

# Numerische Simulationen auf Basis des IFC-Produktmodells

R. Romberg, C. van Treeck, A. Niggel, E. Rank

**Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München**

Arcisstr. 21, 80290 München, <http://www.inf.bv.tum.de>  
{romberg, treeck, niggel, rank}@bv.tum.de

## Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das numerische Simulationen im Bauingenieurwesen auf ein standardisiertes Bauwerksmodell stützt (siehe Abbildung 1). Dabei wird der gesamte Bearbeitungszyklus von der Bauwerksmodell-Erstellung bis zur Visualisierung und Weiterverarbeitung der Berechnungsergebnisse mit strikt dreidimensionalen, kompatiblen Modellen behandelt.

Aus Sicht der Strukturanalyse überwindet dieser Ansatz die übliche Vorgehensweise in der Tragwerksplanung, bei der zur Berechnung des mechanischen Modells die Dimension der Tragstrukturen auf 2D oder 1D Modelle reduziert wird. Die hier gezeigte Methode ermöglicht es dagegen, die Konsistenz des mechanischen Gesamtmodells zu gewährleisten.

Für ein thermisches Mehrzonenmodell stehen mit diesem Ansatz alle relevanten geometrischen Objekte zur Verfügung, die Voraussetzungen für die Definition von Zonen sind. Sie können darüber hinaus als Basis für eine Simulation von Raumluftrömungen dienen.

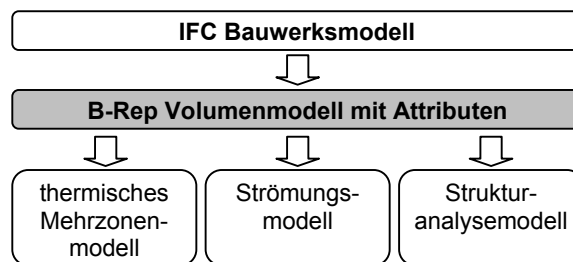


Abbildung 1: IFC Bauwerksmodell als Basis für numerische Simulationen

Der Bearbeitungszyklus beginnt mit der Erstellung des Bauwerksmodells im CAD-System. Dafür kommen die ‚Industry Foundation Classes‘ (IFC) der ‚International Alliance for Interoperability‘ (IAI) zum Einsatz. Das Bauwerksmodell enthält neben der Geometrie eine Vielzahl von Informationen über Material, Typ, Abhängigkeiten, Nachbarschaften uvm. Davon wird zum einen ein geometrisches 3D-Modell abgeleitet und zum anderen alle für die numerische Simulation relevanten Daten in eine externe Datenbank übertragen. Das geometrische 3D-Modell wird hinsichtlich der durchzuführenden Simulation attribuiert und anschließend in ein sog. Verbindungsmodell überführt. Ziel des Verbindungsmodells ist es, Verbindungskörper als Teil des geometrischen Modells zu identifizieren und zwar an den Orten, an denen Objekte des geometrischen Modells zusammentreffen. Aus der Sicht geometrischer Schnittmengen haben die neben den Kopplungsobjekten bestehenden übrigen Objekte im Verbindungsmodell untereinander lediglich gemeinsame Kanten und Knoten. Das Verbindungsmodell hat neben anderen Vorteilen (siehe thermische Gebäudesimulation) die wichtige Eigenschaft, dass es die Voraussetzung für eine automatische Vernetzung in Hexaedern schafft. Im Anschluss an das Präprocessing wird die Geometrie zusammen mit allen weiteren Berechnungsattributen über ein Netzwerk an einen Server übertragen und berechnet. Die Berechnungsergebnisse können anschließend auf dem Client visualisiert und weiterverarbeitet werden.

Das hier beschriebene Verfahren liefert eine mögliche Grundlage für eine stärkere Computerunterstützung der Planung im konstruktiven Ingenieurbau, bei der sowohl Bearbeitungszyklen berücksichtigt als auch die Vorteile einer vernetzt-kooperativen Bearbeitung ausgeschöpft werden können.

