinaus existieren weitere für die Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise relevante Bereiche. Die zugehörigen Fachmodelle, beispielsweise zur Bearbeitung architektonischer und bauwirtschaftlicher Fragestellungen, werden an dieser Stelle nicht detailliert betrachtet. Die in diesem Kapitel getroffenen Aussagen betreffen fachliche Modellvorstellungen und Modellierungskonzepte für Modelle zum Zweck der Bemessung, der Berechnung basierend auf numerischen Methoden und der Beschreibung des Bauwerks bezüglich der architektonischen, konstruktiven, mechanischen und wärmetechnischen Eigenschaften.

Das Ziel der nachfolgenden Betrachtungen liegt nicht in der ausführlichen Dar-

⁵vgl. *islands of engineering* S. 11

stellung der im Bauwesen eingesetzten Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen. Dies wäre auf Grund der Vielzahl und der fachlichen Komplexität der verfügbaren Fachmodelle im Rahmen dieser Arbeit schlicht nicht möglich. Vielmehr sollen grundsätzliche Eigenschaften als Anforderungen für eine datentechnische Abbildung dargestellt werden.

3.3.2 Abbildung architektonischer Eigenschaften

An dieser Stelle soll entsprechend der Schwerpunktsetzung nur ein Überblick über die Abbildung architektonischer Eigenschaften gegeben werden. Die verschiedenen Aspekte architektonischer Abbildungen werden in diesem Abschnitt zusammengefasst betrachtet. Im Gegensatz dazu werden die Fachmodelle des konstruktiven Ingenieurbaus in den nachfolgenden Abschnitten separat dargestellt.

Die Beschreibung architektonischer Eigenschaften dient vorwiegend der Beurteilung ästhetischer Wirkungen des Bauwerksentwurfs. Die Fachmodelle repräsentieren daher im Wesentlichen Modellvorstellungen und Modellierungskonzepte zur Abbildung geometrischer Eigenschaften, die die Formen und Proportionen beschreiben. Darüber hinaus sind verschiedene funktionale bzw. aus der Nutzung bestimmte Aspekte, beispielsweise die Raumaufteilung oder Belichtung, Gegenstand architektonischer Überlegungen.

Geprägt durch die Unterstützung einer freien und kreativen Arbeitsweise zeichnen sich die eingesetzten Modelle durch einen vergleichsweise geringen Grad an Strukturierung und Formalisierung sowie eine unscharfe, oftmals nur qualitative Beschreibung der Bauwerkseigenschaften aus.

In Bezug auf die geometrische und funktionale Abbildung bestehen große Unterschiede in Art und Umfang der Beschreibung von Bauwerkseigenschaften.

Die zum Zweck der Abbildung gestalterischer Eigenschaften eingesetzten Fachmodelle umfassen hauptsächlich Konzepte zur Beschreibung einer gering detailierten Bauwerksgeometrie. Dabei erfolgt eine fachspezifische Strukturierung entsprechend stark verallgemeinerter funktionaler Aspekte, beispielsweise in Bauwerkshülle und -kern.

Raumorientierte Strukturen bilden die Grundlage einer Repräsentation nutzungsspezifischer Aspekte. Die zu Planungsbeginn unsicheren Entwurfsrandbedingungen stehen im Zusammenhang mit häufigen Änderungen und Anpassungen der Modellinhalte. Entsprechend dem geringen Konkretisierungsgrad und um den Bearbeitungsaufwand gering zu halten, werden zweidimensionale, stark abstrahierende Abbildungen eingesetzt, die auf die Grundriss- bzw. Ansichtsebene reduziert werden [36, 39, 40]. Die Modellvorstellungen und Modellierungskonzepte beschränken sich auf die Repräsentation weniger grundlegender Eigenschaften der Räume, wie deren Lage, Zugang und Funktion. In

Verbindung mit der Konkretisierung des Bauwerksentwurfs werden aufwändigere Modellierungskonzepte eingesetzt, die zum Beispiel die Beschreibung des Raumvolumens ermöglichen.

Neben an Raumstrukturen ausgerichteten Modellierungskonzepten werden zur Abbildung architektonischer Eigenschaften bauteilorientierte Konzepte verwendet. Mit der Beschreibung des Bauwerks durch Bauteile⁶ erfolgt eine Detaillierung der Repräsentation der allgemeinen Bauwerksgeometrie. Die in den Modellen beschriebenen Bauteileigenschaften entsprechen dabei einer stark verallgemeinerten konstruktiven Repräsentation des Bauwerks. Die klassische Arbeitsweise des Architekten stützt sich traditionell auf eine zweidimensionale Darstellung, während gegenwärtig zunehmend dreidimensionale bauteilorientierte Bauwerksmodelle die Planung bestimmen. Üblicherweise wird eine Zuordnung der Bauteile zu funktionalen Einheiten wie Raum, Etage und Gebäude vorgenommen.

Die Repräsentation architektonischer Eigenschaften eines Bauwerks erfolgt entsprechend dem konkreten Anwendungszweck auf der Grundlage unterschiedlicher Fachmodelle. Die gering strukturierten und formalisierten Fachmodelle ermöglichen eine einfache und schnelle Anpassung an den fachlichen Kontext. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Flexibilität der datentechnischen Repräsentation architektonischer Eigenschaften.

3.3.3 Abbildung von Tragsystemen

Das Tragwerk wird aus den am Lastabtrag beteiligten Konstruktionselementen⁷ eines Bauwerks gebildet. Seine Funktion besteht in der Aufnahme und Ableitung der auf die Konstruktion einwirkenden Lasten. Die Elemente des Tragwerks beschreiben zusammen mit der sie umgebenden Umwelt und den dazwischen bestehenden Wechselwirkungen das Tragsystem [41, 42, 43].

Das Tragsystem wird durch das Tragwerksmodell unter Verwendung der den spezifischen Anforderungen entsprechenden Abstraktionen repräsentiert. Das Tragwerksmodell umfasst die Einwirkungen, die mechanischen Randbedingungen, die Tragelemente und deren Kopplungen.

Die durch die Fachmodelle abgebildeten Eigenschaften des Tragsystems bilden die Basis zur Beurteilung des Tragverhaltens des Bauwerks. Der technischen Ausrichtung des Anwendungsgebietes folgend zeichnen sich die Modelle gegenüber denen zur Repräsentation architektonischer Eigenschaften durch eine stärkere Strukturierung und einen höheren Formalisierungsgrad aus.

⁶Der Begriff Bauteil wird als allgemeine Bezeichnung für einen physisch unterscheidbaren Teil des Bauwerks verwendet, der entsprechend fachlicher Abstraktionen nicht weiter aufgeteilt wird.

⁷Unter dem Begriff Konstruktionselemente werden spezifische, die Konstruktion beschreibende Bauelemente, die unter Umständen aus mehreren Bauteilen bestehen, zusammengefasst.

Die Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen zur Abbildung der Tragwerkseigenschaften, die durch die Fachmodelle beschrieben werden, unterscheiden sich im Wesentlichen in der Strukturierung der Konstruktion sowie in der Art und Weise der Beschreibung geometrischer und mechanischer Eigenschaften.

Im Stahlbau ist eine räumliche Modellierung des Tragwerks weiter verbreitet und besitzt eine größere Akzeptanz als bei anderen Bauweisen. Allerdings führt der mit einer dreidimensionalen Abbildung verbundene Umfang schnell zu unübersichtlichen und unhandlichen Modellen. Darüber hinaus erfordert die Erstellung und Auswertung einen höheren Aufwand. Eine Modellierung des Gesamtsystems ist daher, abhängig von der durch die Software bereitgestellten Unterstützung des Planers, in der Regel nur für kleine Tragwerke zweckmäßig. In der praktischen Anwendung ist es deshalb üblich, das Gesamttragwerk auf der Grundlage mehrerer aus dem Gesamtkontext herausgelöster Teiltragwerke zu betrachten.

Die Beschreibung der Eigenschaften von Tragelementen wird auf allgemein gültige Grundelemente⁸, wie Balken, Zugstab oder Schale, zurückgeführt. Diese allgemein gültigen generischen Elemente werden auch für die Modellierung der Tragwerkseigenschaften von Wohnhäusern in Stahlbauweise eingesetzt.

Die Unterteilung des Tragwerks in Tragelemente erfolgt an den physischen Grenzen eines Konstruktionselements. Eine Ausnahme bilden kontinuierliche Verbindungen, wie geschweißte Trägerstöße gleicher Querschnitte. Diese bleiben üblicherweise unberücksichtigt. In Abhängigkeit vom Abstraktionsgrad werden Bauteile (zum Beispiel Bleche eines Schweißquerschnitts) über Bauelemente (beispielsweise eine Gitterstütze) bis hin zu Teilsystemen zu einem Tragelement zusammengefasst modelliert (Abb. 3.1).

Das Tragwerk wird bei der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Rahmenbauweise unter Verwendung von Konstruktionselementen aus Walz-, Hohl- oder Leichtbauprofilen gebildet. Diese weisen in der Regel eine im Vergleich zu den Querschnittsabmessungen große Länge auf. Daher wird das Tragverhalten durch Stabelemente im Allgemeinen ausreichend genau beschrieben. Die Abbildung des Konstruktionselements erfolgt durch eine Reduktion auf den Querschnitt und die durch die Schwerelinie gebildete Achse.

Die mechanische Kopplung eindimensionaler Tragelemente wird üblicherweise unter weitgehenden Vereinfachungen als *biegesteif* oder *gelenkig* abgebildet. Der Einsatz offener dünnwandiger Querschnitte erfordert darüber hinaus die Berücksichtigung der Querschnittsverwölbungen, die durch die anschließenden Bauteile und die Anschlusskonstruktion mehr oder weniger stark behindert werden. Für einfache Berechnungen wird von einer Gabellagerung ausgegangen. Die Kopplung erfolgt im Schnittpunkt der Elementachsen. Eventuell vor-

⁸Nach [5] werden diese als *generic engineering elements* bezeichnet.

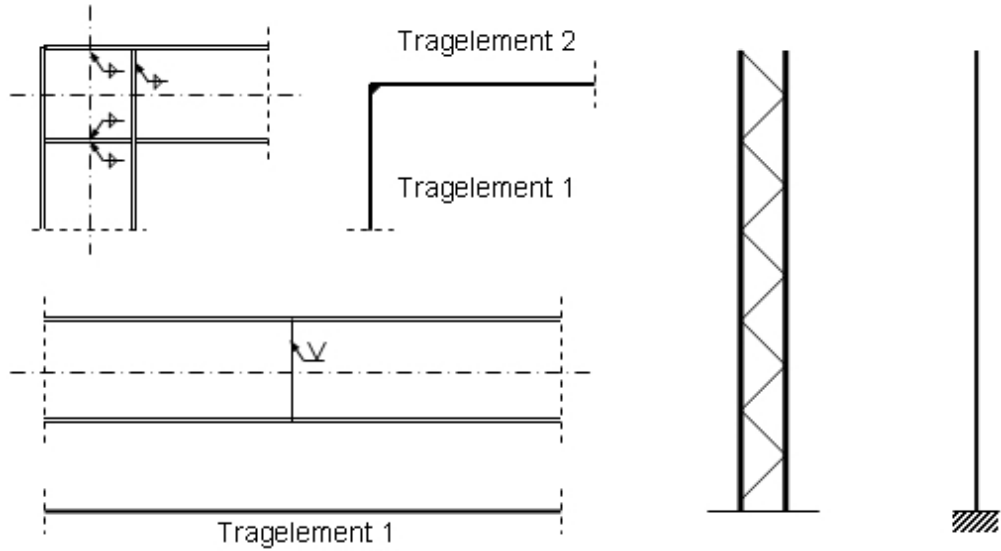


Abbildung 3.1: Unterteilung in Tragelemente, kontinuierliche Verbindungen (links) und Zusammenfassen mehrerer Konstruktionselemente (rechts)

handene Aussermittigkeiten, beispielsweise aus den Anschlusskonstruktionen, werden üblicherweise vernachlässigt.

Eine Möglichkeit, diese stark vereinfachenden Annahmen zu ersetzen, besteht in der genaueren Erfassung des Verformungsverhaltens der Anschlusskonstruktionen. Dies kann beispielsweise für Stirnplattenanschlüsse nach *Eurocode3* [44] erfolgen (Abb. 3.2). Eine wesentliche Voraussetzung sind dabei entsprechend detaillierte Kenntnisse über die konstruktive Ausführung. Nicht unumstritten ist der Nutzen für die praktische Anwendung, was nicht zuletzt aus dem damit verbundenen erhöhten Aufwand resultiert.

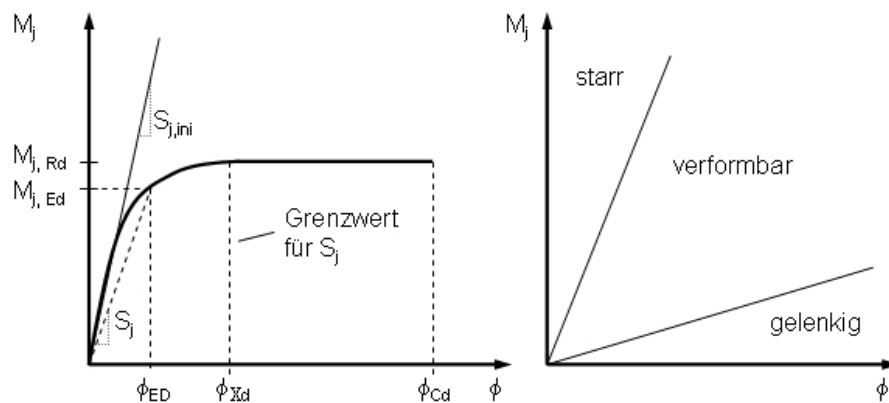


Abbildung 3.2: Momentenrotationskurve und Klassifikation der Knotennachgiebigkeit nach *Eurocode3* [44]

Weitere Vereinfachungen betreffen die an die Rahmen angeschlossenen Tragelemente, wie Wandriegel, Pfetten oder Deckenträger. Dabei werden die zwischen den Schwereachsen der Konstruktionselemente bestehenden konstruktionsbedingten Exzentrizitäten vernachlässigt und idealisierend in einer Ebene liegend angenommen (Abb. 3.3). Detailliertere Betrachtungen, beispielsweise zur Erfassung des Einflusses eines Wandriegels auf das Stabilitätsverhalten einer Rahmenstütze, erfordern dagegen eine genaue Beschreibung der Lage der anschließenden Konstruktionselemente.

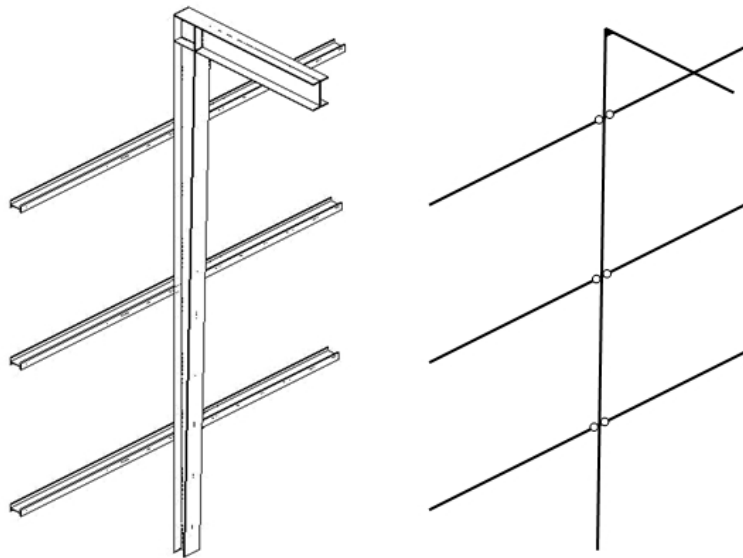


Abbildung 3.3: Konstruktion und mögliche Tragwerksidealisierung

Das Tragverhalten wird durch Stabwerksmodelle für die meisten Untersuchungen genau genug erfasst. Für umfassendere Betrachtungen, insbesondere konstruktiver Details, kommen Modellierungen auf der Grundlage von Platten, Scheiben und Schalen zum Einsatz. Die vom Gesamtmodell losgelöste Betrachtung komplexer Modelle konstruktiver Details wird dabei zunehmend durch die Betrachtung in einer mehrskaligen, zum Beispiel aus Stab- und Schalenmodellierungen bestehenden, Repräsentation abgelöst (siehe z.B. [45]).

Im Unterschied zur Rahmenbauweise erfolgt der Lastabtrag bei der Ständerbauweise über die zusammen aus den Ständern und der Beplankung gebildeten flächenhaften Elemente. Die üblicherweise aus dünnwandigen kaltgewalzten Profilen bestehenden Ständer werden ein- bzw. beidseitig beplankt ausgeführt. Die so gebildeten, als Tafel bezeichneten (vgl. Abschn. 2.2.2) Bauelemente werden als eigenständige Einheiten betrachtet. Deren Modellierung wird entsprechend der Belastung im globalen Tragsystem als Platte oder Scheibe realisiert.

Die Abbildung der mechanischen Eigenschaften der Wand-, Decken- und Dachelemente erfolgt in der Regel getrennt vom globalen System. Die Tragwirkung senkrecht zur Tafelebene kann dabei vereinfachend nur über das kaltgewalz-

te Profil oder abhängig von den fachlichen Anforderungen unter Mitwirkung der Beplankung als Balken beschrieben werden. In Tafelebene werden nach [46] die Ständer als Fachwerkelemente und die Beplankung als Scheibe abgebildet. Die Stabilitätsuntersuchungen für die Ständer erfolgen herausgelöst am Modell eines elastisch gelagerten Balkens. Da im Allgemeinen nicht von einer schubsteifen Verbindung ausgegangen werden kann, ist die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zu berücksichtigen. Auch hier sind analog zur Rahmenbauweise genauere Untersuchungen auf der Grundlage von Schalenmodellen möglich.

Neben den Eigenschaften der Tragelemente sind die durch das Tragwerk aufzunehmenden Lasten zu beschreiben. Dabei besteht eine breite Streuung bezüglich der fachlichen Anforderungen, die zu einer Vielzahl möglicher Modellierungen führt. So lassen sich beispielsweise Lasten in statischer, zeitlich veränderlicher, deterministischer oder auch stochastischer Form repräsentieren [47]. Weitere Unterschiede in der Abbildung ergeben sich bezüglich der Vereinfachungen der geometrischen Repräsentation. Diese Abstraktionen betreffen die räumliche Ausdehnung aber auch die Beschreibung der Lage des Lastangriffspunktes. In Bezug auf die räumliche Ausdehnung wird die fachliche Beschreibung auf Punkt-, Flächen- oder Volumenlasten zurückgeführt. Die Abbildung der Lage des Lastangriffspunktes steht in engem Zusammenhang mit den an die mechanische Modellierung gestellten Anforderungen. So wird üblicherweise die Belastung bei der Repräsentation des Tragwerks durch Stabelemente in der Achse angreifend angenommen. Eventuell vorhandene Lastausmitteln werden in der Regel über Ersatzmomente erfasst. Sollen darüber hinaus Einflüsse aus zum Beispiel einer Querschnittsverdrehung berücksichtigt werden, ist eine detailliertere Beschreibung des Lastangriffspunktes mit den zur Stabachse vorhandenen Exzentrizitäten erforderlich.

Hohe Anforderungen an die Umsetzung einer datentechnischen Abbildung resultieren aus der fachlichen Komplexität, die sich in der Vielzahl an Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen ausdrückt. Dem entgegen werden an eine bauwerksspezifische Anpassung der Datenstrukturen geringe Ansprüche gestellt. Dies ergibt sich aus der Möglichkeit der Rückführung der Tragwerksbeschreibung auf allgemein gültige Grundelemente und eine im Vergleich zur Abbildung architektonischer Eigenschaften stärkere Strukturierung und Formalisierung, die eine Verringerung des zur Abbildung erforderlichen technischen Aufwands ermöglicht.

3.3.4 Abbildung für die numerische Berechnung

Die Berechnung als ein Teil der fachlichen Bearbeitung des Bauwerks erfolgt üblicherweise unter Einsatz numerischer Berechnungsmethoden. Dies erfordert eine an diese Verfahren angepasste Modellbildung. Auf Grund ihrer Allgemeingültigkeit hat sich die Methode der Finiten Elemente (FEM) zur Analyse des Bauwerksverhaltens in vielen Anwendungsbereichen des Bauwesens durchge-

setzt. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die Abbildung mechanischer Sachverhalte.

Der mit der Ausrichtung auf eine mathematisch-numerische Lösung verbundene hohe Formalisierungsgrad der Finite-Element-Methode resultiert in Modellvorstellungen und Modellierungskonzepten, die im Vergleich zu anderen Fachmodellen eine geringe Bindung an einen spezifischen Bauwerksaspekt, beispielsweise die mechanischen Eigenschaften, aufweisen. Die Modelle stellen sich in der Folge unabhängig von den betrachteten spezifischen Bauwerksaspekten durch einen Verbund diskreter Elemente dar, deren Beziehungen innerhalb des Systems über Knoten realisiert werden. Die mechanischen Aspekte werden zum Einen durch die entsprechend fachlicher Modellvorstellungen formulierten Finiten Elemente repräsentiert. Zum Anderen erfolgt der Aufbau des mathematisch-numerischen Modells, das im Allgemeinen als Berechnungsmodell bezeichnet wird, entsprechend der auf den Fachmodellen zur Beschreibung des Tragsystems basierenden mechanischen Modellbildung.

Die der mathematisch-numerischen Modellierung vorausgehende mechanische Modellbildung ist nicht notwendigerweise an eine explizite Beschreibung in einem Tragwerksmodell gebunden. In einfachen Fällen erfolgt die Repräsentation der mechanischen Eigenschaften nur durch das Berechnungsmodell. Eine Trennung numerischer und mechanischer Modelle ist demzufolge nicht immer eindeutig möglich.

Die zur Repräsentation des mechanischen Modells eingesetzten Finiten Elemente unterscheiden sich in ihren Eigenschaften bezüglich der Dimension, Elementform, Knotenanzahl, Art und Anzahl der Freiheitsgrade und der strukturellmechanischen Formulierung, zum Beispiel schubstarr oder schubweich. Von besonderer Bedeutung für den hier betrachteten Anwendungsfall der Wohnhäuser in Stahlbauweise sind Stab-, Balken- (insbesondere mit zusätzlichem Wölbfreiheitgrad), Platten-, Scheiben- und Schalenelemente. Aus den unterschiedlichen Elementeigenschaften und der erforderlichen Diskretisierung der Tragelemente ergeben sich verschiedene mögliche Modellierungen eines Tragwerksmodells, unter anderem auch als mehrskalige Abbildungen (Abb. 3.4). Das konkrete Berechnungsmodell wird durch die Anforderungen an die Analyse, wie erforderliche Genauigkeit, Rechenzeit oder Berücksichtigung von Nichtlinearitäten, bestimmt.

Für den überwiegenden Teil der Probleme des Bauwesens sind eine Vielzahl verschiedener Elementtypen verfügbar. Dennoch werden weitere Elemente für spezielle Anwendungen entwickelt.

Eine Ergänzung der allgemeinen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen der Fachmodelle, beispielsweise um Angaben zur Elementwahl, zur Diskretisierung oder zur verfahrensgerechten Abbildung, ist an eine problemspezifische Verallgemeinerung konkreter mathematisch-numerischer Modelle gebun-

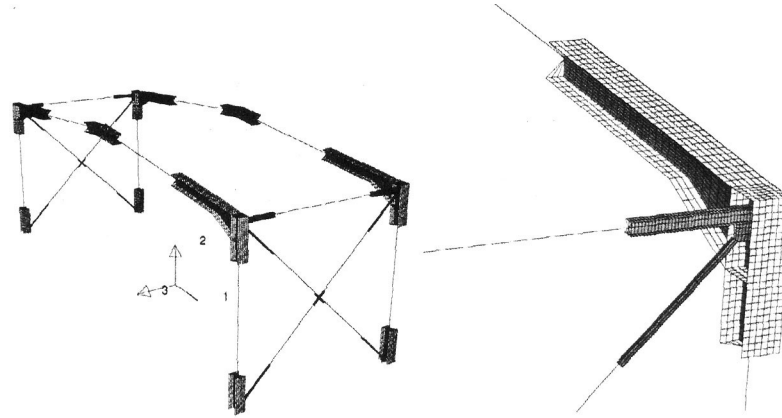


Abbildung 3.4: Beispiel für einen diskretisierten Rahmen innerhalb einer mehrskaligen Tragwerksmodellierung [45]

den. Derartige aufbereitete Lösungen, zum Beispiel zur Modellierung von Anschlüssen, sind für den hier betrachteten Anwendungsbereich der Wohnhäuser in Stahlbauweise zur Zeit nicht verfügbar.

Die durch die Fachmodelle zur numerischen Lösung vorgegebene einheitliche Grundstruktur begünstigt infolge ihres formalen Charakters die Beschreibung durch datentechnische Strukturen. Anforderungen an die Erweiterbarkeit und Flexibilität der Datenstrukturen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Abbildung der Eigenschaften von Finiten Elementen.

3.3.5 Abbildung für die Bemessung des Tragwerks

Fachmodelle für die Bemessung bilden analog den Fachmodellen zur Abbildung des Tragsystems die Grundlage zur Beschreibung mechanischer Bauwerkseigenschaften. Dabei steht jedoch nicht die Repräsentation des Tragsystems im Vordergrund, vielmehr sollen die Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen eine einfache Bemessung, das heißt die Festlegung der Abmessungen von Konstruktionselementen, ermöglichen. Fachmodelle für die Bemessung dienen demnach der Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks und seiner Komponenten.

In üblichen Anwendungsfällen ist eine auf den zum Teil sehr einfachen Fachmodellen basierende Dimensionierung für einen Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ausreichend. In anderen Fällen besteht in der auf den Fachmodellen zur Bemessung basierenden Festlegung der Abmessungen ein Ausgangspunkt aufwändigerer mechanischer Modellierungen. Diese dienen als Grundlage genauere Nachweise, die unter Umständen eine Anpassung der Bemessung ermöglichen [34].

Entsprechend dem Bemessungsgegenstand werden durch die Fachmodelle Teilsysteme, Bauteile, Querschnitte, Querschnittsteile oder Bauteilverbindungen

beschrieben. Die unterschiedlichen Genauigkeitsanforderungen führen zu verschiedenen Vereinfachungen und Abstraktionen. Viele dieser Fachmodelle sind Bestandteil bauweisenspezifischer Normen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist nur eine Darstellung von exemplarisch ausgewählten Bemessungsmodellen möglich. Die grundlegenden Eigenschaften der Fachmodelle zur Bemessung sollen an Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen zur Beurteilung der Stabilität von Stabwerkselementen, der Tragfähigkeit von Querschnitten und des Trag- und Verformungsverhaltens von Rahmenecken aufgezeigt werden. Als Grundlage dient der *Eurocode3 (EC3)*, Teil 1.1, 1.3 und 1.8 [44, 48, 49].

Zum Nachweis der Stabilität von Stabwerken werden durch den *Eurocode3* verschiedene Verfahren angeboten. Beim *Ersatzstabverfahren* bildet ein aus dem Gesamtsystem herausgelöster Stab das Bemessungsmodell zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit. Diese stellt die Grundlage für den Tragfähigkeitsnachweis dar. Für den Fall der beidseitigen Lagerung wird in vielen Fällen vereinfachend von einer Gabellagerung ausgegangen. In Bezug auf den Querschnittsverlauf erfolgt eine Einteilung in gleichförmige Bauelemente mit einem über die gesamte Länge konstanten Querschnitt und ungleichförmige, beispielsweise gevoutete, Bauelemente. Dabei werden nur wenige vereinfachte Beanspruchungszustände berücksichtigt, die über verschiedene Faktoren eine Annäherung an den realen Verlauf der Beanspruchungen ermöglichen. Wie eingangs beschrieben, ist eine Anpassung der auf Basis dieser Modelle erfolgten Bemessung durch die Anwendung genauerer Nachweismethoden möglich. Auf Grundlage des *Eurocode3* Teil 1-1 wird die Voraussetzung dafür unter anderem durch das darin beschriebene *generelle Verfahren* geschaffen.

Die Querschnitte von Stabelementen werden entsprechend der durch lokales Beulen begrenzten Beanspruchbarkeit und Rotationskapazität klassifiziert. Grundlage bildet ein Modell, das den Querschnitt im druckbeanspruchten Bereich in ein- und beidseitig gehaltene Querschnittsteile unterteilt. Die vorrangig bei der Ständerbauweise verwendeten kaltgewalzten Profile erfordern eine genauere Modellierung. Bedingt durch die dünnen Bleche kann nicht von einer festen Einspannung der Querschnittsteile ausgegangen werden. Die seitliche Lagerung wird daher durch eine Rotationsfeder abgebildet. Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der zur Aussteifung der Bleche vorhandenen Sicken. Diese werden durch entsprechende Translationsfedern modelliert (Abb. 3.5). Lokales Beulen dünnwandiger Querschnittsteile wird durch die Reduktion der Querschnittsflächen erfasst. Unter Einsatz eines Reduktionsfaktors kann vereinfachend auf die Abbildung von Rundungen bei der Ermittlung der Querschnittswerte dünnwandiger Profile verzichtet werden.

Eine für die Rahmenbauweise typische Art der Verbindung von tragenden Konstruktionselementen sind Stirnplattenverbindungen. In dem durch den *Eurocode3* Teil 1-8 [49] beschriebenen Bemessungsmodell wird der Anschluss in

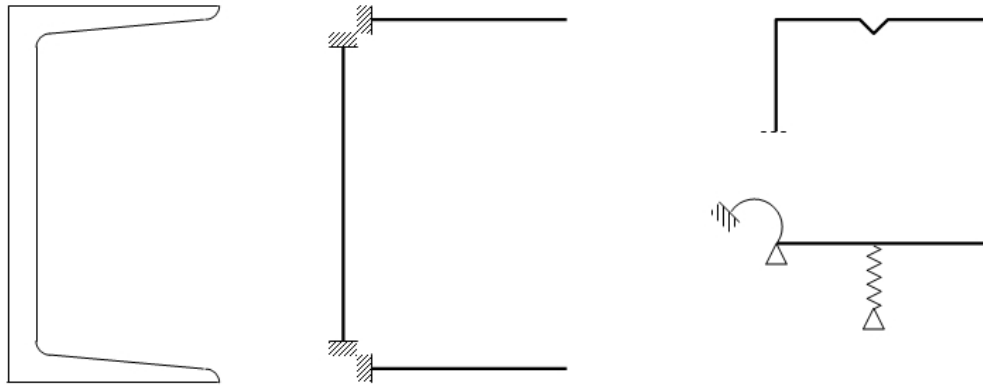


Abbildung 3.5: Beispiele für die Repräsentation von Querschnitten; links für den Querschnitt eines Walzprofils; rechts für den Ausschnitt eines dünnwandigen, kaltgewalzten Profils

mehrere Grundkomponenten zerlegt. Diese werden entsprechend dem betrachteten Anslusselement und der vorhandenen Beanspruchung klassifiziert. Für einen Stirnplattenanschluss lassen sich üblicherweise folgende Komponenten unterscheiden:

- Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung,
- Stützensteg mit Querzug und -druck,
- Stützenflansch mit Biegung,
- Träger- oder Stützenflansch und -steg mit Druckbeanspruchung,
- Stirnblech mit Biegebeanspruchung,
- Trägersteg mit Zugbeanspruchung,
- Schrauben mit Zug- und Abscherbeanspruchung.

Der auf Zug beanspruchte Teil des Stirnplattenanschlusses kann zur Ermittlung der Tragfähigkeit des Stützenflansches und Stirnblechs durch äquivalente T-Stummel abgebildet werden (Abb. 3.6). Die reale Geometrie wird idealisiert durch eine effektive Länge, die Blechdicken, den Schraubenrand- und Stegabstand repräsentiert.

Die spezifischen Eigenschaften der hier vorgestellten Beispiele verdeutlichen die für Bemessungsmodelle charakteristische, stark problembezogene Abbildung und die daraus resultierenden hohen Abstraktionsgrade. Diese Modelle ermöglichen eine einfache Bemessung unter Erfassung der wesentlichen Einflüsse. Auf Grund der geringen Komplexität ist eine Untersuchung verschiedener Lösungsvarianten mit vergleichsweise geringem Aufwand realisierbar.

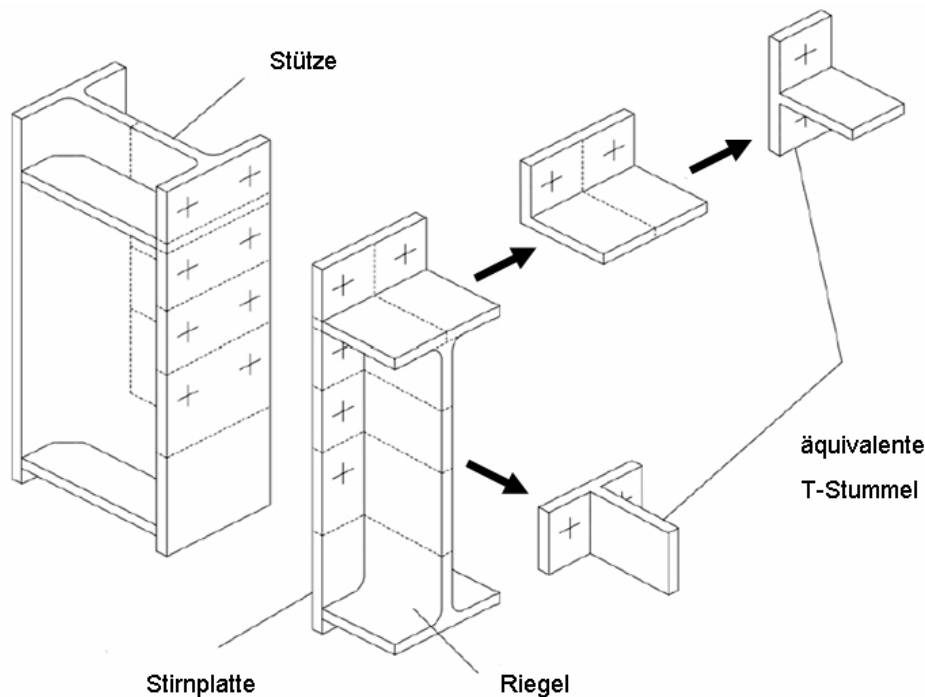


Abbildung 3.6: Modellierung eines Stirnplattenanschlusses durch äquivalente T-Stummel [50]

Die enge Kopplung an eine spezifische Bauweise und der geringe Verallgemeinerungsgrad der Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen führt zu einer Vielzahl verschiedener Fachmodelle. Trotz der Einfachheit und geringen fachlichen Komplexität der Fachmodelle ist eine datentechnische Repräsentation mit einem hohen Aufwand verbunden. Aus der in vielen Fällen bestehenden Bindung der Fachmodelle an bauweisenspezifische Normen unterliegen diese zeitlich lediglich geringfügigen Änderungen. Dementsprechend sind auch die an eine Anpassbarkeit der Datenstrukturen gestellten Anforderungen gering.

3.3.6 Abbildung konstruktiver Eigenschaften

Die Beschreibung konstruktiver Eigenschaften durch das Konstruktionsmodell dient der Dokumentation und als Grundlage für Festlegungen zur Ausführung der Konstruktion⁹. Die Fachmodelle unterscheiden sich in den Konzepten zur Abbildung konstruktiver Aspekte, im Abstraktionsgrad der Repräsentation und in der Strukturierung konstruktiver Elemente.

Die Modellierungskonzepte einfacher Konstruktionsmodelle unterteilen das Bauwerk beispielsweise entsprechend abstrakter Konstruktionselemente, wie Balken, Decke, Dach, Fundament, Stütze oder Wand, und ermöglichen eine allgemeine, grundlegende Beschreibung der Konstruktion.

⁹Unter Konstruktion wird hier der technische Gegenstand und nicht der Konstruktionsprozess verstanden.

Diese sehr einfache Repräsentation ist in ihrer Anwendbarkeit jedoch stark begrenzt. Insbesondere die Beurteilung konstruktiver Aspekte aus ingenieurtechnischer Sicht erfordert eine umfassendere Beschreibung auf der Grundlage komplexerer Fachmodelle. Diese Modelle schließen den Aufbau der Konstruktionselemente, deren Bearbeitungen sowie Festlegungen zur Gestaltung und Ausführung der Anschlusskonstruktionen und Verbindungen ein.

Die für den Wohnhausbau in Stahl eingesetzten Bauweisen stellen durch die in 2.2.2 erläuterten spezifischen Eigenschaften unterschiedliche Anforderungen an die Abbildung der Konstruktion.

Die Trennung von tragender und raumabschließender Funktion bei der Rahmenbauweise führt zu klaren konstruktiven Strukturen, bei denen sich einzelne Bauteile, wie Trapezbleche, Kassetten oder Profile, deutlich voneinander abgrenzen. Für die Beschreibung der Konstruktion werden diese Einzelbauteile zu Konstruktionselementen zusammengeführt. So bilden beispielsweise einzelne Bleche (unter Umständen verschiedener Materialien) einen Träger oder mehrere Träger zusammen mit einem darauf befindlichen Trapezblech und weiteren Elementen eine Decke (Abb. 3.7). Die Beschreibung der zur Verbindung von Konstruktionselementen erforderlichen Anschlusskonstruktionen erfolgt auf der Grundlage verschiedener Grundformen, wie Fahnenblech- oder Strinplattenanschluss. Diese sind wiederum aus wenigen Grundelementen, beispielsweise Steifen, Schrauben oder Platten, zusammengesetzt.

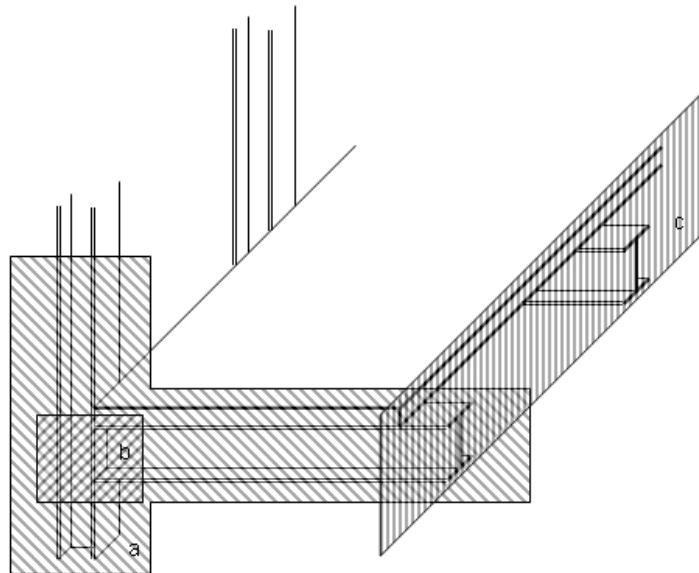


Abbildung 3.7: Beispiel für die Zuordnung von Bauteilen zu Konstruktionselementen; a: Rahmen, b: Anschluss, c: Decke

Eine Zuordnung der Bauteile zu den eingangs beschriebenen Grundelementen, wie Wand und Decke, ist damit nicht immer eindeutig. Diesbezügliche

Probleme bestehen beispielsweise in Fällen, in denen ein Element Bestandteil mehrerer Konstruktionselemente sein kann oder sich verschiedenen Konstruktionselementen zuordnen lässt, zum Beispiel eine Rahmenstütze als Bestandteil einer oder mehrerer Wände. Auch die Möglichkeit, Bauteile allein stehend oder als Teil eines Konstruktionselements zu betrachten, zum Beispiel Rahmenstütze mit davor angebrachten Hüllelementen als Teile eines Wandelements, führt in diesem Kontext zu Schwierigkeiten. Art und Umfang der Zuordnung von Bauteilen zu übergeordneten Konstruktionselementen weisen in der Folge projektspezifische Unterschiede auf.

Die Ständerbauweise zeichnet sich im Vergleich zur Rahmenbauweise durch einen stärker elementorientierten Aufbau in Form von Wand-, Decken- und Dachelementen aus. Damit wird die Zuordnung der Bauteile zu Konstruktionselementen vereinfacht. Unterschiede in der Strukturierung der Abbildung von Wänden resultieren aus dem eingesetzten Konstruktionssystem¹⁰. Die Abbildung erfolgt entsprechend dem Aufbau der Wandelemente geschossweise oder geschossübergreifend. Die herstellereinspezifische Ausführung und die große Anzahl von praktisch eingesetzten Profilen und Anschlussvarianten erschweren eine allgemeine, detaillierte Abbildung und erfordern in der Regel eine spezifisch an das Produkt eines Herstellers angepasste Beschreibung.

Unabhängig von den hier beschriebenen spezifischen Bauweisen ermöglicht eine Standardisierung von Konstruktionselementen eine weniger aufwändige Repräsentation innerhalb der für die Bauwerksplanung eingesetzten Fachmodelle. Dadurch, dass die wesentlichen Details der standardisierten Elemente bereits vorliegen, kann die Beschreibung auf die Angabe einer Produktbezeichnung und geringen Anzahl charakteristischer Parameter, zum Beispiel einer vereinfachten, die wesentlichen Abmessungen repräsentierenden Geometrie, reduziert werden.

Das für den Entwurf eines Bauwerks verwendete Konstruktionsmodell erfordert eine weitere Detaillierung für die Bauausführung.

Die stark voneinander abweichenden Abstraktionsgrade der Fachmodelle zur Abbildung konstruktiver Eigenschaften sind mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an die datentechnische Abbildung verbunden. Die Beschreibung von Konstruktionselementen kann einerseits abstrakt, stark vereinfacht erfolgen. Andererseits ist eine im Vergleich dazu detaillierte Abbildung der einzelnen Bauteile und Verbindungsmittel der Konstruktionselemente möglich. Daraus ergeben sich deutliche Unterschiede in Umfang und Komplexität der erforderlichen Datenstrukturen. Mit steigender Detaillierung resultieren aus den vielfältigen konstruktiven Lösungen zusätzlich höhere Anforderungen an die Flexibilität der datentechnischen Modellierung.

¹⁰siehe Abschnitt 2.2.2, *Platform-* und *Balloon-*Konstruktionssystem

3.3.7 Abbildung wärmetechnischer Eigenschaften

Die Abbildung wärmetechnischer Eigenschaften eines Gebäudes dient der Beurteilung seines thermischen Verhaltens. Die in den Fachmodellen enthaltenen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen konzentrieren sich in der Regel auf die Repräsentation der sich aus der Bauwerkshülle und den sich durch ihre Temperatur unterscheidenden eingeschlossenen Zonen definierten Systemgrenzen. Die Eigenschaften der Systemgrenzen werden durch thermische und weitere physikalische Eigenschaften, wie Lichtdurchlässigkeit und Absorptionsgrad, der sie bildenden Bauwerksteile einschließlich der Öffnungselemente beschrieben. Über die Abbildung der thermischen Eigenschaften der Bauwerksteile hinaus wird die Nutzung der eingeschlossenen Bereiche erfasst.

Unterschiede in den Fachmodellen bestehen in Vereinfachungen der Beschreibung konstruktiver und thermischer Eigenschaften von Konstruktionselementen. Weitere Vereinfachungen ergeben sich in Bezug auf die Abbildung des Wärmetransports innerhalb und an den Grenzflächen von Bauteilen.

Für die im Stahlwohnungsbau eingesetzten Bauweisen ist eine Modellierung der Gebäudehülle unter der Annahme von ebenen, plattenförmigen Bauteilen für die meisten praktischen Fälle ausreichend (Abb. 3.8).

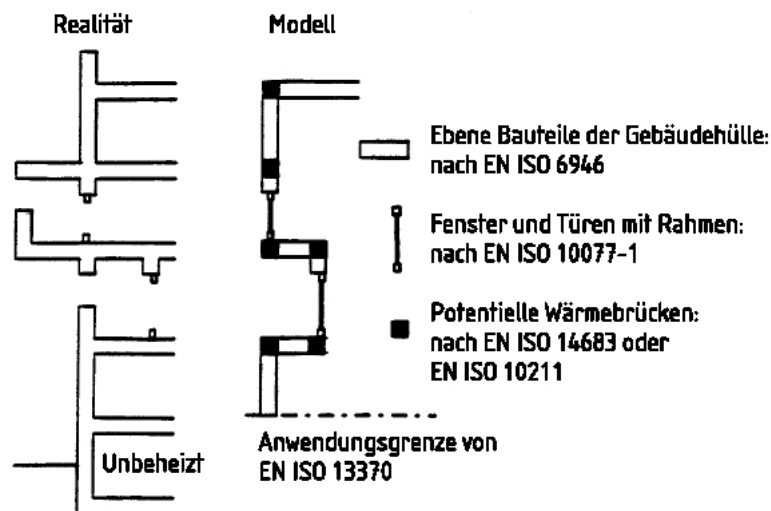


Abbildung 3.8: Modellierung der Gebäudehülle nach DIN EN ISO 13789 [51]

Der typische Aufbau von Konstruktionselementen weist in der Regel thermische Inhomogenitäten auf. Bei der Rahmenbauweise sind auf Grund der Trennung von tragender und raumbildender Funktion die Hüllelemente thermisch günstiger gestaltbar. Dies ermöglicht im Allgemeinen eine vereinfachende Berücksichtigung thermischer Inhomogenitäten. Dabei wird eine Zerlegung der Bauteile in Bereiche mit thermisch gleichartigen Eigenschaften vorgenommen. Die Abbildung der daraus abstrahierten homogenen Bereiche erfolgt durch eine Unterteilung in parallel zur Bauteiloberfläche verlaufende Schichten und senk-

recht dazu befindliche Abschnitte (Abb. 3.9).

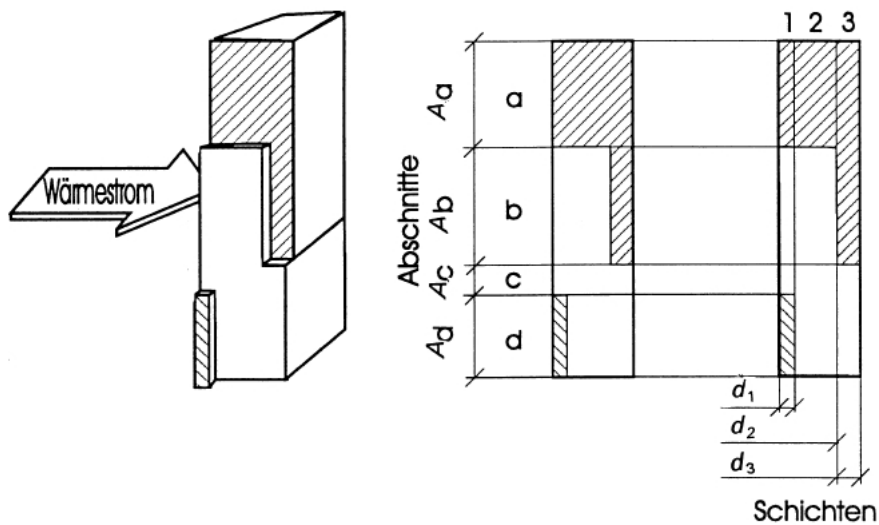


Abbildung 3.9: Aufteilung eines thermisch inhomogenen Bauteils nach DIN EN ISO 6946 [52]

Die aus wärmetechnischer Sicht bei der Ständerbauweise sehr ungünstige Lage der Profile innerhalb der Wärmedämmung erfordert in der Regel genauere Betrachtungen. Die einzelnen Bauteile müssen dabei in ihrer Lage und ihren Eigenschaften detailliert abgebildet werden. Da die Dach-, Decken- und Wandelemente bei dieser Bauweise im Allgemeinen einer starken Typisierung unterliegen, existieren entsprechend den thermischen Anforderungen aufbereitete konstruktive Lösungen, zum Beispiel nach [53]. Aus entsprechenden Katalogen können analog den Produktspezifikationen von Bauprodukten, wie Fenster oder Türen, alle erforderlichen Informationen entnommen werden.

Weitere übliche Vereinfachungen ergeben sich aus der Betrachtung unbeheizter Räume, beispielsweise Keller oder Dachböden, als eine Schicht mit konstanten thermischen Eigenschaften.

Für den konstruktiven Ingenieurbau ist hauptsächlich der Wärmeverlust über die Gebäudehülle von Interesse. Der Wärmeverlust bildet die Grundlage für weitere Betrachtungen, welche die Gesamtenergiebilanz des Bauwerks betreffen.

Zur Lösung komplexer thermischer Fragestellungen werden üblicherweise numerische Verfahren eingesetzt. Analog zur Berechnung des Tragverhaltens von Bauwerken dient die auf den Fachmodellen basierende Modellierung der thermischen Eigenschaften als Grundlage für eine mathematisch-numerische Beschreibung.

Durch die Fachmodelle wird eine Vielzahl verschiedener Modellierungen ermöglicht, die sich in den Abstraktionsgraden und im Abbildungsumfang unterscheiden. Die Verwendung konstruktiv und wärmetechnisch aufbereiteter Lösungen resultiert in geringen Anforderungen an die datentechnische Abbildung. Eine detaillierte Betrachtung der thermischen Eigenschaften hingegen stellt hohe Ansprüche an die fachliche Beschreibung, was sich auch in den zur Abbildung erforderlichen Datenstrukturen widerspiegelt.

3.4 Eigenschaften von Beziehungen zwischen Fachmodellen

Die Repräsentation der Bauwerkseigenschaften erfolgt, wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, mittels spezialisierter Fachmodelle, die auf einen spezifischen Anwendungszweck zugeschnitten sind. Das Bauwerk wird durch die Modelle, die auf den Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen der Fachmodelle basieren, in aus dem Gesamtkontext herausgelösten Teilaspekten beschrieben. Eine über die Teilaspekte hinausgehende Betrachtung der Bauwerkseigenschaften erfordert, wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, die Berücksichtigung der zwischen den Fachmodellen bestehenden Beziehungen. Diese Beziehungen ergeben sich aus

- konzeptuellen und inhaltlichen Übereinstimmungen,
- der Verwendung von Modellinhalten als Modellierungsgrundlage,
- darüber hinausgehenden fachlichen Abhängigkeiten.

Dabei weisen sowohl Modelle gleicher als auch verschiedener fachlicher Ausrichtung derartige gegenseitige Abhängigkeiten auf.

Die Eigenschaften von Beziehungen zwischen den Modellen werden folglich sowohl durch die fachlichen Konzepte als auch durch den konkreten Inhalt, der durch das Bauobjekt beschrieben wird, bestimmt. Wesentliche Einflüsse leiten sich aus den Fachmodellen, der Bauweise und den fachlichen Anforderungen an die Abbildung der Modellzusammenhänge ab.

Die Abbildung des Bauwerks unterliegt während der Planung unterschiedlichen Abstraktionsgraden (vgl. Abschn. 2.1.3). Dies ist neben einer Anpassung der eingesetzten Fachmodelle mit einer Änderung der Beschreibung der Modellzusammenhänge verbunden. Die Verringerung des Abstraktionsgrades der Fachmodelle geht einher mit deren stärkerer Verflechtung und Verzahnung [54]. In der Folge ergeben sich in Abhängigkeit von den Vereinfachungen der fachlichen Konzepte verschiedene Detaillierungsstufen für die Beschreibungen der Beziehungen.

Analog zu den eingesetzten Fachmodellen, die, wie in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels gezeigt, spezifisch an den Anwendungszweck angepasst sind, bedürfen die Abbildungen von Beziehungen zwischen den Fachmodellen einer Adaption an die jeweilige Aufgabe. Dabei ergeben sich entsprechend den Anforderungen einfache Zuweisungen, die sich unabhängig vom fachlichen Kontext abbilden lassen, und komplexe Beschreibungen, die mit der Abbildung anwendungs- und fachspezifischer Aspekte verbunden sind. Die Art und der Umfang der in den Beziehungen enthaltenen fachspezifischen Aspekte resultieren aus den Unterschieden der in den Fachmodellen enthaltenen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen.

In den Anforderungen an die Qualität der fachlichen Abbildung von Beziehungen besteht ein fließender Übergang. Diese Anforderungen reichen von der einfachen Information von Planungsbeteiligten über die Aufbereitung von Modellinhalten bis zur fachlichen Integration von Modellen¹¹.

Die disziplinübergreifende Information von Planungsbeteiligten, zum Beispiel über Werteänderungen, setzt keine detaillierten Kenntnisse über bestehende inhaltliche Zusammenhänge zwischen den Modellen voraus. Dementsprechend sind die Anforderungen an die fachliche Beschreibung von Modellbeziehungen gering.

Die Bereitstellung und gemeinsame Nutzung von Modellen stellt dagegen höhere Anforderungen an die fachliche Abbildung von Beziehungen. Dabei ergeben sich Unterschiede in Bezug auf

- einen Austausch und eine Aufbereitung fachlicher Inhalte basierend auf gleich oder ähnlich strukturierten Fachmodellen,
- eine fachliche Integration von Modellen.

In beiden Fällen ist eine Zuordnung von in Beziehung stehenden Modellteilen erforderlich. Dabei bestimmt sich die fachliche Komplexität der Abbildung und der Aufwand zur Beschreibung aus den Unterschieden in den Modellierungskonzepten und Modellinhalten der zu verknüpfenden Modelle. Eine Vereinfachung der Beziehungsbeschreibung kann durch eine entsprechende Gestaltung der Fachmodelle und eine angepasste, auf den Fachmodellen basierende Modellierung des Bauwerks erreicht werden.

Aus dem konkreten Anwendungsfall ergeben sich, wie unter Abschnitt 3.2 erläutert, spezifische Anforderungen an die Beschreibung des Bauwerks. Die Art und Weise der Berücksichtigung der bestehenden Modellabhängigkeiten obliegt dabei dem Fachplaner (vgl. Abschn. 3.1). Die konkrete Ausprägung einer Abbildung von Modellabhängigkeiten ist demzufolge abhängig vom vorliegenden Anwendungsfall.

¹¹Fachmodelle und darin beschriebene Modellinhalte (vgl. Abschn. 3.1)

Die spezifischen Charakteristika der Bauweisen von Stahlwohnhäusern beeinflussen die Art und Weise, in der Beziehungen zwischen den Fachmodellen zu berücksichtigen sind. Unterschiede zeigen sich beispielsweise in der Bemessung, bei der der Betonbau im Vergleich zum Stahlbau eine viel stärkere Verflechtung mit der Konstruktion aufweist [47], oder auch in der Entkopplung des Tragsystems, zum Beispiel bei der Rahmenbauweise, die eine weitgehend unabhängige Betrachtung des Lastabtrags ermöglicht.

Aus den dargestellten Abhängigkeiten zu den Fachmodellen, Bauweisen und fachlichen Anforderungen ergeben sich für die Abbildung von Modellbeziehungen Einflüsse aus der Normung und Standardisierung. Durch die Standardisierung, das heißt die Vorgabe von Bauteileigenschaften, beispielsweise bei der konstruktiven Gestaltung in Form typisierter Bauelemente, kann auf eine detaillierte Betrachtung der Beziehungen verzichtet werden, wodurch die Anzahl der abzubildenden Abhängigkeiten erheblich reduziert wird (vgl. Abschn. 2.2.3, S. 28). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die zur Abbildung der Bauwerkseigenschaften eingesetzten Fachmodelle und die Art, wie diese untereinander interagieren, durch normative Vorgaben festzulegen. Dabei ist jedoch kritisch anzumerken, dass eine sinnvolle Ingenieurarbeit nur unter einer maßvollen Reglementierung möglich ist [34]. Dementsprechend sind die Möglichkeiten einer Vereinfachung der Abbildung von Beziehungen begrenzt.

Die verschiedenartigen Vorgehensweisen bei der Entwurfsbearbeitung (vgl. Abschn. 2.1.3, S. 21) stellen unterschiedliche Anforderungen an die Abbildung der Modellzusammenhänge. Bei der sequentiellen, aufeinander folgenden Bearbeitung verschiedener Aspekte konzentriert sich die Beschreibung der Beziehungen verschiedener Fachmodelle auf die Übergabe eines definierten Bearbeitungsstandes. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Zuordnung äquivalenter Modellteile. Die fachliche Abstimmung ist Bestandteil der durch den einzelnen Fachplaner bearbeiteten Teilaufgabe (vgl. S. 19). Die in Teilen parallele Bearbeitung verschiedener Aspekte durch mehrere Fachplaner erfordert dagegen eine enge Kopplung der Fachmodelle, die eine Beschreibung der fachlichen Abhängigkeiten einschließt.

Die aus den verschiedenen Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen sowie den Anforderungen der konkreten, bauwerksspezifischen Anwendung resultierende große Anzahl unterschiedlicher Abbildungen fachlicher Zusammenhänge stellt hohe Ansprüche an eine datentechnische Repräsentation. Die mit der Qualität der Beschreibung von Beziehungen verbundene fachliche Komplexität besitzt dabei einen wesentlichen Einfluss auf den erforderlichen Aufwand.

Kapitel 4

Analyse von Datenmodellen

„... data models are developed independently by specialist software vendors.“

(Lämmer u.a. [55])

4.1 Repräsentation von Fachmodellen durch Datenmodelle

4.1.1 Einführung

Die vom Fachplaner zur Beschreibung der für ihn relevanten Teile und Eigenschaften eines Bauwerks als konzeptionelle Grundlage eingesetzten Fachmodelle werden durch die in den Datenmodellen definierten Elemente und Strukturen repräsentiert. Diese Fachdatenmodelle ermöglichen die rechnerinterne Abbildung der auf der Basis der Fachmodelle beschriebenen fachlichen Modellinhalte durch entsprechende Modelldaten.

An die verwendeten Datenstrukturen werden fachliche und technische Anforderungen gestellt. Die im vorangegangenen Kapitel erläuterten Fachmodelle bestimmen dabei die fachlichen Anforderungen. Diese weisen auf Grund der spezifischen, zweckgebundenen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen Unterschiede auf.

Technische Anforderungen an die Datenmodelle ergeben sich beispielsweise bezüglich des Speicherbedarfs, der Konsistenz darin beschriebener Daten, der Organisation des Zugriffs auf Modellinhalte, der Flexibilität und der Erweiterbarkeit.

Aus der im Kapitel 2 erläuterten Planung von Wohnhäusern in Stahlbauweise lassen sich in Bezug auf die datentechnische Abbildung im Wesentlichen zwei Szenarien ableiten. Diese bestehen zum Einen in der Entwicklung von Entwurfslösungen, wie der Erarbeitung von Individual- oder Systemlösungen, und zum Anderen in der Anwendung typisierter Konstruktionssysteme. Für den ersten Fall resultieren aus den erforderlichen Detaillierungsgraden, dem Abbildungsumfang und möglichen Änderungen der Datenstruktur hohe Anforderungen an eine technische Unterstützung. Für den zweiten Fall, der sich dadurch auszeichnet, dass ein großer Teil der Planung im Vorfeld bereits bear-

beitet wurde, wird im Allgemeinen keine weitere Anpassung der Datenstruktur erforderlich. Die zu repräsentierenden Elemente und ihre Abhängigkeiten sind vollständig bekannt und beschrieben, so dass geringere Ansprüche an eine technische Umsetzung bestehen.

Die zur Beschreibung der Bauwerkseigenschaften erforderlichen Datenmodelle lassen sich auf der Grundlage verschiedener datentechnischer Konzepte, Prinzipien und Lösungsansätze erstellen. Bei der Modellierung der Datenstrukturen handelt es sich analog zur Abbildung fachlicher Fragestellungen um einen kreativen, durch subjektive Einflüsse geprägten, Prozess. Die daraus resultierenden Unterschiede in der datentechnischen Modellierung und die Gewichtung der verschiedenen Anforderungen führen zu einer Vielzahl in Funktionalität und Aufbau voneinander abweichender Datenmodelle.

Mit der Objektorientierung steht ein weit verbreitetes Paradigma, das sich unter anderem für die Anwendung im Bauwesen als günstig erwiesen hat, zur Verfügung. Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich aus diesem Grund auf objektorientierte Datenstrukturen.

Unabhängig vom spezifischen Fachgebiet ermöglichen Vererbungshierarchien die Strukturierung des Anwendungsgebietes. Mit zunehmender Größe werden diese jedoch schnell sehr komplex und schwer handhabbar. In dieser Hinsicht, insbesondere in Bezug auf die Abbildung fachlicher Abstraktionsstufen, besteht in der Verwendung von Kompositionen und Aggregationen eine flexible Lösung. Eine weitere Möglichkeit der Anpassung allgemeiner, abstrakter Datenstrukturen ist der Einsatz von Aufzählungstypen. Dies geht jedoch zu Kosten der allgemeinen Lesbarkeit, was den Zugang und die Anwendung, beispielsweise durch den Fachplaner, wesentlich erschwert.

Als Überblick zum grundsätzlichen Aufbau von Fachdatenmodellen werden in den folgenden Abschnitten einzelne, exemplarisch ausgewählte Datenstrukturen der verschiedenen Fachbereiche auf wesentliche Aspekte reduziert dargestellt.

4.1.2 Abbildung von Geometriemodellen

Geometriebeschreibungen sind Bestandteil verschiedener Fachmodelle. Dabei handelt es sich um allgemeine Modellanteile, die unabhängig von der fachlichen Ausrichtung durch spezielle Datenstrukturen beschrieben werden können.

Durch die Fachmodelle werden sehr unterschiedliche Anforderungen an die Repräsentation geometrischer Bauwerkseigenschaften gestellt. Der überwiegende Teil der Fachdatenmodelle erfordert lediglich die Möglichkeit zur Abbildung stark vereinfachter Geometrien, die sich im Allgemeinen durch Parameter beschreiben lassen. Darüber hinausgehende Anforderungen, beispielsweise die

Abbildung durch Freiformflächen, sind für das Bauwesen eher untypisch (vgl. Abschn. 3.3).

Die Entwicklung von Datenstrukturen zur Geometriebeschreibung, die an spezifische Randbedingungen angepasst sind, stellt ein eigenes Forschungsgebiet dar. An dieser Stelle soll daher lediglich ein kurzer Überblick über die grundlegenden Ansätze gegeben werden.

Im Wesentlichen lassen sich Geometriemodelle drei großen Gruppen zuordnen: den Kanten-, Flächen- und Volumenmodellen. Die Beschreibung durch ein Kantenmodell (Wireframe) reduziert die Abbildung geometrischer Eigenschaften auf Kanten und Punkte. Es erfolgt keine explizite Beschreibung von Flächen, wodurch eine nur unvollständige, mehrdeutige Beschreibung erreicht wird. In einem Flächenmodell dagegen werden Flächen durch die sie begrenzenden Kanten eindeutig beschrieben. Für die Abbildung von Körpern fehlen jedoch Informationen zur Geschlossenheit und Konnektivität. Volumenmodelle ermöglichen letztendlich eine eindeutige und vollständige geometrische Repräsentation von Körpern.

Die gebräuchlichsten Verfahren zur Beschreibung von Körpern sind die parametrisierte Darstellung, die Enumerationsverfahren, die Zellerlegung, die Repräsentation durch Begrenzungen (BRep) und die konstruktive Körpermodellierung (CSG).

Während die Repräsentation geometrischer Eigenschaften in den Fachdatenmodellen, wie gezeigt, auf der Grundlage einiger weniger Ansätze realisiert wird, bestehen große Unterschiede in der Strukturierung und Modellierung der fachlichen Daten. Die Unterschiede in den Repräsentationen liegen folglich weniger im strukturellen Aufbau der verschiedenen Fachdatenmodelle begründet, sondern werden hauptsächlich durch die darauf basierenden inhaltlichen Beschreibungen bestimmt.

4.1.3 Abbildung architektonischer Eigenschaften

Im Abschnitt 3.3.2 wurde bereits auf die verschiedenen Repräsentationsmöglichkeiten architektonischer Eigenschaften durch die Fachmodelle eingegangen. Im Wesentlichen kann zwischen einem raum- und bauteilorientierten Aufbau unterschieden werden. Die Beschreibung architektonischer Räume ist nicht immer eindeutig auf der Grundlage begrenzender Bauteile möglich, wie zum Beispiel bei Balkonen oder etagenübergreifenden Atrien. Die Abbildung von Räumen und Bauteilen erfolgt aus diesem Grund in der Regel durch separate Datenstrukturen. In bauteilorientierten Datenmodellen werden die Beziehungen zwischen einzelnen Bauteilen, wie *liegt auf* oder *ist verbunden mit*, üblicherweise nicht explizit abgebildet. Die Bauwerksbeschreibung ist damit auf Aussagen zur geometrischen Lage beschränkt.

Grundsätzlich liegt der Schwerpunkt von Architekturdatenmodellen in den Datenstrukturen zur Abbildung geometrischer Eigenschaften, welche lediglich durch stark limitierte Angaben zum Material und zur Funktion ergänzt werden. Für die meisten Fälle ist eine grobe geometrische, nur die wesentlichen Abmessungen berücksichtigende Abbildung der Architekturelemente für die Bearbeitung ausreichend [36, 39, 40]. Die Bauteilgeometrie wird dabei in der Regel durch entsprechende Parameter beschrieben, zum Beispiel bei einer Wand durch die Mittelebene und Dicke. Räume werden im Allgemeinen entsprechend der Dimension durch Kanten und Flächen repräsentiert. Aufwändigere geometrische Beschreibungen, wie Freiformen, kommen nur in sehr seltenen Fällen, unter anderem bei komplexen Dachformen oder der freien Gestaltung von Gebäudehüllen (zum Beispiel [56]), zum Einsatz. Für die Abbildung geometrischer Eigenschaften stehen, wie im Abschnitt 4.1.2 dargelegt, spezialisierte Datenstrukturen zur Verfügung. In vielen Datenmodellen erfolgt daher eine getrennte Modellierung von Datenstrukturen zur Abbildung geometrischer und fachspezifischer Eigenschaften, bei der die allgemeine geometrische durch die architekturenspezifische Beschreibung referenziert wird.

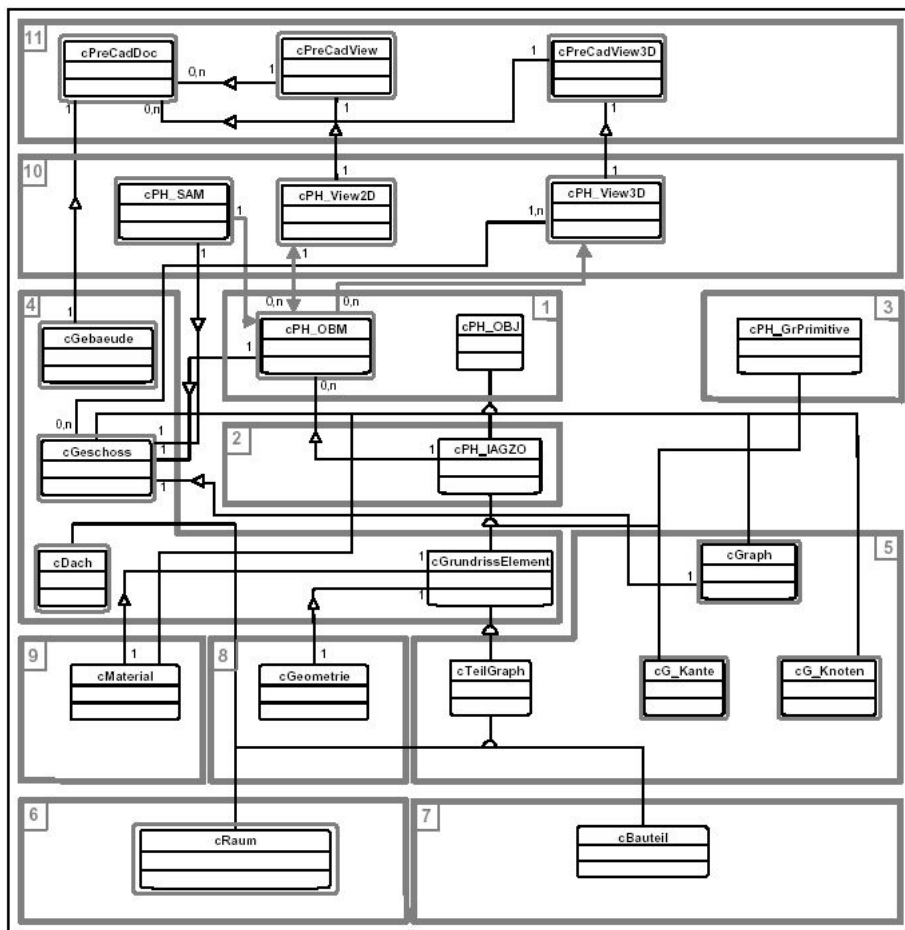


Abbildung 4.1: Ausschnitt einer Datenstruktur für die Architekturplanung aus [57], Übersicht über die Teile des Gesamtmodells

Abbildung 4.1 zeigt den exemplarischen Entwurf eines Datenmodells aus [57]. Für eine spezifische Detaillierungsstufe bindet *Heck* die Raum- und Bauteilsicht in ein CAD-Modell ein. Diese Sichten werden einer globalen Gebäudestruktur bestehend aus Geschoss, Dach und Bodenplatte zugeordnet. Jedes Geschoss wird von einer Deckenplatte und mehreren Grundrisselementen repräsentiert. Die Klasse Grundrisselement bildet dabei die abstrakte Oberklasse für alle Bausemantik tragenden Elemente, wie Räume und Bauteile. Sie aggregiert die Klassen zur Material- und Geometrieabbildung. Räume werden neben der ihnen zugeordneten Geometrie durch zusätzliche Attribute, wie Raumart und Wandfläche, beschrieben. Bei den Bauteilen ist das Modell auf die Abbildung von Bauteilen für die Vorplanung von Gebäuden und die Erstellung von Gebäudegrundrissen beschränkt und verzichtet auf die Darstellung weiterer Bauelemente, wie „Unterzüge und andere tragende Bauteile“ [57]. Durch die Reduktion des Modells auf die Abbildung raumbildender Bauteile sind dem Modell für weitere Betrachtungen zusätzliche Elemente hinzu zu fügen. Die Klasse Material beschreibt neben den Materialeigenschaften auch den Schichtenaufbau von Bauteilen. Für zusammengesetzte Bauteile, wie beispielsweise Ständerwände oder Dachaufbauten, wird der innere Aufbau auf Grund der stark abstrahierten konstruktiven Repräsentation vereinfacht über eine prozentuale Aufteilung nach den Flächenanteilen der Konstruktionselemente abgebildet.

4.1.4 Abbildung von Tragwerkseigenschaften

Die Tragwerkseigenschaften werden entsprechend den in Abschnitt 3.3.3 dargestellten fachlichen Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen unterteilt in die am Lastabtrag beteiligten Konstruktionselemente beschrieben. Die Abbildung des Tragwerks und seiner Umwelt erfolgt als ein System idealisierter Tragelemente, Verbindungen und Einwirkungen. Dabei wird jedes Tragelement üblicherweise einem oder mehreren Teilsystemen des Gesamttragsystems zugeordnet.

In Abhängigkeit vom Anwendungsgebiet kann die Anzahl der durch die Datenmodelle abgebildeten fachlichen Konzepte reduziert werden. Diese Anpassung, zum Beispiel an den Wohnhausbau in Stahlbauweise, ist einerseits mit einer Vereinfachung der Datenstrukturen, beispielsweise der Verringerung der Anzahl erforderlicher Klassen, verbunden. Andererseits wird oft zusätzliche, über die zur Abbildung der Tragwerkseigenschaften hinausgehende Funktionalität integriert. Dies führt, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen, zu einer Verschiebung der fachlichen Ausrichtung.

Bretschneider verfolgt in [58, 59] eine Abbildung des Tragwerks, die sich stark an Modellstrukturen zur numerischen Berechnung (vgl. Abschn. 4.1.5) orientiert und damit Modellierungsentscheidungen zwischen Tragwerksmodell und Berechnungsmodell (vgl. Abschn. 3.3.4) implizit vorweg nimmt (Abb. 4.2). Darüber hinaus ermöglicht die Beschränkung des Anwendungsbereichs auf den Industriebau eine Begrenzung des Datenmodells auf die Abbildung stabförmiger

ger Tragelemente und erlaubt die Definition von Klassen typischer Tragsysteme.

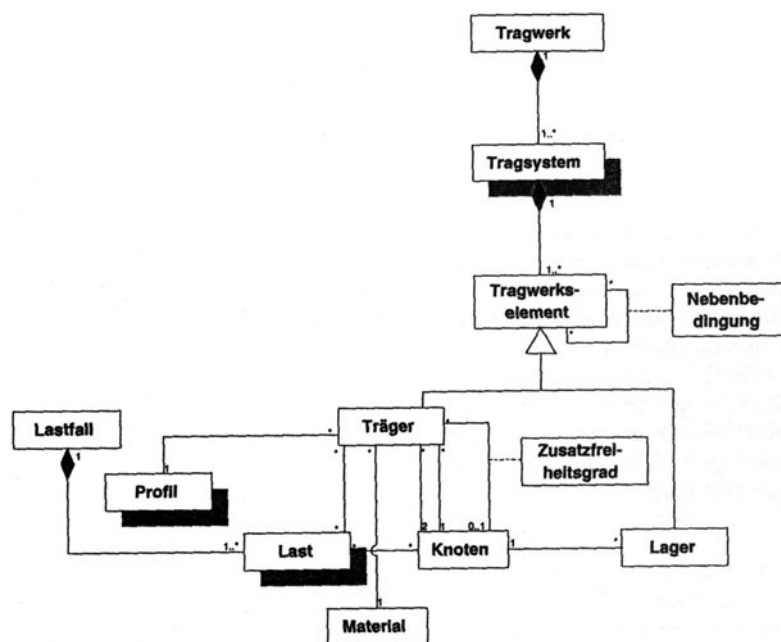


Abbildung 4.2: Beschreibung des Tragwerks nach [58]

Hamwi [60] legt im Gegensatz zu *Bretschneider* den Schwerpunkt auf eine allgemeinere, an Architekturdatenmodelle angelehnte Beschreibung des Tragwerksmodells (Abb. 4.3). Im Gegenzug werden die Möglichkeiten zur Abbildung mechanischer Eigenschaften reduziert, was lediglich die Repräsentation sehr einfacher Tragsysteme ermöglicht. Durch die Vermischung allgemeiner Konstruktions- und Tragwerkelemente entsteht eine sehr uneinheitliche Tragwerksbeschreibung aus Elementen, bei denen die mechanischen Eigenschaften beschrieben werden und solchen, bei denen das nicht der Fall ist. Im Hinblick auf eine mögliche Erweiterung oder Anpassung des Datenmodells dürfte sich die Mehrfachvererbung von Geometrie- und Bauteileigenschaften zur Definition konkreter Bauteilklassen gegenüber einer Modellierung unter Verwendung von Assoziationen als erheblicher Nachteil erweisen.

Weise [61] trennt die Repräsentation des Tragwerksmodells in eine allgemeine Benennung von Bauteilen, eine semantische Beschreibung und ein mechanisches Modell. Die semantische Beschreibung stellt dabei ein Architekturmodell dar, das um für den Lastabtrag erforderliche Bauteile und grundlegende Annahmen zu den Lasten ergänzt ist. Der Vorteil im Vergleich zum Entwurf von *Hamwi* ist die Möglichkeit der Repräsentation eines Bauteils durch mehrere unterschiedliche mechanische Modelle. Das Datenmodell umfasst die Beschreibung von stabförmigen und ebenen Tragelementen sowie Verbindungselementen, Lasten, Lastgruppen, Lastfällen und Lastfallkombinationen. Die zusätzliche Bereitstellung eines allgemeinen semantischen Modells, das die Zusam-

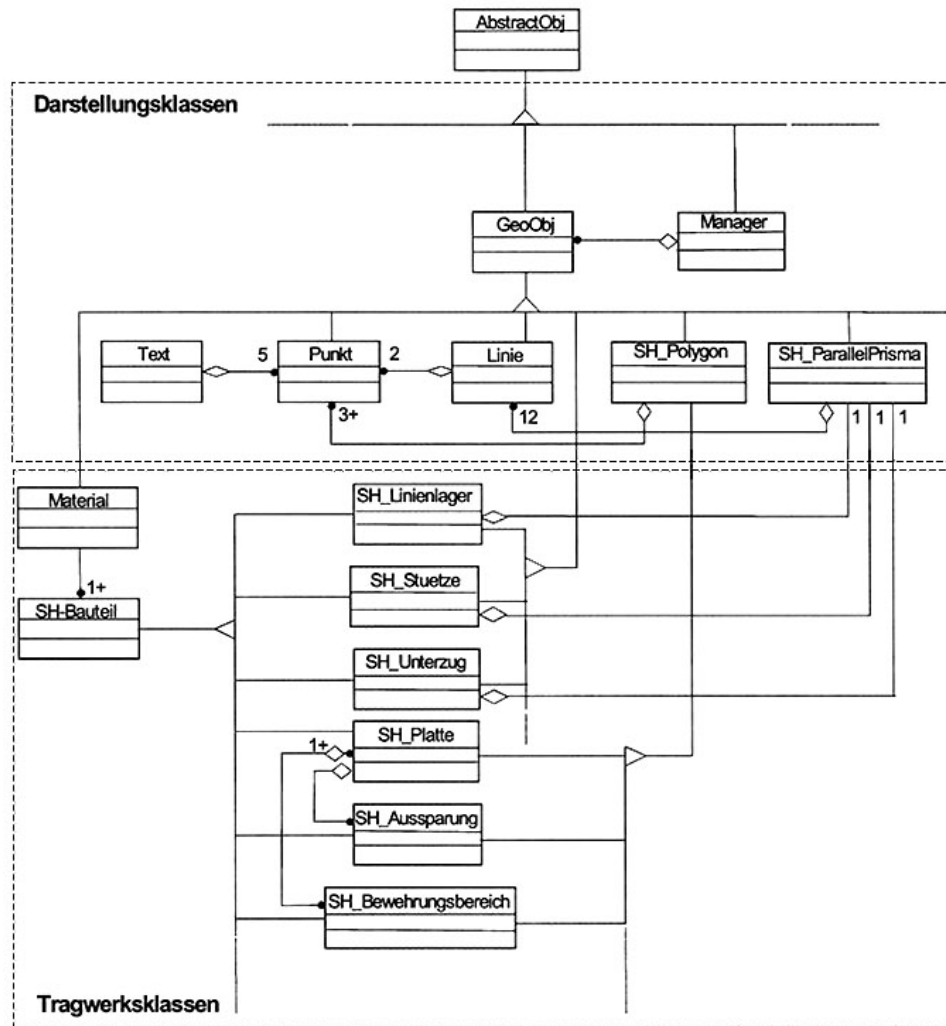


Abbildung 4.3: Objektorientiertes Datenmodell des Tragwerks aus [60]

menarbeit mit anderen an der Bauplanung beteiligten Bereichen vereinfachen soll, resultiert unter anderem aus der engen Verbindung mit den Arbeiten der *International Alliance for Interoperability (IAI)* [62, 63].

Analog zu den Architekturdatenmodellen ist auch hier in den meisten Fällen die Abbildung geometrischer und fachlicher Eigenschaften in getrennten Datenstrukturen üblich. Im Vergleich zur Beschreibung architektonischer Eigenschaften des Bauwerks bestehen bedingt durch die hohen Abstraktionsgrade üblicherweise geringere Anforderungen an die Repräsentation geometrischer Inhalte, wengleich Tendenzen zum Einsatz komplexerer Tragwerksbeschreibungen existieren.

4.1.5 Abbildung von Modellen für die numerische Berechnung

Die auf Finiten Elementen beruhende numerische Berechnung findet, wie bereits in Abschnitt 3.3.4 dargestellt, im Ingenieurwesen zur Untersuchung vielfältiger fachlicher Probleme Anwendung. Der Schwerpunkt für die nachfolgenden Betrachtungen wird entsprechend der überwiegenden Verwendung im Bauwesen auf die Anwendung zur Bearbeitung strukturmechanischer Fragestellungen gelegt.

Der aus der Ausrichtung auf eine mathematisch-numerische Lösung bedingte allgemein-formale Charakter der Fachmodelle zeigt sich in geringen Unterschieden und fachlichen Strukturen, die aus wenigen abstrakten Grundelementen bestehenden. In der Realisierung datentechnischer Strukturen ergeben sich verschiedene Ansätze in den allgemeinen Grundstrukturen, die sich insbesondere in ihrer Erweiterbarkeit und Flexibilität der Beschreibung Finiter Elemente unterscheiden.

In [64, 65] wird ein stark generalisierter Ansatz beschrieben. Darin wird auf einer abstrakten Ebene eine Klasse zur Abbildung Finiter Elemente definiert (Abb. 4.4). Diese assoziiert eine Knotenbeschreibung und eine allgemeine Beschreibung weiterer Eigenschaften, die beispielsweise die Funktionalität zur Abbildung des Materials bereitstellt. Die Repräsentation von Lasten, Rand- und Zwangsbedingungen wird in einer Klasse zusammengefasst, deren Eigenschaften zur Laufzeit ausgewertet werden. Das so definierte, äußerst kompakte Datenmodell ist für die spezifische Anwendung durch konkrete Klassen zu erweitern. Dabei ergeben sich zum Teil umfangreiche Vererbungsstrukturen.

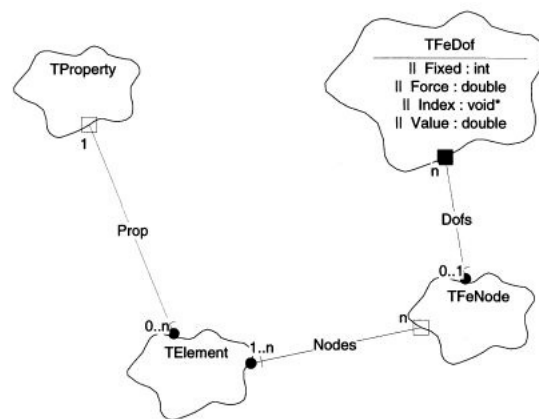


Abbildung 4.4: Klassenstruktur zur Beschreibung eines Finiten Elements [65]

Archer u.a. [66, 67] sowie *Baitsch* u.a. [68] verfolgen in ihrer Grundstruktur ähnliche Ansätze. Während bei *Archer* das Modell aus Elementen, Knoten, Lastfällen, Rand- und Zwangsbedingungen gebildet wird (Abb. 4.5), setzt sich

dieses bei *Baitsch* neben Elementen und Knoten aus Kanten und Materialien zusammen (Abb. 4.6). Außer der beiden Strukturen gemeinsamen Knoten- und Lastzuordnung zur Abbildung der Finiten Elemente besteht bei *Archer* die Definition der Klassen aus einem Werkstoffmodell und einem Ausgangszustand. Von der Oberklasse Element werden in beiden Fällen weitere Elementtypen abgeleitet. Die Unterschiede liegen hier neben der direkten Zuordnung von Materialbeschreibungen vor allem in den zur Strukturierung der Finiten Elemente verwendeten Klassifikationskriterien. Durch *Baitsch* wird zunächst eine Unterteilung in ein- und zweidimensionale Elementformulierungen vorgenommen. Letztere werden weiter nach Elementfamilien strukturiert. Analog zum ersten Ansatz werden allgemeine Parameter zur Beschreibung von Elementeigenschaften in einer separaten Klasse zusammengefasst. Die Klassen zur Beschreibung von Knoten- und Elementlasten werden durch *Archer* von einer gemeinsamen Oberklasse abgeleitet. Zur Unterstützung der auf der Variation der Elementordnung basierenden p-Methode wird durch *Baitsch* eine Klasse zur Abbildung der Elementränder bereitgestellt.

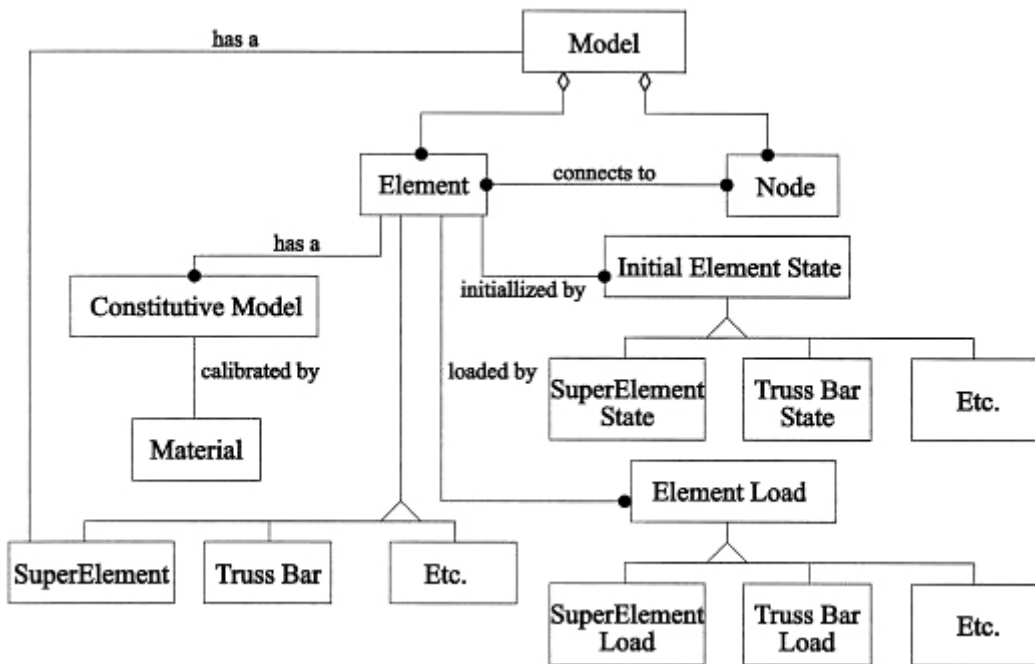


Abbildung 4.5: Klassenstruktur zur Beschreibung eines FE-Modells nach Archer [67]

Die Grundelemente einer Finite-Element-Struktur werden in [69] durch Knoten, Element und Last beschrieben. Davon ausgehend erfolgt der Aufbau einer Vererbungshierarchie (Abb. 4.7). Aus den Element- und Knotenbeschreibungen werden um die Repräsentation von Eigenschaften einer Gruppe von Knoten beziehungsweise Finiten Elementen ergänzte Klassen abgeleitet. Ein weiteres Element der Vererbungshierarchie besteht in einer Klasse, die den Knoten-Element-Verbund repräsentiert. Über entsprechende Ableitungen vereinigt diese die Eigenschaften der Knoten-, Element- und Lastbeschreibungen.

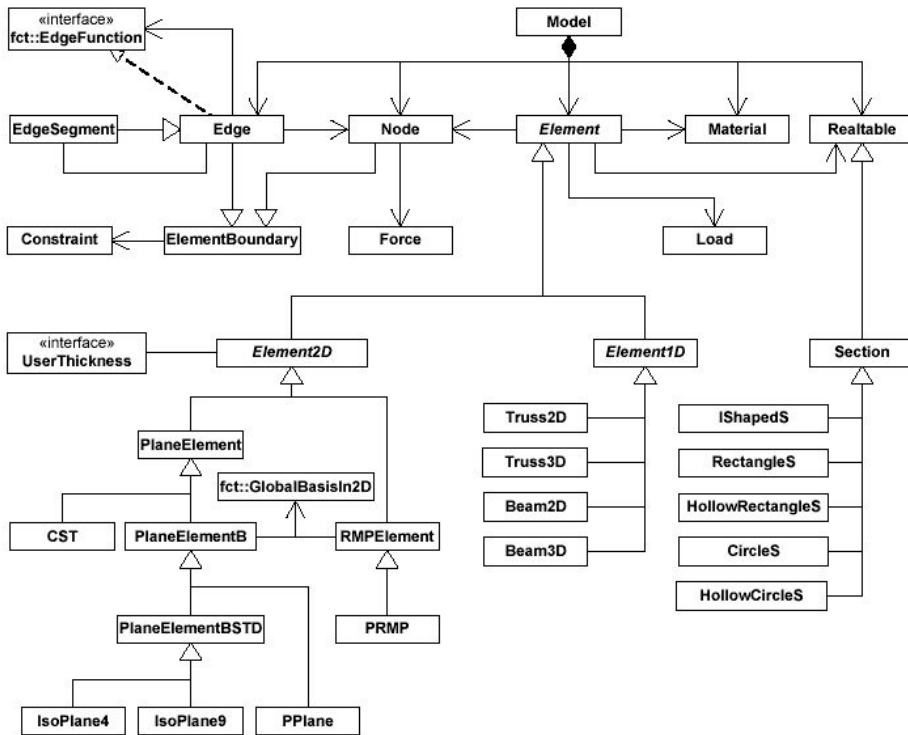


Abbildung 4.6: UML-Klassendiagramm des FE-Modells von *Baitsch* [68]

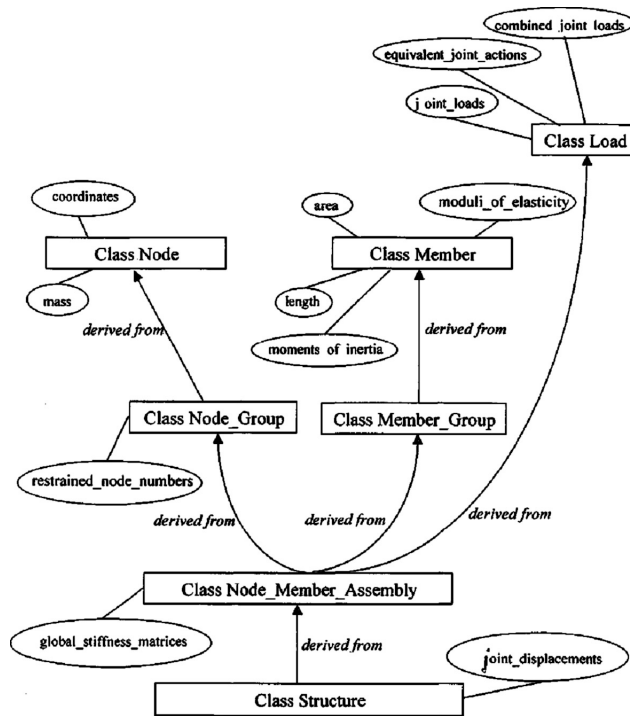


Abbildung 4.7: Darstellung der konzeptuellen Vererbungsstruktur aus [69]

Der Aufbau einer Vererbungshierarchie scheint im Vergleich zu der durch die anderen hier dargestellten Ansätze verwendeten Komposition wenig zweckmäßig. Insbesondere in Bezug auf Wartung und Erweiterung stellt diese, auf Vererbungsstrukturen aufbauende, Lösung hohe Anforderungen an den Bearbeiter. Das resultiert nicht zuletzt aus der zum Aufbau des FE-Modells genutzten Mehrfachvererbung.

Die Entwicklung von Finite-Element-Software ist in der Regel mit einem hohen Aufwand verbunden und erstreckt sich dementsprechend über einen längeren Zeitraum. Die zur Beschreibung der FE-Modelle erforderlichen Strukturen bilden dabei einen wesentlichen Bestandteil eines Softwareprodukts. Die Definition robuster Datenmodelle besitzt folglich eine große Bedeutung und setzt fundierte fachliche Kenntnisse und Erfahrungen voraus. Eine ausführliche Darstellung in Bezug auf die Robustheit und die Erweiterbarkeit von Finite-Element-Systemen erfolgt in [70]. Bedingt durch die Komplexität und langen Entwicklungszeiträume unterliegen die datentechnischen Strukturen nur geringen Modifikationen. Die Realisierung einer Analysesoftware erfordert weitere, über die Gestaltung von Datenmodellen hinausgehende Überlegungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geführt werden sollen.

4.1.6 Abbildung von Modellen zur Bemessung des Tragwerks

Die zur Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eingesetzten Fachmodelle dienen der Festlegung der Abmessungen von Konstruktionselementen. Diese Fachmodelle zeichnen sich entsprechend Abschnitt 3.3.5 durch eine, aus dem geringen Verallgemeinerungsgrad resultierende, hohe Spezifik in den eingesetzten Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen aus. Das ist mit einer sehr aufwändigen datentechnischen Beschreibung verbunden.

Die Ermittlung der Beanspruchung, die Bemessung von Konstruktionselementen und der Nachweis, dass die an das Tragwerk gestellten Anforderungen erfüllt sind, sind eng miteinander verknüpft. Für begrenzte Anwendungsbereiche, beispielsweise den Entwurf von Stahlrahmentragwerken, ergeben sich unter Einhaltung spezifischer Randbedingungen, zum Beispiel der Verwendung von Stabwerksmodellen, enge fachliche Zusammenhänge zwischen den Fachmodellen zur Abbildung des Tragsystems sowie der Berechnung und Bemessung.

In [58, 59] erfolgt eine Abbildung dieser Zusammenhänge durch die Definition einer Klasse Nachweisstelle. Deren Spezialisierungen beziehen sich fachlich auf die Abbildung zur Bemessung von Konstruktionselementen und Querschnitten (Abb. 4.8). Datentechnisch erfolgt eine Zuordnung der Nachweisstellen zu Tragelementen. Aus fachlicher Sicht ist diese Zuordnung wenig zweckmäßig. Die Gründe dafür liegen neben den verschiedenen Bezugsebenen, Konstruktionselement und Querschnitt, in der Einschränkung der Anwendung auf die Bauteilebene. Die erforderlichen Parameter zur Beschreibung des Bemessungs-

modells werden durch die Klasse Nachweiswerte bereitgestellt. Im Hinblick auf Änderungen und Flexibilität eines aus verschiedenen Fachmodellen bestehenden Modellverbundes ist die Verteilung von fachlich mit dem Bemessungsmodell assoziierten Attributen, zum Beispiel Grenzschnittgrößen von Querschnitten, auf andere Fachdatenmodelle als ungünstig zu bewerten.

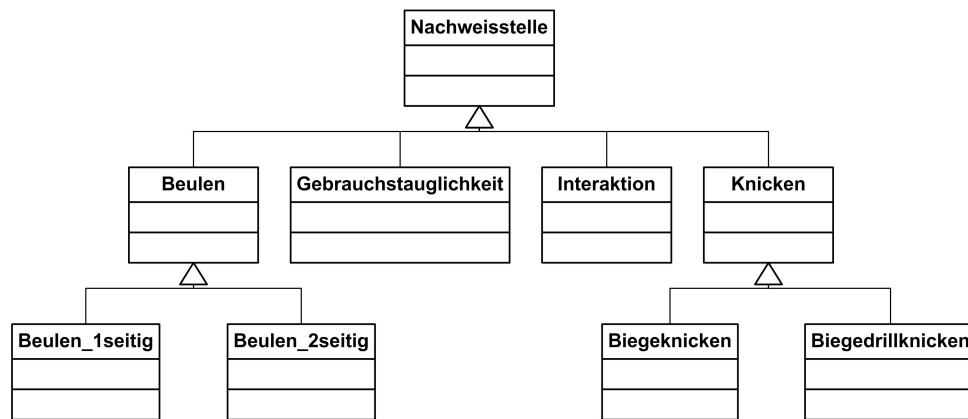


Abbildung 4.8: Vererbungshierarchie der Klasse Nachweisstelle nach [58]

Ein Versuch, nicht nur die Bemessungsmodelle, sondern auch die durch den *Eurocode2* bereitgestellten Vorschriften in einem objekt-orientierten Datenmodell zu beschreiben, ist in [71, 72] dargestellt. Die darin definierten Vererbungsstrukturen, welche Materialeigenschaften und Bewehrungstypen in Klassen zur Abbildung konkreter Strukturelemente, wie Balken und Decken, zusammenführen, erwiesen sich als nicht praktikabel. Die Gründe dafür liegen weniger in der Objektorientierung als vielmehr in den vielfältigen Aspekten, die durch eine Norm abgedeckt werden, und in dem daraus resultierenden Beziehungsgeflecht.

In [73] wird, bezogen auf das durch den *Eurocode3* [74] beschriebene Bemessungsmodell zur Beurteilung der Tragfähigkeit von dünnwandigen Querschnitten, eine objekt-orientierte Datenstruktur definiert. Dabei wird die Klasse zur Beschreibung allgemeiner Querschnittseigenschaften durch Aggregation um analysespezifische Definitionen erweitert (Abb. 4.9). Letztere lassen sich wiederum durch Aggregation im Umfang ausbauen.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine flexible Anpassung der datentechnischen Repräsentation an die fachlichen Anforderungen besteht in der Trennung der Datenstrukturen entsprechend der fachlichen Anwendung. Dies betrifft beispielsweise die Abbildung zur Berechnung und Bemessung von Tragwerken.

4.1.7 Abbildung wärmetechnischer Eigenschaften

An die Fachmodelle zur Beurteilung des thermischen Gebäudeverhaltens bestehen entsprechend Abschnitt 3.3.7 unterschiedliche fachliche Anforderungen.

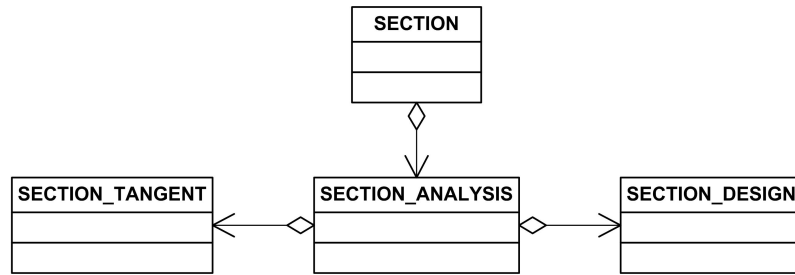


Abbildung 4.9: Datenmodell zur Repräsentation von Querschnitten [73]

Diese dokumentieren sich in verschiedenen Abstraktionsgraden und Abbildungsumfängen der Repräsentation wärmetechnischer Eigenschaften.

Die Abbildung der zur energetischen Beurteilung erforderlichen bauphysikalischen Eigenschaften eines Bauwerks erfolgt in [75] unter Verwendung des auf den *Industry Foundation Classes (IFC)* basierenden Datenmodells des *Architectural Desktop (ADT)* der Firma *Autodesk*. Die vorhandenen Strukturen werden aus Kompatibilitätsgründen nicht durch die Ableitung und Definition spezifischer Klassen erweitert. Die benötigten Eigenschaften der Bauelemente werden in einer Liste zusammengefasst und den CAD-Objekten zugeordnet.

Dass diese Repräsentation nicht den Anforderungen an die Beschreibung der geometrie- und materialbezogenen Inhomogenitäten gerecht wird, zeigt [76, 77]. Diese Ungleichartigkeiten im Aufbau bestehen sowohl senkrecht als auch pa-

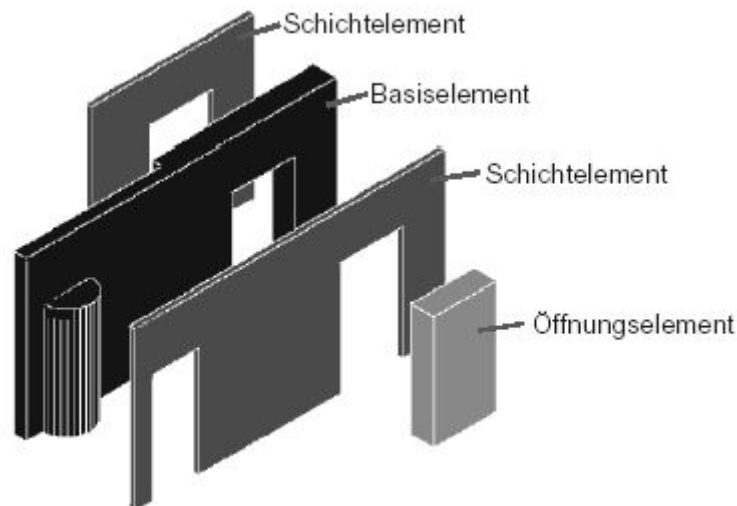


Abbildung 4.10: Beispiel für die Strukturierung eines Bauelements aus [77]

rallel zur Bauteilebene und erfordern die Abbildung von Gefachen, Schichten und Öffnungsbauteilen. Jedes Bauteil wird in Basiselemente aufgeteilt, welchen Schicht- und Öffnungselemente zugeordnet werden. Die Abbildung von

senkrecht zur Oberfläche veränderlichen Eigenschaften basiert auf der Definition von Schichten. Inhomogenitäten parallel dazu, wie sie bei gefachten Bauelementen auftreten, erfordern zur Beschreibung mehrere Basiselemente (Abb. 4.10). Allen Elementen werden entsprechende Materialeigenschaften zugeordnet. Die bauphysikalische Beschreibung des Bauwerks umfasst neben den Bauelementen auch die Festlegung der Nutzungsarten und klimatischen Eigenschaften einzelner Bereiche. Deren Beschreibung erfolgt durch Zonen, welche Räume, zum Beispiel gleicher Nutzung, zusammenfassen.

4.1.8 Abbildung von Konstruktionsmodellen

Die Beschreibung der Konstruktion erfordert die Festlegung von Bauteilen, Bauteilgruppen sowie deren Verbindungen und Bearbeitungen. Durch die in Abschnitt 3.3.6 dargestellten fachlichen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an eine datentechnische Repräsentation.

Die Konstruktion setzt sich nach [78, 79] aus Grundkonstruktionen, wie Stab, Rahmen, Fachwerk und konstruktive Knoten, zusammen (Abb. 4.11). Durch diese werden weitere Bestandteile, wie Stützen und Riegel, aggregiert. Über einen Rückverweis lassen sich rekursive Strukturen aufbauen. Neben Grundkonstruktionen enthält das Modell Verbindungsmittel und Halbzeuge, von denen konkrete Klassen, wie Schrauben oder Profile, abgeleitet werden. Die Abbildung von Bearbeitungen an Konstruktionselementen erfolgt über Typen. Die Datenstrukturen zur Beschreibung der Trenn- und Hüllkonstruktion werden unabhängig von denen der Konstruktion definiert.

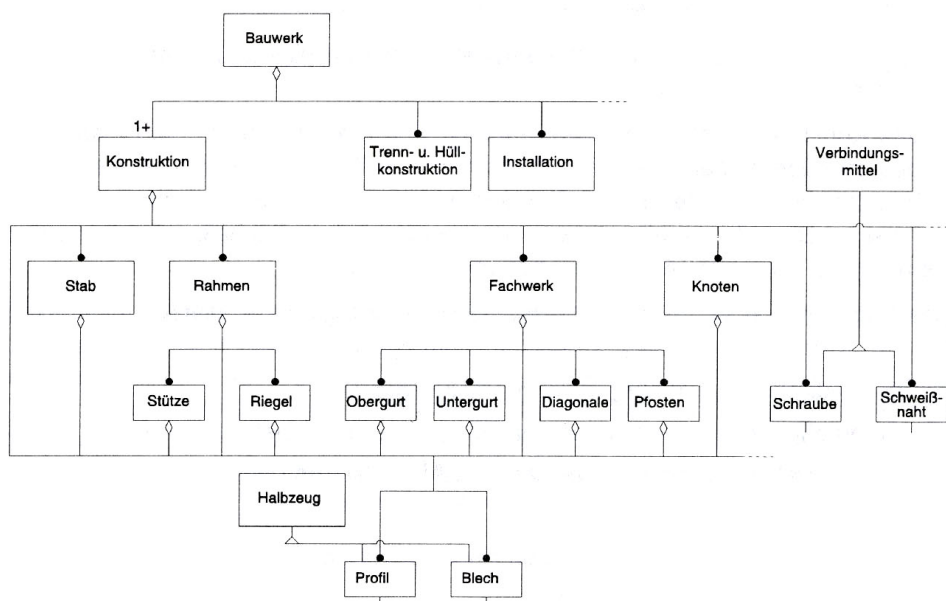


Abbildung 4.11: Modellstruktur aus [78]

Die bereitgestellte Funktionalität zum Aufbau rekursiver Strukturen gewährleistet eine flexible datentechnische Beschreibung der Konstruktion. Gleichzeitig werden jedoch die Möglichkeiten zur Sicherung einer fachlichen Konsistenz eingeschränkt.

In [58, 59] wird die Tragkonstruktion aus den Grundelementen Träger und Lager aufgebaut. Diese Definition wird um Klassen zur Abbildung von Anschlusskonstruktionen und Bauteilbearbeitungen erweitert. Dabei erfolgt eine Unterteilung in geschraubte und geschweißte Anschlüsse. Aus diesen Oberklassen werden konkrete Ausführungsformen, wie Stirnplatten- oder Winkelanschluss, abgeleitet (Abb. 4.12). Eine weitere Strukturierung, zum Beispiel nach den zu verbindenden Elementen, wie Stütze - Träger oder Stütze - Fundament, erfolgt nicht. Jede der Anschlussdefinitionen aggregiert verschiedene Bearbeitungen, die sowohl Bauteile und Verbindungselemente als auch Bauteilbearbeitungen umfassen. Die Abbildung eines Trägers wird über konstruktive Teileinheiten verwirklicht, die diesen abschnittsweise unterteilen.

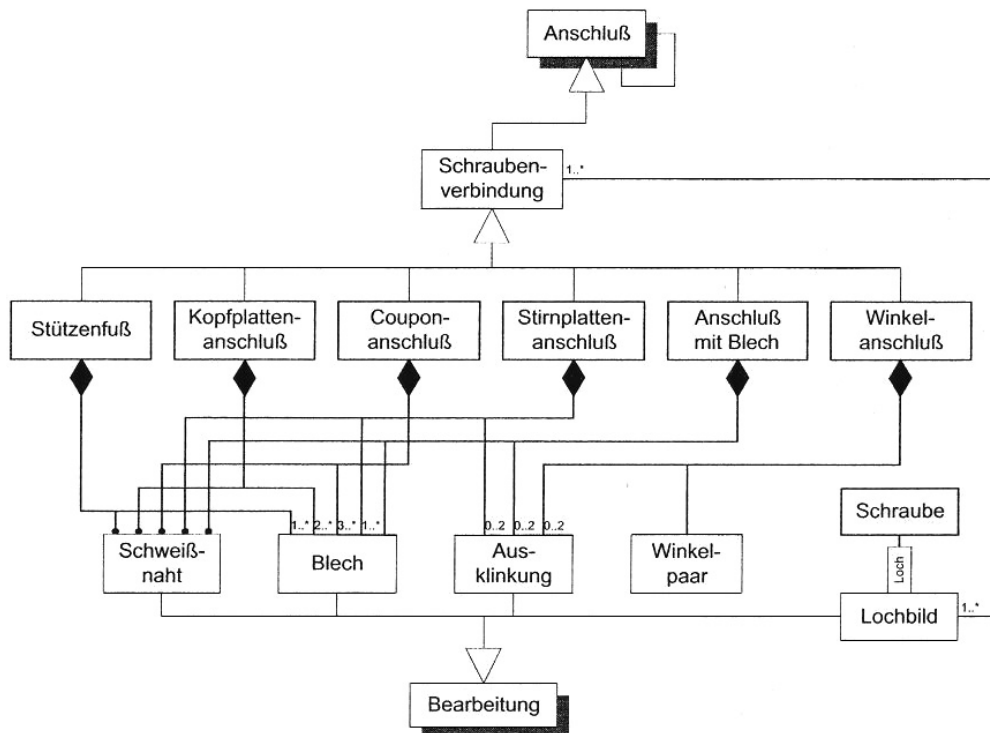


Abbildung 4.12: Datenmodell zur Repräsentation von Stahlbauanschlüssen aus [59]

Der Komplettbau erfordert eine vergleichsweise detaillierte Darstellung der Konstruktion. Ein Vorschlag für eine auf den *Industry Foundation Classes (IFC)* der *IAI* basierende Beschreibung ist in [80, 83] enthalten. Die Konstruktionselemente, wie Wand, Dach und Decke, werden in ihrem detaillierten Aufbau abgebildet, da dieser für viele Anwendungen benötigt wird. Bauprodukte,

wie Türen und Fenster, die in der Regel nur für spezifische Fachplaner von Bedeutung sind, werden dagegen nur als geschlossene Einheiten dargestellt. Die Untergliederung flächiger Konstruktionselemente erfolgt zum Einen in Dickenrichtung zur Abbildung des Schichtenaufbaus und zum Anderen in der Ebene zur Repräsentation der einzelnen Verlegebauteile. Es werden zwei Lösungs-

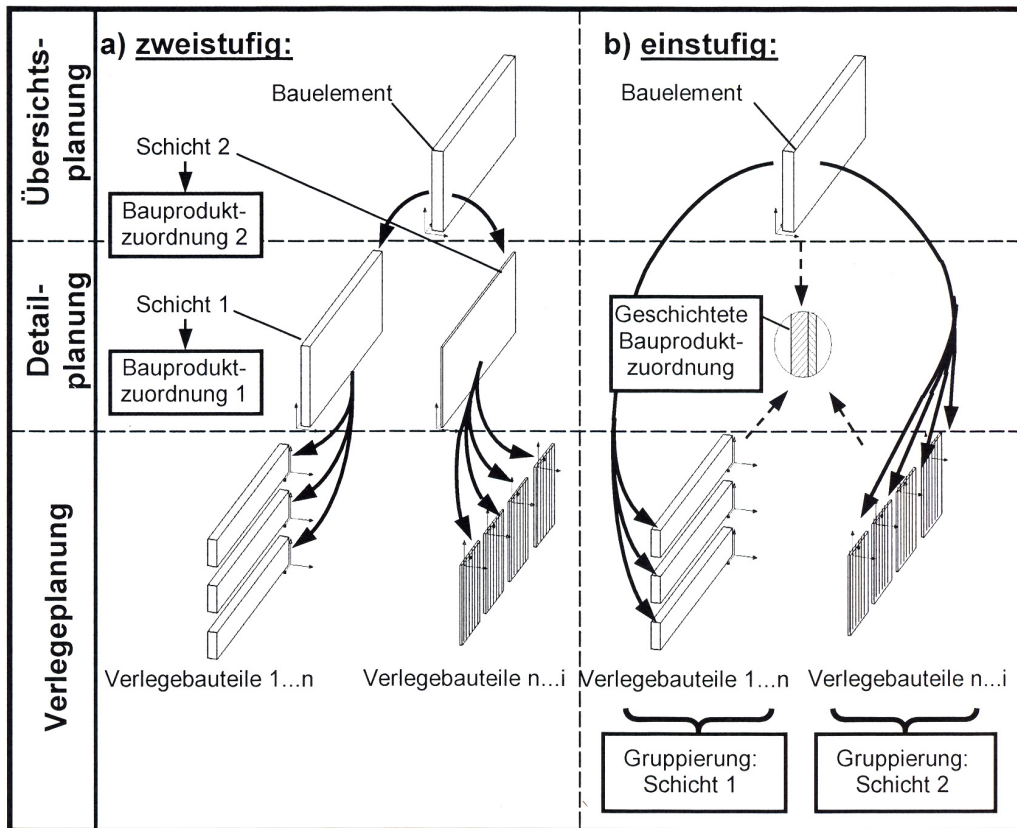


Abbildung 4.13: Lösungsansätze zur Strukturierung von Konstruktionselementen [83]

ansätze für die Beschreibung in einem Datenmodell gegenübergestellt (Abb. 4.13). Der erste Ansatz besteht in einer Strukturierung der Konstruktionselemente in Schichten und einer weiteren Auflösung in Verlegebauteile. Im Gegensatz dazu wird im zweiten Ansatz eine Zerlegung der Konstruktionselemente in Verlegebauteile vorgenommen, die bei Bedarf in Gruppen zusammengefasst werden können, und eine Zuordnung der entsprechenden Schichtinformationen. Der zweite Ansatz stellt die datentechnisch günstigere Lösung dar.

4.2 Produktdatenmodelle

4.2.1 Allgemeines

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Fachdatenmodelle ermöglichen eine Repräsentation der Bauwerkseigenschaften entsprechend der in der datentechnischen Beschreibung umgesetzten fachlichen Konzepte. Diese in den Fachmodellen enthaltenen Konzepte sind im Allgemeinen auf spezifische aus dem Gesamtkontext herausgelöste Aspekte beschränkt (vgl. Abschn. 3.1). Ebenso wenig wie die Fachmodelle selbst sind folglich die Fachdatenmodelle in der Lage, das Bauwerk als Ganzes abzubilden.

Diese Aufgabe, einer über einzelne Aspekte hinausgehenden Repräsentation des Bauwerks, soll über Produktmodelle¹ realisiert werden. Die an eine entsprechende Umsetzung der Produktmodelle gestellten Anforderungen werden zum Teil unterschiedlich definiert. Nach [81] umfasst ein solches Modell zum Beispiel allgemein Aspekte in Bezug auf Form, Funktion und Verhalten. Sehr viel konkreter wird ein Produktmodell nach [82] beschrieben: „Eine Zusammenführung der verschiedenen eingesetzten Modelle zu einem konsistenten Modell führt zum Produktmodell, welches nicht nur Daten zum Design und zur Herstellung eines Produktes enthält, sondern alle Informationen, die während des Entstehungsprozesses und weiteren Lebenslaufes anfallen.“ Die vorangegangenen Definitionen orientieren sich an den beabsichtigten inhaltlichen Eigenschaften und am abzubildenden Umfang. Davon abweichend erfolgt in [83] eine Auslegung des Produktmodells entsprechend dem Verwendungszweck als „modellhafte Darstellung eines Bauwerks zum Zweck des Produktdatenaustauschs“. Neben dem fachlichen Problem der umfassenden Beschreibung von Bauwerkseigenschaften unterliegt die Realisierung eines Produktmodells technischen Anforderungen. Diese technischen Aspekte, insbesondere der einer Standardisierung, werden in [84] betont. Unabhängig von fachlichen Forderungen wird darin festgestellt: „Ein Produktmodell ist ein ganzheitlicher EDV-Standard, durch den sämtliche Anwendungssoftware in Bauprojekten verlustfrei gekoppelt werden kann.“

In diesem Abschnitt sollen grundlegende Eigenschaften der auf verschiedenen Ansätzen basierenden Produktmodelle dargestellt werden. Dementsprechend wird hier eine allgemeine Definition des Begriffs Produktmodell verwendet. Diese Definition schließt Modelle ein,

- die eine disziplinübergreifende Repräsentation der Bauwerkseigenschaften ermöglichen,
- einen applikationsübergreifenden Datenaustausch unterstützen.

Neben den zur formalen Beschreibung der verschiedenen Bauwerksaspekte und deren gegenseitiger Beziehungen erforderlichen Datenstrukturen enthalten die-

¹Entsprechend Abschnitt 3.1 vereint der Begriff Modell, analog den Fachmodellen, die Datenmodelle und die darin beschriebenen Modelldaten.

se Produktmodelle die darin abgebildeten Inhalte. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf spezifische Fragestellungen, beispielsweise die Standardisierung von Produktdatenmodellen, eingegangen.

Die Anforderungen an Produktdatenmodelle ergeben sich aus der Notwendigkeit der ursprünglich durch den Baumeister bewerkstelligten umfassenden Betrachtung des Bauwerks. Dementsprechend ist eine ganzheitliche Abbildung der Bauwerkseigenschaften, eine integrative Planung sowie ein Daten- und Informationsaustausch zu unterstützen.

Wie im Kapitel 3 beschrieben, erfolgt die Repräsentation der Bauwerkseigenschaften in spezialisierten Fachmodellen. Die zwischen den Modellen bestehenden Abhängigkeiten zu berücksichtigen, obliegt den Fachplanern. Derzeit ist kein gewachsenes Fachmodell verfügbar, das in der Lage ist, ein Bauwerk umfassend, fachübergreifend abzubilden. Somit fehlt eine einheitliche fachliche Grundlage für die Erstellung eines Produktdatenmodells. Folglich bestehen Unterschiede in den zur Modellierung eingesetzten fachlichen und technischen Konzepten. Aus den Schwerpunkten

- fachliche² und datentechnische³ Integration sowie
- Daten- und Informationsaustausch

ergeben sich wesentliche Ausgangspunkte für die Entwicklung von Produktdatenmodellen.

Die sukzessive Verbesserung der klassischen Austausch- und Kommunikationsmedien Plan und Zeichnung ist eng gekoppelt an die Entwicklung im Bereich des CAD. Ausgehend von „digitalen“ 2D-Plänen ist die Verwendung dreidimensionaler, bauteilorientierter Geometriemodelle zur Darstellung gestalterisch-konstruktiver Eigenschaften des Bauwerks in den Bereichen Architektur und Konstruktion weit verbreitet (vgl. Abschn. 3.3). Diese Geometriemodelle bieten jedoch nur geringe Möglichkeiten zur datentechnischen und fachlichen Integration der verschiedenen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen, die zur Abbildung der Bauwerkseigenschaften eingesetzt werden. Eine über die Möglichkeiten einer allgemeinen Beschreibung durch Geometriemodelle hinausgehende Unterstützung von Planungsbeteiligten zur gegenseitigen Information wird über den Aufbau von speziellen Informationsmodellen erreicht. Diese setzen in der Regel die auf Grundlage der verschiedenen Fachdatenmodelle beschriebenen Daten über einfache Relationen zueinander in Beziehung (z.B. [85]). Die Abbildung von Modellbeziehungen bleibt auf die Datenebene beschränkt. Dementsprechend ist der über einen Informationsaustausch hinausgehende Beitrag einer derartigen Beschreibung zu einem Datenaustausch sowie einer Integration äußerst gering. Das Problem besteht also darin, eine Lösung bereitzustellen, die es ermöglicht, sowohl eine fachliche und datentechnische

²Zusammenführen und Verzahnen der Fachmodelle (vgl. 3.4)

³Strukturelle Angleichung und Mapping von Datenmodellen

Integration als auch einen Daten- und Informationsaustausch zu unterstützen; das heißt, die verschiedenen Modelle sind dementsprechend zu koppeln und gegebenenfalls ineinander zu überführen.

4.2.2 Randbedingungen aus Hersteller- und Anwendersicht

Die Diskussion von Produktdatenmodellen erfordert neben der Betrachtung fachlicher und technologischer Entwicklungen die Analyse der Interessen, Erwartungen und spezifischen Randbedingungen aus dem Umfeld der Anwender und der Hersteller von Softwareprodukten.

Im Vergleich zur gewohnten Arbeitsweise bedeutet die Erstellung eines Produktmodells zunächst einen Mehraufwand für den Fachplaner, da über die Abbildung der eigenen, auf den Fachmodellen basierenden Modellinhalte hinaus die verschiedenen Abhängigkeiten zwischen den Modellen zu beschreiben sind. Dem gegenüber steht ein zusätzlicher Nutzen in Form einer Erhöhung der Qualität der fachlichen Bearbeitung und der Verbesserung des Datenflusses innerhalb der Planung. Dieser Nutzen lässt sich allerdings in seiner Größe nur schwer allgemein vorhersagen, da er durch die konkreten Randbedingungen des Projekts bestimmt wird.

Betrachtet man zunächst einen weitestgehend sequentiellen Planungsablauf, entsteht durch die in der Regel höheren Ansprüche an die Qualität der zu liefernden Daten am Anfang der Bearbeitungskette ein Mehraufwand. Dieser bringt erst in den nachfolgenden Arbeitsschritten, beispielsweise durch einen geringeren Aufwand bei Übernahme vorhandener Planungsdaten, Vorteile. Ein auf der Beschreibung von Bauteilen basierendes dreidimensionales Gebäudemodell ist im Allgemeinen besser für eine Weiterverarbeitung geeignet als zum Beispiel eine einfache, aus Punkten und Linien bestehende, Strichzeichnung. So würde derzeit von einem Architekten unter Umständen eine entsprechend hochwertige räumliche Bauwerksbeschreibung erwartet werden. Dies bedeutet für den Architekten gegenüber der üblichen Erarbeitung von Zeichnungen und Plänen einen höheren Aufwand, sofern er nicht generell auf Basis dreidimensionaler, bauteilorientierter CAD Modelle arbeitet. Ein über die eigene Bearbeitung hinausgehender Nutzen ergäbe sich für ihn jedoch nicht. Erst nachfolgende Fachplaner würden von der höheren Planungsqualität in der Form eines automatisierbaren Datenflusses profitieren. Ohne entsprechenden Ausgleich ist der Einsatz eines Produktmodells für den Architekten folglich wenig interessant. Auch für die nachfolgenden Fachplaner ergeben sich nur Vorteile unter der Voraussetzung, dass die Planungsdaten ohne große Änderungen übernommen werden können.

Wird dagegen von einem durch überwiegend parallele Bearbeitung gekennzeichneten Planungsverlauf ausgegangen, verlagert sich der Schwerpunkt von einer möglichst einfachen, verlustfreien Übernahme großer Datenmengen hin zu einer schnellen Aktualisierung und Anpassung der verschiedenen Fachmodell-

inhalte. Eine entsprechende Unterstützung vorausgesetzt, ermöglicht in diesem Fall ein Produktmodell die Untersuchung einer größeren Anzahl von Alternativen und damit eine bessere Abstimmung zwischen verschiedenen Entwurfsaspekten. Dem entgegen ist insbesondere auf Grund der verwendeten hochspezialisierten Fachmodelle eine Abbildung der verschiedenen Modellabhängigkeiten mit einem nicht unerheblichen zusätzlichen Beschreibungsaufwand verbunden.

Diese Szenarien beschreiben Grenzwerte, zeigen jedoch, dass nicht unmittelbar von einem geringeren Planungsaufwand ausgegangen werden kann. Der Mehrwert liegt vielmehr in einer höheren erzielbaren Produktqualität. Zusätzliche Kosten aus einem damit verbundenen erhöhten fachlichen und technischen Aufwand werden nur in seltenen Fällen durch den Bauherren übernommen. Der Nutzen von Produktmodellen wird stark durch den konkreten Anwendungsfall bestimmt. Dementsprechend ist eine allgemein gültige Bewertung zum Einsatz nur schwer möglich. Nicht zuletzt erklärt sich daraus die zögerliche Verwendung von Produktmodellen in der Praxis.

Auch die Situation im Bereich der Softwareanbieter übt einen deutlichen Einfluss auf die Entwicklung und Verbreitung von Produktdatenmodellen aus. Die meisten Hersteller haben sich angesichts der spezifischen fachlichen Anforderungen auf die Unterstützung bestimmter Teile des Planungsprozesses spezialisiert. Bis auf wenige Ausnahmen, welche spezielle „in house“ Lösungen anbieten können, erfordert die Anbindung an ein Produktdatenmodell eine Öffnung zu möglicherweise in direkter Konkurrenz stehenden Produkten. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Kosten aus der Herstellung und Wartung entsprechender Schnittstellen. Trotz des mit der Öffnung der Software verbundenen Risikos, stellt die Möglichkeit einer Kopplung verschiedener Softwareprodukte ein Verkaufsargument gegenüber dem Planer dar. Seitens der Hersteller wird aus diesem Grund versucht, die Risiken durch proprietäre Lösungen im Rahmen strategischer Zusammenschlüsse oder durch eine auf Teilbereiche eingeschränkte Unterstützung von Standards für den Im- und Export von Daten zu minimieren.

Im Vergleich zu anderen Bereichen der Industrie ist das Bauwesen durch

- eine konservative Grundhaltung,
- mehrheitlich kleine bis mittlere Unternehmensgrößen,
- eine große Anzahl verschiedener Fachdisziplinen charakterisiert.

Als Folge des heterogenen Umfelds bestehen seitens der Nutzer als Einzelanwender oder organisiert als in der Regel stark lokal agierende Gruppen nur begrenzte Möglichkeiten einer direkten Einflussnahme auf die Hersteller von branchenspezifischer Software. Dies erschwert die breite, flächendeckende Einführung neuer Technologien, was durch das Festhalten an traditionellen Arbeitsmitteln seitens der Fachplaner zusätzlich verstärkt wird. Wie beispiels-

weise in [87] für den angelsächsischen Raum gezeigt wird, stellt diese bauwesenstypische konservative Grundhaltung kein nationales Phänomen dar.

4.2.3 Modellierungskonzepte

Den Ausgangspunkt verschiedener Ansätze für Produktdatenmodelle bilden die spezifischen Fachdatenmodelle, die den Fachapplikationen zugrunde liegen (vgl. Abschn. 4.1). Wie aus den vorangegangenen Abschnitten ersichtlich wird, unterscheiden sich diese Datenstrukturen sowohl in der fachlichen Ausrichtung als auch in den angewendeten technischen und fachlichen Konzepten.

Grundsätzlich kann im Rahmen einer disziplinübergreifenden Abbildung von Bauwerkseigenschaften nach *Dias* zwischen *simple sharing*, bei dem die Attribute verschiedener Fachplaner einem gemeinsam genutzten Element zugeordnet werden, und *complex sharing*, welches die Angleichung verschiedener Repräsentationen umfasst, unterschieden werden [54]. Hier soll nur Letzteres ausführlicher betrachtet werden.

Grundlegende Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich der Strukturierung und des Aufbaus von Produktdatenmodellen werden in [88] dargestellt. Darauf aufbauend sollen nachfolgend einige allgemeine Konzepte diskutiert werden. Diese unterscheiden sich in

- der Komplexität,
- der Flexibilität,
- dem durch die Softwarehersteller aufzuwendenden Implementierungsaufwand,
- dem Grad an fachlicher und datentechnischer Integration.

Gemeinsames Zentraldatenmodell

Ein Ansatz, die Eigenschaften eines Bauwerks umfassend zu repräsentieren, ist die Zusammenführung der einzelnen Fachdatenmodelle zu einem zentralen Datenmodell. Die durch die Softwareanwendung und den spezifischen Verwendungszweck geprägten Eigenschaften der Fachdatenmodelle gehen dabei verloren. Dieser Ansatz wird deshalb auch als gemeinsames Neutraldatenmodell bezeichnet. Vorteile ergeben sich durch eine enge Verzahnung der einzelnen fachlichen Aspekte, was die Konsistenzsicherung und das Versionsmanagement stark vereinfacht. Im Gegenzug resultieren aus der hohen Modellkomplexität mit zunehmendem Modellumfang unübersichtliche und schwer zu wartende Strukturen. Eine Erweiterung oder Anpassung des Datenmodells ist nur unter großem Aufwand möglich.

Durch die vorgegebenen Modellstrukturen sind die fachlichen Aspekte fest

miteinander verbunden. Für eine fachliche Anwendung, bei der sich Zusammenhänge aus dem bearbeiteten Kontext ableiten (vgl. Abschn. 3.4), erweist sich dieser Ansatz als zu unflexibel. Der Fachplaner wird in der Modellbildung und damit in Teilen seines Kompetenzbereiches eingeschränkt. Außerdem ist dieser Ansatz seitens der Entwickler von Fachapplikationen mit einem großen Implementierungsaufwand verbunden, da eine komplette Umsetzung des Datenmodells erforderlich ist.

Folglich besteht das Ziel der Entwicklung anderer Ansätze darin, die Komplexität des Gesamtdatenmodells und den Implementierungsaufwand zu reduzieren sowie gleichzeitig die Flexibilität und die Möglichkeiten der Nutzerinteraktion durch den Fachplaner zu erhöhen.

Domändatenmodelle

Alle durch die Fachdatenmodelle beschriebenen vielfältigen Eigenschaften eines Bauwerks durch ein zentrales Datenmodell zu repräsentieren, ist aus technischen und fachlichen Gründen, wenn überhaupt, nur unter großem Aufwand realisierbar. Daher erscheint es sinnvoll, die Beschreibung des Bauwerks in verschiedene Teilaspekte zu untergliedern und diese basierend auf Teilproduktmodellen zu repräsentieren. Die Integration der Fachdatenmodelle und ein möglicher Datenaustausch ist auf den Anwendungsbereich, die Domäne (application domain), beschränkt. Diese Domäne kann entsprechend den spezifischen Eigenschaften ein oder mehrere Fachdatenmodelle einschließen. Der konkrete Nutzen wird durch die Wahl der Grenzen bestimmt. Angesichts voneinander abweichender Funktionalität in den Applikationen und der unscharfen fachlichen Trennung im Bauwesen stellt die Definition eines zweckmäßigen Bereichs ein Problem dar [88].

Durch die im Vergleich zum Zentraldatenmodell stärkere Fokussierung auf einen Aufgabenbereich bestehen zwischen diesen Domändatenmodellen nur geringe Unterschiede zu denen der spezifischen Fachapplikation.

Ein wesentliches Grundprinzip vieler Ansätze besteht in der Vereinigung entsprechender Teilmodelle zu einem virtuellen Bauwerksmodell⁴. Das geschieht, indem die Teilmodelle modellintern in Beziehung gesetzt werden [87]. Da lediglich eine Vielzahl von Teilmodellen ohne eine zentrale Komponente über Relationen miteinander verbunden werden, wird dieser Ansatz auch als dezentral bezeichnet. Die definierten Zusammenhänge und die zu ihrer Definition erforderlichen Verwaltungsstrukturen bilden dabei einen wichtigen Bestandteil des Produktdatenmodells. Der Abgleich zwischen Daten, die auf Basis der Fachdatenmodelle beschrieben sind, und den Fachapplikationen erfolgt außerhalb des Produktdatenmodells. Die Vorteile dieser Abbildung liegen in der vergleichsweise geringen Komplexität und einer höheren Flexibilität des Datenmodells. Letztere erlaubt eine einfache Anpassung und Beschreibung der

⁴Modelldaten und Datenstrukturen

Modellabhängigkeiten und die Integration weiterer Anwendungsgebiete. Darüber hinaus kann der Implementierungsaufwand seitens der Anwendungsentwickler auf die Berücksichtigung weniger Teildatenmodelle begrenzt werden. Aus der weitreichenden Variabilität der datentechnischen Beschreibung resultiert jedoch gleichzeitig eine große Anzahl zu definierender und zu verwaltender Beziehungen.

Der allgemeine Fall der datentechnischen Kopplung wird durch Lämmer u.a. [55] folgendermaßen charakterisiert: "... data models are developed independently by specialist software vendors. Therefore, the external representation of this data is not straightforward mapable among different applications and is not necessarily compatible." Die Unterschiede, die zwischen den Datenmodellen bestehen, resultieren aus den verwendeten technischen und fachlichen Konzepten. Der zur Definition der Modellzusammenhänge erforderliche Aufwand wird daher maßgeblich durch die Beschaffenheit der Datenmodelle bestimmt.

Verwendung gemeinsamer Ressourcen, Metamodell und Kerndatenmodell

Der Aufwand zur Beschreibung von Modellabhängigkeiten kann durch eine Angleichung der Modelleigenschaften verringert werden. Die nachfolgenden Modellierungskonzepte streben eine Angleichung der Datenstrukturen an.

Eine Vereinheitlichung der im Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Teildatenmodelle lässt sich unter anderem durch die Nutzung gemeinsamer Ressourcen erreichen. Diese enthalten allgemeine Grundelemente ohne baufachliche Semantik, zum Beispiel Datentypen, Geometrie- oder Topologiebeschreibungen.

Eine weitere Möglichkeit zur Vereinheitlichung der Teildatenmodelle besteht in der Bereitstellung grundlegender datentechnischer Konzepte und Konstrukte durch ein übergreifendes Metamodell. Die Angleichung erfolgt dabei lediglich für die datentechnische Modellierung und ist nicht gleichbedeutend mit der inhaltlichen und fachlichen Zusammenführung von Modellen. Somit resultieren aus der technischen Integration keine Zwänge für die baufachliche Nutzung. Die Zusammenführung entsprechend den fachlichen Konzepten und Inhalten ist über interne Abbildungen zu realisieren.

Bestehen nur geringe Unterschiede in Teilen verschiedener Teildatenmodelle, können diese in einer übergreifenden Datenstruktur zusammengefasst werden. Durch die dabei gebildete zentral verfügbare Komponente wird ein für alle Modelle identischer Kern etabliert. Die Beschreibung spezieller Eigenschaften erfolgt weiterhin in den Teilproduktdatenmodellen, die diese allgemeinen, modellübergreifend bereitgestellten Kernelemente erweitern.

Alternativ zur festen Integration von Teilen der Datenmodelle in einem übergreifenden Kern lassen sich Teildatenmodelle auch durch interne Abbildungen

mit einer zentralen Komponente verbinden. Dies bietet die erforderliche Flexibilität insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Erweiterung des Gesamtdatenmodells um weitere fachliche Aspekte (zum Beispiel [87]). Dieser Ansatz wird in einigen Projekten zusätzlich um ein Metamodell (siehe oben) erweitert [88, 89, 90]. Grundsätzlich werden durch einen Ansatz mit einem zentralen Kern eine bessere Koordination und eine gleichartigere Struktur im Vergleich zur Verwendung gemeinsamer Ressourcen ermöglicht. Darüber hinaus zeichnet sich das auf diesem Ansatz basierende Gesamtdatenmodell durch eine relativ zum gemeinsamen Neutraldatenmodell (vgl. Abschn. 4.2.3) geringere Komplexität aus. Es widerspiegelt somit einen Kompromiss aus dezentralem und zentralem Ansatz.

Die Bildung eines zentralen Kerns setzt, wenn auch nur in Teilen, ähnliche Datenstrukturen und fachliche Konzepte voraus. Im Bauwesen ist dies, wie bereits erläutert, im Allgemeinen nicht der Fall. Darüber hinaus ist der Austausch von Daten und die Integration der einzelnen Modelle auf das Kerndatenmodell beschränkt. Folglich besteht auch bei diesem Ansatz das Hauptproblem in der praktischen Definition und einer zweckmäßigen Abgrenzung der gemeinsamen Strukturen. Neben einem zu umfangreichen Kerndatenmodell und damit denen eines gemeinsamen Zentraldatenmodells vergleichbaren Problemen (vgl. Abschn. 4.2.3), besteht insbesondere bei einer hohen Anzahl verschiedener zu berücksichtigender Aspekte die Gefahr der Erstellung eines stark verallgemeinerten Datenmodells mit der Folge, dass disziplinübergreifende Abhängigkeiten nicht detailliert genug abgebildet werden.

Die Art und der Umfang der gegenseitigen Verflechtung wird durch den konkreten Planungsgegenstand und die angewendeten Bearbeitungsmethoden bestimmt. Dies erfordert eine Anpassung des Kerns an die spezifische fachliche Situation.

Da nur eine begrenzte Anzahl an fachlichen Konzepten den Anforderungen der Bildung eines Kerndatenmodells genügt, bedeutet dieser Ansatz für den Fachplaner eine Einschränkung in Bezug auf die Modellierung der Bauwerkeigenschaften. Diese Einschränkung resultiert in einem Mehraufwand, der sich durch eine Ausweitung des Verantwortungsbereiches über die fachliche Integrationsfähigkeit (vgl. Abschn. 2.1.3) der Lösung hinaus auf die Art und Weise der Modellierung ergibt.

4.2.4 Standardisierte Produktdatenmodelle

Durch die Standardisierung wird eine Vereinheitlichung der zur Integration und zum Datenaustausch erforderlichen technischen und fachlichen Basis angestrebt. Aus technischer Sicht ist dieses Ziel durch die Vereinheitlichung der Grundstruktur von Produktdatenmodellen und den darin enthaltenen Datenstrukturen erreichbar. Die Problemfelder aus fachlicher Sicht wurden in Abschnitt 3.4 betrachtet.

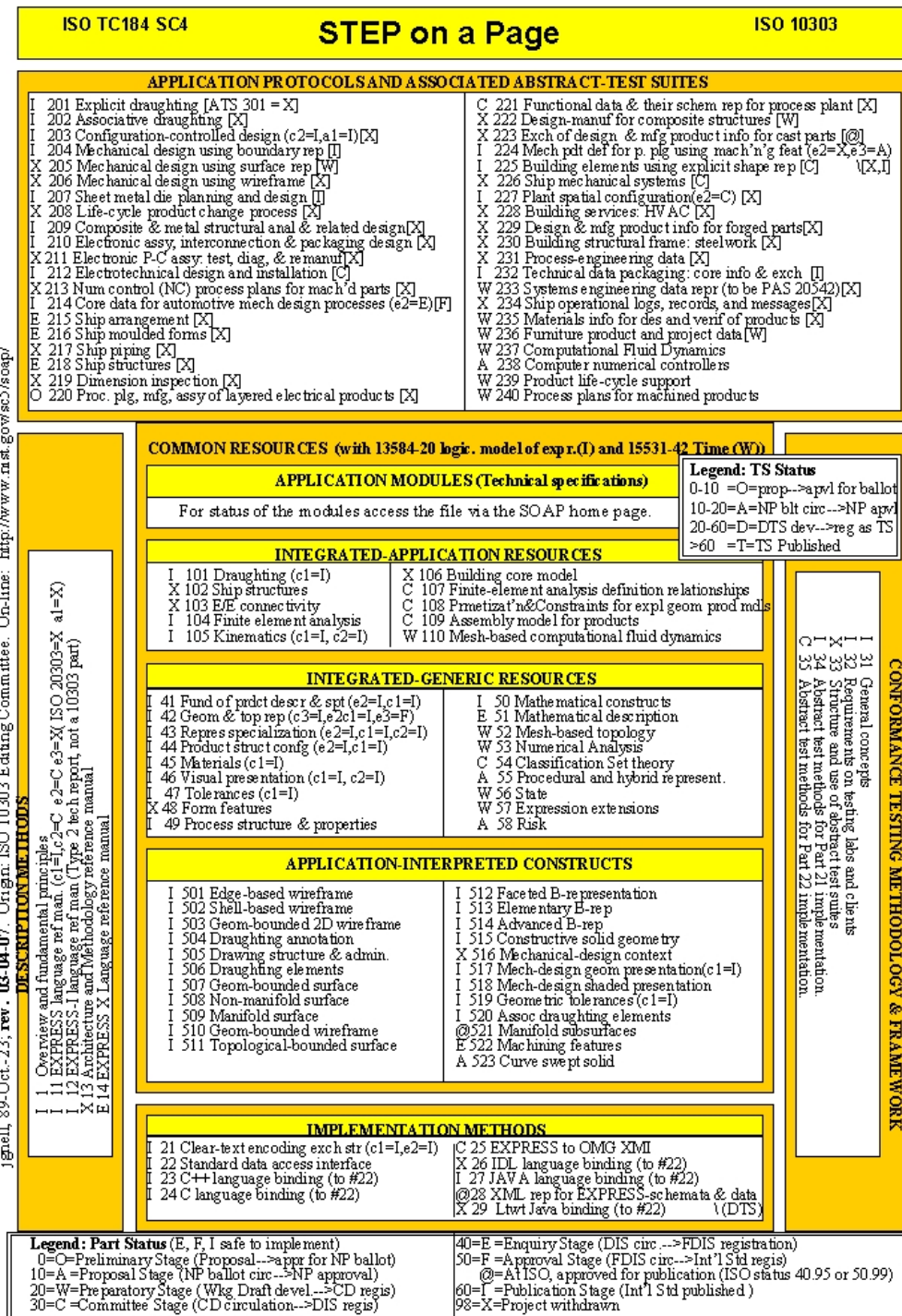
Für das Bauwesen konzentriert sich die Entwicklung von Produktdatenmodellstandards im Wesentlichen auf zwei Initiativen. Diese bestehen in den *Industry Foundation Classes (IFC)* der *International Alliance for Interoperability (IAI)*[91, 92] und dem *Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)* der *International Organization for Standardization (ISO)*[93]. Darüber hinaus bestehen für den Stahlbau relevante Arbeiten im durch die *Universität Leeds* und das *Steel Construction Institute* erarbeiteten *CIMsteel Integration Standard (CIS)*[94] und dem *Produktmodell Stahlbau* des *Deutschen Stahlbauverbands (DSTV)*[95]. Diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Standardisierungsbemühungen der *ISO* im Bereich der Produktmodellierung begannen 1984 mit der Erarbeitung der *ISO10303* [96]. Diese auch unter der Bezeichnung *Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)* bekannte Norm ist ein Zusammenschluss verschiedener Einzelstandards, welche die Anwendung und Entwicklung von Produktmodellen vereinheitlichen sollen. Das Anwendungsgebiet erstreckt sich über nahezu alle Industriezweige, beginnend beim Bauwesen über die Elektrotechnik bis zum Flugzeug-, Maschinen-, Schiff- und Automobilbau. Dadurch soll eine branchenübergreifende Kopplung von Datenmodellen ermöglicht werden. Der Lebenszyklus, für den sämtliche relevante Informationen eines Produkts abzubilden sind, wird von der Entwicklung über die Fertigung, die Nutzung, den Abbau bis zur Entsorgung definiert. Die Standardisierung umfasst sowohl Datenstrukturen als auch Werkzeuge, wie die Beschreibungssprache *EXPRESS*, und Vorgehensweisen zur Beschreibung, Umsetzung und zum Konformitätstest. Die Datenstrukturen beinhalten dabei die *integrated information resources* (Informationsmodelle), welche sich weiter in *generic resources* (Basismodelle), *integrated application resources* und *application interpreted resources* aufteilen, und die *application protocols* (Anwendungsprotokolle). Letztere repräsentieren die Datenmodelle für ein Anwendungsgebiet, indem sie die benötigten Elemente aus den Ressourcen identifizieren und in den erforderlichen Kontext stellen.

Für die Anwendung im Bauwesen relevant sind dabei *ISO 10303-201/202* für den zeichnungsbasierten Austausch, *AP255* für die Beschreibung eines dreidimensionalen Gebäudemodells, *AP209* für Teile des konstruktiven Ingenieurbaus und *AP104* für die Finite-Element-Analyse.

Die schrittweise Weiterentwicklung der traditionellen Austausch- und Kommunikationsmedien Plan und Zeichnung über „digitale“ 2D-Pläne hin zu dreidimensionalen bauteilorientierten Modellen (vgl. Abschn. 4.2.1) zeigt sich auch in der Entwicklung der *ISO10303*. Die enge Kopplung an CA(A)D Systeme wird vor allem in den stark an der Beschreibung geometrischer Eigenschaften ausgerichteten Datenmodellen deutlich (vgl. Abschn. 4.2.1).

Nach [84] erfolgt im Bereich des Bauwesens in Deutschland keine praktische Anwendung eines auf STEP basierenden Produktmodells. Im Flugzeug-, Maschinen- und Automobilbau besitzen die auf diesem Standard basierenden Mo-



jgnell, 89-Oct-23; rev. 03-04-07. Origin: ISO 10303 Editing Committee. On-line: <http://www.nist.gov/sc7/soap/>

DESCRIPTION METHODS
 I 1 Overview and fundamental principles
 I 11 EXPRESS language ref man. (c1=L,c2=C e2=C,e3=X) ISO 20303-X at I-X
 I 12 EXPRESS-I language ref man. (Type 2 tech report, not a 10303 part)
 X 13 Architecture and Methodology reference manual
 E 14 EXPRESS X Language reference manual

CONFORMANCE TESTING METHODOLOGY & FRAMEWORK
 I 31 General concepts
 I 32 Requirements on testing labs and clients
 X 33 Structure and use of abstract test suites
 I 34 Abstract test methods for Part 21 implementation
 C 35 Abstract test methods for Part 22 implementation

Abbildung 4.14: Übersicht über den Aufbau der ISO10303 [97]

delle eine größere Bedeutung und sind im Vergleich zum Bauwesen weiter verbreitet. Unter anderem dadurch wird die vorhandene Fokussierung auf eine geometrische Repräsentation des Produkts zusätzlich gefördert und führt zu sehr begrenzten Möglichkeiten der Repräsentation fachspezifischer Abstraktionen. In [75] und [80, 83] werden diesbezüglich die fehlende Möglichkeit einer parametrisierten Beschreibung der Bauteilgeometrie und die geringe Unterstützung zur Abbildung fachlicher Informationen bemängelt. Darüber hinaus wird durch [80, 83] der große Umfang, durch den die Einarbeitung und Umsetzung erschwert wird, und das unflexible und zeitaufwändige Verfahren der Einführung und Erweiterung der Anwendungsprotokolle als Ursache für die geringe Akzeptanz angeführt.

Mit der 1995 von der Firma *Autodesk* angeregten *IAI* [91] ist eine weitere Initiative hinzugekommen, die sich im Gegensatz zur *ISO10303* ausschließlich auf das Bauwesen konzentriert. Bei der *IAI* handelt es sich um einen Zusammenschluss von Bauherren, Baufirmen, Ingenieur- und Architekturbüros sowie Softwareherstellern, die mehrheitlich aus dem Bereich CAD stammen. Darüber hinaus ist eine Vielzahl an Forschungsinstituten an der Entwicklung beteiligt.

Die *IFC* besitzen, wie Abbildung 4.15 zeigt, eine streng hierarchisch, modular aufgebaute Struktur. Dabei erfolgt eine Aufteilung in vier Schichten von abstrakt zu konkret in *resource*, *core*, *interoperability* und *domain layer*. Es ist festgelegt, dass von Elementen einer Schicht nur auf die der nächst Allgemeineren referenziert werden darf. Durch den *Ressource Layer* werden allgemeine Grundelemente, zum Beispiel zur Geometriebeschreibung, bereitgestellt. Deren Nutzung ist für die darüber liegenden Schichten vorgeschrieben. Der *Core Layer* definiert generische Datenstrukturen und legt somit einheitliche Grundstrukturen für den *interoperability* und *domain layer* fest. Zur Vermittlung zwischen den verschiedenen Anwendungsbereichen dient der *interoperability layer*, der Elemente beinhaltet, die von mehr als einem Modell des *domain layers* benötigt werden. In der äußersten Schicht werden durch die Domaindatenmodelle konkrete, für das Fachgebiet relevante Datenstrukturen bereitgestellt.

Die *IAI* stellt in der aktuellen Version *IFC 2x Edition 3 (IFC2x3)* Datenmodelle bereit, die eine Unterstützung der Fachbereiche Tragwerksplanung, Ingenieurbau, Haustechnik, Elektrotechnik, Facility Management, Kosten- und Ablaufplanung sowie Architektur ermöglichen. Aus dem großen Umfang von derzeit über 600 Klassen [92] ergeben sich ähnliche Probleme in Bezug auf die Umsetzung wie bei der *ISO10303*. Folglich sind nur wenige Anwendungen verfügbar, die die aktuelle Version *IFC2x3* unterstützen. Ein Großteil der am Markt vorhandenen Implementierungen beruht auf der Version 2x mit einer Einschränkung auf die Architekturdomäne. Die Verbreitung ist also im Wesentlichen auf den Bereich CA(A)D begrenzt.

Die *IFC* wird im praktischen Umfeld vor allem als Format für den dateibasierten Datenaustausch wahrgenommen [85, 98]. Vorteile im Vergleich zu *STEP*

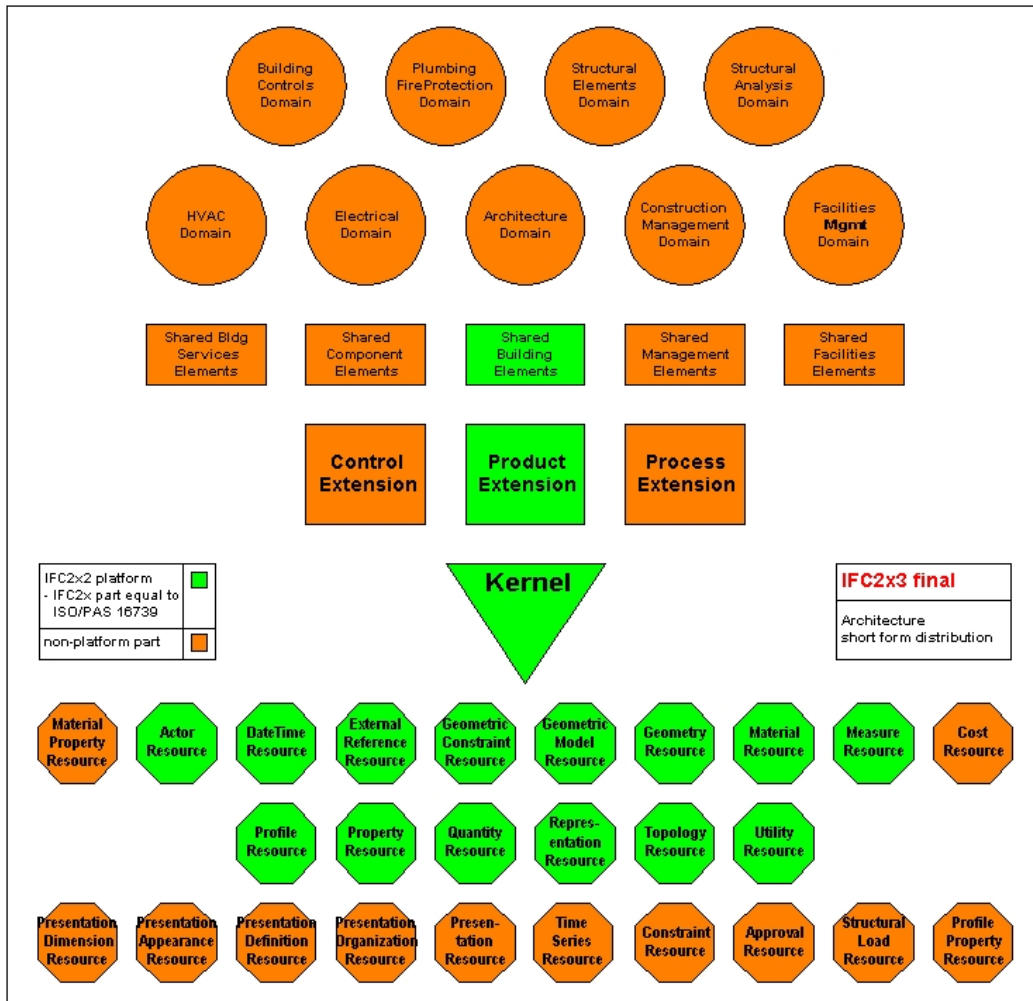


Abbildung 4.15: Architektur der *Industry Foundation Classes* [91]

ergeben sich jedoch aus dem moderneren technischen Konzept und der sehr guten Dokumentation [80, 83].

Mit dem *CIMsteel Integration Standard* und dem *Produktmodell Stahlbau* des *DSTV* liegen zwei spezifisch auf den Stahlbau zugeschnittene Entwicklungen vor. Der durch die *Universität Leeds* und das *Steel Construction Institute (SCI)* im Rahmen des durch die europäische Union geförderten Forschungsprojekts *Eureka 130* erarbeitete Standard wurde in einer ersten Version 1995 veröffentlicht. 1999 ersetzte das *SCI* die erste Version durch den erweiterten *CIS/2*. Mit der aktuellen Version *CIS/2.1* erfolgte 2003 die bisher letzte Aktualisierung.

Bei der Entwicklung wurde von Beginn an auf weitgehende Nutzung und Konformität zur *ISO10303* Wert gelegt. Eine Aufnahme in die *STEP* Normenreihe konnte jedoch trotz starker Bestrebungen nicht erreicht werden. Fokus des *CIS/2* liegt auf der weitgehenden Unterstützung des konstruktiven Stahlbaus im Entwurf, der Analyse, der konstruktiven Durchbildung (Detaillierung), der

Herstellung und Errichtung. Diese Bereiche werden im Modell durch die drei Sichten Analyse, Entwurf und Fertigung repräsentiert. Das Einsatzgebiet erstreckt sich über den Wohnungs-, Industrie- und Geschäftsbau. Obwohl durch den *CIS/2* im Vergleich zur *IAI* ein kleiner Anwendungsbereich abgedeckt wird, enthält dieser 269 Klassen (conformance classes)[12].

Einen vergleichsweise pragmatischen Ansatz verfolgt das auf [99] basierende *Produktmodell Stahlbau* des *Deutschen Stahlbauverbands*. Dies zeigt sich zum Einen am Umfang der fachlichen Beschreibung, der sich sehr eng am Bedarf der Industrie orientiert, und zum Anderen am Einsatz einfacher technischer Modellierungskonzepte. Bis auf die Verwendung der Modellierungssprache *EXPRESS* wurde auf einen Einsatz von Ressourcen der *ISO10303* und einer damit dazu möglichen Konformität zu Gunsten einer für die praktische Nutzung besser geeigneten featurebasierten, parametrisierten Bauteilbeschreibung verzichtet. Seitens des *DSTV* wird eine Abbildung angestrebt, die weniger auf eine allgemeine Geometriebeschreibung ausgerichtet ist, sondern sich vielmehr an den spezifisch angepassten Fachmodellen orientiert [84]. Durch das Produktdatenmodell werden lediglich die Bereiche Konstruktion und Statik abgedeckt. Um die individuelle Anpassung an die durch die Software unterstützte Funktionalität zu erreichen, stehen die sieben in Abbildung 4.16 dargestellten Implementationsbereiche zur Verfügung. Die aktuelle Version vom April 2000 [100] ist auf Grund der kompakten Definition und des hohen Detaillierungsgrades in mehreren kommerziellen Softwareanwendungen aus den Bereichen CAD und CAE verfügbar. Der Verzicht auf komplexere und leistungsfähigere datentechnische Modellierungskonzepte steht jedoch einer Weiterentwicklung entgegen.

Die praktischen Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass die Etablierung eines einheitlichen Standards sehr aufwändig und zeitintensiv ist. Die Realisierbarkeit und der praktische Nutzen standardisierter Produktdatenmodelle werden sehr unterschiedlich beurteilt. Die Anwendung eines Produktmodellstandards wird durch

- die Grenzen der Übereinstimmung von Softwareprodukten,
- die Vereinheitlichung der Beschreibung von Bauelementen,
- die Formalisierbarkeit der Beziehungen zwischen Fachmodellen

bestimmt.

Wie im Abschnitt 4.2.2 erläutert, bestehen seitens der Softwarehersteller grundsätzliche Bedenken gegenüber einer Öffnung ihrer Produkte. Folglich stehen sie einem Standard skeptisch gegenüber. Nach [75] besteht für die Softwarehersteller darüber hinaus ein Konflikt zwischen einer Angleichung durch den Standard und der Notwendigkeit, sich durch zusätzliche Funktionalität von Mitbewerbern abzugrenzen.

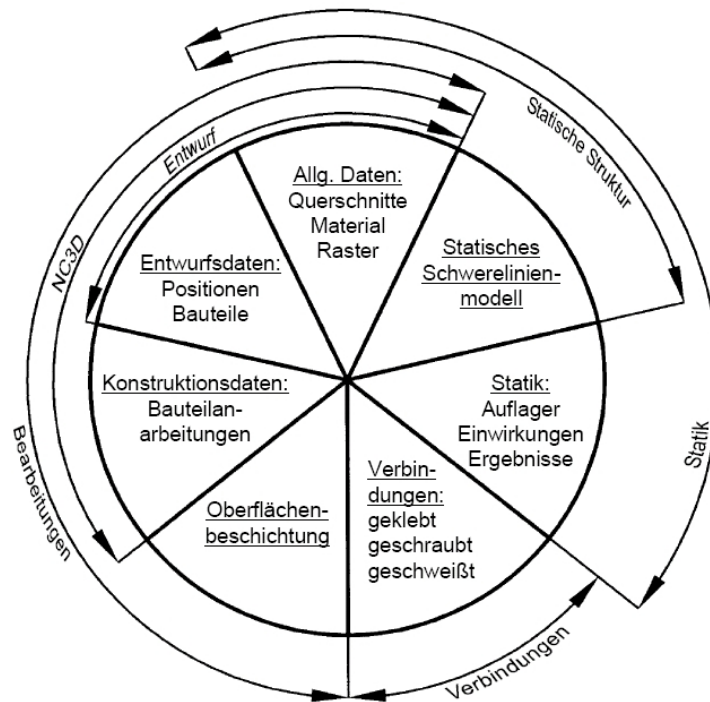


Abbildung 4.16: Implementationsbereiche der Produktschnittstelle Stahlbau [100]

Weitere Probleme für eine einheitliche Beschreibung resultieren aus dem bis auf wenige Ausnahmen, wie beispielsweise Teile des Stahlbaus oder des Fertigteilbaus, geringen Standardisierungsgrad von Bauelementen und -produkten.

Die angestrebte Allgemeingültigkeit eines Produktmodellstandards erfordert die Einbindung einer großen Gruppe von Anwendern und Herstellern. Durch die zum Teil sehr gegensätzlichen Interessen ergibt sich lediglich eine sehr kleine gemeinsame Basis zur Bildung eines Standards. Über diesen Konsens hinausgehende fachliche und technische Anforderungen an die Abbildungsfunktionalität bleiben zwangsläufig unberücksichtigt. Diese Beschränkung lässt sich zumindest zum Teil durch die in den *IFC* bereitgestellten Möglichkeiten einer dynamischen Erweiterung verringern (*IfcPropertySets*). Die Anwendung dieser Erweiterungsmöglichkeiten setzt jedoch die gegenseitige Absprache der Beteiligten Hersteller bzw. Fachplaner zur Vereinbarung der zusätzlichen, außerhalb des Standards angebotenen Funktionalität voraus. Weitere Probleme bestehen einerseits in einem Ausufern der bereitgestellten Datenstrukturen und andererseits in der Dominanz einzelner Hersteller oder Nutzer, die auf Grund ihrer Vormachtstellung den Standard als Marktinstrument einsetzen könnten [87]. Dies ist vor allem seitens der Softwarehersteller verbunden mit der Befürchtung, dass bedingt durch die erforderliche Detaillierung ein allgemein gültiger Standard kaum mit vertretbarem Aufwand umzusetzen und zu warten ist.

Grundsätzlich bietet ein Standard gegenüber der proprietären Einzelentwicklung den Vorteil, dass nur eine Schnittstelle gepflegt werden muss. Allerdings ergibt sich auch der Nachteil, dass entsprechend qualifiziertes Personal vorgehalten werden muss. Dies ist in der Regel mit nicht unerheblichen Kosten verbunden. In [83] wird die Umsetzung der im Umfang vergleichsweise übersichtlichen *Produktschnittstelle Stahlbau* in das CAD System *BOCAD* in der Größenordnung von 250.000,- Euro beziffert. Insbesondere für kleinere Hersteller ist somit eine zögerliche Realisierung der Anbindung an einen Produktmodellstandard zu verstehen. Und das, obwohl gerade diese kleinen Anbieter mit ihren Softwareprodukten durch den möglichen Datenaustausch (vgl. Abschn. 4.2.2) in Konkurrenz mit den großen Softwarehäusern und gegenüber strategischen Allianzen von einem allgemeinen Standard begünstigt wären.

Neben der Verfügbarkeit eines Standards spielt die Qualität der Umsetzung, die sich durch ein fehlerfreies Funktionieren und durch Aktualität auszeichnet, eine entscheidende Rolle. Dem sehr restriktiven und aufwändigen Verfahren zur Umsetzung und Konformitätsprüfung nach *ISO10303* steht das einfache, flexiblere Vorgehen der *IAI* gegenüber. Für die praktische Anwendung bietet Letzteres den Vorteil einer früheren Verfügbarkeit, ist jedoch auch mit der Gefahr verbunden, an Verlässlichkeit der Implementierung zu verlieren.

Die Beschreibung eines Bauwerks erfordert das Zusammenwirken der einzelnen Fachmodelle in einer projektspezifischen Art und Weise. Ohne Annahmen, beispielsweise zum Anwendungsbereich und zu den eingesetzten fachlichen Konzepten durch den Produktmodellstandard, ist die Repräsentation der Modellzusammenhänge auf eine sehr abstrakte Ebene begrenzt. Die Intention der hier vorgestellten Ansätze liegt folglich hauptsächlich in der Realisierung eines Datenaustauschs und weniger in der Unterstützung einer fachlichen Integration.

Standards wie *STEP* und *IFC* finden derzeit zur praktischen Bearbeitung von Bauplanungsaufgaben noch keine breite Anwendung. Die Hauptgründe dafür liegen im Umfang und der Komplexität der Standards sowie deren mangelnder Flexibilität (vgl. Abschn. 4.2.2).

4.2.5 Dynamische Produktdatenmodelle

Produktdatenmodelle müssen die Beschreibung des Bauwerks über die konzept-, fach- und planungsphasenspezifischen Grenzen hinaus ermöglichen. Folglich bestehen hohe Anforderungen an die Datenstrukturen. Diese lassen sich bedingt durch die technische und fachliche Entwicklung der verschiedenen Fachdisziplinen und die hohe Individualität von Bauprojekten nur schwer vollständig und allgemein gültig vordefinieren.

Während eine Möglichkeit im Einsatz von Datenmodellen liegt, die über einen längeren Zeitraum unverändert bleiben (siehe vorangegangener Abschnitt), ba-

sieren dynamische Produktdatenmodelle auf der Anpassung der Datenstrukturen während der Nutzung. Letztere ermöglichen eine spezifischere datentechnische Beschreibung, wodurch die Verwendung verschiedener fachlicher Konzepte zur Beschreibung von Bauwerkseigenschaften, die sich in Bezug auf Detaillierung, Abstraktion und Strukturierung unterscheiden, besser unterstützt werden kann.

Eine durch die Vorgehensweise bei der Erstellung und Nutzung charakterisierte Form der dynamischen Produktmodelle sind die durch *Kowalczyk* in [82] beschriebenen, evolutionären Produktdatenmodelle. Der grundlegende Ansatz ist ein in Daten und Struktur mit dem Lebenszyklus des Bauwerks mitwachsendes Modell. *Kowalczyk* setzt voraus, dass bedingt durch den Unikatcharakter von Bauobjekten spezifische Datenmodelle zur Beschreibung erforderlich sind. Diese Datenstrukturen bilden somit neben den eigentlichen Daten einen Teil der Erstellung eines Produktmodells. Der Ansatz selbst ist fachlich neutral, das heißt er enthält keine bauspezifische Semantik. Das Datenmodell umfasst lediglich die zu einem Zeitpunkt wirklich benötigten Elemente. Für den einleitend in Abschnitt 4.2.2 diskutierten sequentiellen Planungsablauf würden sich zunächst verhältnismäßig kompakte Modelle ergeben. Die zugrunde liegende Datenstruktur würde während der weiteren Bearbeitung entsprechend den verschiedenen Anforderungen angepasst werden. Diese Struktur müsste konsequenterweise denen der verschiedenen Fachdatenmodelle stark ähneln. Angesichts des für die Anpassungen der Modelle erforderlichen Aufwands stellt die Wahl einer geeigneten Modellstruktur ein nicht zu unterschätzendes Problem dar.

Durch die Verwendung einer gemeinsamen Datenstruktur ist auch der andere Extremfall einer weitgehend parallelen Bearbeitung sehr problematisch. Dieser führt bei entsprechender Detaillierung zu Eigenschaften, die mit denen eines Zentraldatenmodells (vgl. Abschn. 4.2.3) vergleichbar sind.

Die mit der Modellarchitektur verbundenen Probleme lassen sich, wie bereits in Abschnitt 4.2.3 dargestellt, durch die Verwendung eines auf Teildatenmodellen basierenden Ansatzes auflösen. Beispielsweise wird durch *Willenbacher* in [101] ein über den Lebenszyklus eines Bauwerks anpassbarer Modellverbund aus dynamisch definierbaren Teildatenmodellen propagiert. Durch Verzicht auf die Definition eines Kerndatenmodells werden Teile der Partialdatenmodelle direkt durch Verknüpfungen aufeinander abgebildet. Diese realisieren dabei das erforderliche *mapping* zur Beschreibung der Modellabhängigkeiten.

Die Möglichkeit der Anpassung der Datenstrukturen ermöglicht eine sehr umfassende und gleichzeitig spezifische Beschreibung eines Bauwerks. Die erhöhte Flexibilität durch den Umgang mit dynamisch gestaltbaren Datenmodellen ist allerdings für den Fachplaner mit einer Ausweitung seines Aufgabenbereichs verbunden. Ihm obliegt über die Erstellung seiner Fachmodelldaten hinaus die Definition und Wartung der zugrunde liegenden Datenstrukturen. Dies stellt

insofern eine anspruchsvolle Aufgabe dar, als dass er zur Abschätzung von Folgen auf das Gesamtmodell, die aus den Änderungen seines Datenmodells resultieren, die zum Teil komplexen Beziehungen zu allen anderen Fachdatenmodellen kennen muss. Zusätzlich ist durch ihn sicherzustellen, dass Daten bei Änderungen an der Modellstruktur vollständig und richtig erhalten bleiben bzw. für die neue Verwendung aufbereitet werden. Eine Übertragung dieser Aufgaben, beispielsweise an einen Softwareanbieter oder andere externe Spezialisten, ist nur bedingt möglich, da Änderungen am Datenmodell für den sinnvollen Einsatz zeitnah erfolgen müssen und der Planer die fachliche Richtigkeit der Daten zu gewährleisten hat. Darüber hinaus besteht ein zusätzlicher Aufwand in der Anpassung der datentechnischen Anbindungen an die eingesetzten Fachapplikationen. Nachteilig ist weiterhin die zumindest verkürzte Verifikationsphase und die zu erwartende schlechtere Dokumentation der Datenstrukturen sowie deren Implementierungen in den Softwareprodukten. Die fachlichen Probleme, die bei der Definition von Produktdatenmodellen bestehen, können folglich auch durch die Verwendung evolutionärer und dynamischer Produktdatenmodelle nicht gelöst werden.

4.2.6 Schlussfolgerungen und Konsequenzen

Als unabdingbare Konsequenz aus der Vielzahl beteiligter Fachdisziplinen und der innerhalb dieser auftretenden hohen Anzahl unterschiedlicher fachlicher Konzepte bedarf die Abbildung eines Bauwerks vieler verschiedener Datenstrukturen (vgl. Abschn. 4.1). Diese Fachdatenmodelle sind für eine ganzheitliche Repräsentation gleichermaßen auf datentechnischer und fachlicher Ebene zusammenzuführen. Die Verwendung gleicher technischer Konzepte bei der Abbildung von Fachmodellen ermöglicht eine Angleichung der Datenstrukturen. Der Austausch gleicher Modellinhalte zwischen verschiedenen Fachdatenmodellen wird so erleichtert. Eine fachliche Integration auf dieser Basis setzt jedoch eine ausreichende Schnittmenge der datentechnischen Strukturen voraus. Eine solche ist gerade beim Einsatz einfacher Ingenieurmodelle (vgl. Abschn. 3.2) in vielen Fällen nicht gegeben.

Bezüglich der fachlichen Integration bestehen im Wesentlichen zwei Ansätze. Eine Möglichkeit liegt in der Einführung eines gemeinsamen Grundkonzepts, zum Beispiel einer einfachen bauteilorientierten geometrischen Repräsentation von Konstruktionselementen. Dieses ist in der Regel als Erweiterung in den Fachdatenmodellen umzusetzen. Nachteilig bei diesem Ansatz ist sowohl der erhöhte Aufwand zur Erstellung und Pflege der Datenstrukturen als auch die fachliche Bindung der Beschreibung der Modellzusammenhänge an das vorgegebene Grundkonzept. Der andere Ansatz besteht in der expliziten Definition der zwischen den Modellen existierenden fachlichen Beziehungen. Das ermöglicht eine umfassende Abbildung des Bauwerks, ist jedoch auf Grund der teilweise komplexen Zusammenhänge sehr aufwändig (vgl. Abschn. 3.4). Je en-

ger fachliche Vorgaben durch die datentechnischen Strukturen und Konzepte, zum Beispiel durch eine Standardisierung, eingeschlossen werden, desto mehr ist die Modellbildung aus fachlicher Sicht an das eingesetzte Produktdatenmodell gebunden. Dies gilt sowohl für die durch die Datenstrukturen darstellbaren Fachmodellldaten als auch für die zwischen ihnen bestehenden Abhängigkeiten. Eine umfassende Beschreibung eines Bauwerks bedingt folglich die Einbeziehung des Planers in den Erstellungsprozess der zur Abbildung erforderlichen datentechnischen Grundstrukturen. Eine technische Lösung muss sich daher an den Denkweisen der beteiligten Fachplaner orientieren.

Dass die Integration der Modelle zusätzlich zu den technischen Fragestellungen ein fachliches Problem darstellt, wird durch die Notwendigkeit der Erstellung zweckmäßiger Datenstrukturen und der Beschreibung der Modellzusammenhänge dokumentiert.

4.3 Anforderungen an eine datentechnische Abbildung aus fachlicher Sicht

In den vorangegangenen Kapiteln und Abschnitten wurden Randbedingungen aus der Planung sowie der Analyse der Fach- und Datenmodelle erläutert. Auf dieser Grundlage sollen nachfolgend Anforderungen an eine umfassende datentechnische Beschreibung spezifiziert werden. Die Darstellungen konzentrieren sich auf eine Betrachtung der Zusammenhänge aus fachlicher Sicht.

In Abschnitt 2.1.3 wurde gezeigt, dass sich aus dem breiten Spektrum zwischen der Erarbeitung industrieller und individueller Lösungen große Unterschiede in den Randbedingungen für den Einsatz von Modellen ergeben. Dementsprechend sind die an eine fachliche Beschreibung der Bauwerkseigenschaften gestellten Anforderungen sehr verschieden. Die Bearbeitung von Wohnhäusern in Stahlbauweise erfordert somit die datentechnische Repräsentation von Modellen, die sowohl in ihrem Umfang als auch in den zugrunde liegenden fachlichen Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen unter Umständen stark voneinander abweichen.

Die Weitergabe fachlicher Informationen ist üblicherweise auf eine geometrische Beschreibung konstruktiver Eigenschaften ausgerichtet. Spezifische Aspekte, wie beispielsweise mechanische oder wärmetechnische Eigenschaften, bleiben bei dieser Art der Bauwerksbeschreibung, die zweckmäßig auf der Grundlage bauteilorientierter CAD-Modelle erfolgt, unberücksichtigt. Um die Anforderungen einer umfassenden Beschreibung aller Bauwerkseigenschaften zu erfüllen, sind dementsprechend weitere spezialisierte Fachmodelle erforderlich (vgl. 3.3).

Die fachgerechte Abbildung der Bauwerkseigenschaften liegt in der Verantwortung des einzelnen Fachplaners. Ihm obliegt die Wahl geeigneter Fachmodelle

sowie der Art und Weise der fachlichen Beschreibung. Für eine disziplinübergreifende Beschreibung des Bauwerks ist ein Modellverbund zu realisieren. Die Eigenständigkeit der einzelnen Modelle in einem solchen Modellverbund ist auf Grund der speziellen Verantwortung der Fachplaner aufrecht zu erhalten.

Die Beschreibung eines Bauwerks auf Basis spezialisierter Ingenieurmodelle ist mit einer großen Anzahl verschiedener fachlicher Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen verbunden. Analog zur fachlichen Beschreibung ist die datentechnische Abbildung durch viele, spezifisch an die Verwendung angepasste Datenmodelle (vgl. Abschn. 4.1) gekennzeichnet. Wie bereits in Abschnitt 4.2.3 dargelegt, besitzen diese Datenstrukturen im Allgemeinen keine oder nur wenige Gemeinsamkeiten, die sich sinnvoll, zum Beispiel in einem Kerndatenmodell, vereinigen lassen.

Unabhängig von spezifischen fachlichen Inhalten schließen viele der Fachmodelle allgemeine Geometrie- und Wertebeschreibungen ein (vgl. Abschn. 3.3). Die dafür erforderlichen datentechnischen Elemente lassen sich zweckmäßig in Form von modellübergreifenden Ressourcen bereitstellen. In Verbindung mit einem für alle Datenmodelle einheitlichen datentechnischen Modellierungskonzept wird eine Angleichung der Datenstrukturen erreicht, ohne die fachlichen Modellierungsmöglichkeiten negativ zu beeinflussen.

Der Ausgangspunkt zur Erstellung von Fachdatenmodellen besteht in den fachlichen Modellierungskonzepten und Modellvorstellungen. Entsprechend den in Abschnitt 4.1.1 erläuterten verschiedenen technischen Randbedingungen und subjektiven Modellierungsentscheidungen ergeben sich voneinander abweichende datentechnische Strukturen. Eine Angleichung dieser Datenmodelle, die aus den gleichen Fachmodellen abgeleitet sind, erfordert daher lediglich datentechnische Konvertierungen. Die Datenmodelle lassen sich folglich unabhängig von fachlichen Zusammenhängen innerhalb einer fachübergreifenden Beschreibung der Bauwerkseigenschaften von Wohnhäusern in Stahlbauweise auf eine gemeinsame verallgemeinerte Struktur reduzieren.

Die Entwicklung verallgemeinerter softwareunabhängiger Datenmodelle ist größtenteils mit der Definition datentechnischer Standards verknüpft. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4.2.2 wird die Realisierung und Bereitstellung dieser Standards maßgeblich durch die Hersteller von Anwendungssoftware bestimmt. Die Einflussmöglichkeiten der Fachplaner auf derartige datentechnische Standards sind gering. Dies betrifft sowohl die zur Verfügung gestellte Funktionalität zur Beschreibung fachlicher Inhalte als auch die Qualität und den Umfang der Umsetzung in den einzelnen Softwareprodukten. Eine umfassende Abbildung von Bauwerkseigenschaften ist an eine stärkere Einbeziehung des Fachplaners bei der Gestaltung einer datentechnischen Beschreibung gebunden. Der praktische Einsatz standardisierter Datenmodelle erfordert darüber hinaus eine praktikable Möglichkeit, die inhaltliche Über-

einstimmung zwischen den in den applikationsspezifischen und den standardisierten Datenmodellen beschriebenen Daten zu überprüfen.

Derzeit existieren verschiedene im Bauwesen eingesetzte datentechnische Standards, zum Beispiel *IFC* oder *CIMSteel*. Diese unterscheiden sich in der fachlichen Ausrichtung, den zugrunde liegenden Konzepten und der Verbreitung. Es muss davon ausgegangen werden, dass ein Standard nicht alle spezifischen Bereiche des Bauwesens in gleicher Detaillierung abdecken kann. Für eine umfassende Abbildung der Bauwerkseigenschaften ist folglich der Umgang mit unterschiedlichen Datenmodellen erforderlich.

Der Umfang standardisierter Produktdatenmodelle ist, wie in Abschnitt 4.2.4 gezeigt, im Allgemeinen sehr hoch. Deren Implementierung und Wartung innerhalb einer Ingenieursoftware ist entsprechend kostenintensiv und zeitaufwändig. Aus fachlicher Sicht ist demgegenüber eine schnelle Verfügbarkeit und hohe Detaillierung anzustreben. Kleine, auf begrenzte Anwendungsbereiche spezialisierte Datenmodelle, zum Beispiel für den Wohnhausbau oder den Industriebau, sind demzufolge aus fachlicher Sicht günstiger zu bewerten.

Bei der im Bauwesen eingesetzten Software handelt es sich größtenteils um hoch spezialisierte Anwendungen. Änderungen an den zugrunde liegenden Datenstrukturen sind üblicherweise mit einem erheblichen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Darüber hinaus bedarf auch die Entwicklung der ingenieurtechnischen Konzepte, welche die Grundlage für die Fachdatenmodelle bilden, eines längeren Zeitraums. Entsprechend den in Kapitel 2.1.3 dargestellten Randbedingungen beschränkt sich die Nutzung und damit die Wartung und Pflege einer datentechnischen Beschreibung im Allgemeinen auf den Zeitraum einer aktiven Planungsbearbeitung. Durch die geringfügigen Änderungen an Datenstrukturen von Fachapplikationen und die zeitliche Entwicklung fachlicher Grundlagen ist in der Regel keine Anpassung der Fachdatenmodelle eines disziplinübergreifenden Modellverbunds während der Planung erforderlich.

Einschränkend ist jedoch zu bemerken, dass es nahezu unmöglich erscheint, sämtliche benötigte Funktionalität einer datentechnischen Beschreibung im Vorfeld sicherzustellen. Aus diesem Grund ist in Einzelfällen zur Gewährleistung eines funktionierenden Datenaustauschs eine dynamische Erweiterung der Beschreibung erforderlich. Eine sinnvolle Anwendung bleibt dabei auf kleinere Anpassungen, wie die Definition zusätzlicher Materialkennwerte, beschränkt. Zum Einen ist der Fachplaner mit größeren Änderungen am Datenmodell schlicht überfordert, da diese Arbeiten entsprechende Erfahrungen und Kenntnisse voraussetzen. Zum Anderen wächst der Aufwand mit dem Umfang an Änderungen überproportional an. Dabei ist zu beachten, dass neben der Definition der Datenstrukturen diese für eine Nutzung praktisch umgesetzt und dokumentiert werden müssen. Darüber hinaus ist eine Anpassung und Verifikation der zugehörigen Softwareanbindungen notwendig. Unter der Voraussetzung einer zweckmäßigen Eingrenzung des Anwendungsgebietes, zum Beispiel

auf Wohnhäuser in Stahlbauweise, kann in der Regel von quasi-statischen Fachdatenmodellen ausgegangen werden.

Zur fachlichen Repräsentation der verschiedenen Bauwerksaspekte werden zunehmend aufwändigere Modelle eingesetzt (vgl. Abschn. 3.2). Als eine Folge der höheren Detaillierung in der fachlichen Beschreibung der Einzelaspekte wächst auch die Anzahl und die Komplexität der zwischen den Modellen bestehenden Beziehungen (vgl. Abschn. 3.4). Diese Abhängigkeiten sind für eine interdisziplinäre Abbildung der Bauwerkseigenschaften wesentlich. Dementsprechend ist sowohl eine fachliche als auch eine datentechnische Aufbereitung und Strukturierung der fachlichen Zusammenhänge notwendig.

Als Grundlage für eine datentechnische Beschreibung der Modellzusammenhänge ist deren Definition auf fachlicher Ebene erforderlich. Eine mit dem Ziel der Realisierung eines durchgängigen Datenflusses üblicherweise auf Ebene der Fachdatenmodelle und Fachmodelldaten reduzierte Betrachtung, zum Beispiel im Rahmen von Produktmodellen, ermöglicht nur eine Berücksichtigung der aus datentechnischer Sicht bestehenden Modellabhängigkeiten. Diese von der fachlichen Ebene losgelöste Ableitung der zwischen den Modellen bestehenden Beziehungen wird einer umfassenden Repräsentation von Bauwerkseigenschaften nicht gerecht.

Aus der Vielgestaltigkeit von Bauwerken und ihrer im Allgemeinen individuellen Planung resultieren verschiedene Anforderungen an die benötigten Fachdatenmodelle und deren Zusammenspiel. Die konkreten Anforderungen an eine Beschreibung des Bauwerks ergeben sich in der Regel erst während der Bearbeitung des Projektes. Eine umfassende datentechnische Abbildung muss dem Planer einerseits eine projektspezifische Kombination geeigneter vorhandener Fachdatenmodelle, wie Datenstrukturen zur Beschreibung komplexer räumlicher Tragstrukturen oder einfacher ebener Stabwerke, ermöglichen und andererseits eine flexible fachliche Beschreibung der Beziehungen zwischen diesen Modellen erlauben. Darüber hinaus ist der Umgang mit Modellen und Beziehungen verschiedener Abstraktionsstufen zu unterstützen.

Eine über einzelne fachliche Aspekte hinausgehende Abbildung von Bauwerkseigenschaften erfordert infolge der abzubildenden Modellzusammenhänge einen zusätzlichen Modellierungsaufwand. Dieser Mehraufwand ist gering zu halten, da er durch den Fachplaner getragen werden muss. Dementsprechend sind spezialisierte Softwarewerkzeuge erforderlich. Diese müssen dem praktisch tätigen Ingenieur (nicht dem spezialisierten Programmierer oder Softwareingenieur) eine Anpassung der datentechnischen Beschreibung ermöglichen und ihn darüber hinaus bei einer disziplinübergreifenden Modellierung unterstützen.

Die zwischen den Modellen bestehenden Beziehungen weisen, wie in Abschnitt 3.4 ausgeführt, teilweise eine hohe fachliche Komplexität auf. Wie schon zuvor erläutert, ist eine datentechnische Beschreibung dieser Abhängigkeiten mit

einem zusätzlichen Modellierungsaufwand verbunden. Eine sinnvolle Realisierung einer umfassenden datentechnischen Repräsentation von Wohnhäusern in Stahlbauweise erfordert eine Vordefinition der komplexen und aufwändig zu beschreibenden Modellzusammenhänge. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Flexibilität in der Beschreibung von Abhängigkeiten ist eine Strukturierung in kombinierbare Grundeinheiten anzustreben. Diese Aufteilung in allgemeinere Elemente ermöglicht eine einfache Übertragung der Beziehungsbeschreibungen auf ähnliche fachliche Aufgabenstellungen. Wird darüber hinaus die Kombination allgemeiner Grundelemente unterstützt, sind weitere Vereinfachungen in der Anwendung und Möglichkeiten zur Sicherung der fachlichen Konsistenz der abgebildeten Modellzusammenhänge für Wohnhäuser in Stahlbauweise erreichbar.

Kapitel 5

Realisierung einer experimentellen datentechnischen Repräsentation

„Wenn das Neue nicht
irgendwo ausprobiert würde,
wo haben wir dann eine
Chance, es kennenzulernen?“

(Franz Liszt)

5.1 Beschreibung der verwendeten Datenmodelle

5.1.1 Generelle Bemerkungen

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Datenstrukturen bilden die Grundlage einer experimentellen Realisierung einer datentechnischen Repräsentation zur Abbildung der Bauwerkseigenschaften von Wohnhäusern in Stahlbauweise. Das Ziel liegt dementsprechend nicht in der Erstellung allgemein gültiger Datenmodelle. Vielmehr erfolgt eine Anpassung der Datenmodelle an das spezifische Anwendungsgebiet der Wohnhäuser in Stahlbauweise. Mit der datentechnischen Beschreibung wird ausschließlich die Darstellung und Verdeutlichung grundlegender fachlicher Zusammenhänge und technischer Konzepte angestrebt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht auf Grund der fachlichen Komplexität nicht. Die Darstellung der verwendeten Datenmodelle konzentriert sich auf deren wesentliche Eigenschaften, die anhand ausgewählter Ausschnitte dargelegt werden.

Grundlage zur Erstellung der Fachdatenmodelle bildet das Paradigma der Objektorientierung. Die Darstellung und Beschreibung der Datenstrukturen erfolgt unter Verwendung der *Unified Modelling Language (UML)* (z.B. [102]).

Eine Umsetzung basierend auf den mit den IFC definierten Datenstrukturen wäre grundsätzlich denkbar gewesen. Nachteilig für deren Einsatz innerhalb einer experimentellen Realisierung einer disziplinübergreifenden datentechnischen Repräsentation sind jedoch

- der erhebliche Umfang,
- die weniger umfassenden Beschreibungsmöglichkeiten im hier betrachte-

ten Umfeld der Wohnhäuser in Stahlbauweise,

- das auf einen Datenaustausch ausgerichtete Konzept.

5.1.2 Ressourcen Physik und Geometrie

Durch die Ressourcen *Geometrie* und *Physik* werden allgemeine Grundelemente bereitgestellt, die in vielen der Fachdatenmodelle benötigt werden. Ihre Bedeutung resultiert aus dem durch die Verwendung spezifizierten fachlichen Kontext.

Durch die Ressource *Physik* werden Datenstrukturen zur Abbildung von physikalischen Größen zur Verfügung gestellt. Die Größen werden als komplexe Datentypen bestehend aus Einheit, Wert und Typ beschrieben (Abb. 5.1).

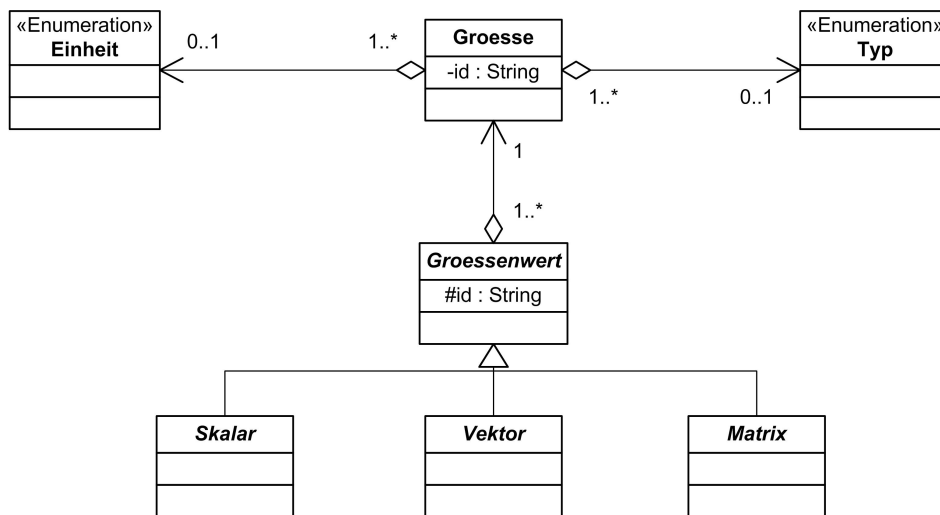


Abbildung 5.1: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung physikalischer Größen

Die Vorteile dieser Beschreibung liegen in

- einer hohen Flexibilität, da sich Zahlenwerte durch verschiedene Beschreibungen repräsentieren lassen,
- einer hohen Konsistenz, zum Beispiel durch die Angabe der Einheit,
- einer Typsicherheit,
- einer Bereitstellung weiterer Eigenschaften durch den Typ, zum Beispiel, dass es sich um eine Abmessung handelt.

Ein wesentlicher Nachteil besteht allerdings in dem höheren Bedarf an Speicherplatz.

Die Abbildung von Werten wird auf der ersten Ebene in Skalare, Vektoren und Matrizen gegliedert. Die konkrete Benennung wird dabei aus Gründen der Handhabbarkeit einer möglichen allgemeinen Definition vorgezogen. Neben der Abbildung deterministischer Werte ist auch eine Beschreibung stochastischer Werte möglich. Letztere werden durch ihre Momente (z.B. Mittelwert, Standardabweichung) und ihren Verteilungstyp definiert (Abb. 5.2).

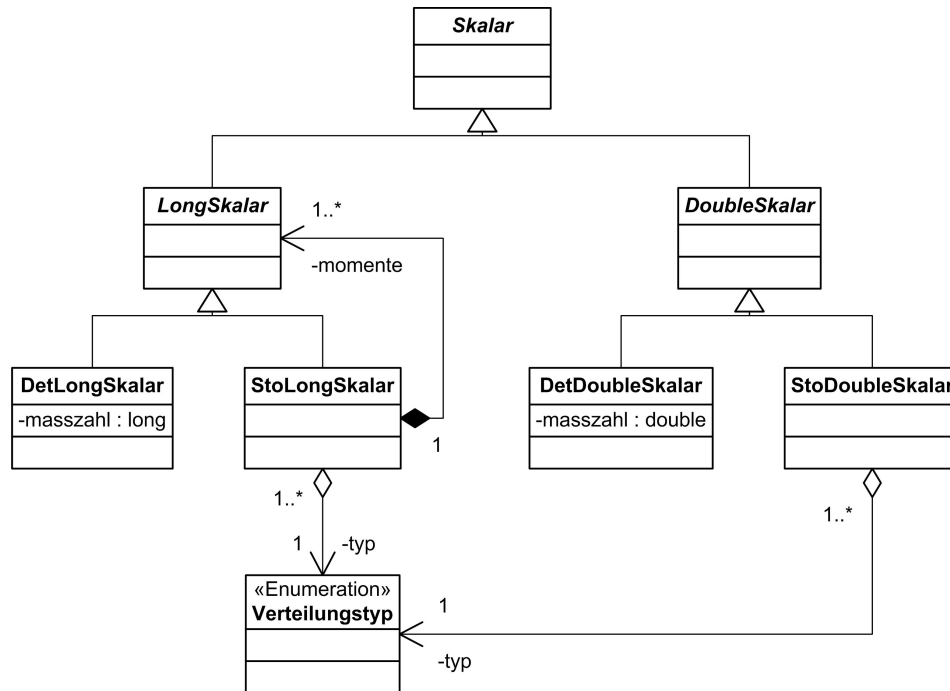


Abbildung 5.2: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung skalarer Größenwerte

Auf Grund der im Allgemeinen entsprechend den Anforderungen stark vereinfachten Geometrie und der Bevorzugung einer parameterbasierten gegenüber einer expliziten Beschreibung (vgl. 4.2.4) beschränken sich die Klassen der Geometrieressource auf die Repräsentation geometrischer Grundelemente, wie Punkt, Linie und Rechteck (Abb. 5.3).

Um sowohl eine ebene als auch eine räumliche Abbildung zu ermöglichen, wird die Dimension erst auf Objektebene durch die Zuweisung des entsprechenden Koordinatensystems festgelegt. Durch die Klasse *Geometrie*, die Oberklasse der geometrischen Grundelemente, wird eine abstrakte Beschreibung des Koordinatensystems aggregiert. Da die Festlegung der dimensionsbestimmenden konkreten Klasse des verwendeten Koordinatensystems erst zur Laufzeit erfolgt, wird eine höhere Flexibilität erreicht. Attribute, die geometrische Abmessungen repräsentieren, werden durch Klassen der Physik Ressource beschrieben.

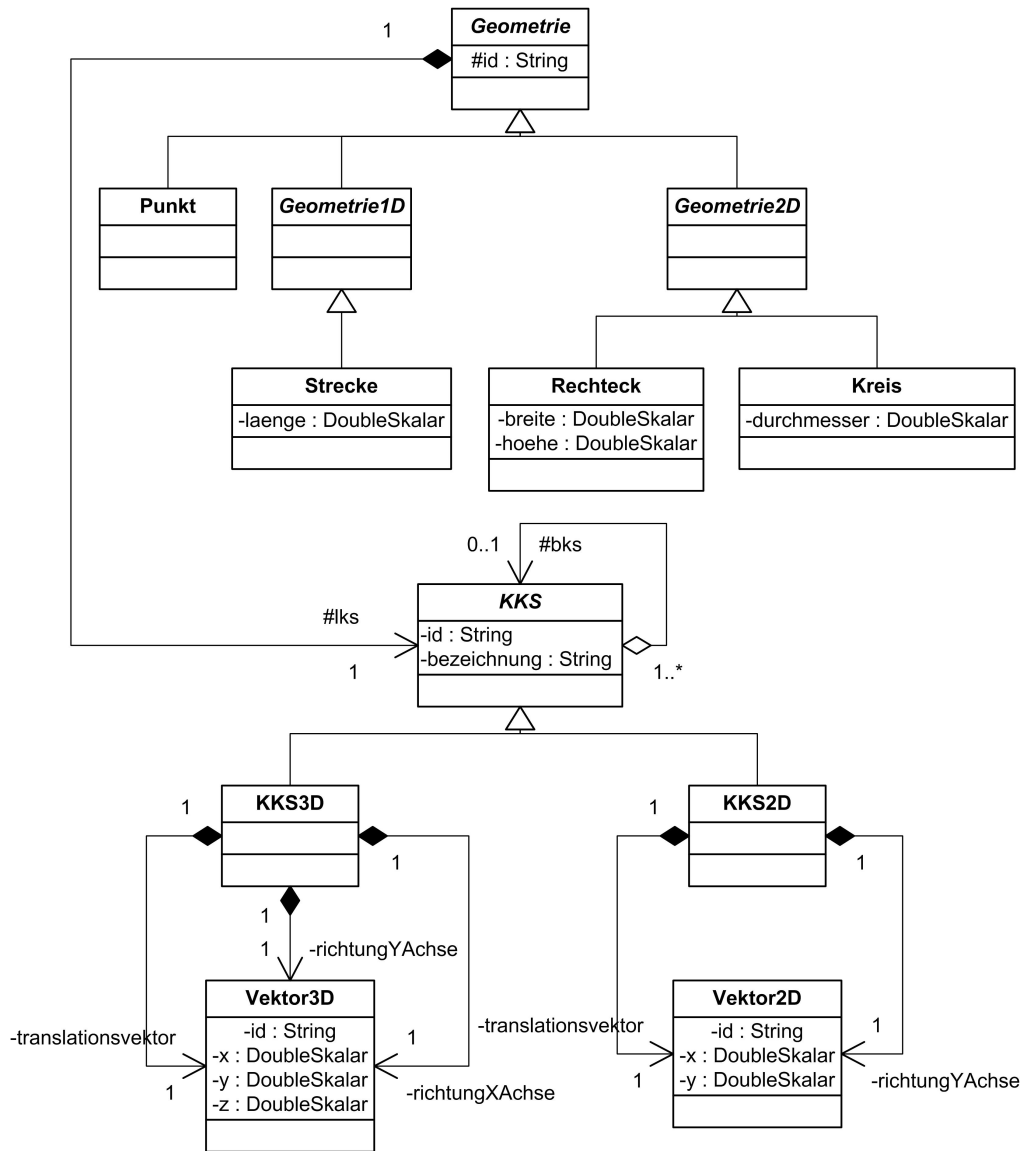


Abbildung 5.3: Ausschnitt aus dem zur Abbildung der Geometrie verwendeten Datenmodell

5.1.3 Teildatenmodell Tragwerk

Durch das Tragwerksmodell werden die am Lastabtrag beteiligten Teile des Bauwerks repräsentiert. Das Tragwerk wird in Abhängigkeit seiner Eigenschaften in Teilstrukturen aufgeteilt. Die einzelnen Elemente der datentechnischen Beschreibung des Tragwerks werden entsprechend der in Abbildung 5.4 dargestellten Paketstruktur organisiert.

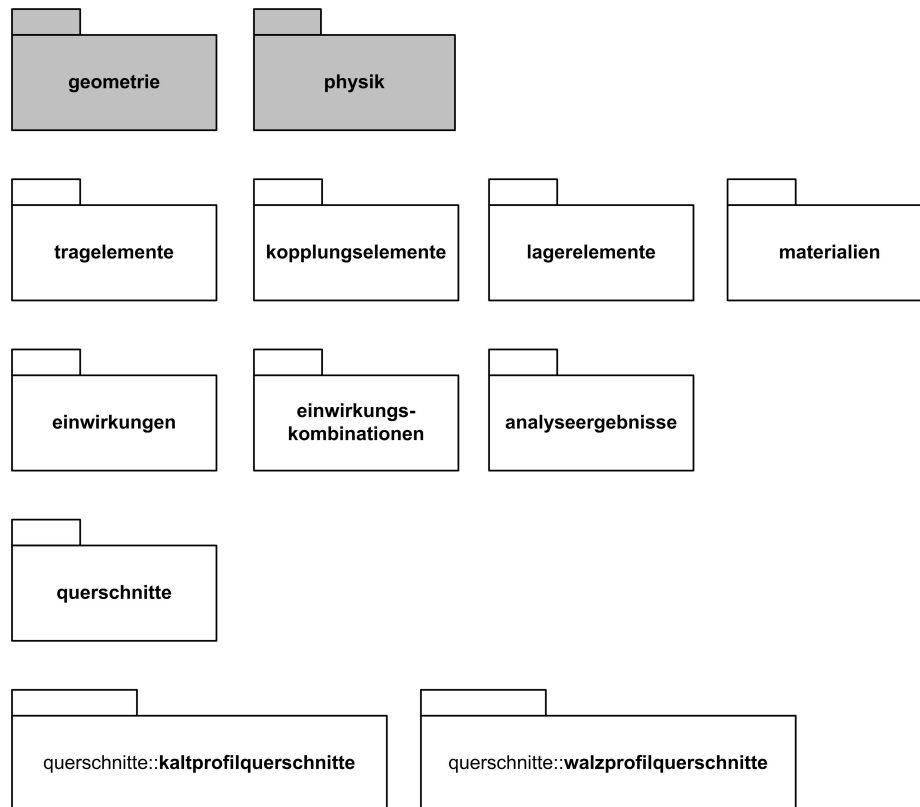


Abbildung 5.4: Paketstruktur des Teildatenmodells zur Tragwerksbeschreibung

Einzelne Tragelemente können verschiedenen Teilsystemen angehören (Abb. 5.5). Bezüglich der Abmessungsverhältnisse und der daraus abgeleiteten vereinfachten Annahmen zur Spannungsverteilung erfolgt eine Klassifizierung in ein-, zwei- und dreidimensionale Tragelemente. Deren Geometrie wird durch Klassen der Geometrieressource beschrieben. Stabförmige Tragelemente werden durch Bauteilachse und Querschnitt, flächige Elemente durch Mittelebene und Schichten repräsentiert. Dabei werden die Materialinformationen dem Querschnitt bzw. den Schichten zugewiesen (Abb. 5.6).

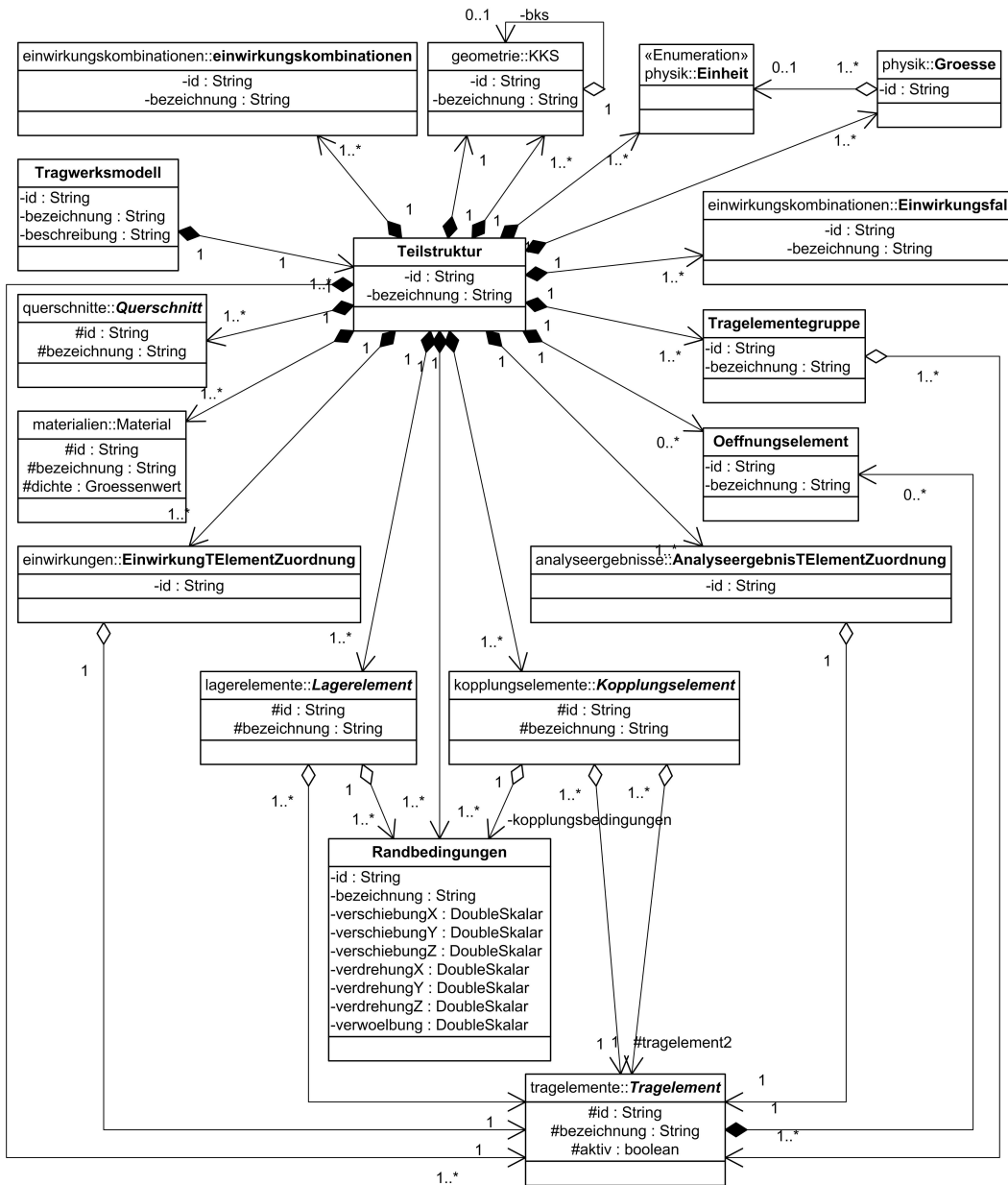


Abbildung 5.5: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Beschreibung des Tragwerksmodells

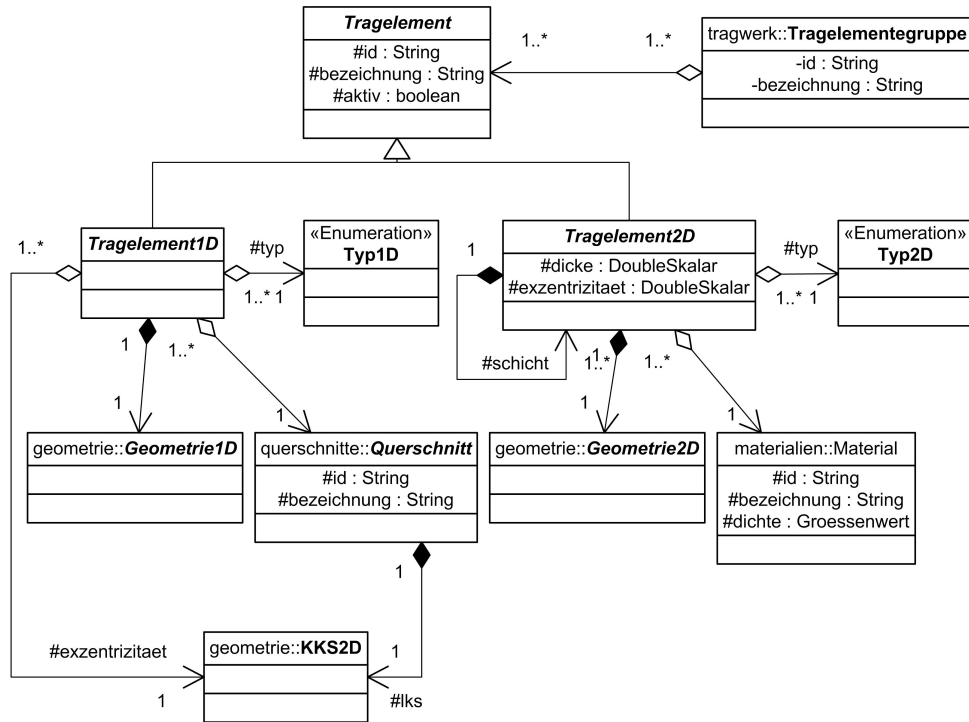


Abbildung 5.6: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Tragelementen

Die verschiedenen erforderlichen Querschnittsformen werden in ein- und mehrteilige untergliedert. Typische Formen einteiliger Querschnitte sind zum Beispiel Kalt- oder Walzprofile. Diese lassen sich zu mehrteiligen Querschnitten, bei Bedarf mit unterschiedlichen Materialien, zusammenfügen. Die verschiedenen Querschnittstypen werden durch Parameter beschrieben und in Form von Klassen bereitgestellt (Abb. 5.7).

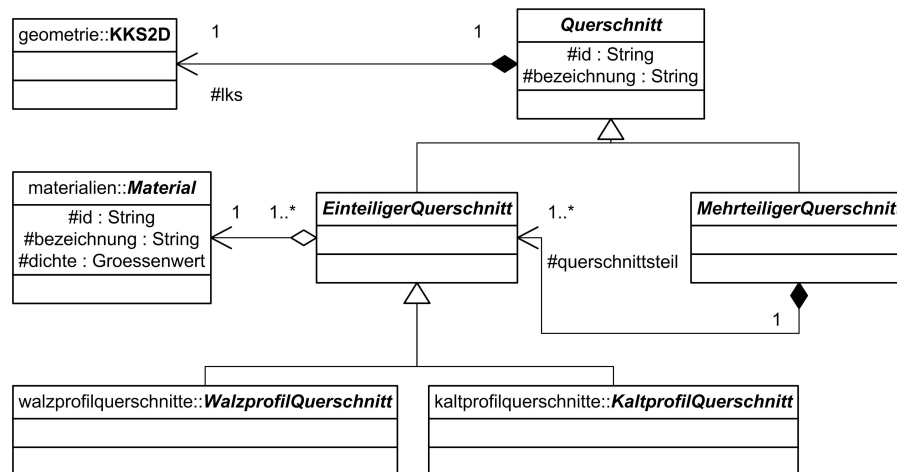


Abbildung 5.7: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Querschnitten

Das Tragwerksdatenmodell beinhaltet neben Klassen zur Beschreibung von Tragelementen auch Datenstrukturen zur Abbildung von Einwirkungen. Diese werden aus der Beschreibung von Art, Größe und Geometrie, welche die geometrische Lage und den Einwirkungsbereich umfasst, zusammengesetzt. Die Zuordnung von Einwirkungen und Tragelementen wird über die Klasse *EinwirkungTElementZuordnung* realisiert (Abb. 5.8). Einwirkungsfälle fassen einzelne Einwirkungen zu Gruppen zusammen, die entsprechend fachlicher Anforderungen in Einwirkungskombinationen organisiert werden.

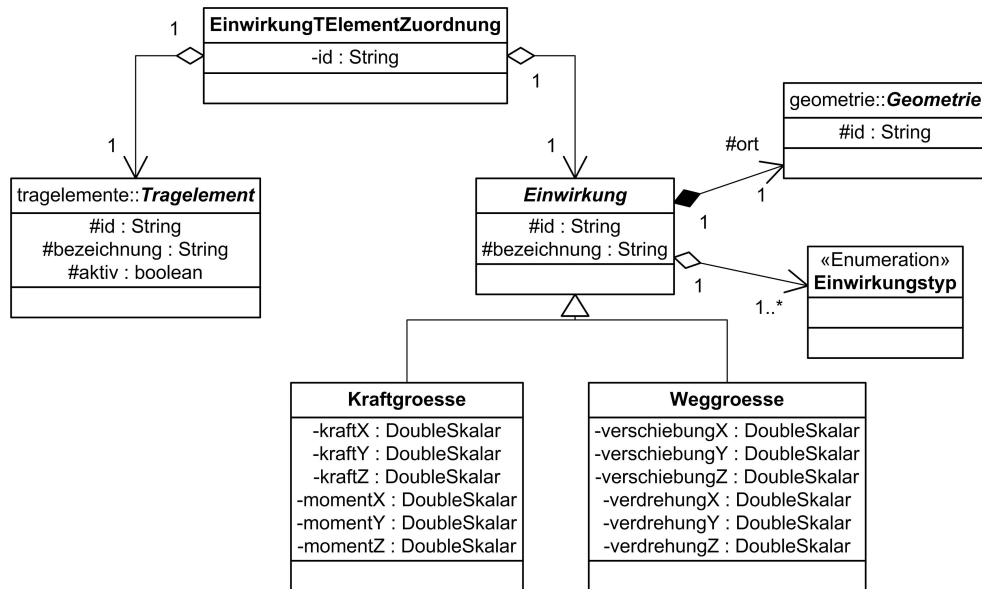


Abbildung 5.8: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Einwirkungen

Das Zusammenwirken von Tragelementen wird über Kopplungselemente beschrieben. Diese umfassen die Abbildung der mechanischen und der geometrischen Eigenschaften. Die geometrischen Merkmale setzen sich aus Lage und Form des Kopplungselements zusammen. Entsprechend den Abmessungen erfolgt eine Unterteilung in Punkt-, Linien- und Flächenkopplungen (Abb. 5.9). Das gleiche Ordnungsschema wird für die Beschreibung von Lagerungselementen verwendet. Im Unterschied zum Kopplungselement ist ein Lagerungselement nur mit einem Tragelement assoziiert.

Der überwiegende Teil der im Bauwesen eingesetzten Materialien wird im Aufbau als homogen angenommen. Aus diesem Grund beschränken sich die Ausführungen an dieser Stelle auf die Abbildung homogener Materialien. Eine Unterteilung wird bezüglich der Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften in isotrop und anisotrop vorgenommen. Aus den entsprechend diesen Kriterien definierten abstrakten Basisklassen werden konkrete Klassen zur Beschreibung der Materialeigenschaften, zum Beispiel für Stahl, abgeleitet (Abb. 5.10).

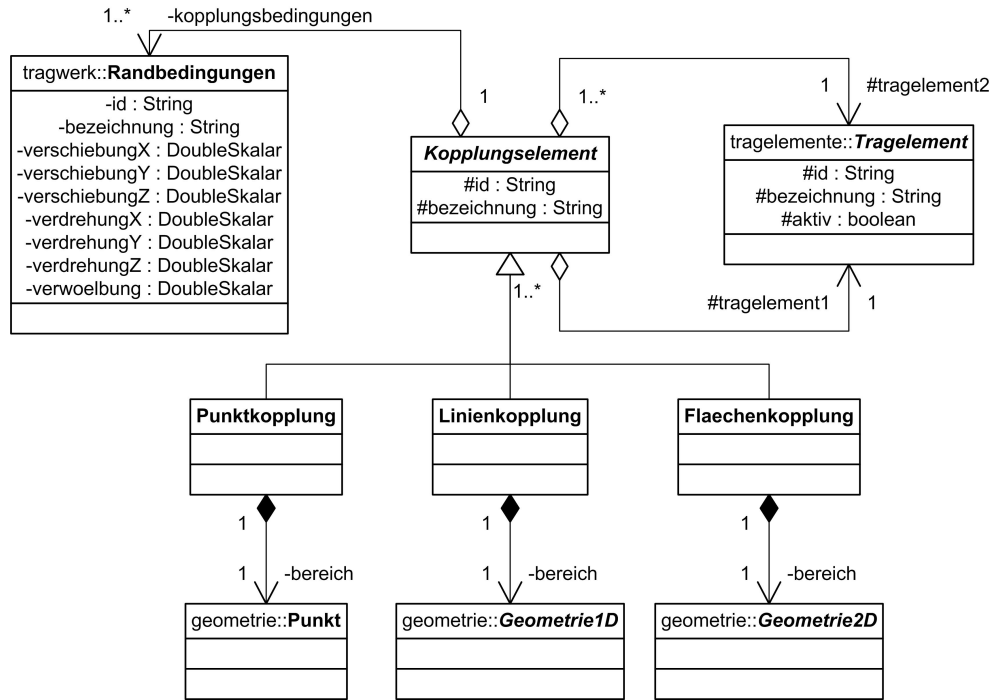


Abbildung 5.9: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Elementkopplungen

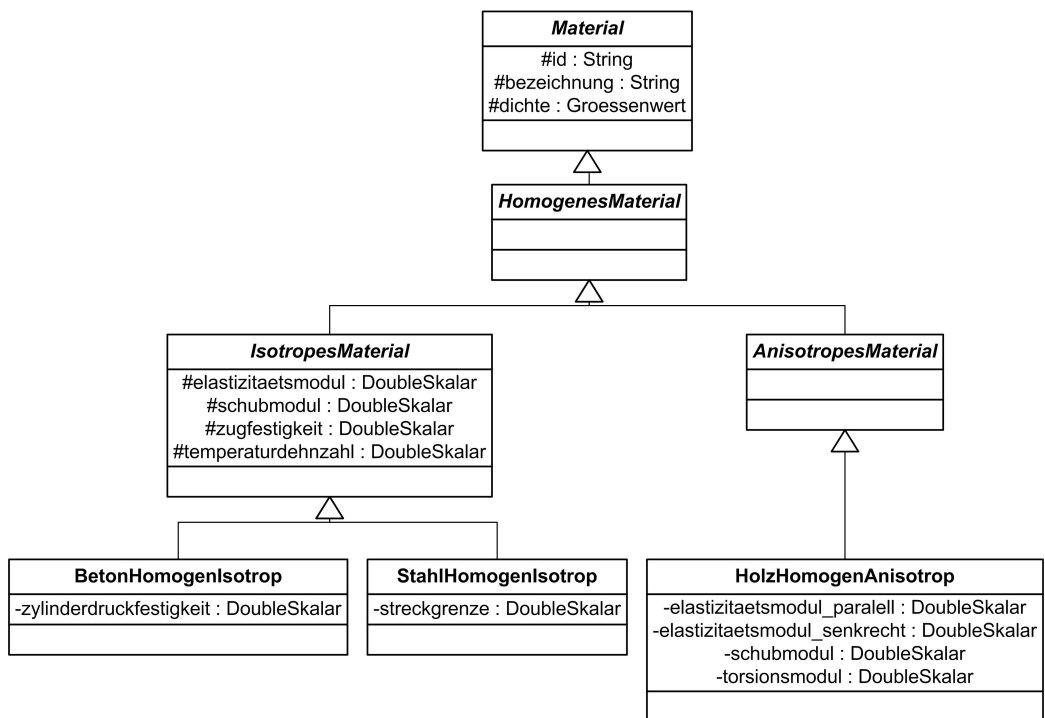


Abbildung 5.10: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Materialien

5.1.4 Teildatenmodell numerische Analyse

Wie bereits in Abschnitt 3.3.4 erläutert, eignet sich die Methode der Finiten Elemente zur Lösung sehr verschiedener Aufgabenstellungen. Der Fokus liegt in dieser Arbeit einschränkend in der strukturmechanischen Anwendung, wenngleich die Datenmodelle für andere Anwendungsbereiche durch den hohen Formalisierungsgrad der Methode im Allgemeinen nur geringe Unterschiede aufweisen.

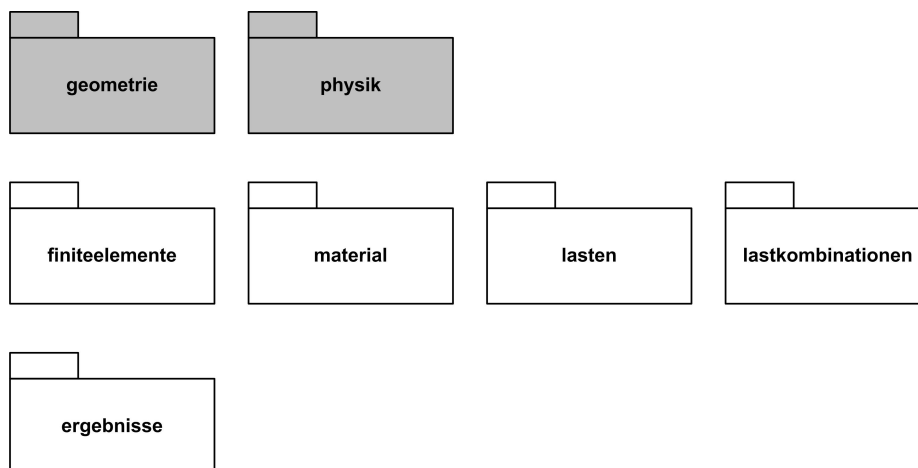


Abbildung 5.11: Paketstruktur des Teildatenmodells für Modelle der numerischen Analyse

Das Teildatenmodell unterteilt sich in die in Abbildung 5.11 dargestellten Pakete. Zur Strukturierung der Modelldaten lassen sich Finite Elemente in Gruppen zusammenfassen (Abb. 5.12). Finite Elemente bilden die Grundbausteine des Modells. Sie werden durch ihre Eigenschaften wie Elementklasse, Elementgeometrie, Beschreibung des geometrischen und physikalischen Verhaltens sowie die Knotenanzahl charakterisiert. Diesbezüglich mögliche Klassifikationskriterien für Finite Elemente lassen sich unter anderem [103, 104, 105] entnehmen. Die hier vorgenommene Unterteilung orientiert sich überwiegend an [104]. Alle wesentlichen Klassifikationskriterien werden im Elementtyp zusammengefasst. Dieser beinhaltet die durch das Element repräsentierten Freiheitsgrade, die Knotenanzahl und Aufzählungstypen. Die Aufzählungstypen ermöglichen die Beschreibung der Elementklasse sowie des physikalischen und geometrischen Verhaltens. Durch die allgemeine Repräsentation Element werden neben diesen grundlegenden Merkmalen auch die erforderlichen Knoten, das Material, die Lage der Integrationspunkte und das verwendete Koordinatensystem referenziert. Für konkrete Finite Elemente bestimmt sich die Orientierung des Elementkoordinatensystems üblicherweise aus der Lage der Knoten. Für Stabelemente wird im Allgemeinen darüber hinaus ein zusätzlicher Referenzknoten eingeführt. Die Festlegung geschieht dabei in der Regel (willkürlich) durch den Programmierer. Um die sich aus der Definition des lokalen Koordinatensystems ergebenden Abhängigkeiten zu vermeiden, wird hier das lokale Koordinatensystem explizit definiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt

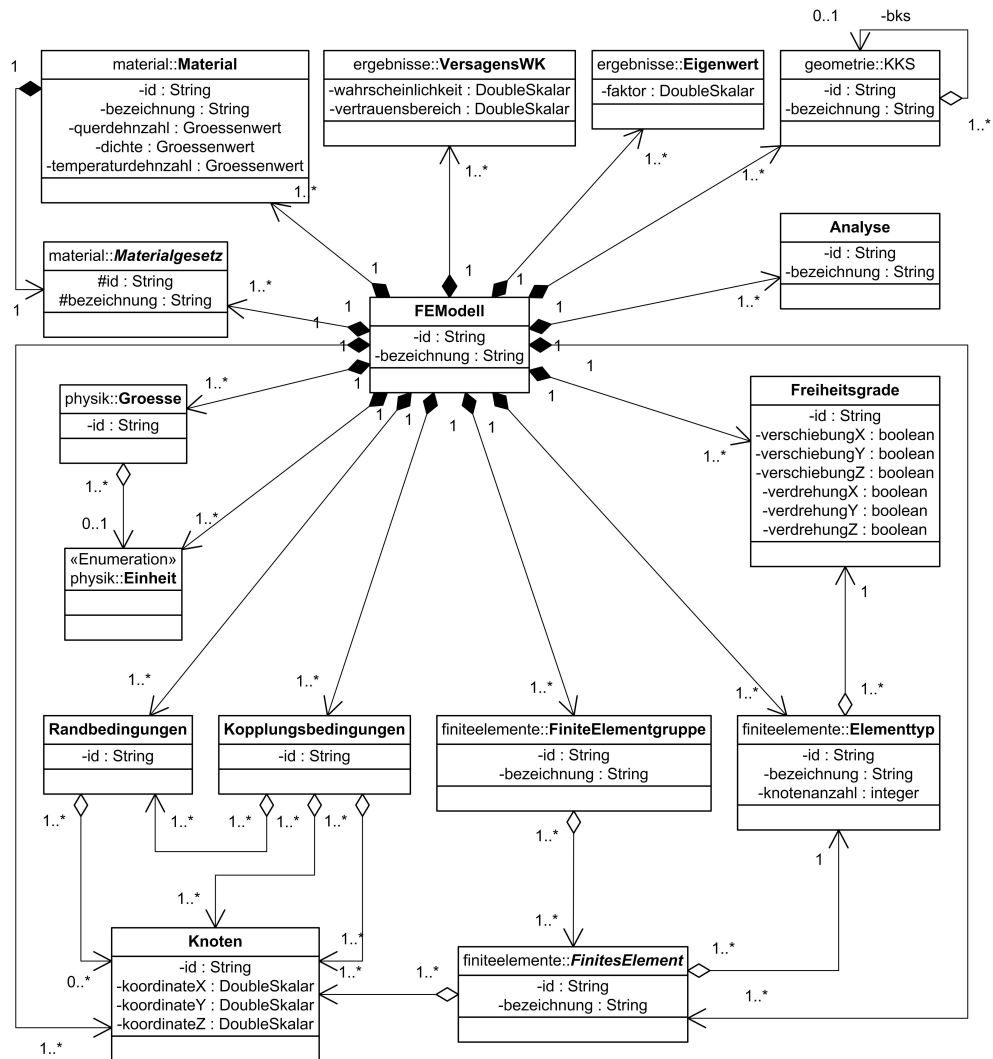


Abbildung 5.12: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Finite-Element-Modellen

eine Spezialisierung der abstrakten Oberklasse *FinitesElement* entsprechend der geometrischen Ausdehnung der Finiten Elemente. Von diesen spezialisierten Beschreibungen werden Klassen abgeleitet, die konkrete Finite Elemente repräsentieren, wie zum Beispiel spezifische Balken- oder Schalenelemente (Abb. 5.13).

Randbedingungen werden durch ihren Typ, wie Verschiebung, Verdrehung, Verwölbung, ihre Richtungsvektoren und die Zuordnung zu einem Knoten definiert (Abb. 5.14). Die Abbildung von mechanischen Abhängigkeiten, die zwischen zwei Knoten bestehen, wird über Kopplungsbedingungen realisiert. Diese aggregieren neben den Knoten die Randbedingungen.

Materialien werden über Materialkennwerte und ein Materialgesetz repräsentiert, das durch eine idealisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung ausgedrückt wird. Diese vereinfachte Abbildung ist für viele praktische Fälle ausreichend.

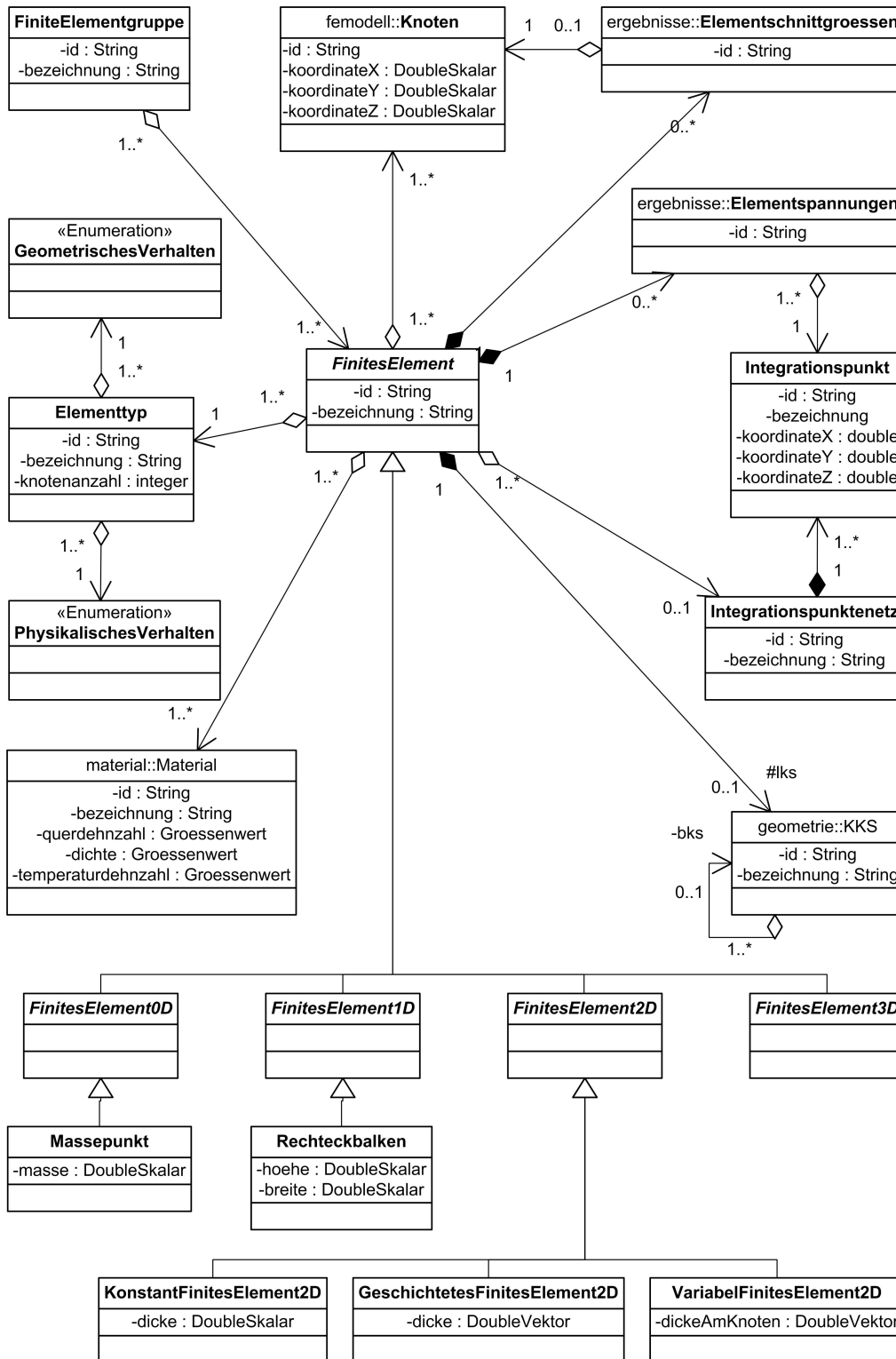


Abbildung 5.13: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Beschreibung Finiter Elemente

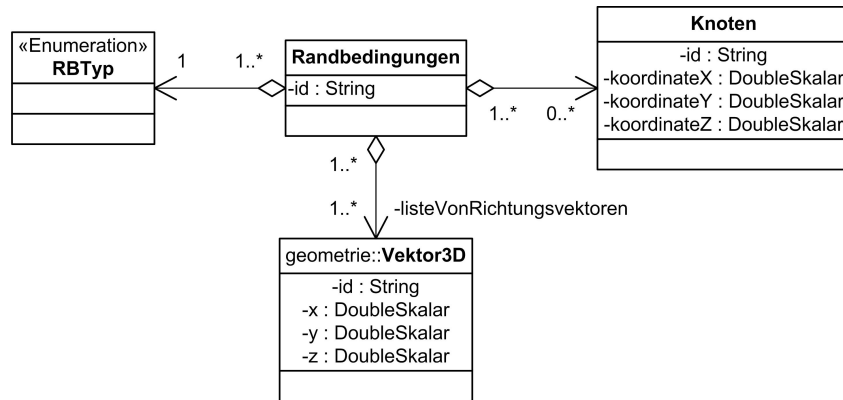


Abbildung 5.14: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Beschreibung von Randbedingungen

Eine Erweiterung der bestehenden Strukturen lässt sich jedoch problemlos realisieren.

Lasten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Lastwerte und ihres Bezugs auf Elemente des FE-Modells. Resultierend aus der Zuordnung zu Knoten bzw. Finiten Elementen erfolgt eine Aufteilung in Knoten- und Elementlasten. Entsprechend geometrischer Eigenschaften werden die elementbezogenen Lasten darüber hinaus in Linien-, Flächen- und Volumenlasten strukturiert (Abb. 5.15). Diese Grundstruktur ermöglicht eine weitere Spezialisierung und Ableitung häufig benötigter Lastverteilungstypen, wie Gleich- oder Trapezlasten. Lastwerte lassen sich in Kraft-, Momenten- und Temperaturwerte unterscheiden. Die Abbildung dieser Einteilung erfolgt über die Enumeration *Typ* der Klasse *Groesse* (Abb. 5.1), die in der Ressource *Physik* enthalten ist (vgl. 5.1.2).

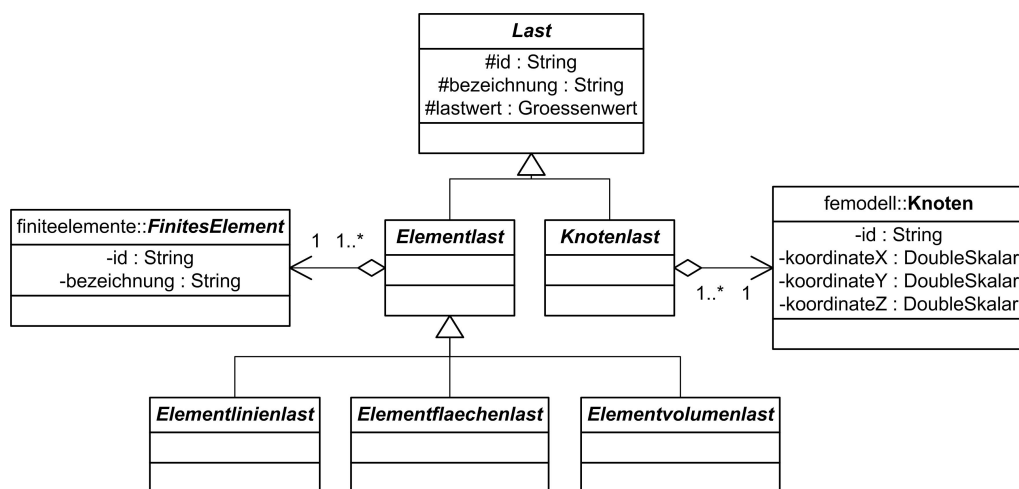


Abbildung 5.15: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Repräsentation von Lasten

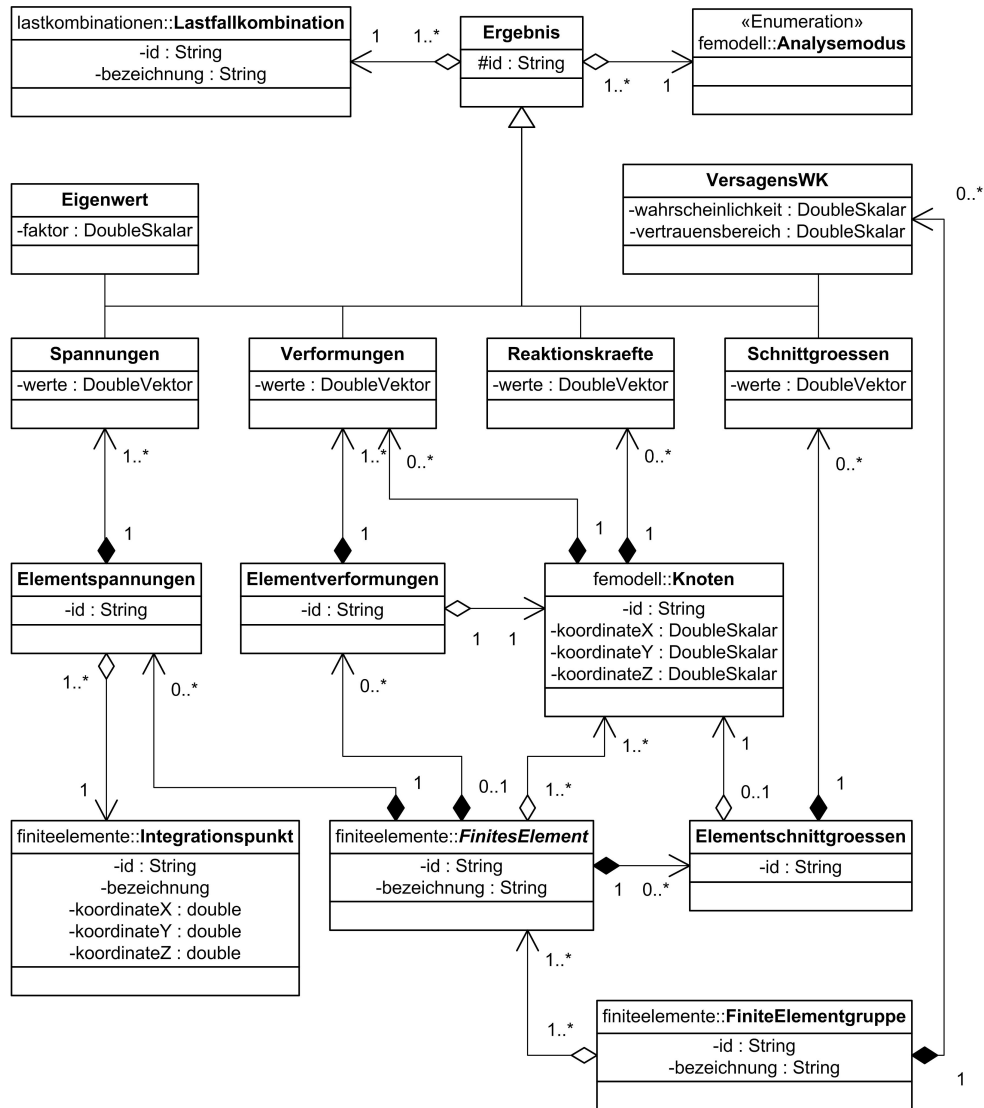


Abbildung 5.16: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Ergebnisse

Die Ergebnisse einer FE-Berechnung stehen in Bezug zur Belastung, welche sich aus der Lastfallkombination ergibt, und der Art der durchgeführten Analyse, zum Beispiel Eigenwertanalyse. Die verschiedenen Ergebnisgrößen, wie Eigenwerte, Versagenswahrscheinlichkeiten, Spannungen, Verformungen, Reaktionskräfte und Schnittgrößen, werden durch entsprechende Klassen repräsentiert. Die Abbildung der Beziehungen der Gesamtstruktur, der einzelnen oder in Gruppen zusammengefassten Finiten Elemente und der Knoten zu diesen Größen erfolgt über Aggregationen. Eigenwerte werden auf die Gesamtstruktur bezogen abgebildet. Dahingegen wird eine Zuordnung von Versagenswahrscheinlichkeiten zu Gruppen von Finiten Elementen vorgenommen. Die Finiten Elemente selbst werden durch ihre Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen charakterisiert. Die Abbildung der Elementspannungen geschieht

dabei in Bezug auf die Integrationspunkte, die Beschreibung der Elementverformungen und -schnittgrößen in Relation zu den Knoten des Finiten Elements (Abb. 5.16).

5.1.5 Teildatenmodell Konstruktion

Auf Grund der geringen Standardisierung und der stark individualisierten Lösungen erfordert die über eine allgemeine, abstrakte Beschreibung hinausgehende Repräsentation der Konstruktion einen vergleichsweise hohen Aufwand. Der grundsätzliche Aufbau des Konstruktionsmodells erfolgt aus Konstruktionselementen, Bauteilen, deren Bearbeitungen sowie Verbindungen und Anschlüssen. Da sich die Geometrie der Elemente des Konstruktionsmodells üblicherweise im Rahmen der Anforderungen bautechnischer Anwendungen zweckmäßig durch Parameter, zum Beispiel Höhe, Länge und Breite, beschreiben lässt, wird auf eine explizite Abbildung der geometrischen Eigenschaften verzichtet.

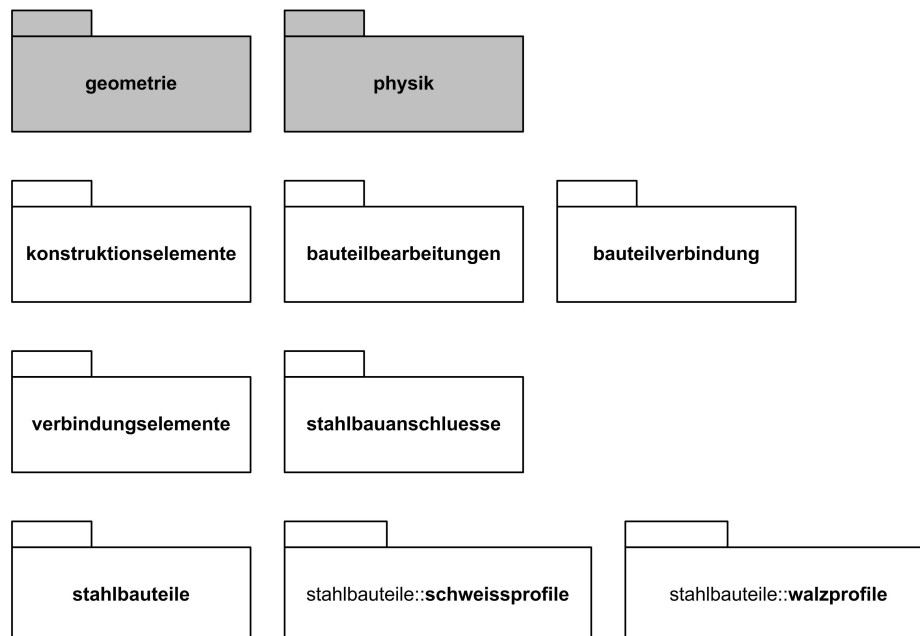


Abbildung 5.17: Paketstruktur des Teildatenmodells zur Abbildung der Konstruktion

Das Teildatenmodell unterteilt sich in die in Abbildung 5.17 dargestellten Pakete. Die Grundstruktur zur Beschreibung von Konstruktionselementen wird durch allgemeine Grundformen gebildet, wie beispielsweise Stütze, Träger, Wand, Decke, Dach, Treppe, Verband und Fundament, die in Form abstrakter Klassen bereitgestellt werden (Abb. 5.18). Aus diesen werden zur Abbildung konkreter Konstruktionselemente, zum Beispiel einer Ständerwand in Leichtbauweise, entsprechende Klassen abgeleitet, die einen spezifischen Aufbau repräsentieren.

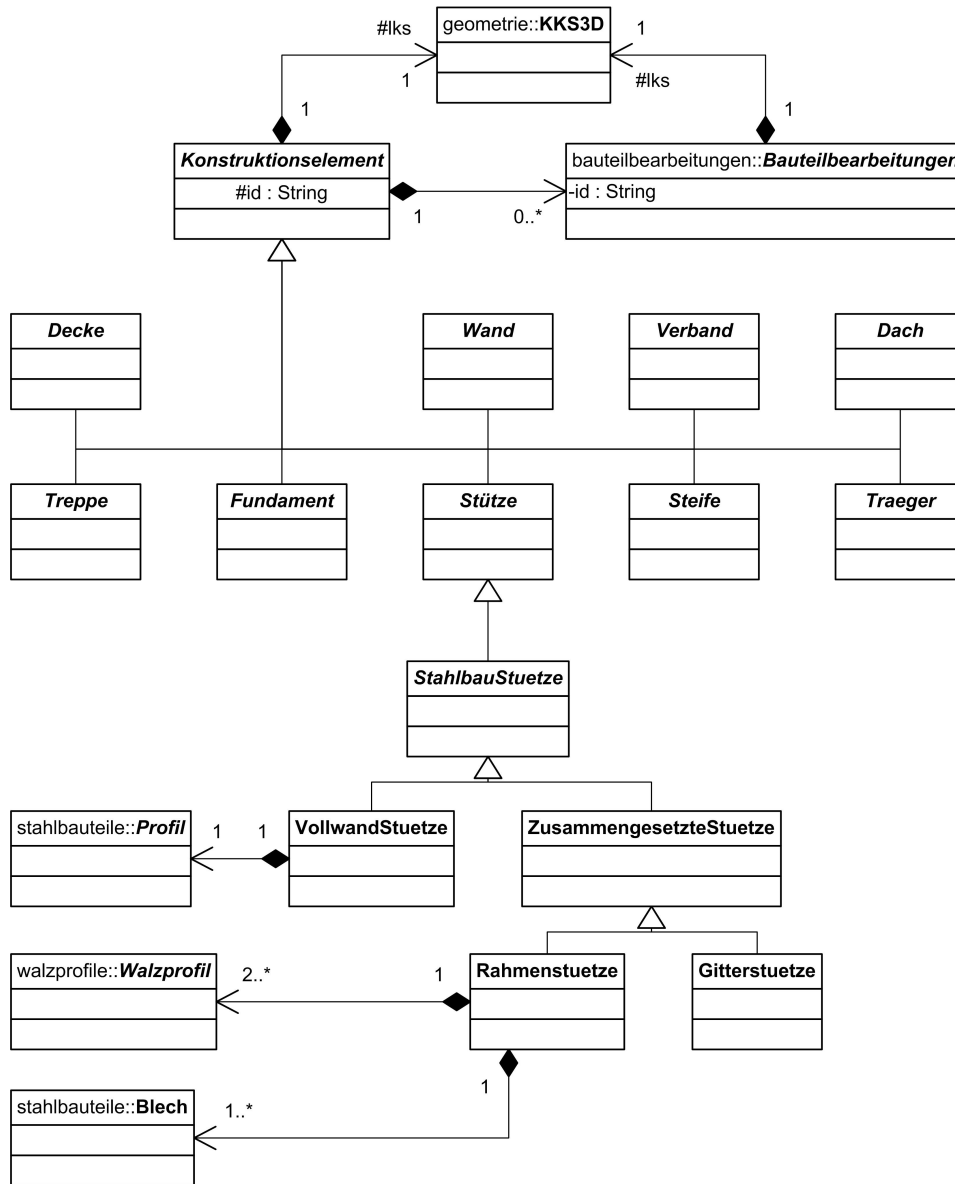


Abbildung 5.18: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Konstruktionselemente

Den Konstruktionselementen lassen sich verschiedene durch spezifische Parameter und geometrische Lage charakterisierte Bearbeitungen zuordnen. Diese umfassen neben Profil- und Blechbearbeitungen, wie Ausklinkung, Fase oder Freischnitt, auch Löcher und Öffnungen (Abb. 5.19).

Alle Grundelemente, die zum Aufbau von Konstruktionselementen und in Anschlusskonstruktionen erforderlich sind, werden unter Stahlbauteilen zusammengefasst. Dabei wird unterschieden zwischen Blechen, die durch eine zweidimensionale Geometrie und Bauteildicke abgebildet werden und Profilen, die durch Bauteilache und Querschnitt beschrieben werden. Eine Mischform sind Profilbleche, die eine flächige Ausdehnung besitzen, aber ein über die Bauteillänge konstantes Profil aufweisen und daher analog zu stabförmigen Elementen

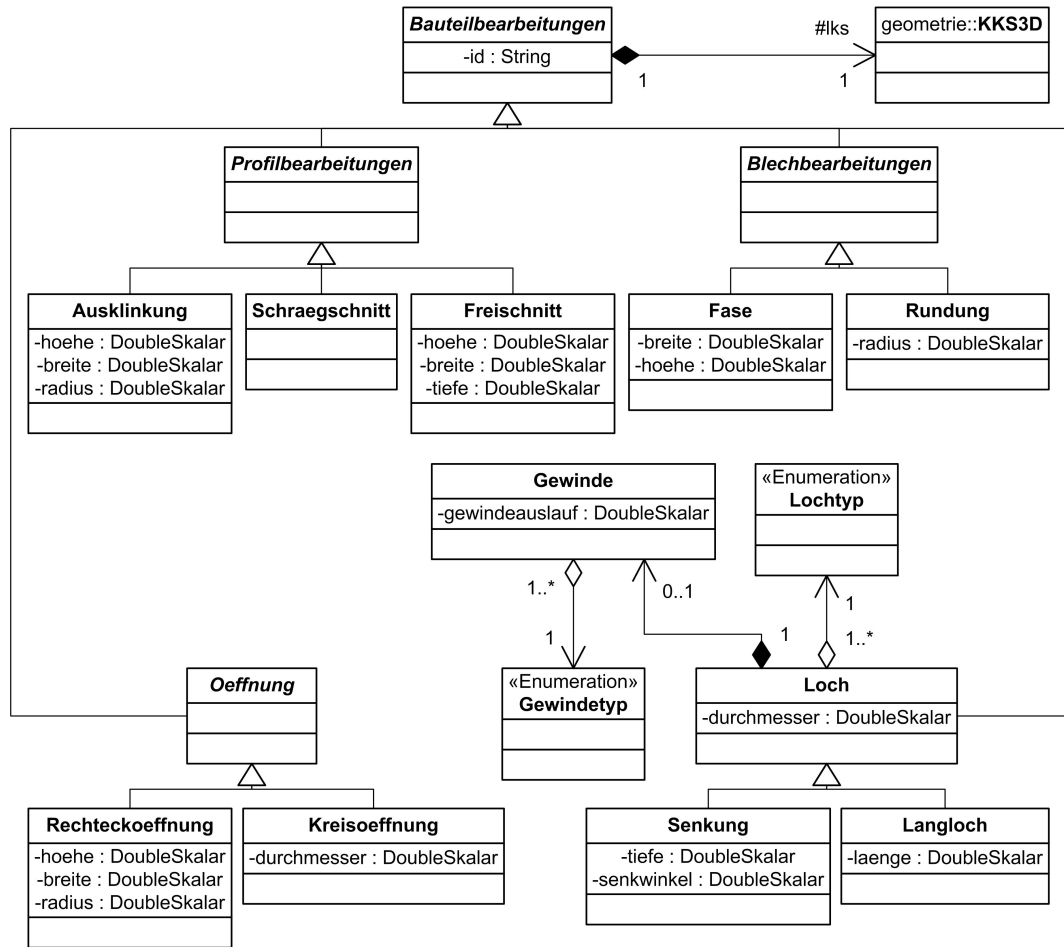


Abbildung 5.19: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bauteilbearbeitungen

ten repräsentiert werden (Abb. 5.20). Die verschiedenen Profiltypen werden entsprechend der Herstellungstechnologie in kaltgefertigte, warmgewalzte und geschweißte Profile unterteilt.

Bauteilverbindungen beschreiben die Art und Weise wie zwei oder mehr Bauteile miteinander verbunden werden und repräsentieren im Allgemeinen einen Bestandteil einer Anschlusskonstruktion. Neben der geometrischen Lage beinhaltet die Definition von Verbindungen die Referenzen auf die verbundenen Bauteile und weitere Parameter, die die spezifische Verbindung charakterisieren. Bezüglich der Verbindungsart erfolgt eine Klassifizierung in Schraub-, Niet-, Schweiß- und Klebverbindungen (Abb. 5.21).

Ein Anschluss wird zum Einen durch das Anschlusselement, welches den grundsätzlichen Aufbau sowie die erforderlichen Bauteilverbindungen und Bauelemente definiert, und zum Anderen durch die über die Anschlusskonstruktion verbundenen Konstruktionselemente bestimmt. Typische Anschlusselemente werden beispielsweise durch Fahnenblech-, Stirnplatten- oder Doppelwinkel-

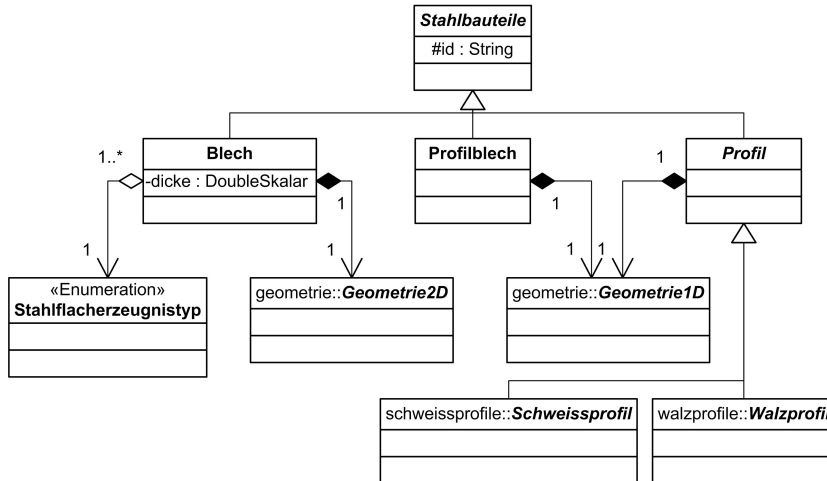


Abbildung 5.20: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Stahlbauteile

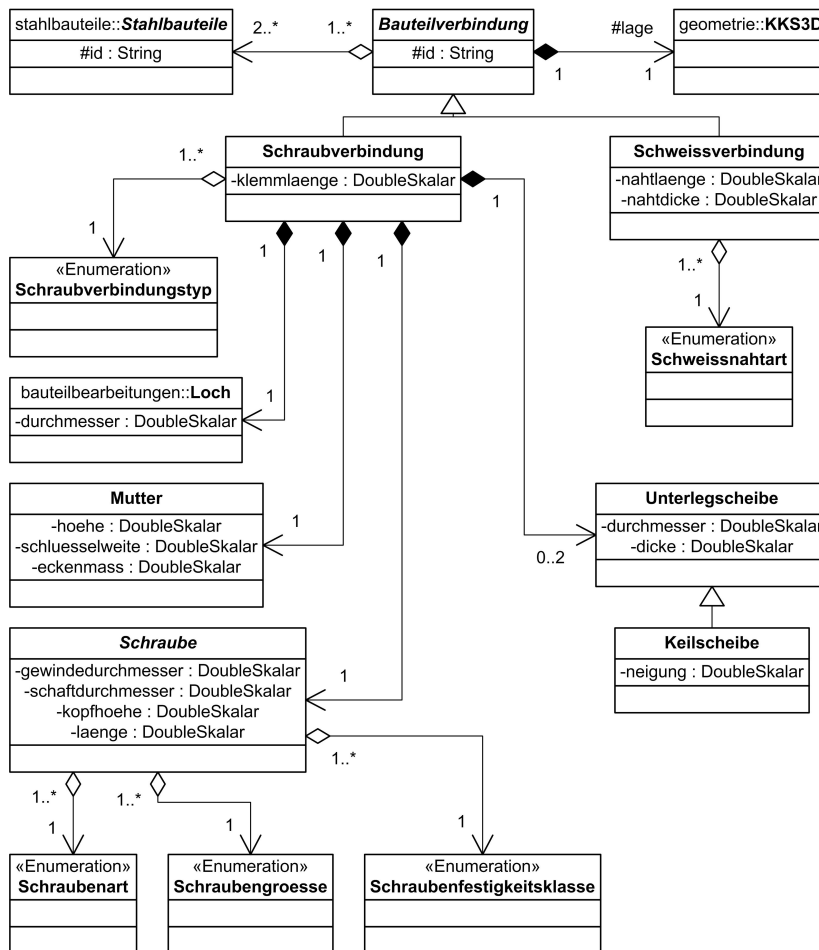


Abbildung 5.21: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bauteilverbindung

schluss repräsentiert. Die abstrakte Beschreibung durch die Klasse *Stahlbauanschluss* ermöglicht für festgelegte Anschlusssituationen mit spezifischen konstruktiven Randbedingungen, zum Beispiel einen Stützenstoss, spezifische Ausführungsvarianten eines Konstruktionsprinzips genauer zu beschreiben (Abb. 5.22).

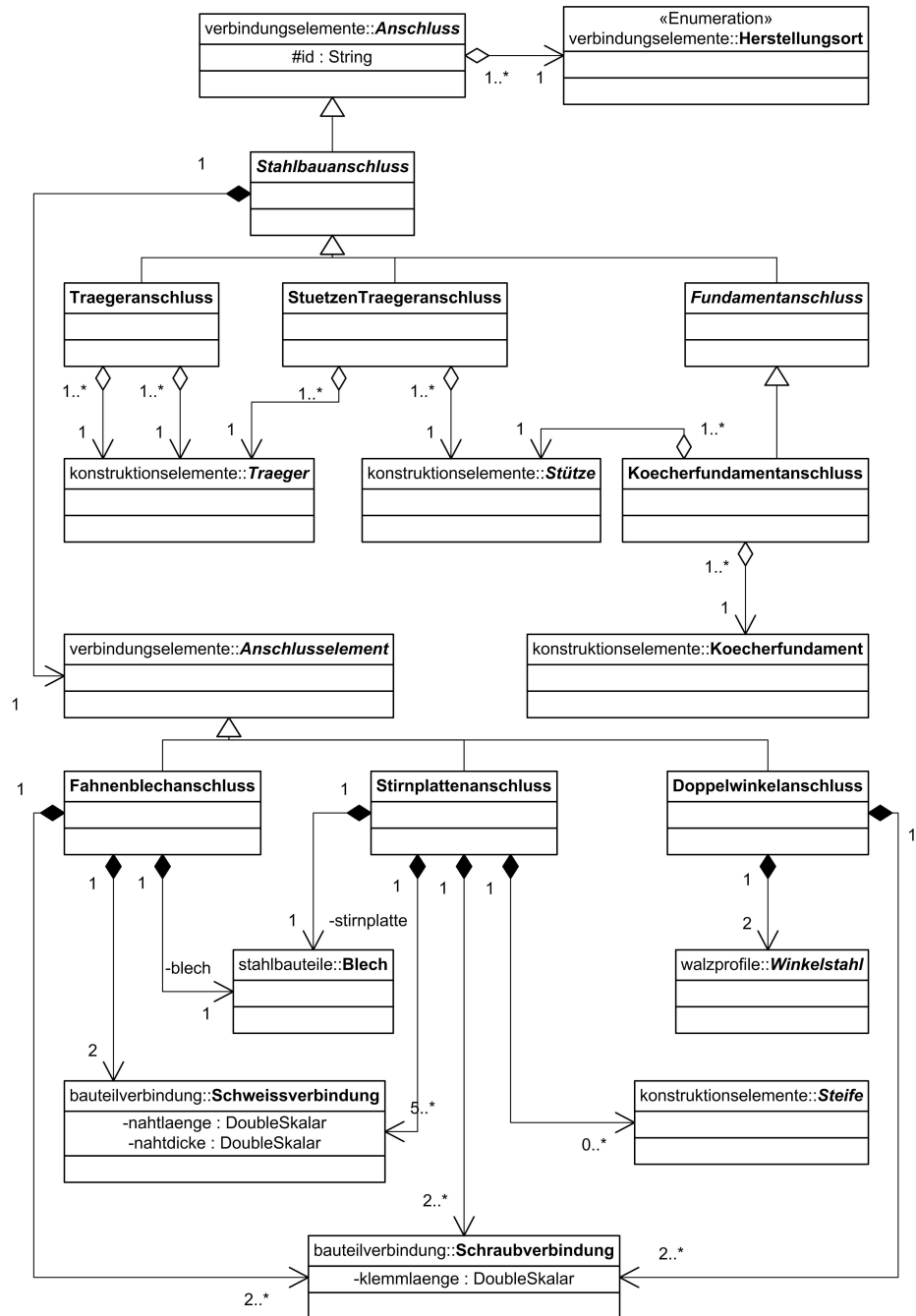


Abbildung 5.22: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Anschlüssen

5.1.6 Teildatenmodell Bemessung

Die Festlegung von Bauteilabmessungen und weiteren Systemeigenschaften erfolgt in der Regel in engem Bezug zu einer oder mehreren bauwesenspezifischen Normen. Diese enthalten neben Angaben zur mechanischen Modellierung auch zulässige Vereinfachungen und Abstraktionen sowie Vorgaben zur Bemessung, zum Nachweis und zur konstruktiven Ausbildung der Bauteile.

Auf Grund des Umfangs aktueller Normen konzentrieren sich die folgenden Darstellungen auf die Teile 1-1 und 1-8 [44, 49] des *Eurocode3 (EC3)*.

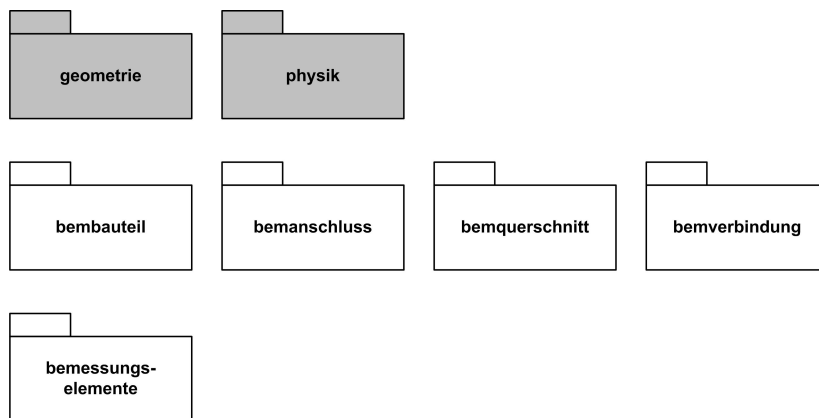


Abbildung 5.23: Paketstruktur des Teildatenmodells zur Beschreibung von Bemessungsmodellen

Die dem Teildatenmodell zugrunde liegende Aufteilung in Pakete ist in Abbildung 5.23 dargestellt. Es erfolgt eine Strukturierung der einzelnen Bemessungsmodelle entsprechend den durch die Modelle abgebildeten Bemessungselementen. Diese Elemente bestehen unter anderem aus Bauteil, Querschnitt, Anschluss und Verbindung. Über die spezifischen Eigenschaften der Modelle zur Bemessung hinaus umfassen die Bemessungselemente die auf sie einwirkende Beanspruchung (Abb. 5.24).

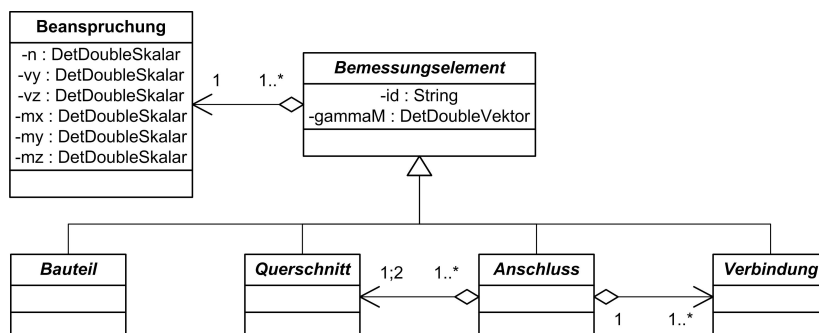


Abbildung 5.24: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bemessungselemente

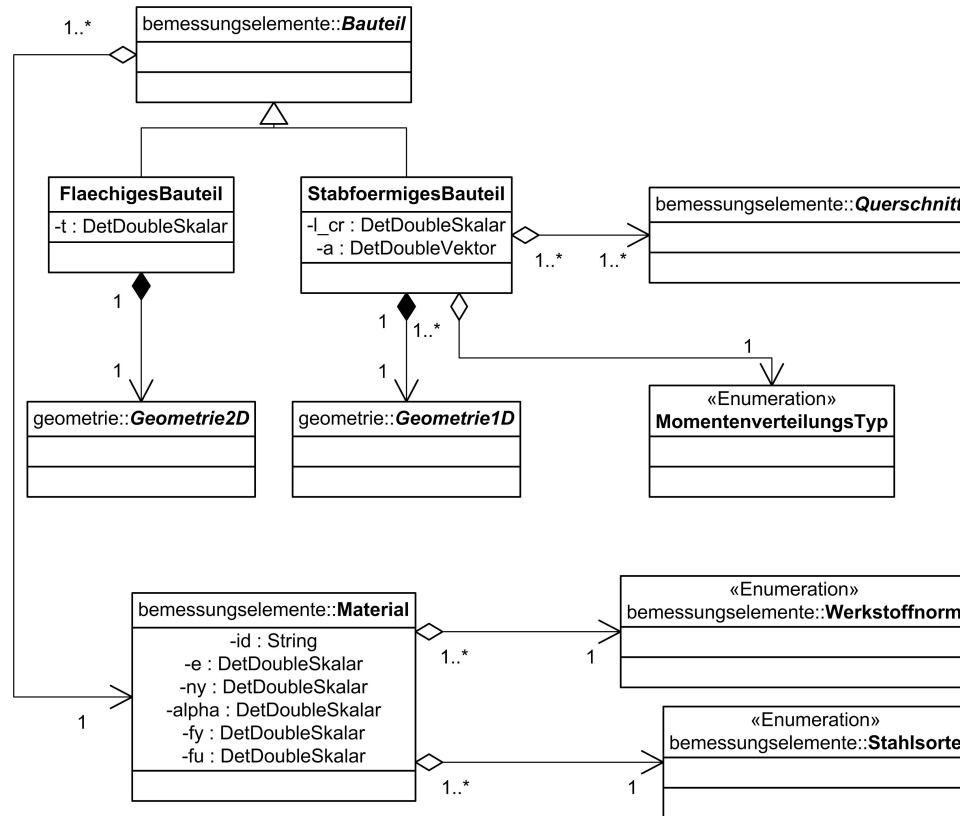


Abbildung 5.25: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bauteile zur Bemessung

Die Bauteile wiederum werden in flächige und stabförmige Bauteile aufgeteilt. Die Repräsentation stabförmiger Bauteile wird durch

- die Bauteilachse,
- die Querschnitte, die Bemessungsstellen widerspiegeln,
- und weitere durch spezifische Modelle benötigte Eigenschaften, wie Angaben zur Beanspruchungsart,

definiert (Abb. 5.25).

Die Beschreibung der Querschnitte basiert auf dem Zusammensetzen aus einzelnen Querschnittselementen (Abb. 5.26). Dem Teil 1-1 des *EC3* folgend wird eine Klassifikation in einseitig und beidseitig gestützte Elemente vorgenommen. Die Abbildung dieser Einteilung geschieht über einen Aufzählungstyp. Diese Beschreibung wird, wie auch die Materialeigenschaften, der Klasse *QuerschnittsElement* zugeordnet.

Analog zu Teil 1-8 des *EC3* erfolgt eine Klassifizierung der Verbindungen in Schraub-, Niet-, Bolzen- und Schweißverbindungen. Die Schraub-, Niet- und Bolzenverbindungen werden durch Rand- und Lochabstände, die Dicke

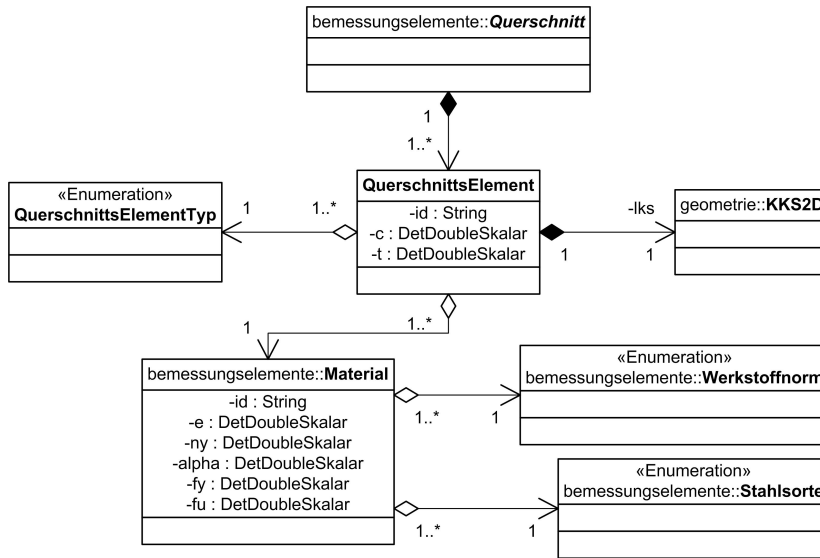


Abbildung 5.26: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Querschnitte zur Bemessung

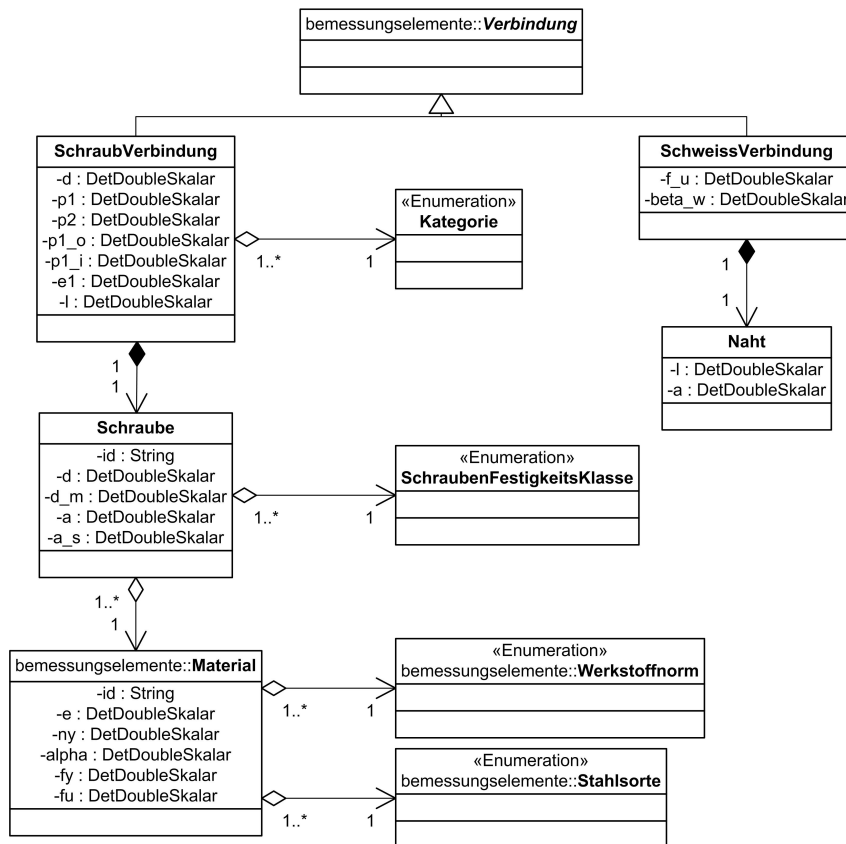


Abbildung 5.27: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Verbindungen zur Bemessung

des dünnsten außenliegenden Blechs sowie die Eigenschaften des Verbindungsmittels beschrieben. Schweißverbindungen werden über die Nahteigenschaften, Nahtlänge und -dicke abgebildet (Abb. 5.27).

Die Definition von Anschlüssen erfolgt über die Querschnitte der anschließenden Bauteile, die erforderlichen Verbindungen und die spezifischen von der Ausführungsform abhängigen Beschreibungen weiterer Merkmale. Die Ausführungsformen werden in Stirnplattenanschlüsse mit I-förmigen Querschnitten und in Anschlüsse mit Hohlprofilen unterteilt. Die dementsprechend von der allgemeinen Repräsentation abgeleiteten Klassen enthalten spezifische Erweiterungen, die beispielsweise für Stirnplattenverbindungen in der Abbildung von T-Stummeln und Stegfeldern bestehen (Abb. 5.28).

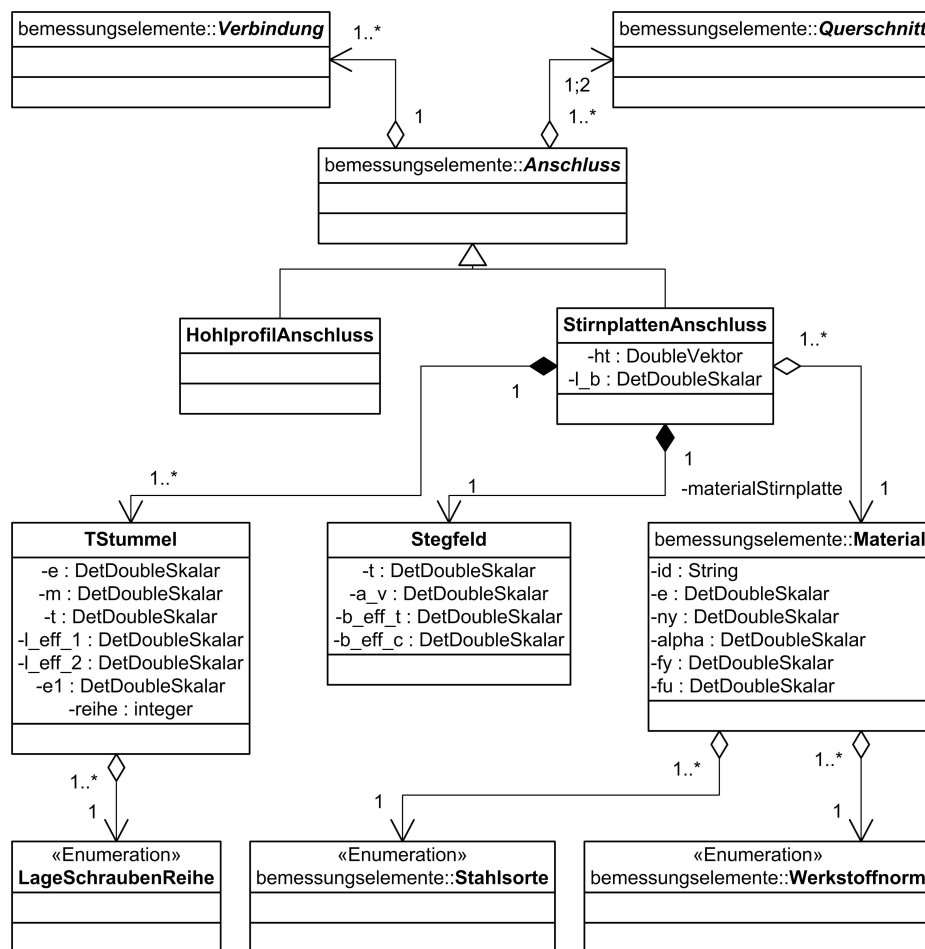


Abbildung 5.28: Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Anschlüsse zur Bemessung

5.2 Abbildung der Modellbeziehungen

5.2.1 Beschreibung der Grundstruktur

Wie in den vorhergehenden Kapiteln erläutert, wird das Bauwerk in seinem Bearbeitungszustand durch einzelne Fachmodelle beschrieben, die jeweils spezifische Aspekte abbilden. Ein zentrales, gemeinsames Fachmodell existiert folglich nicht. Auf Datenebene werden die Fachmodellinhalte durch entsprechende Daten auf Grundlage der Fachdatenmodelle beschrieben. Die Abhängigkeiten zwischen den Teilmodellen werden durch die Methoden zur Modellierung von Modelldaten repräsentiert. Bedingt durch die Abbildung der verschiedenen Bauwerksaspekte in unterschiedlichen Formen und Detaillierungsgraden erfahren die Abhängigkeiten eine Anpassung im Planungsverlauf.

Zur datentechnischen Abbildung der Modellbeziehungen werden die erforderlichen Methoden in einer Klassenstruktur organisiert (Abb. 5.29). Dabei werden die Beziehungen durch allgemeine Grundelemente beschrieben, die weitere Elemente aggregieren, um eine spezifische Abbildung zu ermöglichen. Die aus der iterativen Bearbeitung resultierenden unterschiedlichen Detaillierungsgrade spiegeln sich auch in den Beziehungen der Fachdatenmodelle wider. Auf Klassenebene werden die verschiedenen Abstraktionsstufen durch den Aufbau einer Vererbungshierarchie umgesetzt. Die gemeinsamen Merkmale der Beziehungsbeschreibungen bestehen in Referenzen zu Quell- und Zielobjekten, der Abbildung erforderlicher Parameter sowie weiteren Attributen zu Herkunft und Klassifikation.

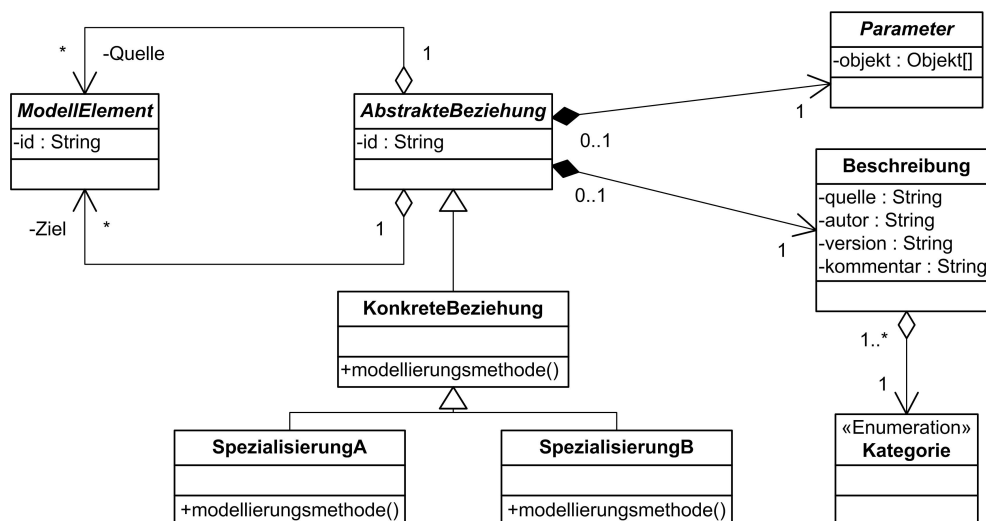


Abbildung 5.29: Prinzipielle Grundstruktur zur Abbildung von Modellbeziehungen

5.2.2 Anwendungsbeispiel

Das nachfolgende Beispiel stellt einen typischen Anwendungsfall des Wohnhausbaus in Stahlbauweise dar. Gegenstand der Betrachtung ist die Konstruktion eines Anschlusses zur Verbindung eines Deckenträgers mit einer durchgehenden Rahmenstütze (Abb. 5.30).

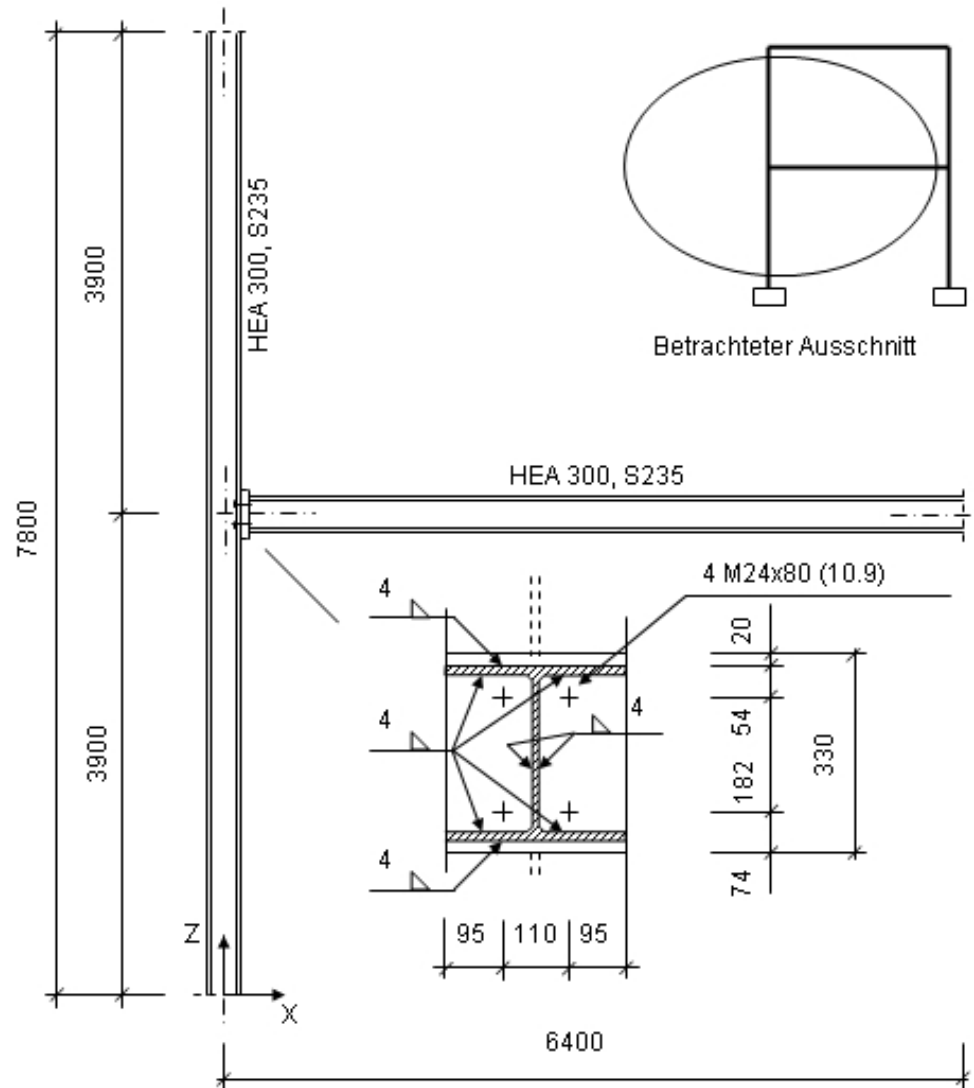


Abbildung 5.30: Systemskizze des betrachteten Beispiels

Die Bearbeitung erfordert eine Abbildung verschiedener fachlicher Aspekte. Im Rahmen dieses Beispiels erfolgt eine Beschreibung dieser Aspekte in Modellen zur:

- Beschreibung des Tragwerks,
- numerischen Berechnung,
- konstruktiven Beschreibung,

- Bemessung.

Die datentechnische Beschreibung der fachlichen Modellinhalte basiert auf den in Abschnitt 5.1 dargestellten Datenstrukturen. Die zugehörigen Objektdiagramme sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Anhängen B, C, D und E zusammengefasst.

Eine umfassende Beschreibung aller zwischen den verschiedenen Modellen bestehenden fachlichen Zusammenhänge ist auf Grund der Vielzahl denkbarer Beziehungen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Dementsprechend wird in diesem Beispiel lediglich eine prinzipielle Darstellung exemplarisch ausgewählter Beziehungen vollzogen. Die Objekte der Beziehungsbeschreibungen sind zur Unterscheidung der Objekte der Fachdatenmodelle grau hinterlegt.

Das Problem wird durch Objekte des Teildatenmodells Tragwerk unter Annahme stabförmiger Tragelemente und einer biegesteifen Kopplung modelliert. Die Abbildung der Tragelemente erfolgt entsprechend den Objektdiagrammen in Anhang B durch zwei Instanzen der Klasse *Tragelement1D* (Abb. B.2). Diese Objekte setzen sich aus der Beschreibung der Tragelementgeometrie (Abb. B.3) und des Querschnitts (Abb. B.4) zusammen. Die biegesteife Verbindung der Tragelemente wird über ein Objekt der Klasse *Kopplungselement* realisiert (Abb. B.5).

Die mechanische Analyse des Anschlusses soll basierend auf der Methode der Finiten Elemente durchgeführt werden. Dies setzt eine entsprechende Aufbereitung der vorhandenen Tragwerksmodellldaten voraus. Die Modelldaten enthalten geometrische Beschreibungen, die durch die Finiten Elemente und Knoten zu repräsentieren sind. Die Modellierung der geometrischen Eigenschaften erfordert

- die Berechnung der Knotenkoordinaten,
- die Unterteilung der Tragelementgeometrie,
- die Zuordnung der Knoten zu den Finiten Elementen.

Für die Festlegung der Knotenkoordinaten ist die Lage anschließender Tragelemente zu berücksichtigen. Im hier betrachteten Fall ist dafür eine Ermittlung des Schnittpunktes der Tragelementachsen der durchgehenden Stütze und des daran angeschlossenen Trägers erforderlich.

Als Parameter für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den geometrischen Abbildungen des Tragwerksmodells und des auf der Methode der Finiten Elemente basierenden Modells zur numerischen Analyse sind Informationen über die Elementlänge bzw. -anzahl und die Elementeigenschaften erforderlich. Für die Modellierung der Stütze wird darüber hinaus die Beschreibung des angeschlossenen Trägers benötigt. Diese Parameter sind durch den Fachplaner festzulegen und bilden einen Bestandteil der Beziehungsbeschreibung.

Die zur Aufbereitung der Tragwerksmodellldaten benötigte geometrische Grundfunktionalität wird durch die Klasse *StreckeZuFinitesElement1D* bereitgestellt (Abb. 5.31 und 5.32). Die Tragelemente werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur sehr grob in jeweils zwei Finite Elemente unterteilt. Die Instanzen sind in Abbildung C.2 als Objektdiagramm dargestellt.

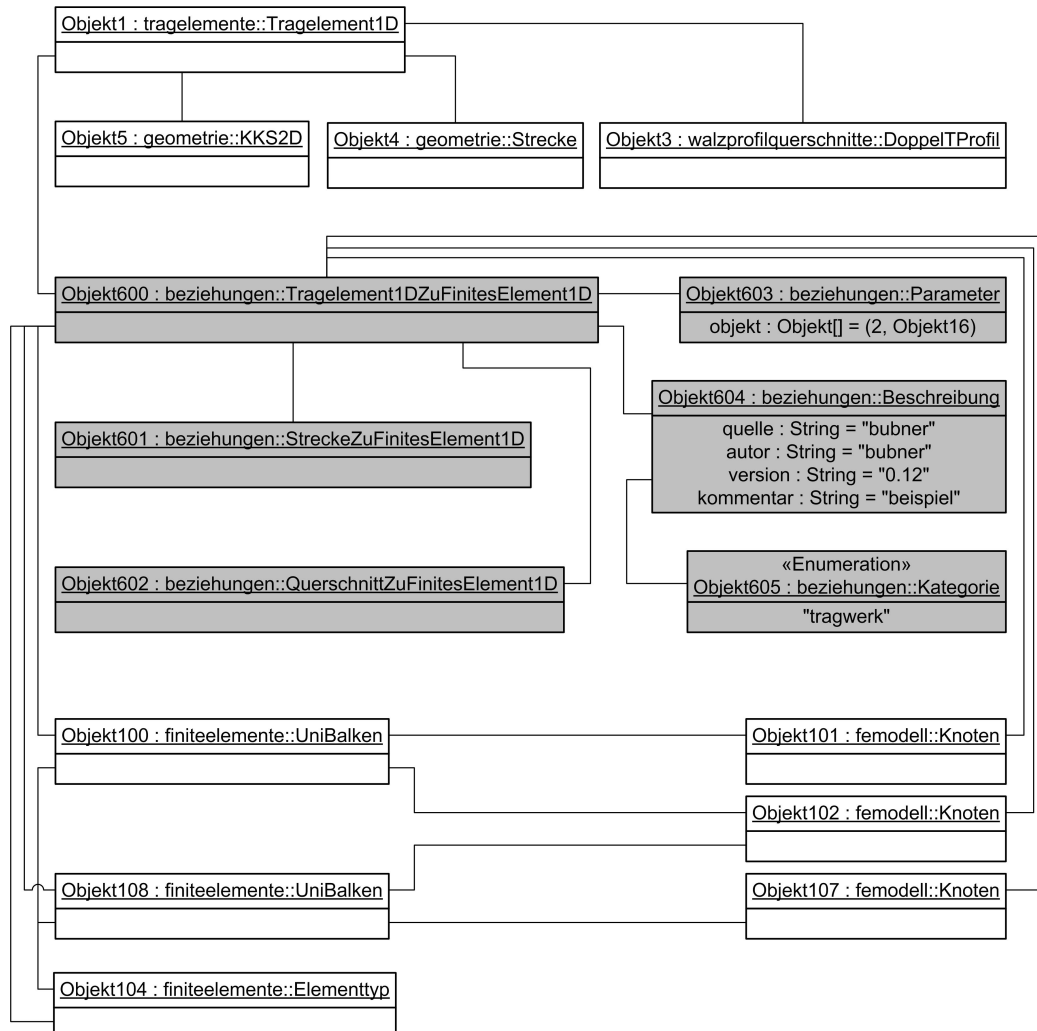


Abbildung 5.31: Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Tragelement der Stütze des Tragwerksmodells und Finiten Elementen des Finite-Element-Modells

Die Querschnittsgeometrie des Tragelements kann, sofern dies durch das Finite Element und dessen Formulierung unterstützt wird, durch die Zuordnung der den Querschnitt des Finiten Elements beschreibenden Parameter übertragen werden. Anderenfalls ist wie in dem hier betrachteten Beispiel eine Ermittlung der Querschnittswerte durchzuführen. Die zur Aufbereitung der Querschnittsdaten erforderlichen Operationen werden in der Klasse *QuerschnittZuFinitesElement1D* zusammengefasst (Abb. 5.31 und 5.32). Die Zuordnung der Querschnittswerte erfolgt entsprechend den durch die Instanzen der Klasse *Strecke*

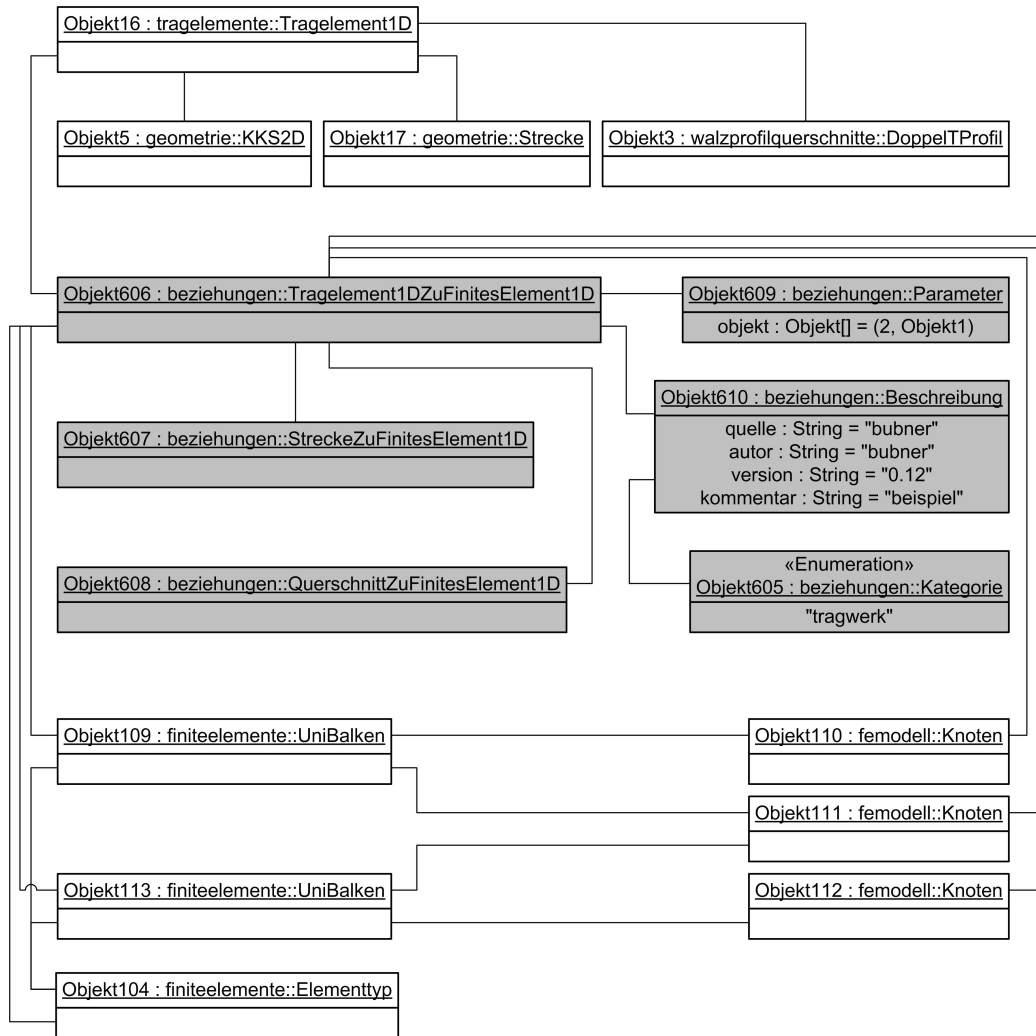


Abbildung 5.32: Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Tragelement des Trägers des Tragwerksmodells und Finiten Elementen des Finite-Element-Modells

ZuFinitesElement1D beschreiben die Abhängigkeiten zwischen den Elementen des Tragwerks- und Finite-Element-Modells.

Über die Aggregation der Klassen *StreckeZuFinitesElement1D* und *QuerschnittZuFinitesElement1D* wird die Beschreibung der dargestellten Modellzusammenhänge in der Klasse *Tragelement1DZuFinites1D* zusammengefasst.

Die vom Kopplungselement des Tragwerksdatenmodells durch die Angabe von Steifigkeiten beschriebenen Randbedingungen (Abb. B.5) sind für die Festlegung der Knotenbeziehungen in Richtungsvektoren der Randbedingungen des Finite-Element-Modells umzuformen (Abb. C.3). Die Abbildung der Zusammenhänge erfolgt über eine Instanz der Klasse *PunktkopplungZuKopplungsbedingungen* (Abb. 5.33).

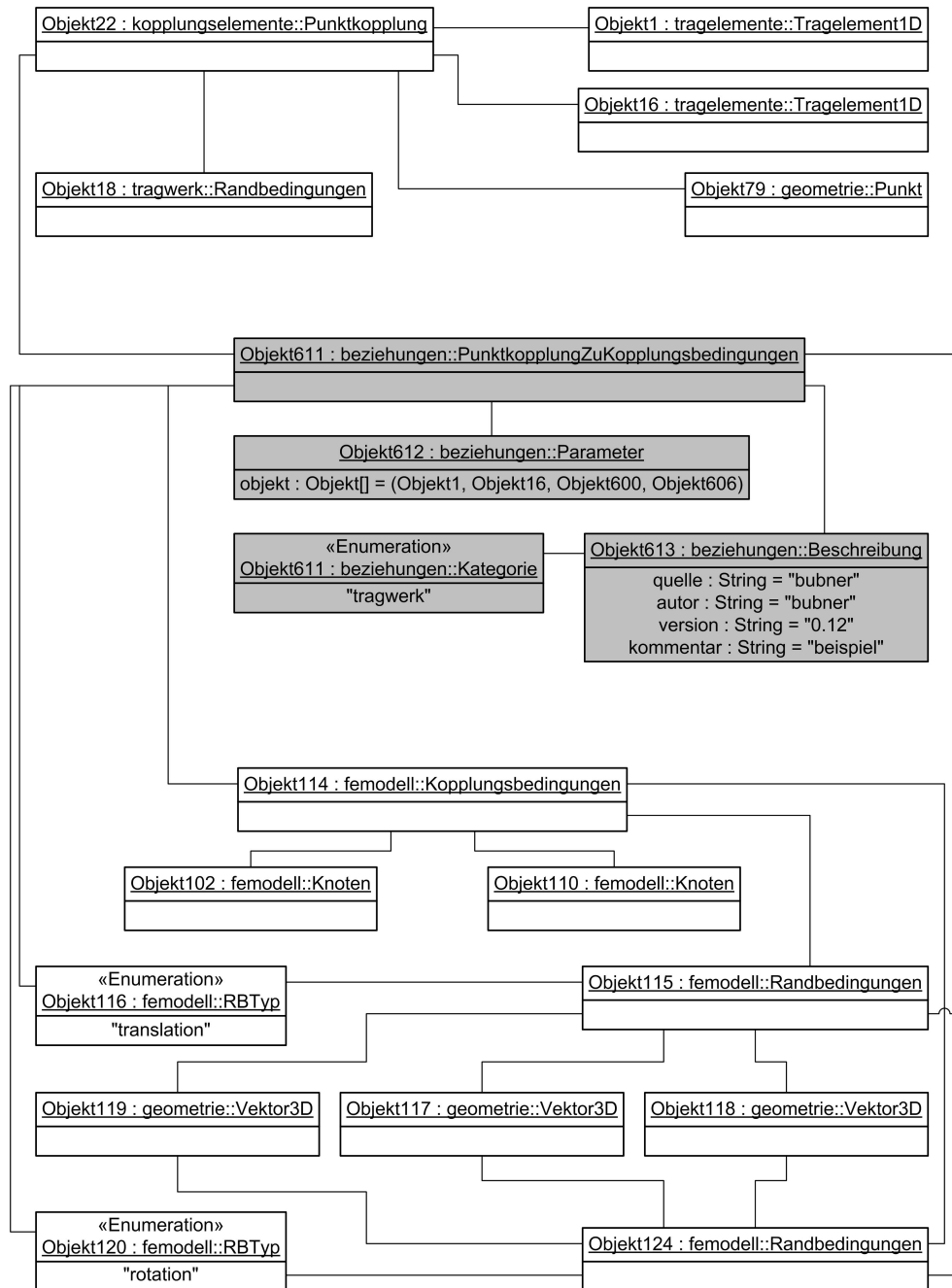


Abbildung 5.33: Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Kopplungselement des Tragwerksmodells und den Kopplungsbedingungen des Finite-Element-Modells

Als Parameter werden die miteinander verbundenen Tragelemente und deren Beziehungen zu den Elementen des Finite-Element-Modells übergeben. Diese Objekte werden benötigt, um die zu den Knotenbeziehungen gehörigen Knoten zu bestimmen. Die Auswahl der miteinander in Beziehung stehenden Knoten erfolgt entsprechend ihrer geometrischen Lage und Zuordnung zu den Tragelementen. Die benötigten Analyseergebnisse, wie zum Beispiel die Schnittgrößen

im Anschlussbereich, werden durch den Fachplaner bestimmt. Sie sind den entsprechenden Tragelementen des Tragwerksmodells zuzuweisen.

Die Verbindung des Trägers mit der Stütze soll über einen Stirnplattenanschluss realisiert werden (Abb. D.1). Es wird davon ausgegangen, dass dieser Anschluss als Entwurf im Konstruktionsmodell verfügbar ist. Die entsprechenden Daten des Konstruktionsmodells (Abb. D.4) bilden die Grundlage zur Modellierung eines auf dem *Eurocode3* basierenden Bemessungsmodells. Dieses Bemessungsmodell setzt sich aus den Eigenschaften des Stegfeldes, den verwendeten äquivalenten T-Stummeln und den Schraub- sowie Schweissverbindungen zusammen (Abb. E.1). Die Beziehungen zwischen Konstruktions- und Bemessungsmodell werden durch eine Instanz der Klasse *TraegeranschlussZuEC3Anschluss* beschrieben (Abb. 5.34). Durch diese Instanz werden Objekte der Klassen *StirnplattenanschlussZuTStummel* sowie *SchraubverbindungZuBemessungsschraubverbindung* und *SchweissverbindungZuBemessungsschweissverbindung* aggregiert.

Es wird ein T-Stummel beschrieben, der den Stützenflansch im Zugbereich des Anschlusses repräsentiert (Abb. E.1). Ergänzend ließen sich dem Modell bei Bedarf weitere T-Stummel hinzufügen. Die durch ein Objekt der Klasse *StirnplattenanschlussZuTStummel* repräsentierten Beziehungen beschreiben die Zusammenhänge der Abbildung der Konstruktion und der Abbildung zur Bemessung durch äquivalente T-Stummel. Die Eigenschaften der T-Stummel bestimmen sich aus der Lage und angenommenen Wirkungsweise der Schraubenreihen. Im hier betrachteten Beispiel erfolgt die Modellierung der T-Stummel unter der Annahme einer einzelnen äußeren Schraubenreihe.

Durch die Klasse *SchraubverbindungZuBemessungsschraubverbindung* werden die Methoden zur Ermittlung der erforderlichen Modellparameter des Bemessungsmodells einer Schraube (Abb. E.2) bereitgestellt. Die durch die Methoden realisierte Funktionalität besteht in der Ermittlung von Randabständen und Querschnittswerten der Schraube. Der modulare Aufbau der Beziehungsbeschreibungen ermöglicht es dem Fachplaner, den Abbildungsumfang zu begrenzen. Dies zeigt sich beispielsweise in der Abbildung der Schweissnähte, die hier exemplarisch auf zwei Nähte, eine am Flansch und eine am Steg des Trägers, reduziert wurde.

Die auf Grundlage des Bemessungsmodells ermittelten Eigenschaften können zu einer Anpassung der anderen vorhandenen Modelle führen. Beispielsweise ist die Abbildung der mechanischen Kopplung im Tragwerksmodell von der rechnerisch bestimmten Rotationssteifigkeit der Verbindung abhängig. Die Anpassung der Modelle wird basierend auf den bestehenden Beziehungen einerseits durch die Aktualisierung der Modellparameter unterstützt. Andererseits wird durch die in den Klassen zur Abbildung der Beziehungen bereitgestellten Methoden eine über Werteänderungen hinausgehende Modellmodifikation erleichtert. So lassen sich Teile der Modellierung, zum Beispiel die Repräsentation

tion der Steifigkeit im FE-Modell durch ein Federelement, unkompliziert durch Anpassung der Eigenschaften der Beziehungsbeschreibung ändern.

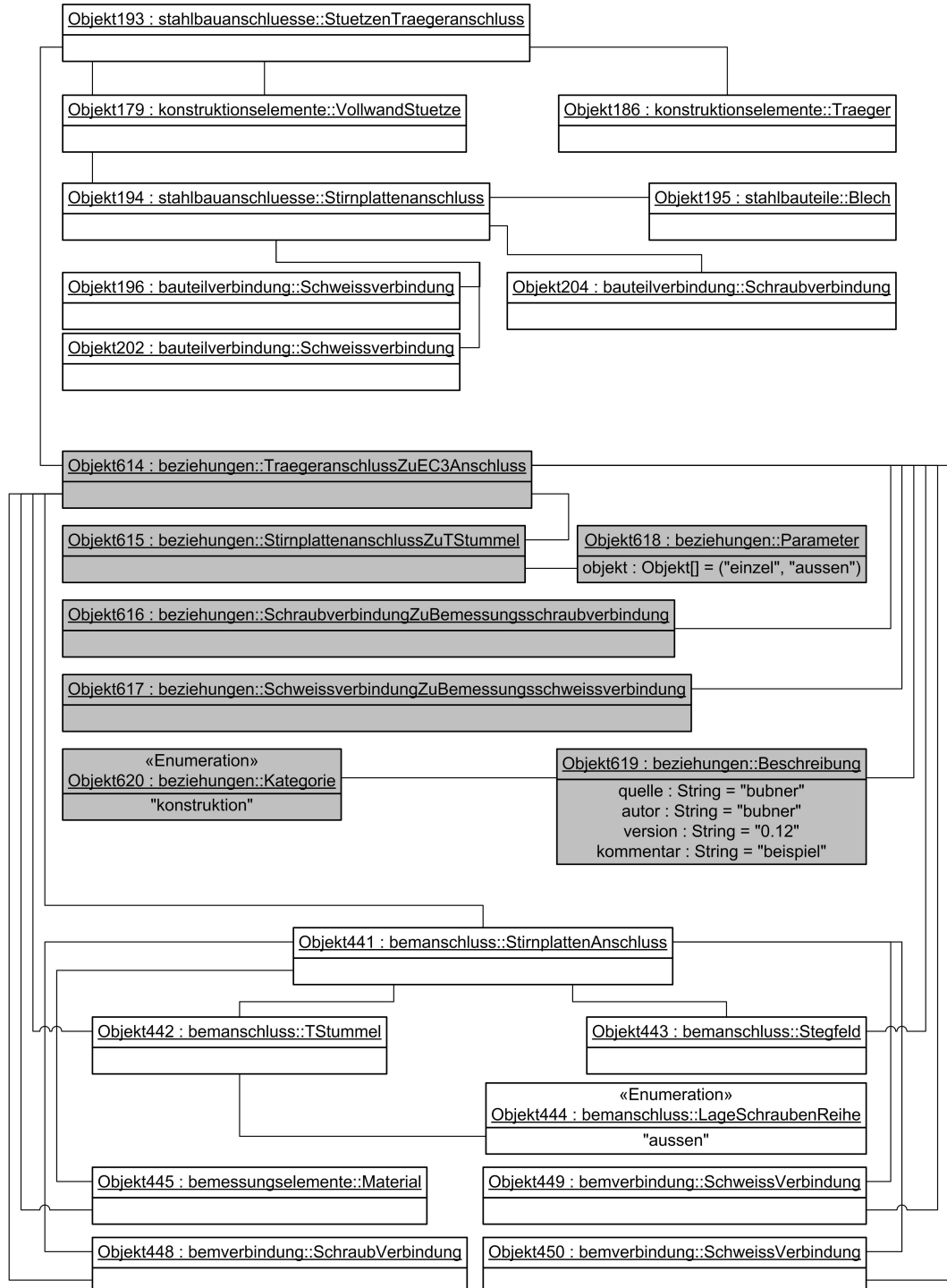


Abbildung 5.34: Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Stirnplattenanschluss des Konstruktionsmodells und dem Bemessungsmodell

Im Beispiel wurde deutlich, dass eine applikationsneutrale datentechnische Beschreibung auf Grund ihrer höheren Allgemeingültigkeit einen größeren Aufwand erfordert. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Realisierung einer disziplinübergreifenden, umfassenden datentechnischen Abbildung eine Aufbereitung der Modellbeziehungen sowohl auf fachlicher als auch auf datentechnischer Ebene voraussetzt. Die hier exemplarisch realisierte datentechnische Strukturierung erweist sich diesbezüglich als sehr flexibel und an die spezifischen fachlichen Anforderungen bei der Planung und Entwicklung von Wohnhäusern in Stahlbauweise anpassbar.

Kapitel 6

Zusammenfassung

In diesem Kapitel sollen zusammenfassend die wesentlichen Aussagen der einzelnen Abschnitte dieser Arbeit dargestellt werden.

Allgemein zeichnen sich Bauwerke durch ihre lange Lebensdauer, Vielgestaltigkeit sowie deren individuelle Anpassung an die Nutzung und standortspezifischen Randbedingungen aus. Charakteristisch für Wohnhäuser in Stahlbauweise ist neben einer allgemeinen individuellen Gestaltung des Bauwerksentwurfs die Entwicklung und der Einsatz typisierter industrieller Lösungen. Der Grad an Vorfertigung wird dabei vor allem durch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte bestimmt. Dementsprechend ergeben sich sehr unterschiedliche Randbedingungen für die Planungsbearbeitung und Anforderungen an die Abbildung von Bauwerkseigenschaften.

Eine Beschreibung der Bauwerkseigenschaften erfordert auf Grund der fachlichen Komplexität verschiedene Fachmodelle. Diese repräsentieren verschiedene fachliche Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen, die spezifisch an einen Anwendungsbereich und Verwendungszweck angepasst sind. Die Wahl eines für eine konkrete Anwendung geeigneten Fachmodells sowie die Art und Weise der Modellierung von Bauwerkseigenschaften liegt in der Verantwortung von Fachplanern.

Zwischen den verschiedenen Modellen, die einzelne Aspekte eines Bauwerks abbilden, bestehen fachliche Zusammenhänge. Diese gegenseitigen Beziehungen sind durch den Fachplaner zur Integration seiner Lösung in den Gesamtkontext zu berücksichtigen.

Unterstützt durch die mit der technischen Entwicklung verbundene Verfügbarkeit entsprechender Hard- und Software erfolgen zunehmend aufwändigere Modellierungen einzelner fachlicher Aspekte. Die detailliertere Beschreibung der verschiedenen Bauwerksaspekte führt zu einer stärkeren Verzahnung der die Bauwerkseigenschaften repräsentierenden Modelle. Die Abbildung dieser Modellbeziehungen unterliegt derzeit jedoch üblicherweise erheblichen Vereinfachungen, die den gestiegenen Anforderungen an eine fachliche Bearbeitung, wie einer erhöhten Planungsqualität, nicht gerecht werden. Eine umfassende, disziplinübergreifende Repräsentation des Bauwerks erfordert neben der Abbildung der Fachmodelle und deren Inhalten die Beschreibung der zwischen den

Modellen bestehenden fachlichen Abhängigkeiten. Unterschiede in den fachlichen Abhängigkeiten ergeben sich sowohl bezüglich der verschiedenen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen als auch aus der konkreten inhaltlichen Beschreibung. Dementsprechend unterliegt die Abbildung von Modellbeziehungen projektspezifischen Randbedingungen.

Um fachliche Inhalte rechnerintern repräsentieren zu können, ist eine datentechnische Modellierung der fachlichen Modellierungskonzepte und Modellvorstellungen erforderlich. Neben den durch die Fachmodelle definierten fachlichen Anforderungen unterliegt die Entwicklung von Datenstrukturen technischen Randbedingungen. Diese Randbedingungen führen in Verbindung mit subjektiven Modellierungsentscheidungen zu einer Vielzahl verschiedener Datenstrukturen.

Produktdatenmodelle ermöglichen eine über einzelne Aspekte hinausgehende datentechnische Abbildung der Bauwerkseigenschaften. Die Entwicklung erfolgt im Allgemeinen mit dem Ziel der Unterstützung eines applikationsübergreifenden Datenaustauschs. Dementsprechend wird durch diese Modelle eine datentechnische Integration unter anderem über die Angleichung von Datenstrukturen realisiert. Eine außerdem erforderliche Abbildung der fachlichen Beziehungen wird dagegen nur unzureichend unterstützt.

Aus fachlicher Sicht bestehen wesentliche Anforderungen an eine umfassende, disziplinübergreifende datentechnische Abbildung in:

- einer baufachlichen sowie datentechnischen Aufbereitung und Strukturierung fachlicher Modellzusammenhänge,
- der Realisierung einer projektspezifischen, anforderungsgerechten Kombination von Fachdatenmodellen innerhalb eines Modellverbunds,
- der Gewährleistung einer flexiblen datentechnischen Abbildung von Modellbeziehungen durch den Fachplaner.

Eine diesen Anforderungen entsprechende datentechnische Beschreibung repräsentiert ein eigenständiges Modell. Demzufolge ist die Erstellung, Nutzung und Wartung dieser Beschreibung durch darauf abgestimmte spezialisierte Softwarewerkzeuge zu unterstützen.

Die Abbildung in der Regel komplexer Modellzusammenhänge innerhalb eines aus spezialisierten Teilmodellen bestehenden Modellverbunds kann auf der Grundlage vordefinierter Beziehungsbeschreibungen realisiert werden. Eine entsprechende fachliche und datentechnische Strukturierung in Grundeinheiten gewährleistet die erforderliche Flexibilität und Übertragbarkeit auf ähnliche fachliche Aufgabenstellungen. Durch eine Zusammenführung mehrerer Grundeinheiten ergeben sich Vorteile in der Sicherstellung einer fachlichen Konsistenz. Darüber hinaus wird durch deren Kombination ein Dokumentieren bewährter Strategien und Vorgehensweisen zur Modellbildung ermöglicht.

Entsprechend der Zielsetzung erfolgt mit dieser Arbeit eine auf die fachliche Sicht konzentrierte Betrachtung zu den Anforderungen an eine umfassende disziplinübergreifende datentechnische Abbildung von Bauwerkseigenschaften. Damit verbunden ist die Hoffnung, einen Beitrag zu einer engeren Zusammenarbeit von Ingenieuren des Konstruktiven Ingenieurbaus und der Informatik im Bauwesen geleistet zu haben.

Literaturverzeichnis

- [1] Hannus, M.: The Islands Of Automation In Construction, URL <http://cic.vtt.fi/projects/ratas/islands.html>
- [2] Duddeck, H.: Wie konsistent sind unsere Entwurfsmodelle? In: Bauingenieur 64 (1989), Seiten 1-8
- [3] Neue Methode der Bauplaung: Digitales Bauen, Intelligente Architektur / AIT Spezial (2003), Nr.39, S.60-61
- [4] Forgber, U.: Die Vernetzung von Kompetenzdomänen in virtuellen Projekträumen. Dissertation, Karlsruhe, 1999
- [5] Samuel, A.; Weir, J.: Introduction to Engineering Design: Modelling, Synthesis and Problem Solving Strategies. Oxford : Butterworth - Heinemann, 1999
- [6] Industriebau. Leipzig 2 (1913), Seite 269
- [7] Industriebau. Leipzig 21 (1930), Seite 135
- [8] Werner, F.; Seidel, J.: Der Eisenbau - Vom Werdegang einer Bauweise. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1992
- [9] Wichtige Baudaten, Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., Ausgabe 9/2005
- [10] Kalusche, W.: Koordination und Integration in der Bauplanung. In: Deutsche Bauzeitschrift 130 (1996), Heft 11, S. 177-181
- [11] Kalusche, W.: Bauplanung - Entwicklung und Chancen. In: Wissenschaftliches Symposium Bauwirtschaft 2000: Perspektiven am Beginn des neuen Millenniums, Institut für Bauwirtschaft der Universität GH Kassel (Hrsg.), 2000, S. 123-140
- [12] Eastman, C.; Wang, F.; You, S.-J.; Yang, D.: Deployment of an AEC industry sector product model. In: Computer-Aided Design xx (2005), Seiten 1-15
- [13] Rudolph, S.; Kröplin, B.: Über die Systematische Bewertung von Konstruktionen. In: Bauingenieur 69 (1994), S. 3-11

- [14] Rottke, E.: ExTraCAD Computerunterstützung des architektonischen Tragwerkentwurfs, Dissertation, Technische Hochschule Aachen Fakultät für Architektur, 1998
- [15] Lee, G.; Eastman, C. M.; Zimring, C.: Avoiding design errors: a case study of redesigning an architectural studio. In: Design Studies Vol. 24 No. 5 (2003), Seiten 411-435
- [16] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 548: Kostengünstiger Wohnungsbau mit Stahl. 1. Auflage, 1999
- [17] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 559: Wohnungsbau mit Stahl. 1. Auflage, 2000, Seiten 18-22
- [18] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 573: Stahl im Wohnungsbau - innovativ und wirtschaftlich. 1. Auflage, 2002, Seiten 11-14
- [19] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 559: Wohnungsbau mit Stahl. 1. Auflage, 2000, Seiten 11-17
- [20] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 560: Häuser in Stahlleichtbauweise. 1. Auflage, 2002
- [21] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 573: Stahl im Wohnungsbau - innovativ und wirtschaftlich. 1. Auflage, 2002, Seiten 15-22
- [22] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 573: Stahl im Wohnungsbau - innovativ und wirtschaftlich. 1. Auflage, 2002, Seiten 22-26
- [23] Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.): Wohnungsbau mit Stahl 075 - Doppelhaus in Rudolstadt. 1. Auflage, 2000
- [24] Sedlacek, G.; Weynand, K.: Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau. Band 1. 1. Auflage Düsseldorf : Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 2000
- [25] Sedlacek, G.; Weynand, K.: Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau. Band 2. 2. Auflage Düsseldorf : Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 2002
- [26] Tichelmann, K.; Pfau, J.: Entwicklungswandel Wohnungsbau: Neue Gebäudekonzepte in Trocken- und Leichtbauweise. Braunschweig / Wiesbaden : Vieweg, 2000
- [27] Werner, F.; Linse, G.: Bauhauskonzept 2000 - Preiswerter Eigenheimbau durch innovative Verbindung von Planung, Baustellen- und Baustofflogistik. Professur Stahlbau, Bauhaus-Universität Weimar, 1999 - Abschlussbericht
- [28] Forschungs- und Entwicklungsprojekt zur Modulbauweise - Mehrgenerationenhaus in Menden. In: Lenze, V.; Luig, K. Th.; Dorka, S.: Stahlarchitektur international, Wohnhäuser aus vier Kontinenten. München : Deutsche Verlags - Anstalt, 2004, Seite 150f

-
- [29] Lenze, V.; Luig, K. Th.; Dorka, S.: Stahlarchitektur international, Wohnhäuser aus vier Kontinenten. München : Deutsche Verlags - Anstalt, 2004
- [30] Lehner, F.; Öz, F.; Widmaier, B.: Flexibler Wohnungs- und Bürobau mit Stahl. Düsseldorf : Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, 1999
- [31] Linse, G.; Werner, F.: Produkt und Prozessstrategien für den innovativen Wohnungsbau. Kongressbeitrag zu: Innovativer Wohnungsbau mit Stahl, Hamm, 2000
- [32] Duddeck, H.: Die Ingenieuraufgabe, die Realität in ein Berechnungsmodell zu übersetzen. In: Bautechnik 60 (1983), Seiten 225-234
- [33] Duddeck, H.: Entwicklung der Berechnungsmodelle des Bauingenieurs: Woher? Wohin?. In: Bautechnik 70 (1993), Seiten 640-649
- [34] Schlaich, J.: Über das Modellieren im Konstruktiven Ingenieurbau, besonders im Stahlbetonbau. In: Teutsch, M. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Falkner: Betonbau - Forschung, Entwicklung und Anwendung. Braunschweig : IBMB Bibliothek, 1999
- [35] Dewitz, E.; Tönsing, J.: Schritte zur Modellabbildung. Berlin : Ernst & Sohn, 2003
- [36] Steinmann, F.: Modellbildung und computergestütztes Modellieren in frühen Phasen des Entwurfs, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 1997
- [37] NORM DIN 276 Juni 1993. Kosten im Hochbau.
- [38] Unterweger, H.: Globale Systemberechnungen von Stahl- und Verbundbrücken - Leistungsfähigkeit einfacher Stabmodelle. Habilitationsschrift, Technische Universität Graz, 2001
- [39] Medjdoub, B.: Towards aid in preliminary design in architecture: ARCHIPLAN. In: Pahl, J. P.; Werner H.: Proceedings of the 6th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Rotterdam : Balkema, 1995, S. 733-739
- [40] Petzold, F.: Computergestützte Bauaufnahme als Grundlage für die Planung im Bestand. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2001
- [41] Stahl-Information-Zentrum (Hrsg.): Dokumentation 534: Hallen aus Stahl. 1. Auflage, 1997
- [42] Büttner, O.; Hampe E.: Bauwerk Tragwerk Tragstruktur. Band1: Analyse der natürlichen und gebauten Umwelt. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1977
- [43] NORM DIN EN 1990 Oktober 2002. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, deutsche Fassung

- [44] NORM EN 1993-1-1 Juli 2005. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, deutsche Fassung
- [45] Wriggers, P.; Stein, E.: Multi-Skalen-Methoden und Modelladaptivität bei der Berechnung von komplexen Strukturen. Bauingenieur 79 (2004), Heft 11, Seiten 497-505
- [46] Naujoks, B.: Ständerbauweise mit Kaltprofilen. In: Lange, J. (Hrsg.): Tagungsband Leicht Bauen. TU Darmstadt Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Stahl-Informations-Zentrum, Darmstadt, 2003
- [47] Anwar, N.; Kanok-Nukulchai, W.; Batanov, D. N.: Component-Based, Information Oriented Structural Engineering Applications. Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 19 No. 1 (2005), Seiten 45-57
- [48] NORM DIN V ENV 1993-1-3 Mai 2002. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-3: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche, deutsche Fassung
- [49] NORM DIN EN 1993-1-8 Juli 2005. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-8: Berechnung und Bemessung von Anschlüssen, deutsche Fassung
- [50] Heiland, M.: Bemessung von Stirnplattenanschlüssen auf Basis des Eurocode 3 mit der Methode äquivalenter T-Stummel. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2005, zu beziehen über Professur Stahlbau, Bauhaus-Universität Weimar
- [51] NORM DIN EN ISO 13789 Oktober 1999. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Spezifischer Transmissionswärmeverlustkoeffizient - Berechnungsverfahren, deutsche Fassung
- [52] NORM DIN EN ISO 6946 Oktober 2003. Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, deutsche Fassung
- [53] Tichelmann, K.; Ohl, R.: Wärmebrücken Atlas: Trockenbau, Stahl-Leichtbau, Bauen in Bestand. Köln : R. Müller, 2005
- [54] Dias, W. P. S.: Multidisciplinary Product Modeling of Buildings. In: Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 10 No. 1 (1996), Seiten 78-86
- [55] Lämmer, L.; Meißner, U.; Petersen, M.: Object-oriented integration of construction and simulation models. In: Computers and Structures 79 (2001), Seiten 2143-2149

-
- [56] Blümel, I.: Modellierungstechniken in Architektur und Informationstechnologien: Gebäudehülle und -kern. In: Zimmermann, J., Geller, S. (Hrsg.), Forum Bauinformatik 2004, Junge Wissenschaftler forschen. Aachen : Shaker Verlag, 2004, Seiten 28-34
- [57] Heck, P.: Ein objektorientiertes CAD-Modell für die raum- und bauteilorientierte Bearbeitung von Gebäuden in der Vorplanung, Dissertation, Universität Kaiserslautern Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltp lanung/Bauingenieurwesen, 1998
- [58] Bretschneider, D.: Modellierung rechnergestützter, kooperativer Arbeit in der Tragwerksplanung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 4 Nr. 151., Düsseldorf : VDI Verlag, 1998
- [59] Hartmann, D.; Bretschneider, D.; Kolender, U.: Objektorientierte Strukturanalyse, Bemessung und konstruktive Durchbildung von Industriebauten unter besonderer Berücksichtigung parallel ablaufender Prozesse. In: Hartmann, D. (Hrsg.): Objektorientierte Modellierung in Planung und Konstruktion. Weinheim : Wiley-VCH, 2000, Seiten 219-246
- [60] Hamwi, S.: Entwurf, Realisierung und Test eines objektorientierten Datenmodells für die Tragwerksplanung. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000
- [61] Weise, M.: Konzeption und Validierung eines objekt-orientierten Tragwerkmodells für den Bereich Hochbau auf der Basis des IFC-Projektmodells 2.0, Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 1999, zu beziehen über www.buildingsmart.de
- [62] Weise, M.; Katranuschkov, P.; Liebich, Th.: Das iCSS-Tragwerksmodell und seine Einbindung in das IFC-Modell. In: Bauen mit Computern: Kooperation in IT-Netzwerken, VDI-Bericht 1668, Düsseldorf : VDI-Verlag, 2002, Seiten 633-638
- [63] Weise M.; Katranuschkov P.; Liebich T.; Scherer R. J.: Structural analysis extension of the IFC modelling framework. In: Special Issue IFC - Product models for the AEC arena, ITcon Vol. 8 (2003), Seiten 181-200, <http://www.itcon.org/2003/14>
- [64] Mackie, R. I.: Using objects to handle complexity in finite element software. Engineering with Computers Vol. 13 (1997), Seiten 99-111
- [65] Mackie, R. I.: Object-oriented finite element programming - the importance of data modelling. Advances in Engineering Software 30 (1999), Seiten 775-782
- [66] Archer, G. C.: Object-Oriented Finite Element Analysis. Dissertation, University of California at Berkeley, 1996

- [67] Archer, G. C.; Fenves G.; Thewalt C.: A new object-oriented finite element analysis program architecture. *Computers and Structures* 70 (1999), Seiten 63-75
- [68] Baitsch, M.; Hartmann, D.: Object Oriented Finite Element Analysis for Structural Optimization using p-Elements. In: Beucke, K.: *Proceedings Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Weimar : Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [69] Madan, A.: Object-Oriented Paradigm in Programming for Computer-Aided Analysis of Structures. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* Vol. 18 No. 3 (2004), Seiten 226-236
- [70] Mackie, R. I.: Exensibility of finite element class systems - a case study. In: *Computers and Structures* 82 (2004), Seiten 2241-2249
- [71] Garrett, J. H.; Hakim, M. M.: Object-oriented model of engineering design standards. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* Vol. 6 No. 3 (1992), Seiten 323-347
- [72] Garrett, J. H.; Kiliccote, H.: Context-oriented modeling of Eurocodes. In: Scherer, R. J.: *Proceedings of the 1st European Conference on Product and Process Modelling in the Building Industry ECPPM'94*. Rotterdam : Balkema, 1995, Seiten 95-102
- [73] Papp, F.; Iványi, M.; Jármai, K.: Unified object-oriented definition of thin-walled steel beam-column cross-sections. *Computers and Structures* 79 (2001), Seiten 839-852
- [74] NORM ENV 1993-1-1 April 1993. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, deutsche Fassung
- [75] Neuberg, F.: Ein Softwarekonzept zur Internet-basierten Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken. Dissertation, Technische Universität München, 2004
- [76] Petersen, M.: Ein Konzept verteilter Software-Komponenten zur Integration der thermischen Bauphysik in die Gebäudeplanung. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2002
- [77] Petersen, M.: Verteilte Software-Komponenten zur Integration der thermischen Bauphysik. In: *Bauen mit Computern: Kooperation in IT-Netzwerken*, VDI-Bericht 1668, Düsseldorf : VDI Verlag, 2002, Seiten 64-77
- [78] Maier, W.; Ahlgrimm, J.: Rechneranwendung im Stahlbau - Integration von Konstruktion und Bemessung. In: Horstmann, O.; Brüggemann, B. M. (Hrsg.): *Forum Bauinformatik - Junge Wissenschaftler forschen*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1996, Seiten 45-59

-
- [79] Ahlgrimm, J.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines Modellkonzeptes und einer allgemeinen Beschreibungssprache für bauliche Anlagen, dargestellt am Beispiel stählerner Stabtragwerke. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1997
- [80] Hörenbaum, Ch.: Ein Produktmodell für den Komplettbau. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2002
- [81] Howard, H. C.; Abdalla, J. A.; Phan, D. H. D.: Primitive-composite approach for structural data modelling. In: Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 6 No. 1 (1992), Seiten 19-40
- [82] Kowalczyk, W.: Ein interaktiver Modellierer für evolutionäre Produktmodelle, Dissertation, Technische Universität Dresden, 1997
- [83] Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktschnittstelle Stahlbau für die Anforderungen im Komplettbau. Düsseldorf : Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 2002 - Forschungsbericht
- [84] Haller, H.-W.; Hörenbaum, Ch.; Osterieder, P.; Saal, H.: Produktmodelle zur Optimierung der Projektabwicklung. In: Stahlbau 73 (2004), Heft 3, S. 196-204
- [85] Rivard, H.; Fenves, S. J.: A Representation For Conceptual Design Of Buildings. In: Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 14 No. 3 (2000), Seiten 151-159
- [86] Froese, Th.: Models of Construction Process Information. In: Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 10, No. 3 (1996), Seiten 183-193
- [87] Eastman, Ch. M.: Building product models: computer environments supporting design and construction. Boca Raton : CRC Press, 1999
- [88] Hannus, M.; Karstila, K.; Tarandi, V.: Requirements on Standardised Building Product Data Models. In: Scherer, R. J.: Proceedings of the 1st European Conference on Product and Process Modelling in the Building Industry ECPPM'94, Rotterdam : Balkema, 1995, Seiten 43-50
- [89] Katranuschkov, P.: COMBI: Integrated product model. In: Scherer, R. J.: Proceedings of the 1st European Conference on Product and Process Modelling in the Building Industry ECPPM'94, Rotterdam : Balkema, 1995, Seiten 511-520
- [90] Amor, R. W.; Clift, M.; Scherer, R.; Katranuschkov, P.; Turk, Z.; Hannus, M.: A Framework for Concurrent Engineering - ToCEE. In: European Conference on Produkt Data Technology, PDT Days 1997, CICA, Sophia Antipolis, France, 15-16 April, Seiten 15-22
- [91] URL <http://www.iai-international.org/>
- [92] URL <http://www.buildingsmart.de/>

- [93] URL <http://www.iso.org/>
- [94] URL <http://www.cis2.org/>
- [95] URL <http://www.deutscherstahlbau.de/>
- [96] NORM ISO 10303 Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange.
- [97] STEP on a Page. Stand: 7.4.2003,
URL <http://www.mel.nist.gov/sc5/soap/>
- [98] Behaneck, M.: Von „A“ bis „I“ alles über IFC. Deutsches IngenieurBlatt 10 (2003), Heft 5, Seiten 48-52
- [99] Haller, H.-W.: Ein Produktmodell für den Stahlbau. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1994
- [100] Standardbeschreibung Produktschnittstelle Stahlbau - Teil 1: Empfehlungen für den Anwender. Version 4/2000, Deutscher Stahlbau-Verband, 2000, zu beziehen unter www.deutscherstahlbau.de
- [101] Willenbacher, H.: Interaktive verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierung als Integrationsplattform für den Bauwerkslebenszyklus. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- [102] Booch, G.; Rumbough, J.; Jacobson, I.: The Unified Modelling Language User Guide. Reading, Mass. : Addison Wesley, 1999
- [103] Bathe, K.-J.: Finite-Element-Methoden. 2. Auflage Berlin : Springer Verlag, 2002
- [104] Mehlhorn, G. (Hrsg.): Der Ingenieurbau: Grundwissen. [6]: Rechnerorientierte Baumechanik. Berlin : Ernst & Sohn, 1996, Seite 477f
- [105] Knothe, K.; Wessels, H.: Finite Elemente: Eine Einführung für Ingenieure. 3. Auflage Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1999, Seiten 187-192
- [106] Maas, M.; Computergestützte Methode für das Entwerfen von Tragkonstruktionen. Dissertation, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, 2001
- [107] Roehrig, J.: Datenstrukturen zur Körpermodellierung und Netzmodellierung. Bochum : Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr Universität Bochum, 1999
- [108] Haas, W.: Datenaustausch und Datenintegration - STEP und IAI als Beiträge zur Standardisierung. In: BundesBauBlatt 48 (1999), Heft 11

-
- [109] Csavajda, P.; Ilieva, D.; Kalpakidis, G.; Haas, W.: Durchgängige Datenkommunikation zwischen Bauherrn, Planer und Bauunternehmungen in der Fabrikplanung der Automobilindustrie. In: Bauinformatik Journal 4 (2001), Heft 1, Seiten 19-24
- [110] Brottrager, I.: Bauen und Wohnen: Wohin geht die Entwicklung? In: Beratende Ingenieure, Oktober 2003, Seiten 44-47
- [111] Berztky, R.: Konstruieren und Fertigen im Stahlbau durch ganzheitliches, rechnerunterstütztes Entwerfen. Dissertation, Darmstadt 1978
- [112] Schneider, U.: Standardisierung der Kommunikation als Integrationsansatz. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2000
- [113] Haymaker, J.; Kunz, J.; Suter, B.; Fischer, M.: Perspectors: composable, reusable reasoning modules to construct an engineering view from other engineering views. In: Advanced Engineering Informatics 18 (2004), Seiten 49-67
- [114] Scherer, R. J.; Katranuschkov, P.: Integration sollte mehr sein als reiner Datenaustausch. In: Saal, H.; Bucak, Ö. (Hrsg.): Neue Entwicklungen im Konstruktiven Ingenieurbau, Festschrift F. Mang zum 60. Geburtstag, O. Steinhardt zum 85. Geburtstag. Karlsruhe : Universität, 1994, Seiten 749-762
- [115] Reymendt, J.: Ein Beitrag zur objektorientierten Modellierung im Massivbau. Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 4 Nr. 128, Düsseldorf : VDI Verlag, 1995
- [116] Mehlhorn, G.: Der Ingenieurbau: Grundwissen. [8]: Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen. Berlin : Ernst & Sohn, 1997, S. 74
- [117] Petersen, Ch.: Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 3. Auflage Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg, 1993, S. 140
- [118] Lange, J.; Naujoks, B.: Stahl im Wohnungsbau. Bauingenieur 78 (2003), Heft 10, Seiten 459-465
- [119] Song, H. C.: Kopplung von CAD und Statik bei der integrierten Projektbearbeitung im Stahlbau. Disseration, Universität Stuttgart, 1994
- [120] Lenze, V.; Luig, K. Th.: Stahl im Wohnungsbau. Berlin : Ernst & Sohn, 1998
- [121] Balzert, H.: Lehrbuch der Objektmodellierung - Analyse und Entwurf mit der UML 2. 2. Aufl. München : Elsevier, 2005
- [122] Das große Fremdwörterbuch. München : Axel Juncker Verlag, 2001

- [123] Hesse, W.; Barkow, G.; von Braun, H.; Kittlaus, H.-B.; Scheschonk, G.: Terminologie in der Softwaretechnik - Ein Begriffssystem für die Analyse und Modellierung von Anwendungssystemen. Teil 1: Begriffssystematik und Grundbegriffe. In: Informatik-Spektrum 17 (1994), Seiten 39-47
- [124] Hesse, W.; Barkow, G.; von Braun, H.; Kittlaus, H.-B.; Scheschonk, G.: Terminologie in der Softwaretechnik - Ein Begriffssystem für die Analyse und Modellierung von Anwendungssystemen. Teil 2: Tätigkeits- und ergebnisbezogene Elemente. In: Informatik-Spektrum 17 (1994), Seiten 96-105
- [125] NORM DIN 18800 Teil 1 November 1990. Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vielgestaltigkeit von Bauwerken	16
2.2	Standardisierung im Wohnungsbau am Beispiel von Plattenbauten	17
2.3	Fachliche Spezialisierung beim Entwurf von Bauwerken	18
2.4	Konstruktive Entwicklung am Beispiel von Hallenrahmen (links: 1913 [6], Mitte: 1930 [7], rechts: aktuelle Ausführung)	19
2.5	Entwurfsprozess a) nach Kröplin u.a. [13], b) um Entwurfspha- sen erweitertes Modell nach Rottke [14]	20
2.6	Darstellung des Entwurfsprozesses aus [15]	21
2.7	Doppelhaus in Rudolstadt in Skelettbauweise (Rudolstädter Stahl- bau GmbH, Rudolstadt) [23]	23
2.8	<i>Platform-</i> (links) und <i>Balloon</i> -Konstruktionssystem (rechts) [26]	23
2.9	Raumeinheiten in Modulbauweise (ALHO Systembau GmbH, Morsbach)	24
2.10	Bildung modularer Grundelemente [26]	26
2.11	Industrielle Fertigung von Raummodulen (Sekisui Heim, Japan)	26
3.1	Unterteilung in Tragelemente, kontinuierliche Verbindungen (links) und Zusammenfassen mehrerer Konstruktionselemente (rechts) .	37
3.2	Momentenrotationskurve und Klassifikation der Knotennachgie- bigkeit nach <i>Eurocode3</i> [44]	37
3.3	Konstruktion und mögliche Tragwerksidealisation	38
3.4	Beispiel für einen diskretisierten Rahmen innerhalb einer mehr- skaligen Tragwerksmodellierung [45]	41
3.5	Beispiele für die Repräsentation von Querschnitten; links für den Querschnitt eines Walzprofils; rechts für den Ausschnitt eines dünnwandigen, kaltgewalzten Profils	43
3.6	Modellierung eines Stirnplattenanschlusses durch äquivalente T- Stummel [50]	44
3.7	Beispiel für die Zuordnung von Bauteilen zu Konstruktionsele- menten; a: Rahmen, b: Anschluss, c: Decke	45
3.8	Modellierung der Gebäudehülle nach DIN EN ISO 13789 [51] . .	47
3.9	Aufteilung eines thermisch inhomogenen Bauteils nach DIN EN ISO 6946 [52]	48
4.1	Ausschnitt einer Datenstruktur für die Architekturplanung aus [57], Übersicht über die Teile des Gesamtmodells	56
4.2	Beschreibung des Tragwerks nach [58]	58

4.3	Objektorientiertes Datenmodell des Tragwerks aus [60]	59
4.4	Klassenstruktur zur Beschreibung eines Finiten Elements [65]	60
4.5	Klassenstruktur zur Beschreibung eines FE-Modells nach <i>Archer</i> [67]	61
4.6	UML-Klassendiagramm des FE-Modells von <i>Baitsch</i> [68]	62
4.7	Darstellung der konzeptuellen Vererbungsstruktur aus [69]	62
4.8	Vererbungshierarchie der Klasse Nachweisstelle nach [58]	64
4.9	Datenmodell zur Repräsentation von Querschnitten [73]	65
4.10	Beispiel für die Strukturierung eines Bauelements aus [77]	65
4.11	Modellstruktur aus [78]	66
4.12	Datenmodell zur Repräsentation von Stahlbauanschlüssen aus [59]	67
4.13	Lösungsansätze zur Strukturierung von Konstruktionselementen [83]	68
4.14	Übersicht über den Aufbau der <i>ISO10303</i> [97]	78
4.15	Architektur der <i>Industry Foundation Classes</i> [91]	80
4.16	Implementationsbereiche der Produktschnittstelle Stahlbau [100]	82
5.1	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung physikalischer Größen	92
5.2	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung skalarer Größenwerte	93
5.3	Ausschnitt aus dem zur Abbildung der Geometrie verwendeten Datenmodell	94
5.4	Paketstruktur des Teildatenmodells zur Tragwerksbeschreibung	95
5.5	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Beschreibung des Tragwerksmodells	96
5.6	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Tragelementen	97
5.7	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Querschnitten	97
5.8	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Einwirkungen	98
5.9	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Elementkopplungen	99
5.10	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Materialien	99
5.11	Paketstruktur des Teildatenmodells für Modelle der numerischen Analyse	100
5.12	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Finite-Element-Modellen	101
5.13	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Beschreibung Finiter Elemente	102
5.14	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Beschreibung von Randbedingungen	103
5.15	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Repräsentation von Lasten	103
5.16	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Ergebnisse	104

5.17	Paketstruktur des Teildatenmodells zur Abbildung der Konstruktion	105
5.18	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Konstruktionselemente	106
5.19	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bauteilbearbeitungen	107
5.20	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Stahlbauteile	108
5.21	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bauteilverbindung	108
5.22	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung von Anschlüssen	109
5.23	Paketstruktur des Teildatenmodells zur Beschreibung von Bemessungsmodellen	110
5.24	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bemessungselemente	110
5.25	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Bauteile zur Bemessung	111
5.26	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Querschnitte zur Bemessung	112
5.27	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Verbindungen zur Bemessung	112
5.28	Ausschnitt aus dem Datenmodell zur Abbildung der Anschlüsse zur Bemessung	113
5.29	Prinzipielle Grundstruktur zur Abbildung von Modellbeziehungen	114
5.30	Systemskizze des betrachteten Beispiels	115
5.31	Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Tragelement der Stütze des Tragwerksmodells und Finiten Elementen des Finite-Element-Modells	117
5.32	Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Tragelement des Trägers des Tragwerksmodells und Finiten Elementen des Finite-Element-Modells	118
5.33	Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Kopplungselement des Tragwerksmodells und den Kopplungsbedingungen des Finite-Element-Modells	119
5.34	Objektdiagramm der Beziehungen zwischen dem Stirnplattenanschluss des Konstruktionsmodells und dem Bemessungsmodell	121
B.1	Skizze des im Anwendungsbeispiel dargestellten Tragwerks	147
B.2	Objektdiagramm der Tragelemente des Anwendungsbeispiels . . .	148
B.3	Instanzen der geometrischen Repräsentation der Tragelemente .	148
B.4	Beschreibung des durch die Tragelemente benötigten Querschnitts-Objekts	149
B.5	Objektdiagramm des Kopplungselements zur Verbindung der Tragelemente	149
B.6	Instanzen der Klassen der Ressource Physik des Tragwerksmodells	150
B.7	Objekte der Ressource Physik zur geometrischen Beschreibung .	151
C.1	Skizze des im Anwendungsbeispiel dargestellten FE-Modells . . .	153

C.2	Instanziierung der Finiten Elemente des Anwendungsbeispiels	154
C.3	Darstellung der Objekte zur Abbildung der Kopplungsbedingungen	155
C.4	Objekte der Klassen der Ressource Physik des Modells zur numerischen Analyse	156
C.5	Instanzen der Klasse der Ressource Physik zur geometrischen Abbildung Finiten Elemente	157
D.1	Skizze der im Anwendungsbeispiel dargestellten Konstruktion	159
D.2	Objektdiagramm der Konstruktionselemente des Anwendungsbeispiels	160
D.3	Instanzen zur Abbildung der Stirnplatte	161
D.4	Instanziierung der Objekte zur Beschreibung des Stahlbauanschlusses	162
D.5	Objektdiagramm der Schraubverbindungen	163
D.6	Instanzen der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schraubverbindungen	164
D.7	Instanzen der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schraubenlöcher	165
D.8	Instanzen zur Abbildung der Schweissverbindungen	166
D.9	Objekte der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schweissverbindungen	167
D.10	Objekte der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schweissverbindungen (Fortsetzung)	168
D.11	Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Beschreibung von Objekten des Konstruktionsmodells	169
D.12	Objekte der Klassen der Ressource Physik für die Abbildung geometrischer Elemente des Konstruktionsmodells	170
D.13	Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Abbildung der Bauteilverbindungen	171
D.14	Objekte der Klassen der Ressource Physik zur geometrischen Abbildung der Schraubverbindungen	172
D.15	Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur geometrischen Abbildung der Schweissverbindungen	173
E.1	Objekte zur Repräsentation des Stirnplattenanschlusses des Bemessungsmodells	176
E.2	Objektdiagramm der Verbindungen des Bemessungsmodells	177
E.3	Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Abbildung des Bemessungsmodells	178
E.4	Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Abbildung des Bemessungsmodells (Fortsetzung)	179

Tabellenverzeichnis

2.1	Unternehmensstruktur 2003 in Deutschland aus [9]	20
2.2	Baugenehmigungen für den Neubau von Wohnhäusern in Deutschland aus [9]	26

Anhang A

Glossar

Anschluss Alle zur Realisierung einer konstruktiven Zusammenführung von zwei oder mehr Konstruktionselementen erforderlichen Komponenten.

Art des Tragwerks Bezeichnung für eine mit spezifischen Tragwerkeigenschaften verbundene Anordnung tragender Konstruktionselemente, u.a. Fachwerk, Rahmentragwerk.

Aspektmodell Modell, das den Abbildungsgegenstand aus einer spezifischen Sicht beschreibt.

Bauart Die Art und Weise, wie Konstruktionselemente aufgebaut sind und zu baulichen Anlagen oder Teilen davon zusammengefügt werden, zum Beispiel Ständerbau

Bauwerk Baulich erstellter Teil der Umwelt.

Art des Bauwerks Vorgesehene Nutzung mit der bestimmte globale charakteristische Eigenschaften eines Bauwerks verknüpft sind, zum Beispiel Wohnhaus, Industriegebäude oder Straßenbrücke.

Baustoff Für die Herstellung von Bauteilen verwendetes Material, zum Beispiel Beton, Stahl oder Holz.

Bausystem Baulich-konstruktives Konzept typisierter Elemente, welches das Ergebnis einer Systematisierung darstellt. Auf Grundlage dieses Konzepts wird eine industriell ausgerichtete Planung und Fertigung von Bauwerken angestrebt.

Bauteil Allgemeine Bezeichnung für einen physisch unterscheidbaren Teil des Bauwerks, der entsprechend den fachlichen Abstraktionen nicht weiter aufgeteilt wird.

Bauelement Aus einem oder mehreren Bauteilen bestehender Teil des Bauwerks, zum Beispiel Ständerwand, Fenster u.ä.

Datenmodell Modell, das die Struktur und Eigenschaften der Datenelemente sowie die einzuhaltenden Konsistenzbedingungen und existierenden Operationen zur Manipulation der Datenelemente festlegt. [121]

Datentechnische Integration hier: strukturelle Angleichung und Mapping (Festlegung datentechnischer Beziehungen) von Datenmodellen

Domänenmodell Datenmodell, das einen Anwendungsbereich repräsentiert (Domänenmodell, Anwendungsbereichsdatenmodell).

Differentialbauweise Bauweise, die sich dadurch auszeichnet, dass die verwendeten Bauteile aus mehreren vergleichsweise einfach gestalteten Elementen, gegebenenfalls verschiedener Materialien, bestehen. [26]

Einwirkung Alle Arten von Einflüssen, unter anderem Lasten, aufgezwungene Verformungen, Beschleunigungen, Temperatur- oder Feuchtigkeitsänderungen, die zu einer Beanspruchung im Bauwerk, beispielsweise Spannungen, Kraft- oder Verformungsgrößen, führen.

fachliche Modellvorstellung Fachspezifische Annahme, die der Beschreibung von Modellinhalten zugrunde liegt.

fachliche Integration hier: Zusammenführen und Verzahnen von Fachmodellen

Fachmodell Abstraktes Modell, das die fachlichen Konzepte und Vorstellungen repräsentiert. Es bildet die Grundlage zur Abbildung konkreter fachspezifischer Inhalte.

Grenzzustand Entsprechend DIN EN 1990 (EC1) [43] Zustand, bei dessen Überschreitung die an das Tragwerk gestellten Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt werden.

Grenzzustand der Tragfähigkeit Entsprechend DIN EN 1990 (EC1) [43] Grenzzustand, der mit Einsturz oder anderen Formen des Tragwerksversagens in Zusammenhang steht.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit Entsprechend DIN EN 1990 (EC1) [43] Grenzzustand, bei dessen Überschreitung die festgelegten Bedingungen für die Gebrauchstauglichkeit eines Tragwerks oder eines Bauteils nicht mehr erfüllt werden.

Gründung Alle Teile der Baukonstruktion, die der Einleitung der durch ein Bauwerk und die darauf einwirkenden Beanspruchungen verursachten Belastungen in den Baugrund dienen, zum Beispiel Streifenfundamente, Plattenfundamente, Pfahlgründungen.

Hüllkonstruktion Alle Teile einer Konstruktion mit der Funktion, den Innenraum gegenüber dem Außenraum abzugrenzen.

IFC Industry Foundation Classes

Integralbauweise Bauweise, die sich dadurch auszeichnet, dass deren Bauteile in einem Stück und aus einem Material, zum Beispiel durch gießen oder extrudieren, gefertigt sind. Damit verbunden wird eine optimale Anpassung der Bauteilgeometrie an den Kraftfluss ermöglicht [26].

Integration Im Kontext der Bearbeitung von Ingenieuraufgaben besteht Integration in einer zielgerichteten Einbeziehung der Teillösungen Anderer in den eigenen Leistungsbeitrag sowie der Rückführung dieses Beitrags in die Gesamtlösung. Mit einer Integration wird eine ganzheitliche Lösung einer Bauaufgabe angestrebt.

Integrierende Bauweise Bauweise, die sich durch quasi-homogene Bauteile auszeichnet, die aus mehreren Bauelementen zusammengeführt werden [26].

Knotenpunkt Punkt, an dem mindestens zwei tragende Konstruktionselemente eine kraftschlüssige Verbindung bilden.

Konstruktionselement Spezifisches, die Konstruktion beschreibendes Bauelement, das unter Umständen aus mehreren Bauteilen besteht.

Koordination Auf das Zusammenwirken der in der Regel zahlreichen Projektbeteiligten in der Planung und Ausführung von Bauwerken ausgerichteter Prozess [10].

Lastfall Untereinander verträgliche Gruppierung mehrerer einzelner Einwirkungen.

Modellierungskonzept Beschreibt ein fachspezifisches Grundprinzip bzw. eine Vorlage zur Abbildung von Bauwerkseigenschaften im Rahmen der Modellbildung.

Produktdatenmodell Datenmodell, das die Grundlage für eine disziplinübergreifende Repräsentation von Bauwerkseigenschaften zum Zweck der Unterstützung eines applikationsübergreifenden Datenaustauschs ermöglicht.

Skalar Mathematische Größe, deren Wert durch eine reelle Zahl bestimmt ist.

STEP Standard for the Exchange of Product Model Data

Teilproduktdatenmodell Datenmodell, welches Teil eines Produktdatenmodells ist (Partialdatenmodell).

Teiltragwerk Teil des Gesamttragwerks, der unter Umständen als eigenständiger Teil des globalen Systems betrachtet wird.

Tragwerk Das Tragwerk wird durch die am Lastabtrag beteiligten Konstruktionselemente eines Bauwerks gebildet. Seine Funktion besteht in der Aufnahme und Ableitung der auf die Konstruktion einwirkenden Lasten.

Tragsystem System, das aus den Tragelementen, deren Kopplungen sowie der das Tragwerk umgebenden Umwelt gebildet wird und die Wechselwirkungen und das Zusammenspiel dieser Teile beschreibt.

Tragwerksmodell Idealisierte Beschreibung der Eigenschaften des Tragsystems.

Tragstruktur Abstrahierte Abbildung des Tragwerks zum Zweck der Beschreibung des Tragverhaltens.

UML Unified Modeling Language

Anhang B

Objektdiagramme zum Teildatenmodell Tragwerk

Nachfolgend sind die Objektdiagramme des in Abschnitt 5.2.2 erläuterten Beispiels dargestellt. Abbildung B.1 zeigt eine Skizze des beschriebenen Tragwerks.

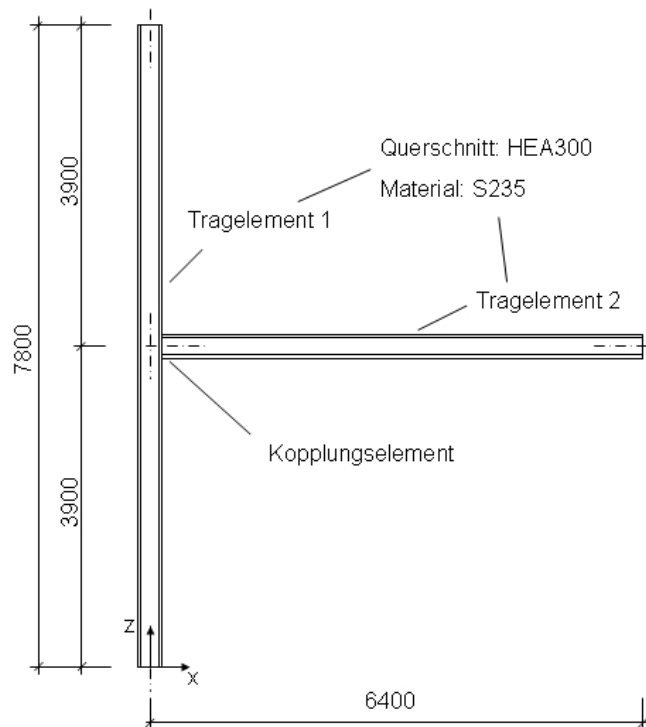


Abbildung B.1: Skizze des im Anwendungsbeispiel dargestellten Tragwerks

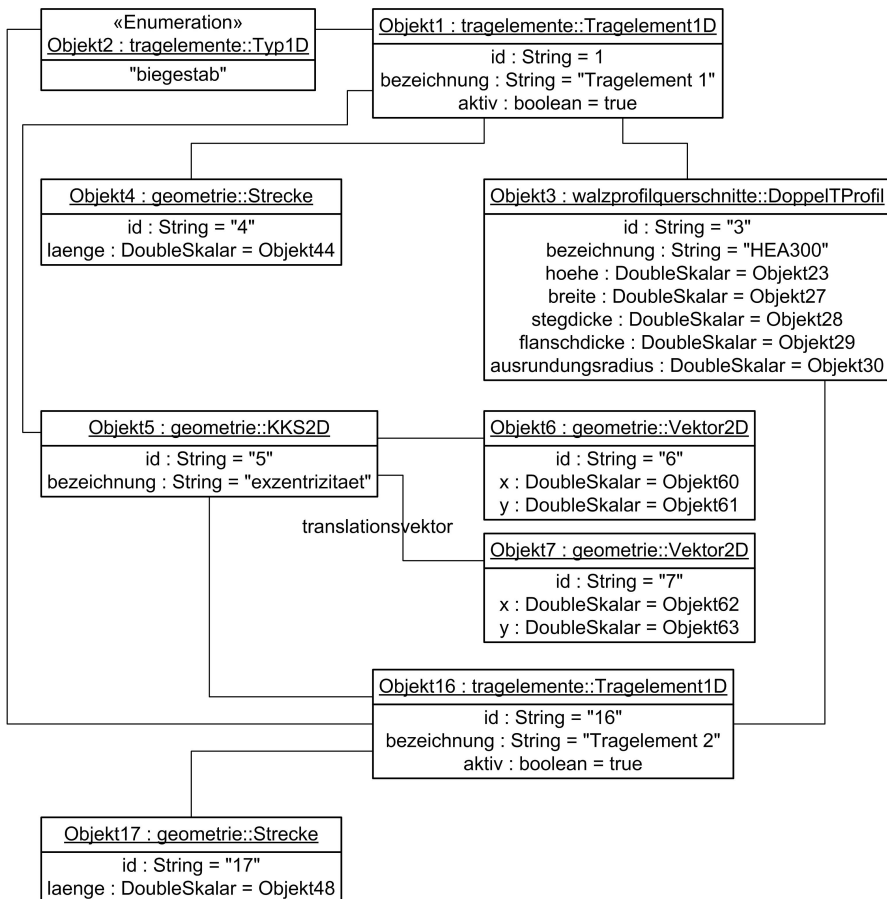


Abbildung B.2: Objektdiagramm der Tragelemente des Anwendungsbeispiels

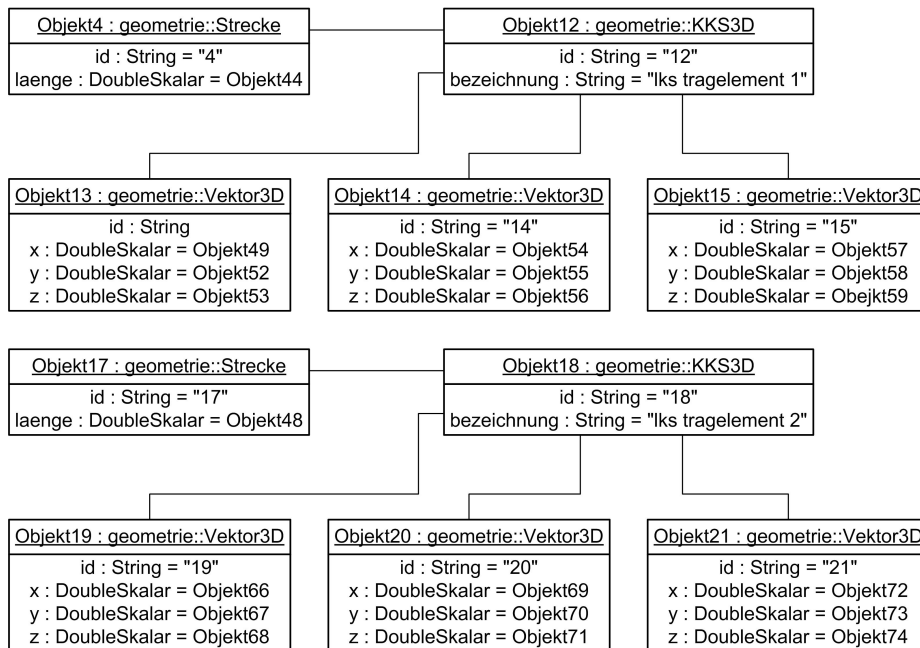


Abbildung B.3: Instanzen der geometrischen Repräsentation der Tragelemente

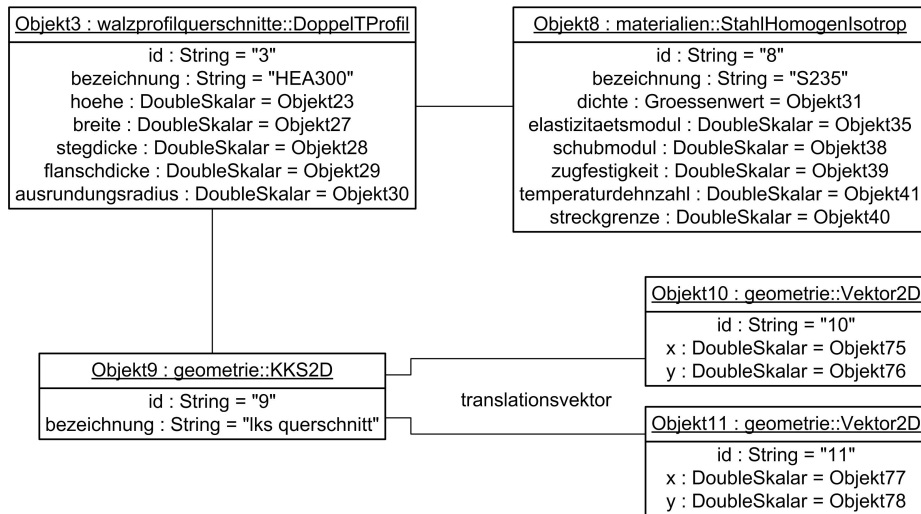


Abbildung B.4: Beschreibung des durch die Tragelemente benötigten Querschnitt-Objekts

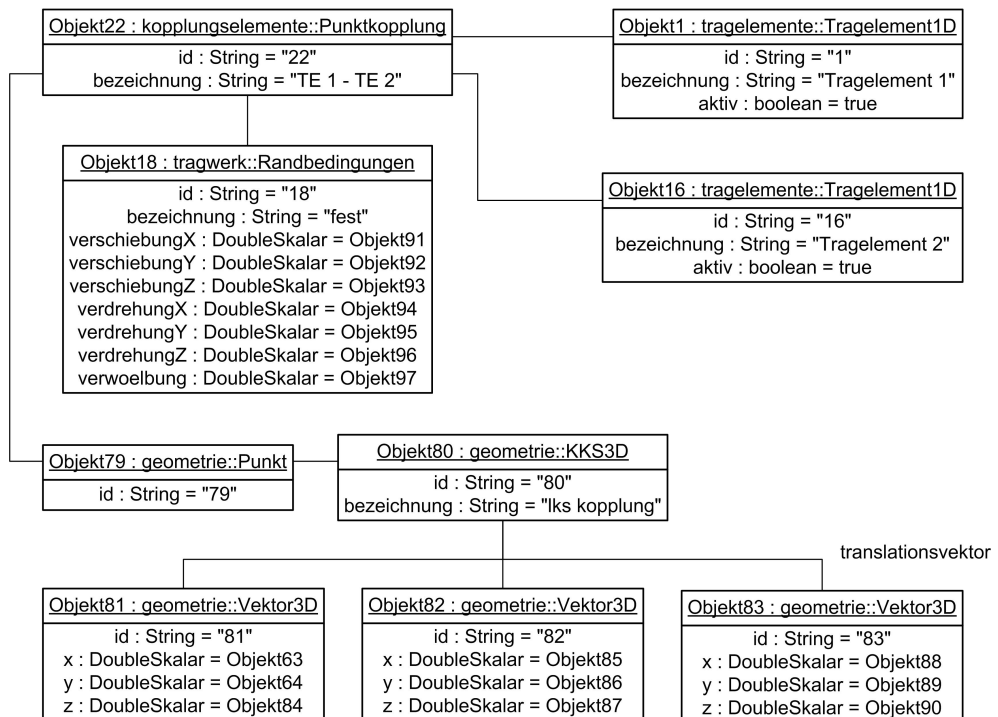


Abbildung B.5: Objektdiagramm des Kopplungselements zur Verbindung der Tragelemente

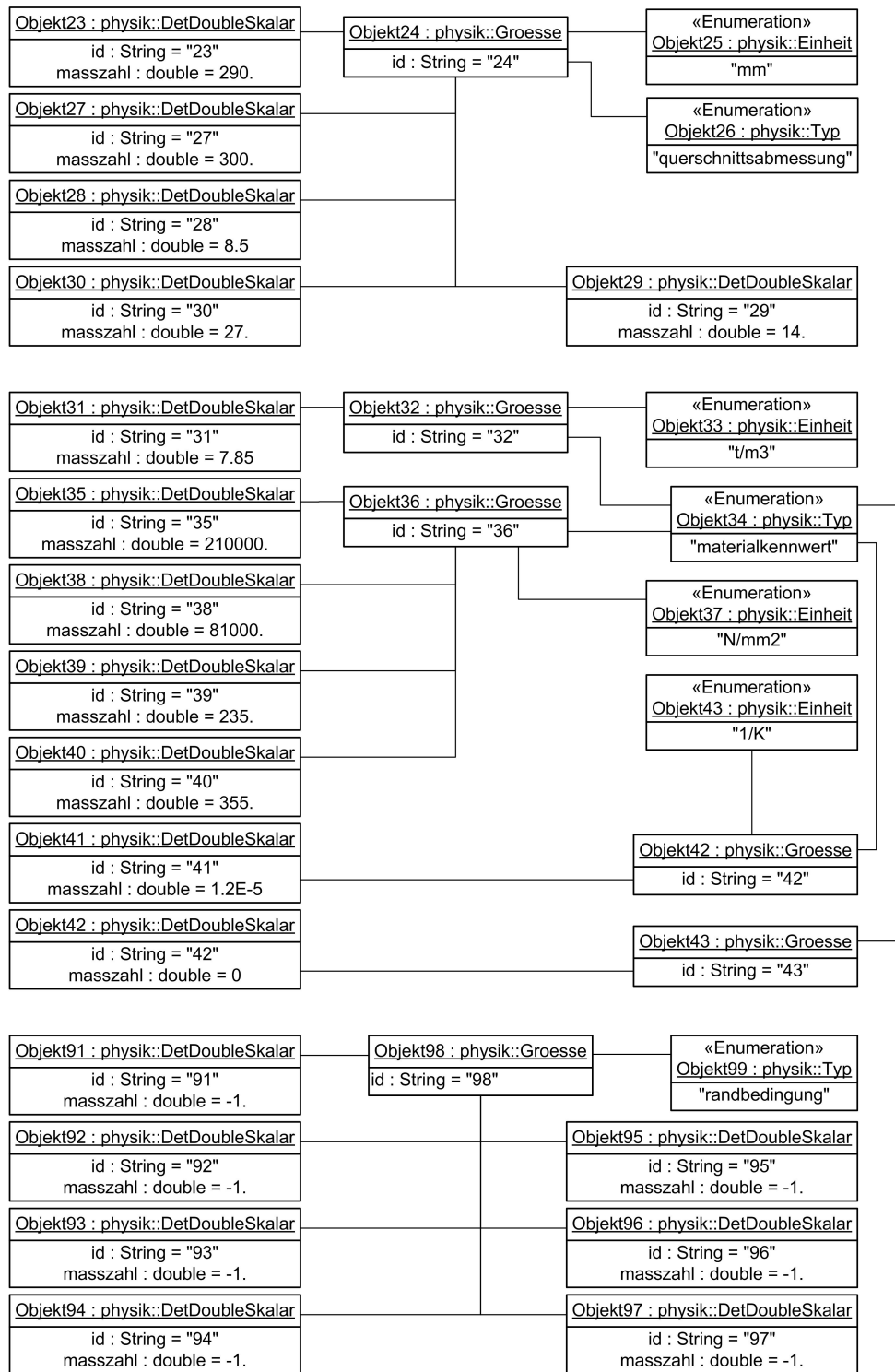


Abbildung B.6: Instanzen der Klassen der Ressource Physik des Tragwerksmodells

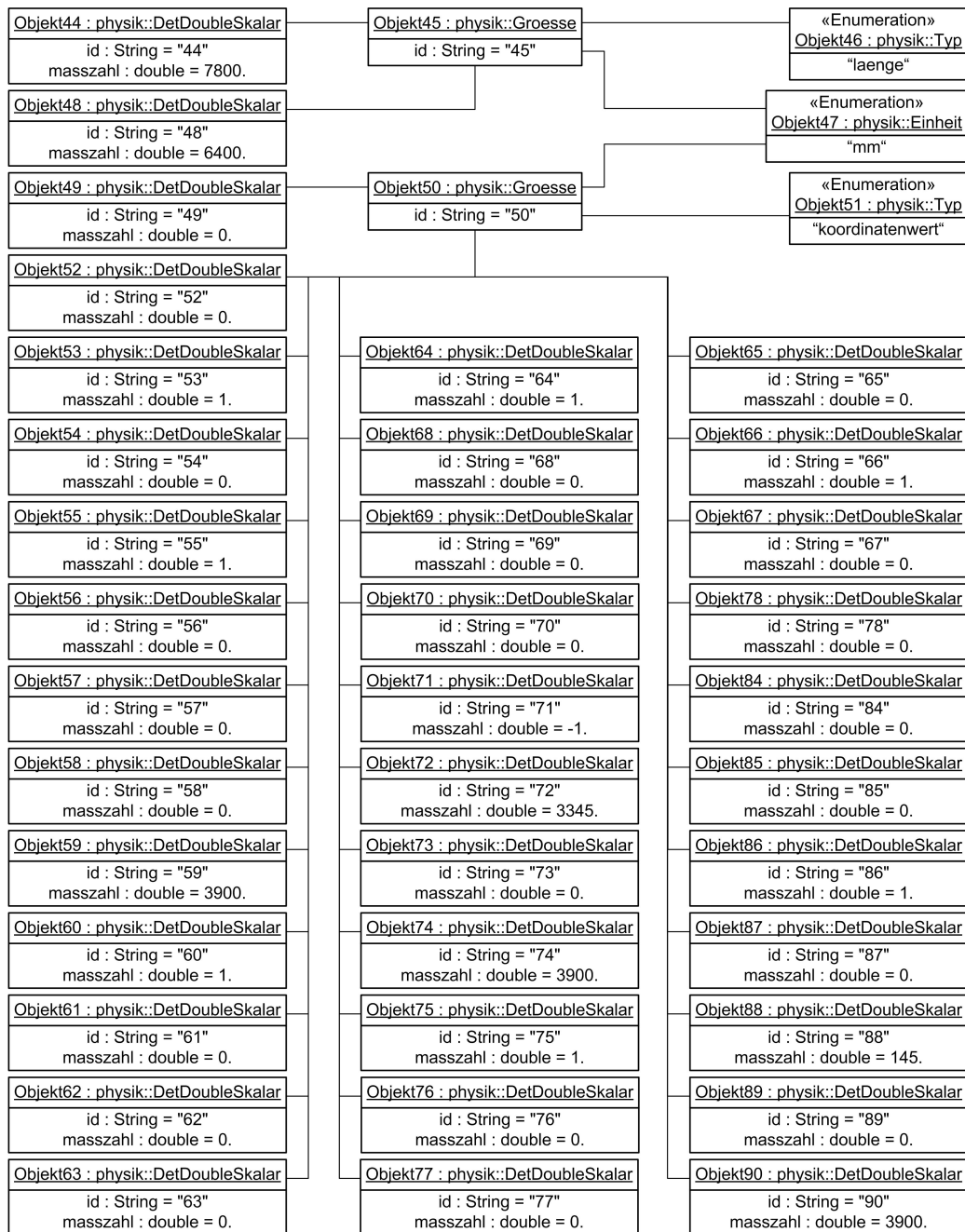


Abbildung B.7: Objekte der Ressource Physik zur geometrischen Beschreibung

Anhang C

Objektdiagramme zum Teildatenmodell numerische Analyse

Dieses Kapitel enthält die Objektdiagramme zum Anwendungsbeispiel im Abschnitt 5.2.2. In Abbildung C.1 ist eine Skizze des abgebildeten Modells dargestellt.

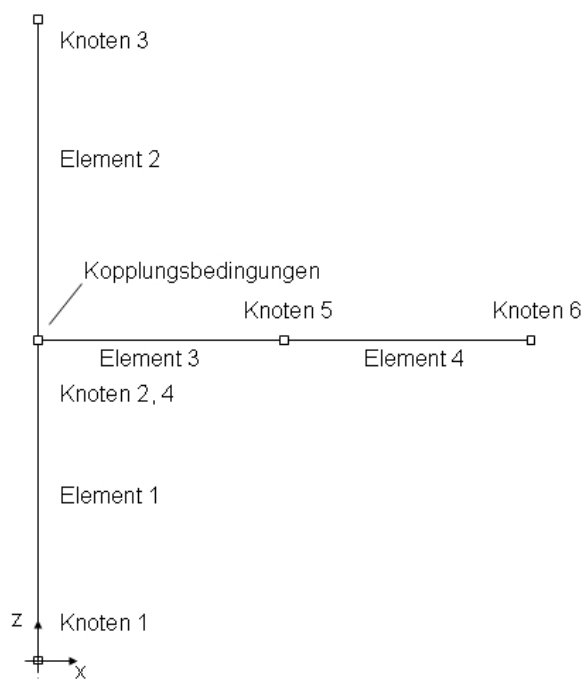


Abbildung C.1: Skizze des im Anwendungsbeispiel dargestellten FE-Modells

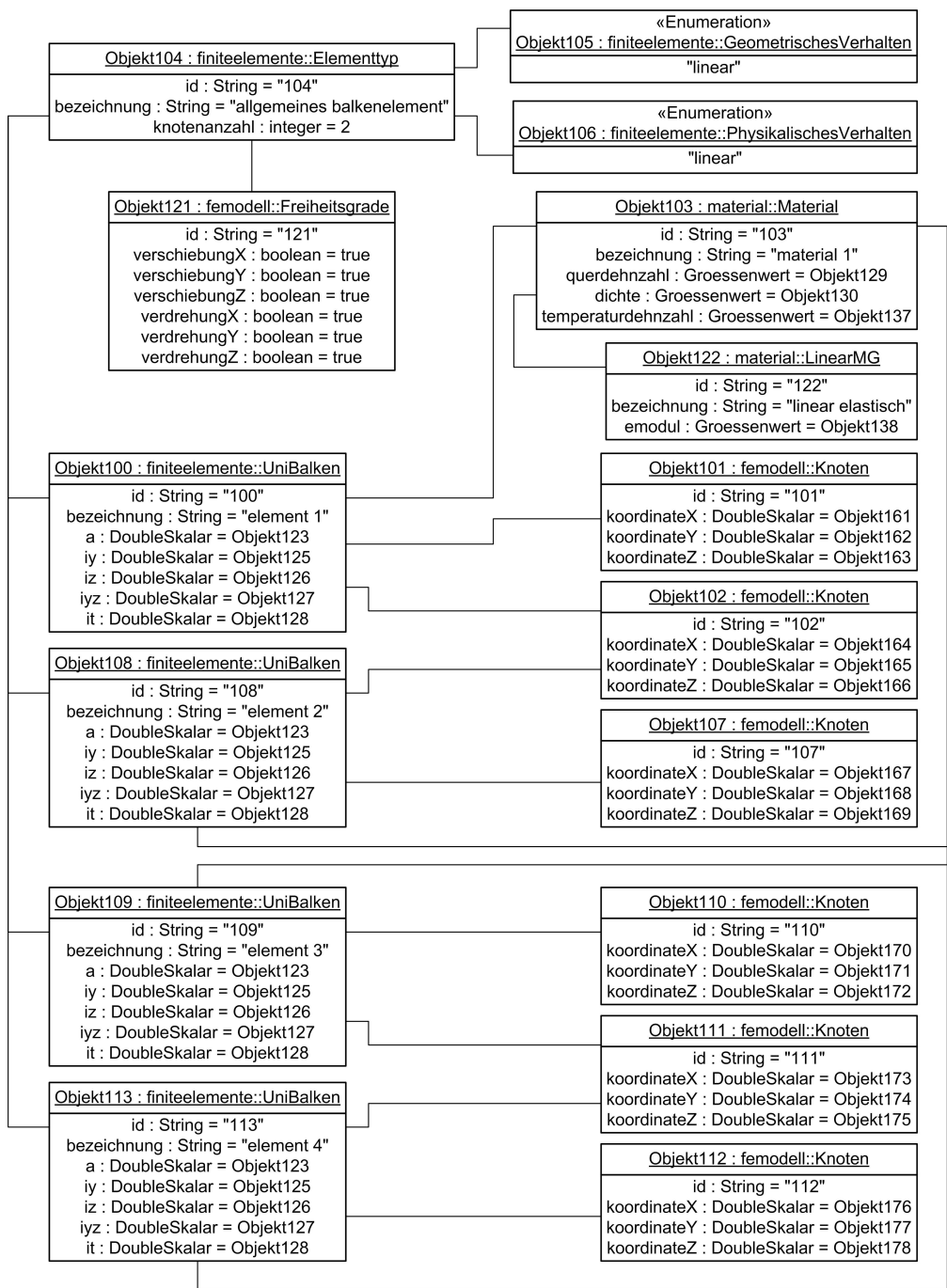


Abbildung C.2: Instanziierung der Finiten Elemente des Anwendungsbeispiels

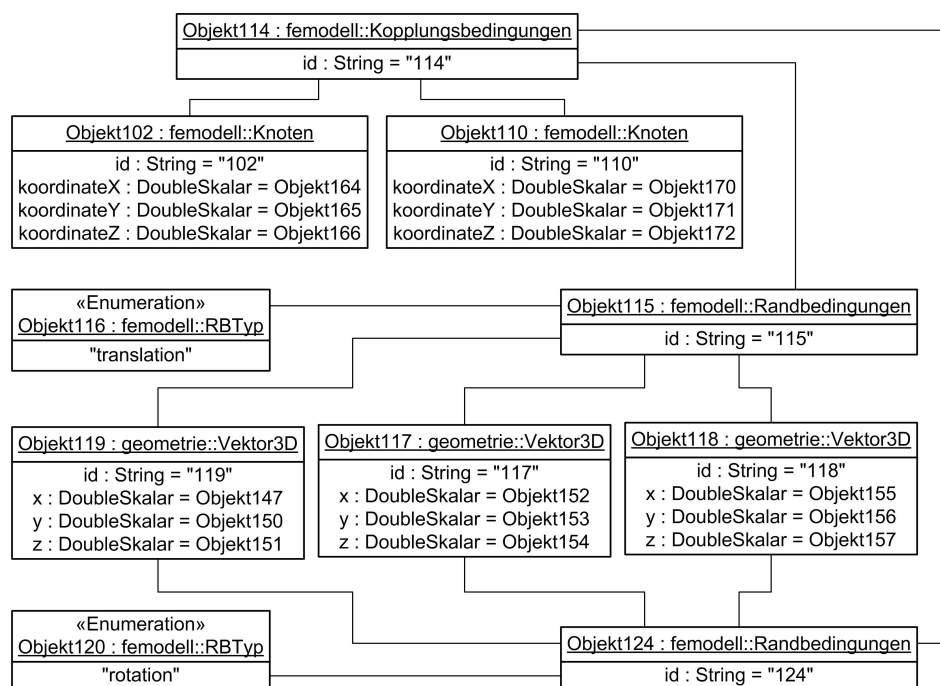


Abbildung C.3: Darstellung der Objekte zur Abbildung der Kopplungsbedingungen

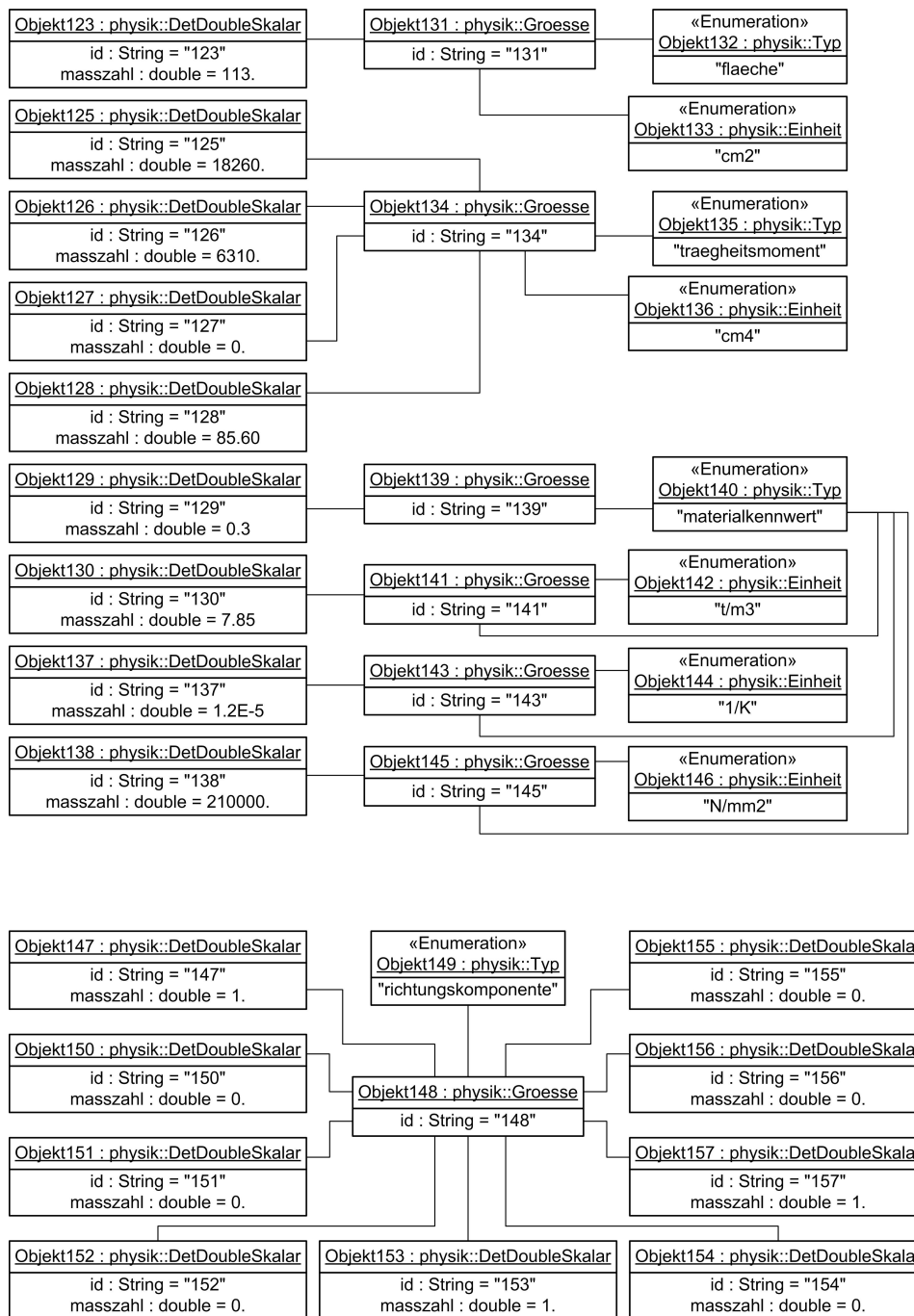


Abbildung C.4: Objekte der Klassen der Ressource Physik des Modells zur numerischen Analyse

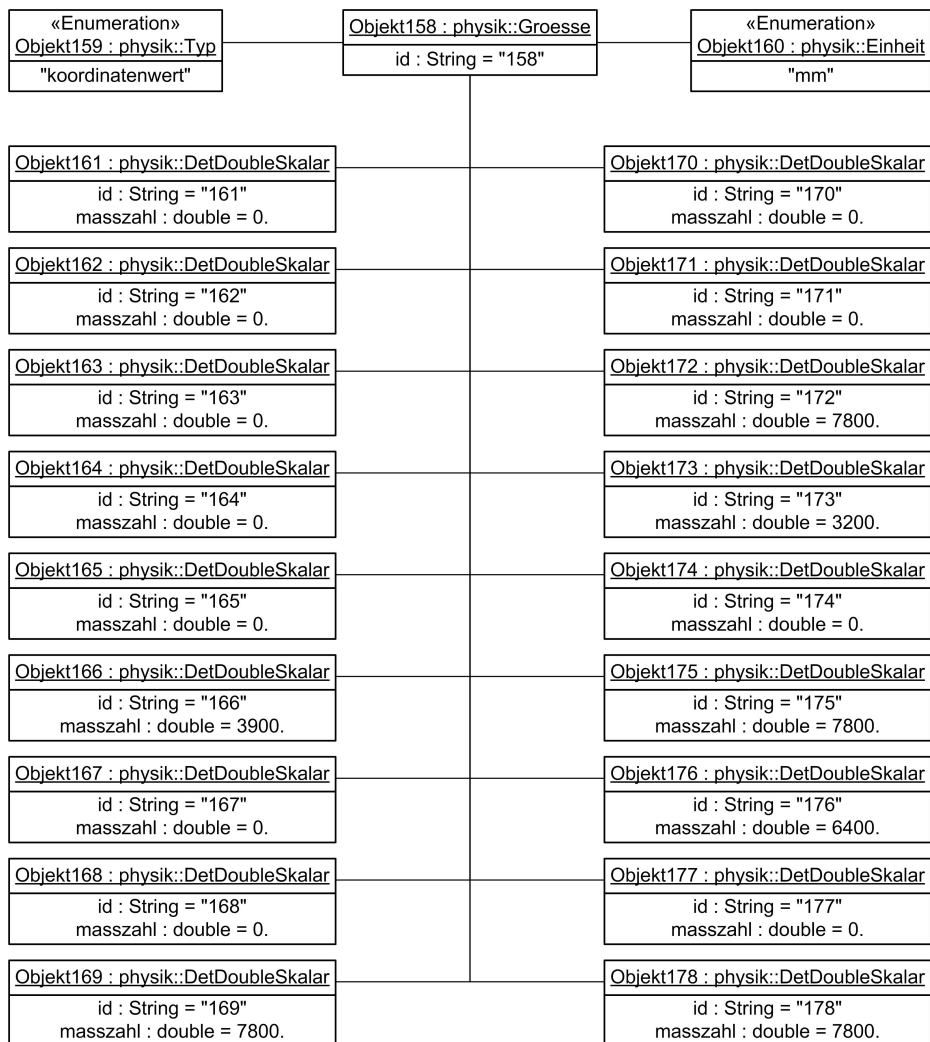


Abbildung C.5: Instanzen der Klasse der Ressource Physik zur geometrischen Abbildung Finiter Elemente

Anhang D

Objektdiagramme zum Teildatenmodell Konstruktion

Nachfolgend sind die Objektdiagramme des Anwendungsbeispiels aus Abschnitt 5.2.2 zugefasst. Die Skizze in Abbildung D.1 zeigt die durch die Modelldaten repräsentierte Konstruktion.

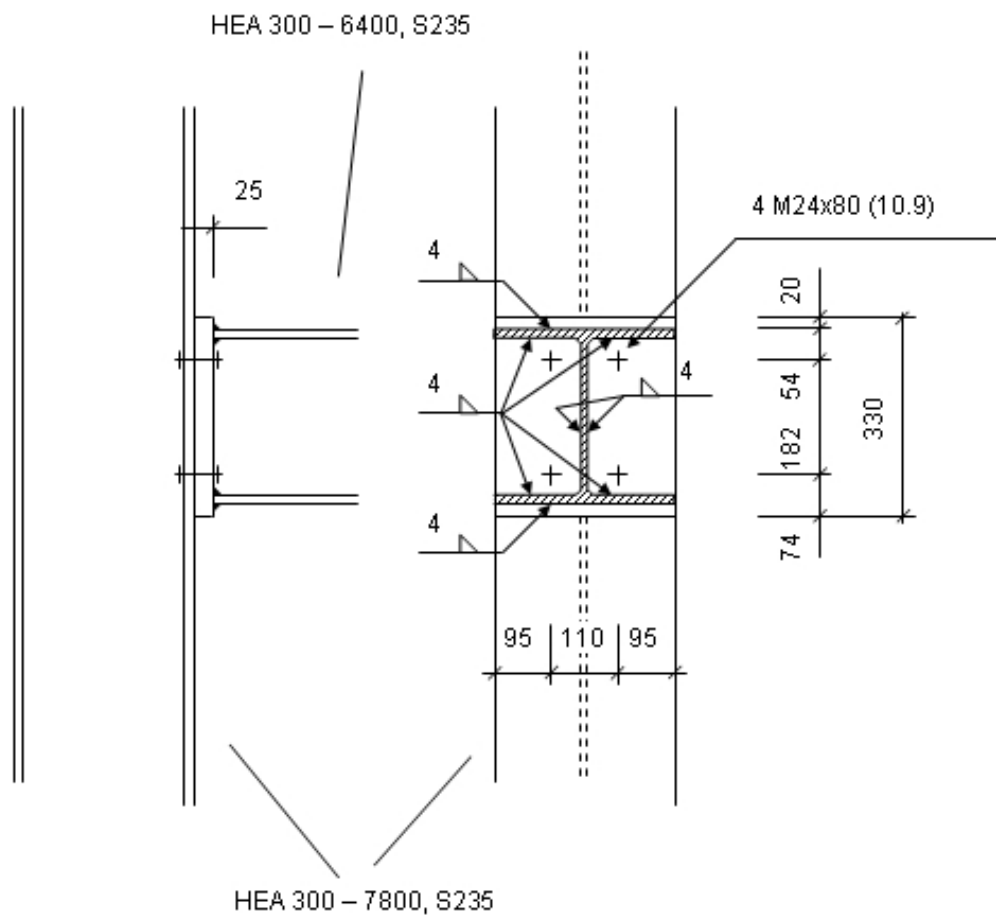


Abbildung D.1: Skizze der im Anwendungsbeispiel dargestellten Konstruktion

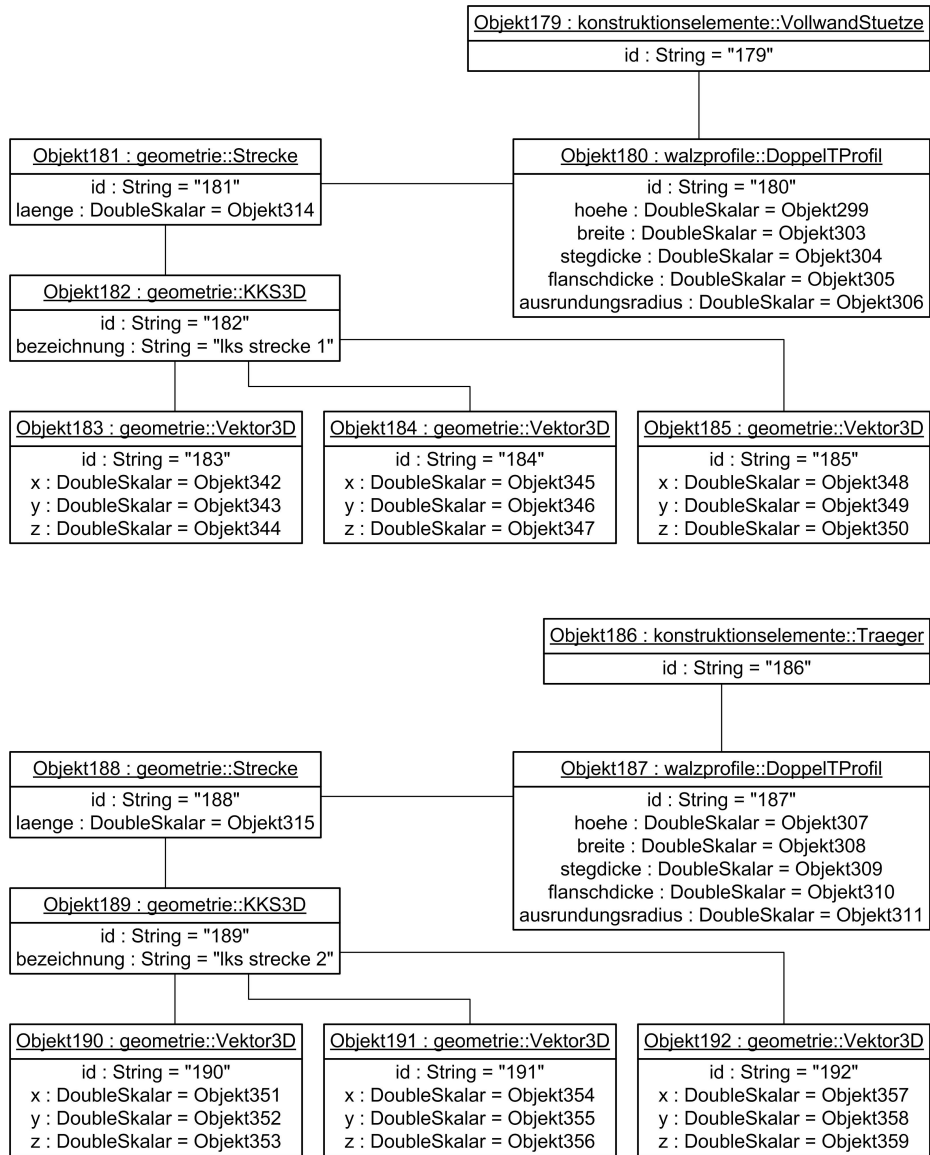


Abbildung D.2: Objektdiagramm der Konstruktionselemente des Anwendungsbeispiels

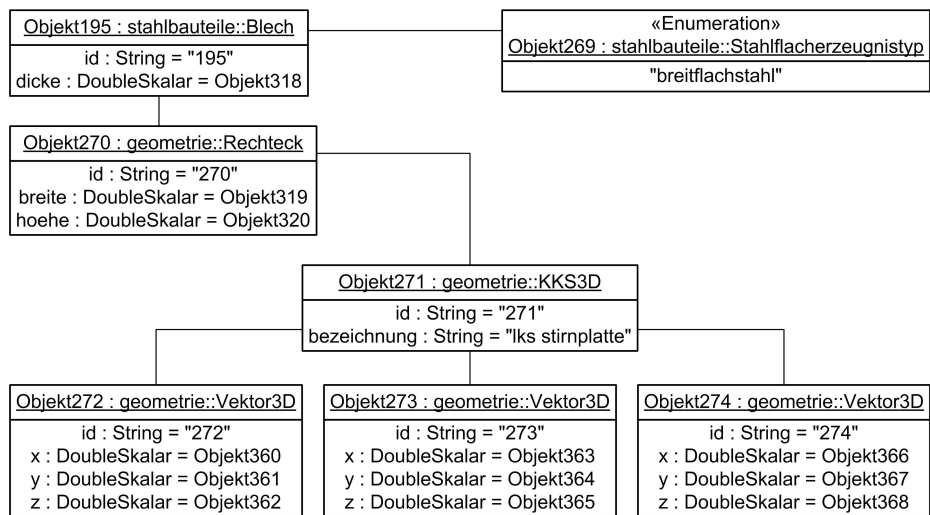


Abbildung D.3: Instanzen zur Abbildung der Stirnplatte

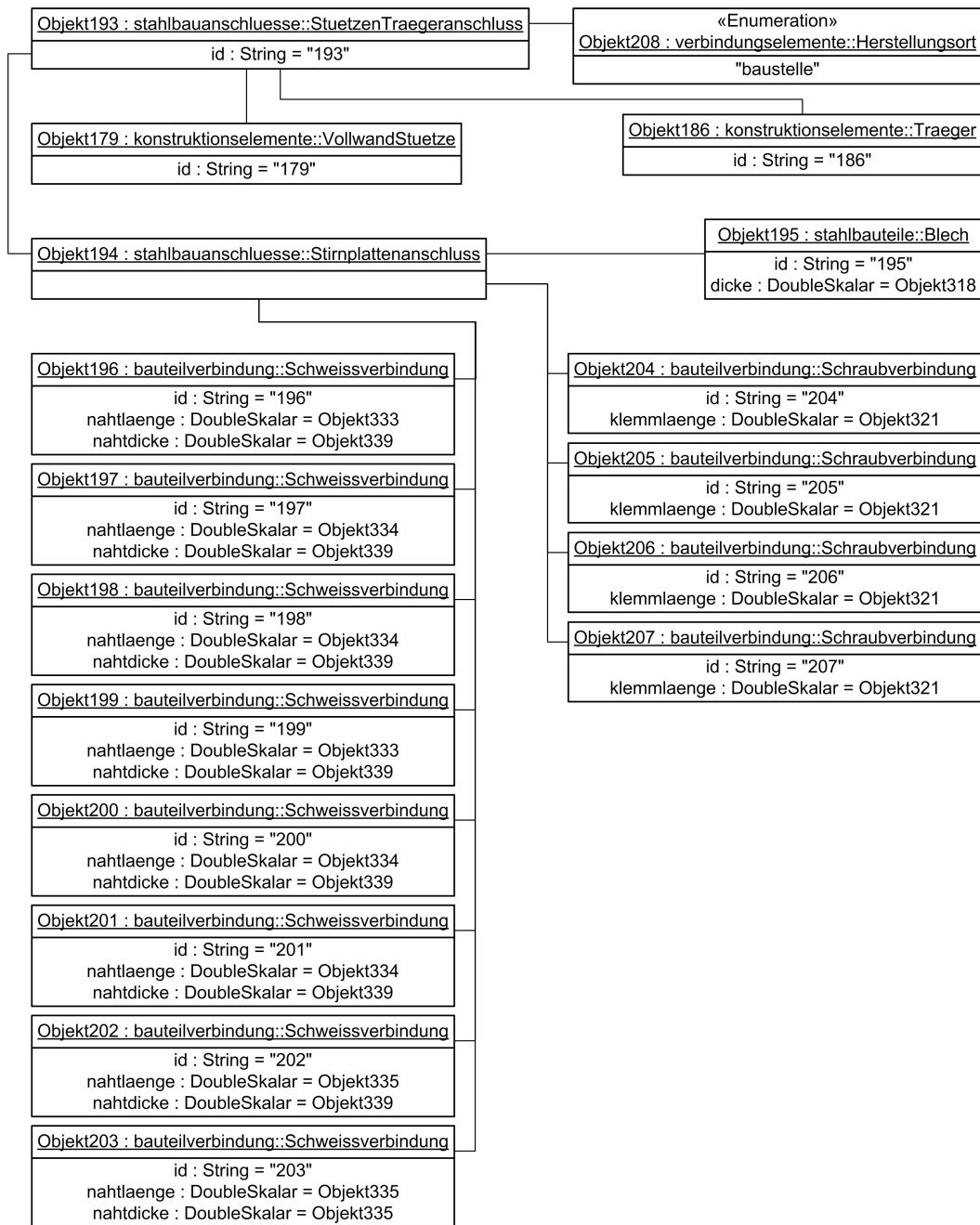


Abbildung D.4: Instanziierung der Objekte zur Beschreibung des Stahlbauanschlusses

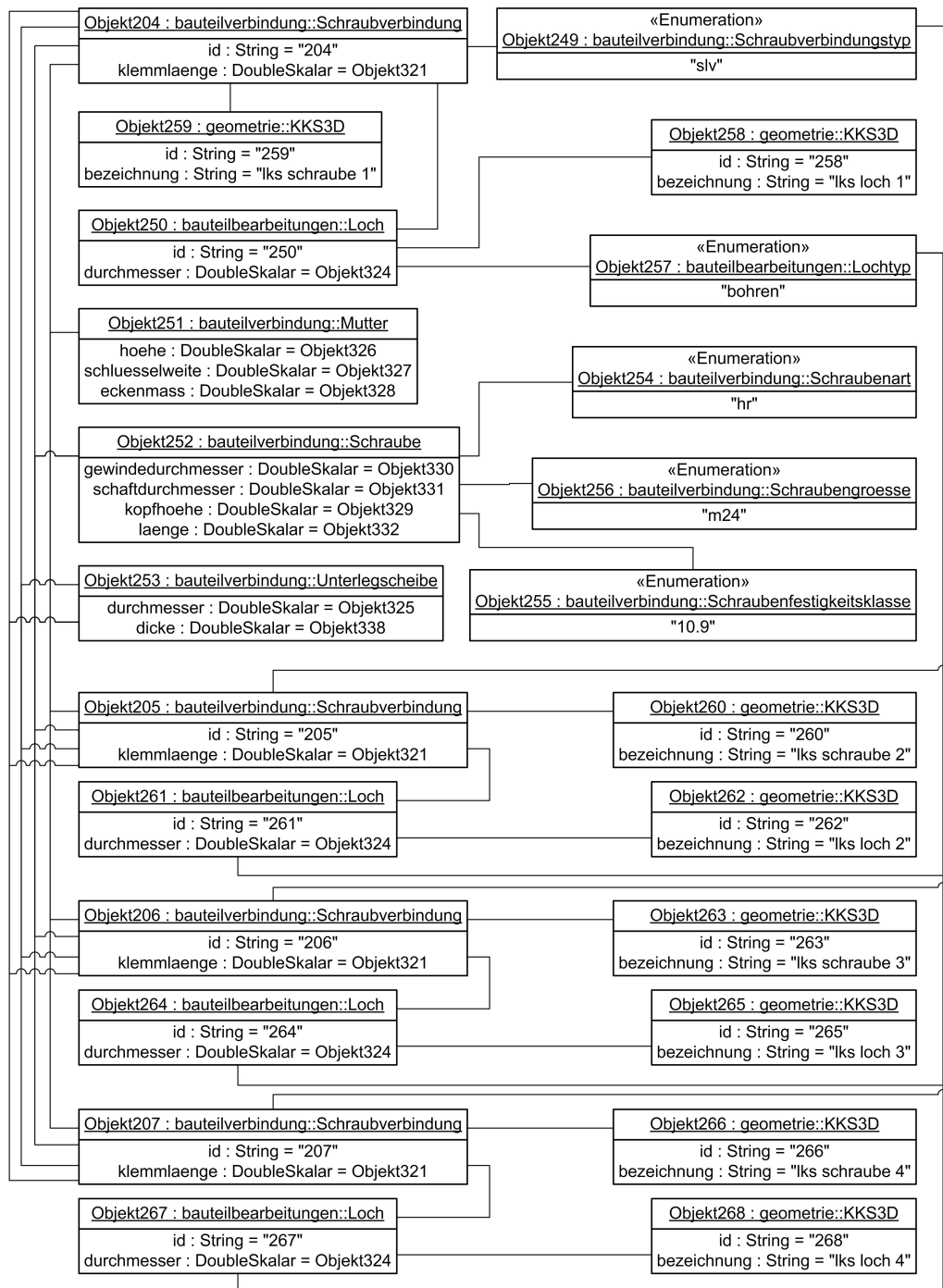


Abbildung D.5: Objektdiagramm der Schraubverbindungen

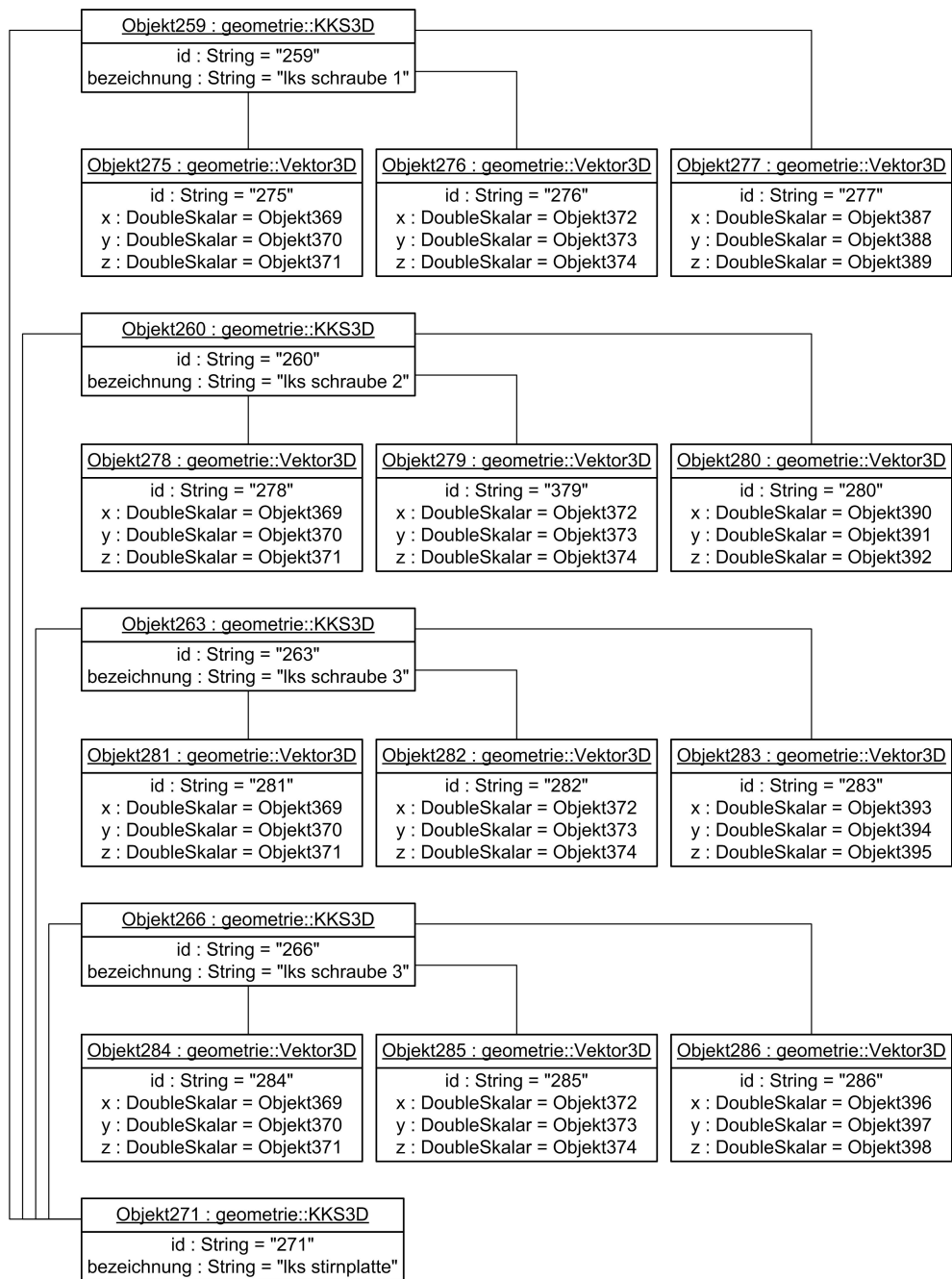


Abbildung D.6: Instanzen der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schraubverbindungen

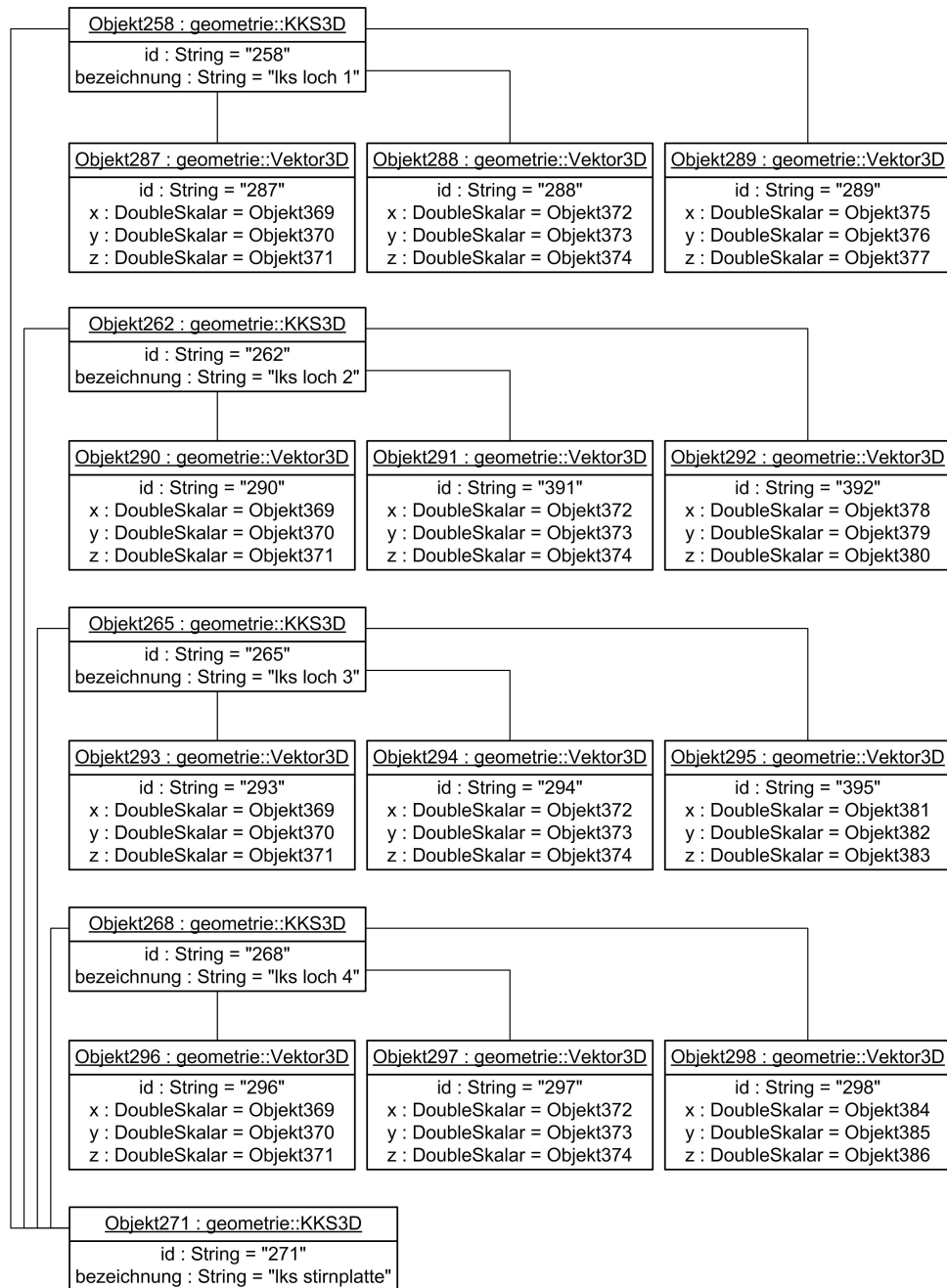


Abbildung D.7: Instanzen der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schraubenlöcher

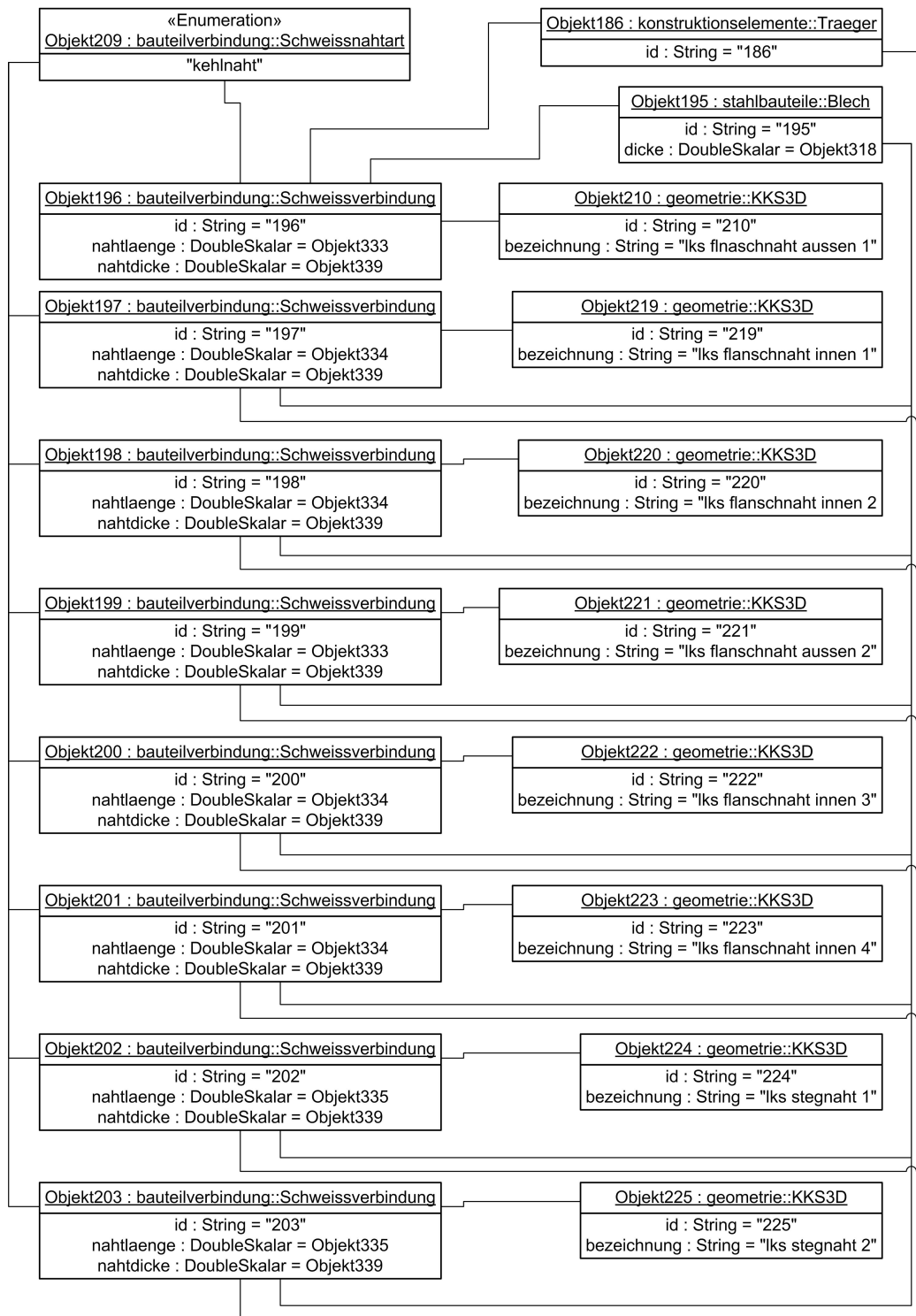


Abbildung D.8: Instanzen zur Abbildung der Schweissverbindungen

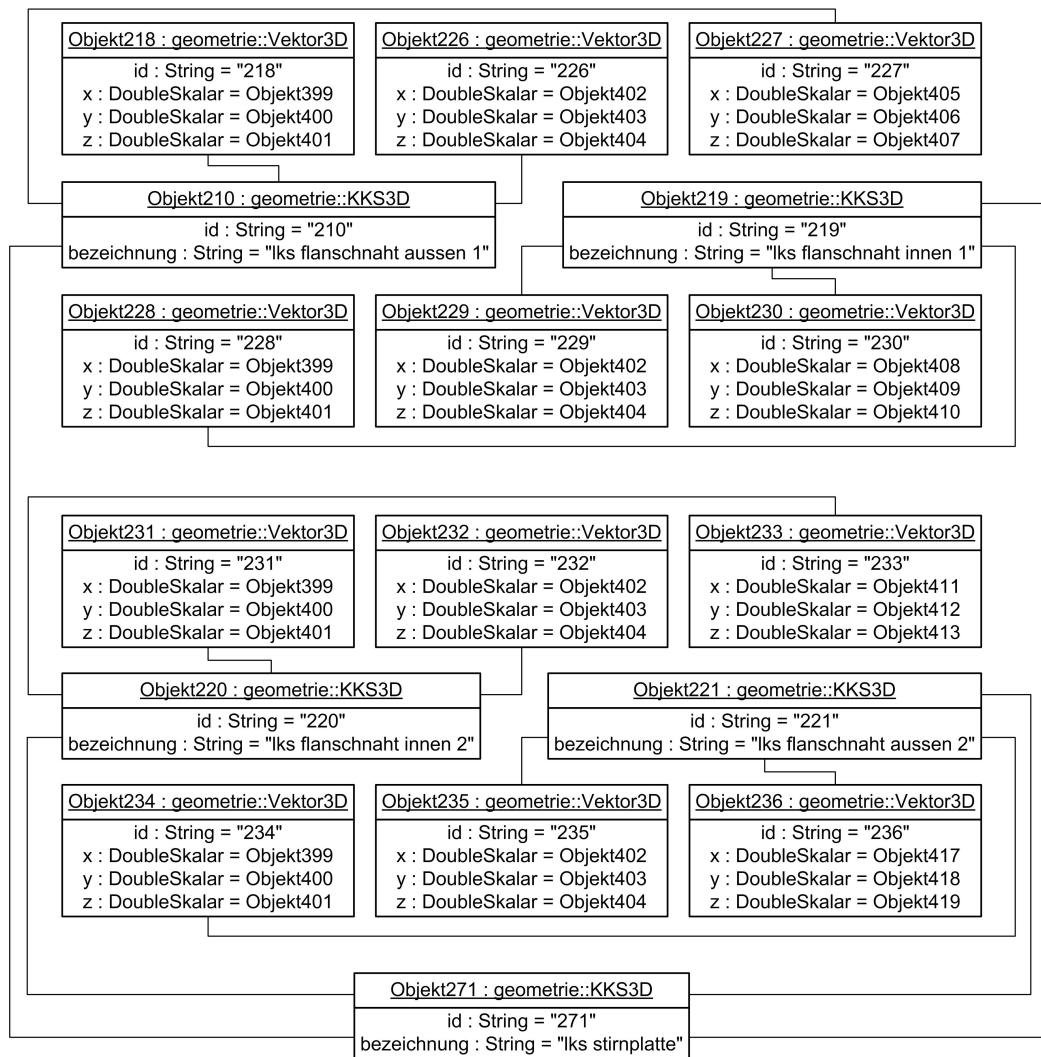


Abbildung D.9: Objekte der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schweissverbindungen

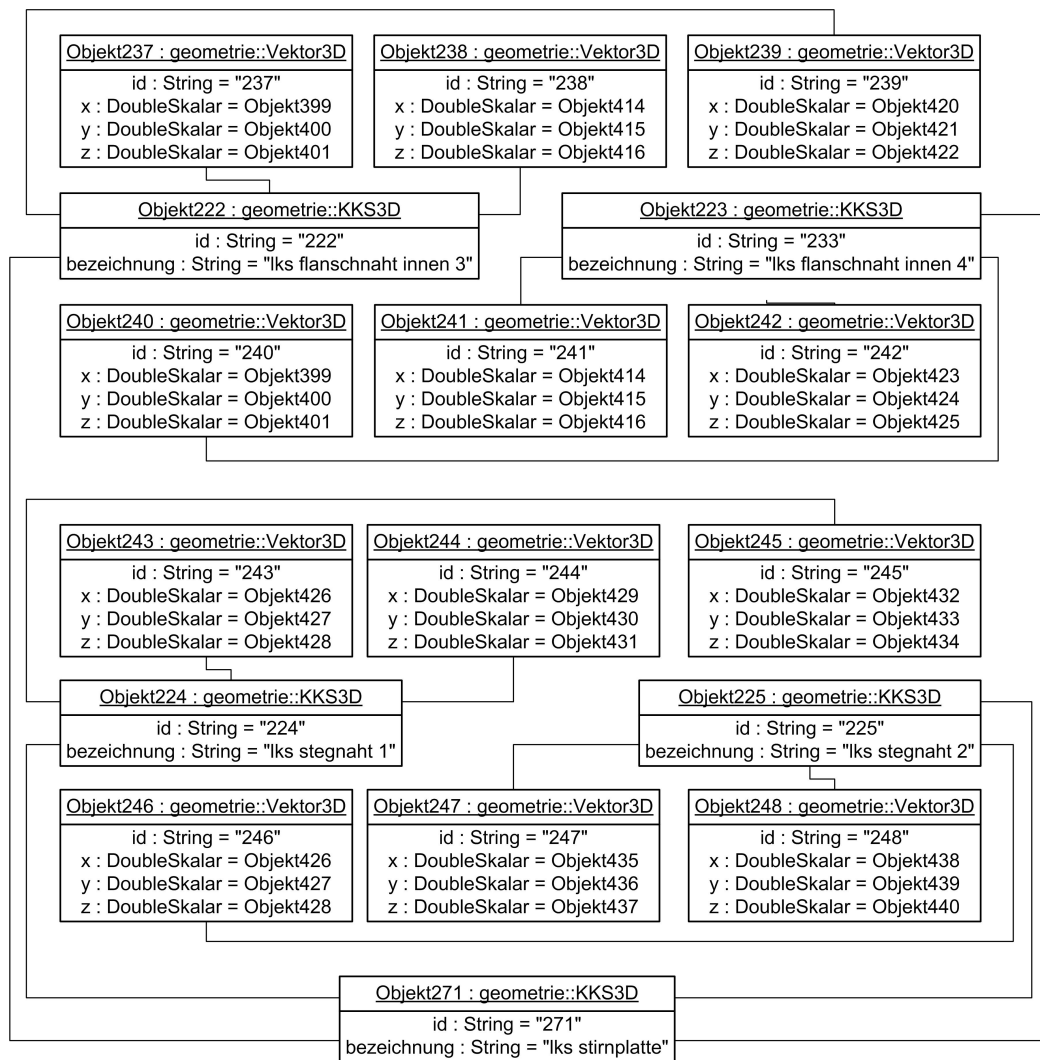


Abbildung D.10: Objekte der Klassen der Ressource Geometrie zur Abbildung der Schweissverbindungen (Fortsetzung)

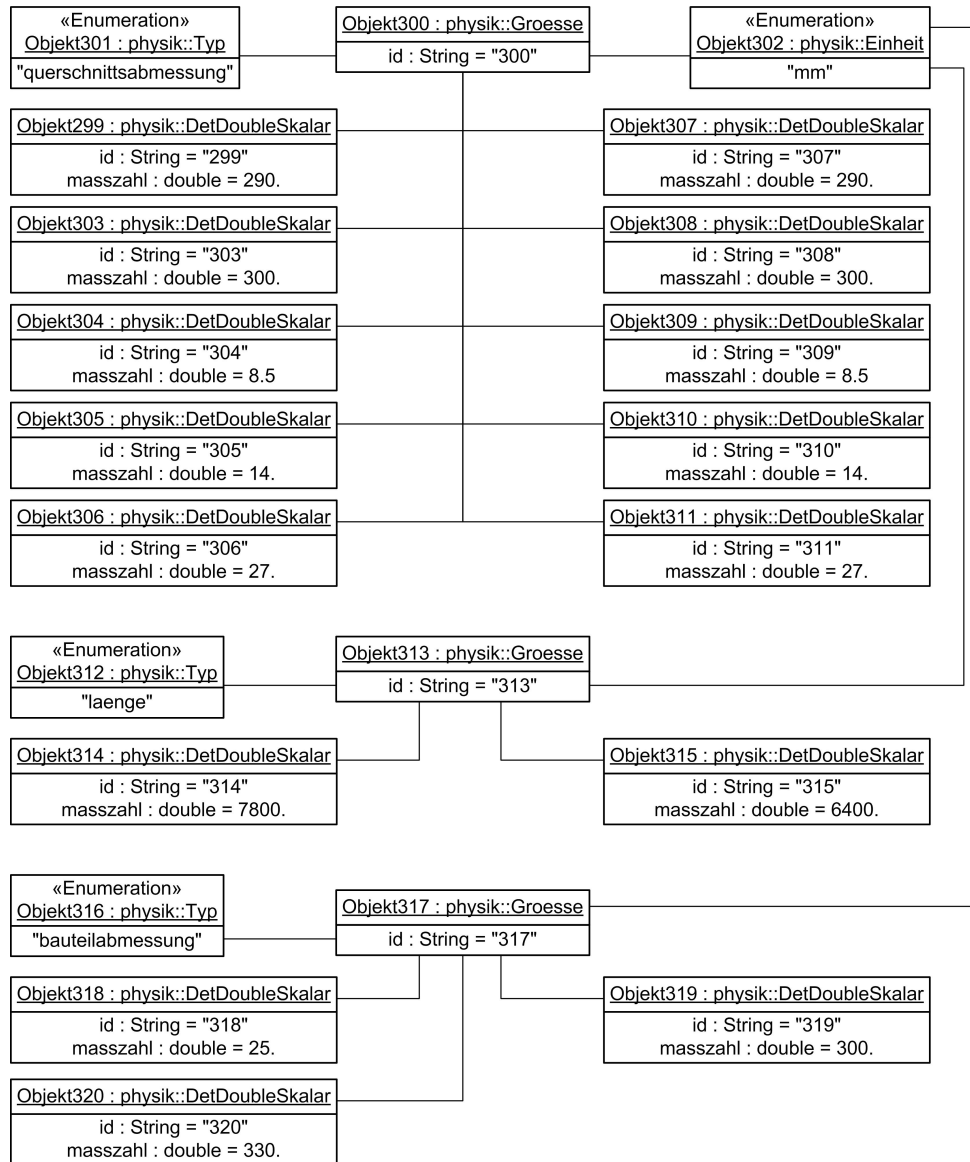


Abbildung D.11: Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Beschreibung von Objekten des Konstruktionsmodells

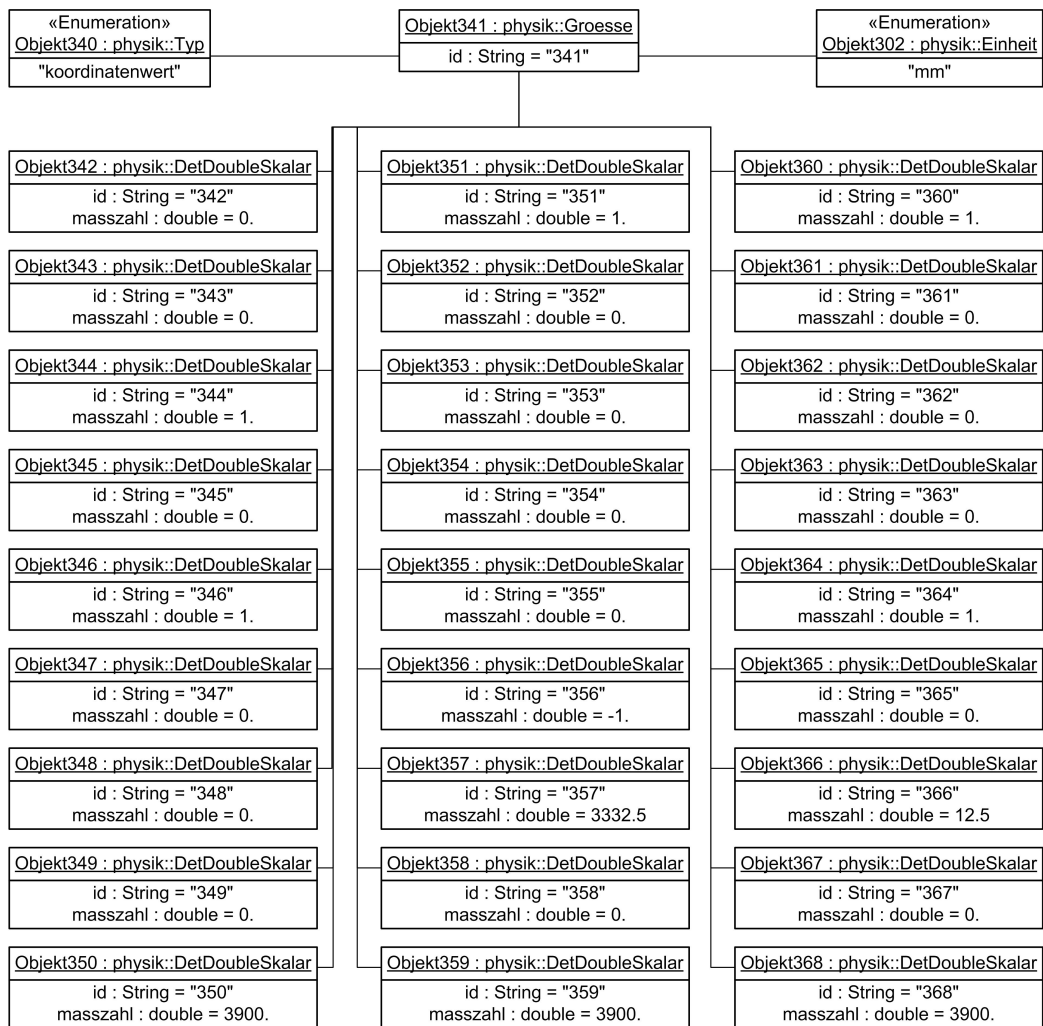


Abbildung D.12: Objekte der Klassen der Ressource Physik für die Abbildung geometrischer Elemente des Konstruktionsmodells

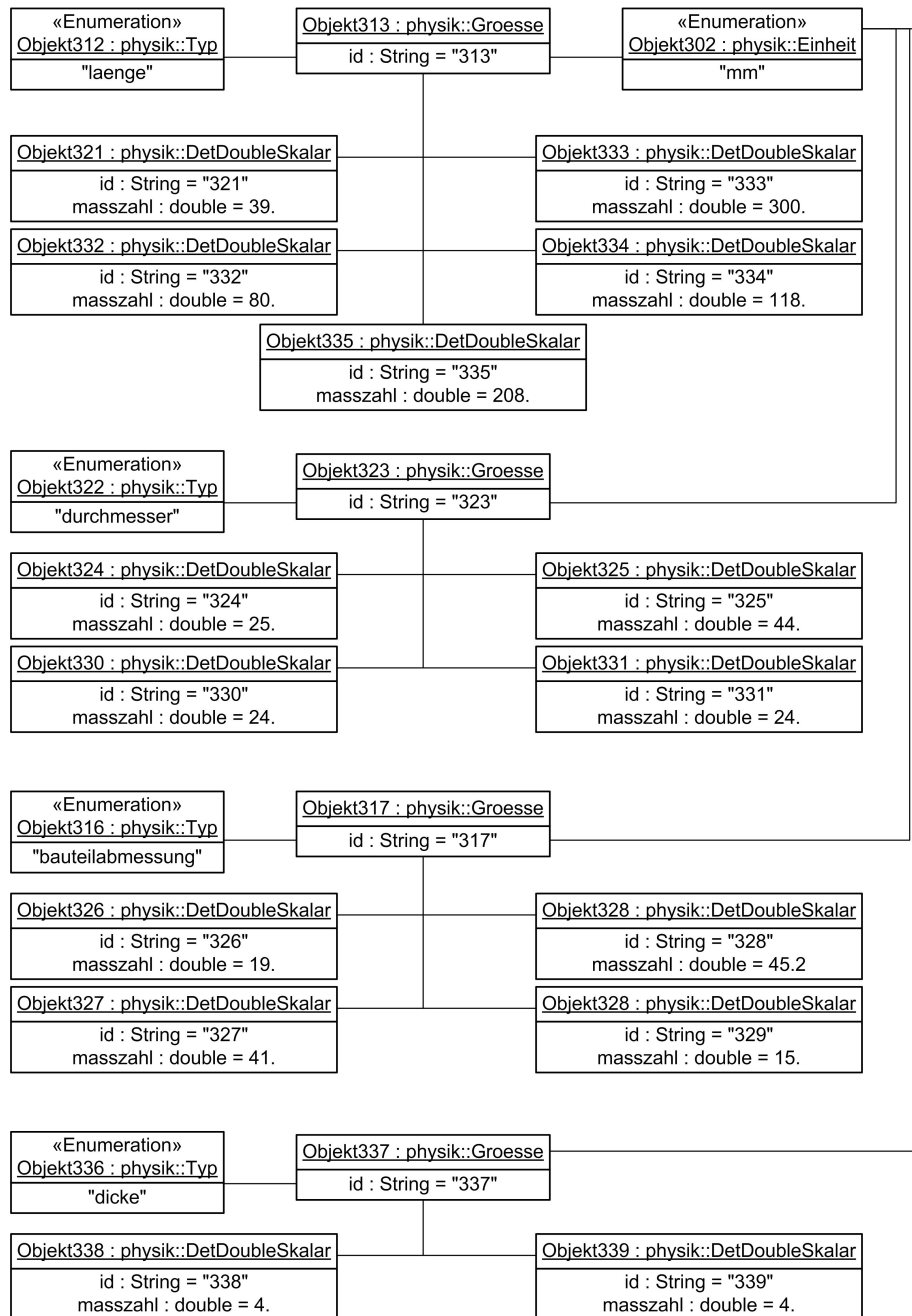


Abbildung D.13: Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Abbildung der Bauteilverbindungen

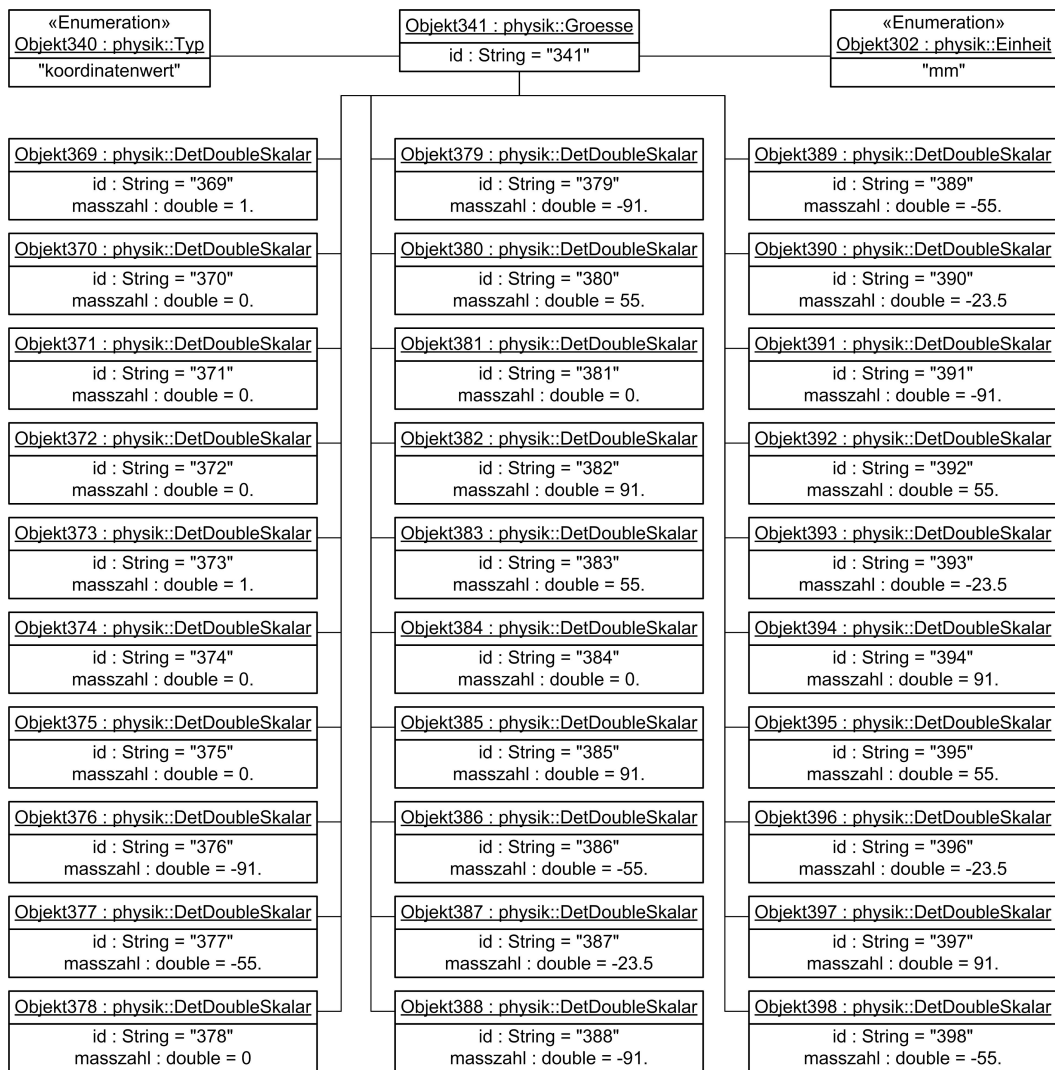


Abbildung D.14: Objekte der Klassen der Ressource Physik zur geometrischen Abbildung der Schraubverbindungen



Abbildung D.15: Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur geometrischen Abbildung der Schweissverbindungen

Anhang E

Objektdiagramme zum Teildatenmodell Bemessung

In diesem Kapitel sind die zum Anwendungsbeispiel aus Abschnitt 5.2.2 zugehörigen Objektdiagramme dargestellt.

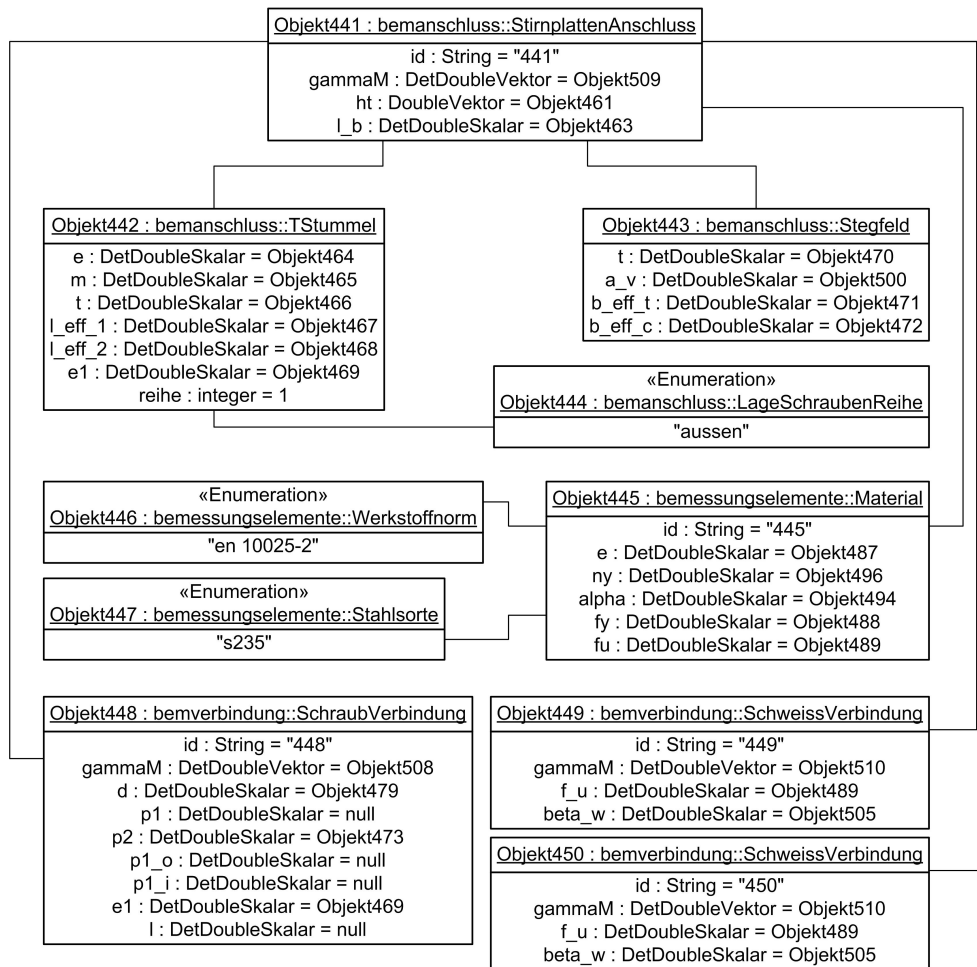


Abbildung E.1: Objekte zur Repräsentation des Stirnplattenanschlusses des Bemessungsmodells

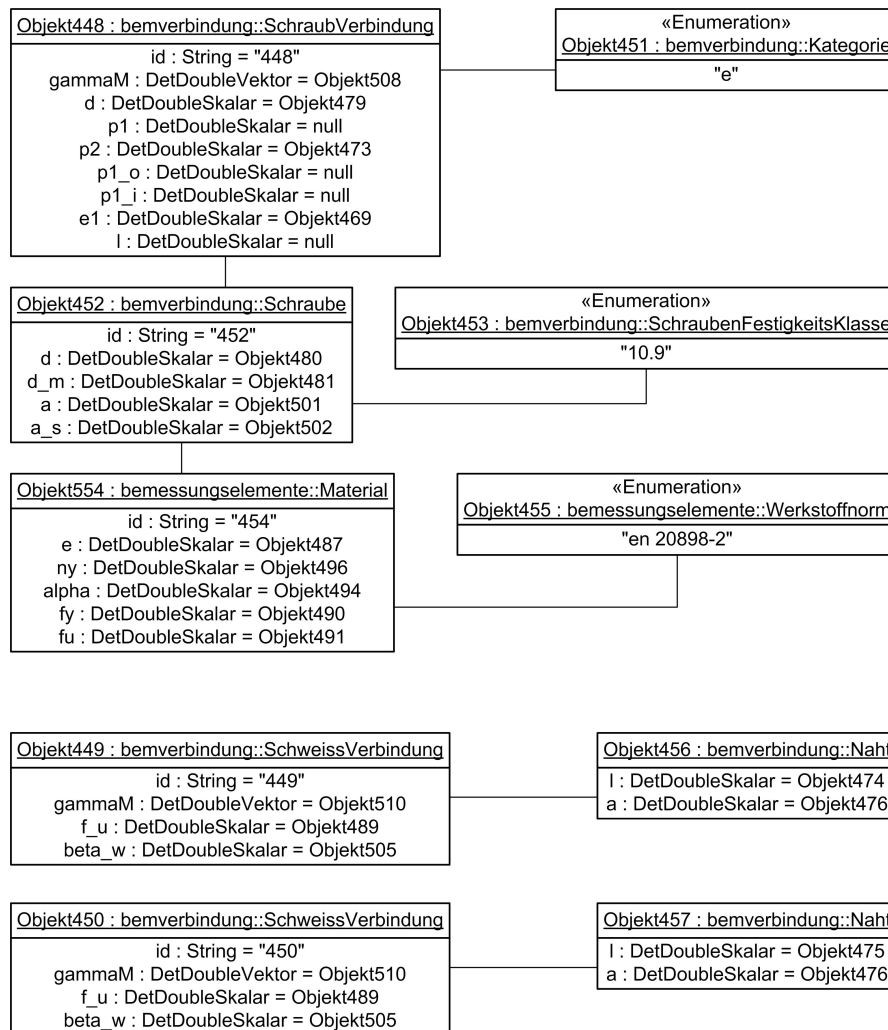


Abbildung E.2: Objektdiagramm der Verbindungen des Bemessungsmodells

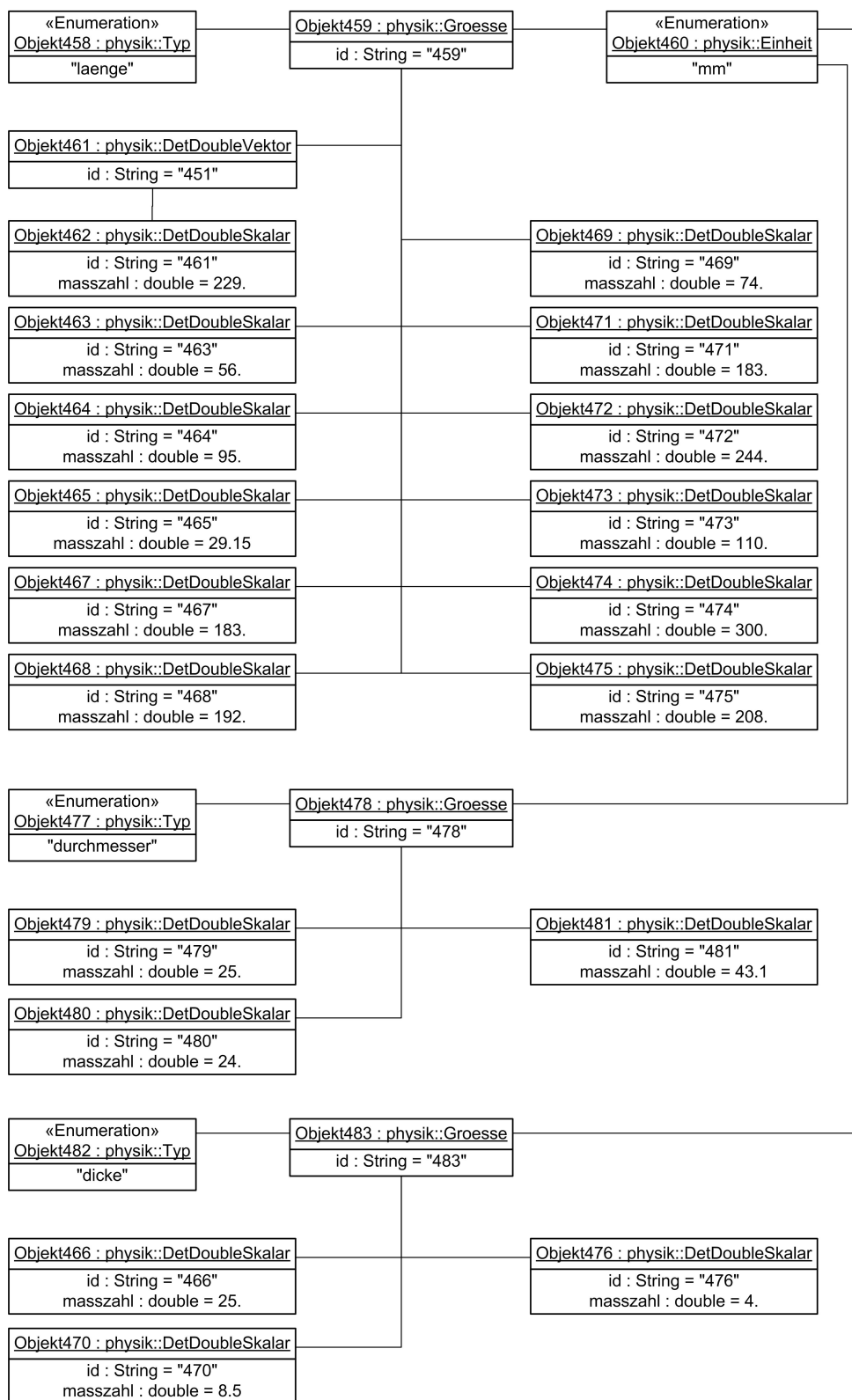


Abbildung E.3: Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Abbildung des Bemessungsmodells

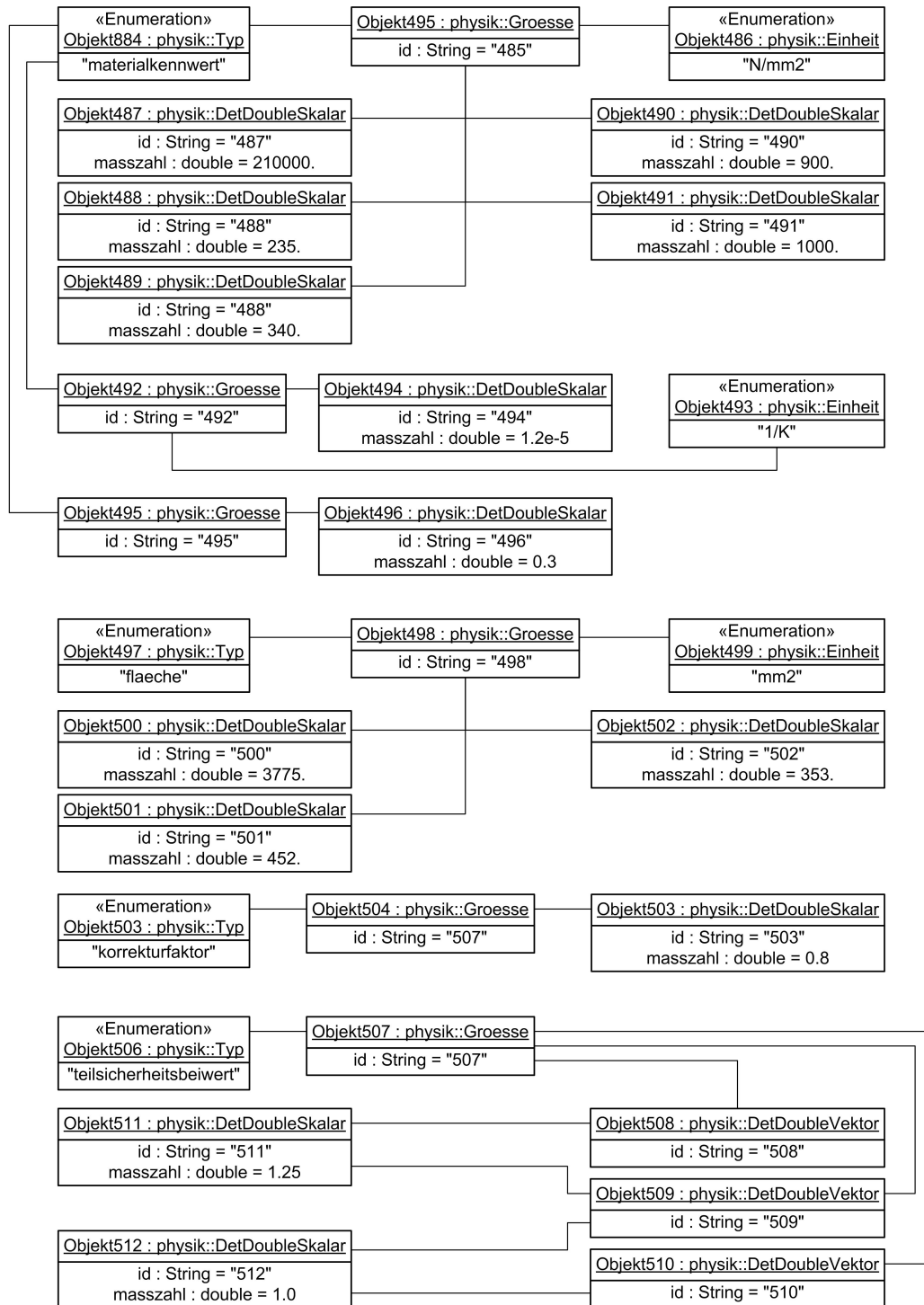


Abbildung E.4: Instanzen der Klassen der Ressource Physik zur Abbildung des Bemessungsmodells (Fortsetzung)