## Das IFC-Bauwerksmodell

Der Import geometrischer wie semantischer Daten eines Bauwerks erfolgt in dem vorgestellten Ansatz aus dem Produktmodell der IFC. Das IFC-Schema dient dabei nicht als Modell zur internen Speicherung von Daten, sondern wird hier als Schnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Programme wie CAD-Anwendungen für Architekten oder anderer Modellierungstools verwendet. Das IFC-Schema wird in Form einer Spezifikation veröffentlicht. Die Einhaltung der Kompatibilität der darauf aufsetzenden Implementierungen hinsichtlich der Praxistauglichkeit des Schemas ist dabei ein ganz entscheidender Aspekt. Fortlaufende Zertifizierungen IFC-fähiger Software sollen dies garantieren [St2003].

Die Implementierung dieser Schnittstelle erfolgt unter Verwendung einer sog. Toolbox [Eu2003], die das Objektschema der IFC auf ein Klassenmodell einer objektorientierten Programmiersprache abbildet und Werkzeuge für den effizienten Objektzugriff zur Verfügung stellt. Damit werden Grenzen zwischen spezialisierten CAD-Softwarepaketen, die maßgeschneidert auf spezielle Erfordernisse ausgerichtet sind, aufgebrochen und der Datenaustausch über die Anwendungsgrenzen hinaus unterstützt.

Der Übergang vom IFC-Modell in das interne Datenmodell des Simulations-Frameworks wird durch einen Wechsel der Sicht auf das Bauwerk vollzogen [Lä2003]: Während bei Objekten des IFC-Modells der Objekt-Typ mit zugeordneten Daten im Mittelpunkt steht (beispielsweise ist eine Wand ein abstraktes Objekt, das auch Informationen zur Geometrie besitzen kann), fokussiert das hier verwendete Datenmodell das *geometrische Objekt* (siehe Abbildung 2). Zugeordnete Daten wie Typ, Attribute und topologische Modellinformationen werden getrennt mittels einer geeigneten Datenbanktechnik verwaltet.

Die Konvertierung des IFC-Modells in das interne Datenformat beinhaltet folgende Teilaspekte:

- Analyse der geometrischen Repräsentation der IFC-Objekte (Extrusionsmodell oder B-Rep Modell).
- Erkennen und Verwaltung von Löchern in Objekten (z.B. Fenster).
- Transformation der Objekte in ein einheitliches Koordinatensystem.
- Berücksichtigung relevanter Attribute (z.B. Materialien, Lasten, Lagerungen).
- Berücksichtigung unterschiedlicher Wandverschneidungsstrategien (Winkelhalbierende oder stumpfer Wandanschluss).
- Auswertung und Vervollständigung von Nachbarschaftsbeziehungen.

Den Objekten des geometrischen Modells werden beliebige Daten zugeordnet. Diese werden in einer hierarchischen Datenstruktur verwaltet. Jedes Objekt im geometrischen Modell wird über eine eindeutige ID identifiziert; diese stellt den Bezug zu der hierarchischen Datenstruktur her. Die ID wird aus der *IfcGloballyUniqueId* des IFC-Modells abgeleitet. Neben den Knoten in der hierarchischen Datenstruktur, die mit den geometrischen Objekten des ACIS-Modells korrespondieren [CoLi2001], gibt es weitere Knoten, die übergeordnete Strukturen ohne direkten Geometriebezug verwalten (z.B. Wand). Eine Wand besteht in dieser Beschreibung aus einer Menge von Wandschichten.

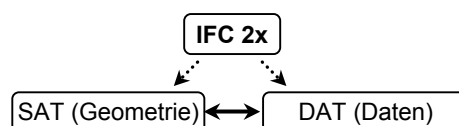


Abbildung 2: Konvertierung des IFC-Modells in das ACIS Geometrie-Modell (SAT) und in das hierarchische Datenbank-Modell (DAT)

## Attributierung der Geometrie

Die Attributierung der Modelle wird bei diesem Ansatz während unterschiedlicher Bearbeitungsphasen durchgeführt. Bestimmte Attribute werden im Bauwerksmodell definiert und anschließend verlustfrei in das geometrische Modell übernommen (z.B. die Materialdefinition). Weitere Attribute können im Verlauf der Modellbearbeitung verwaltet und verändert werden (siehe Abbildung 3).

Die flexible Anwendung der Attributierung ermöglicht die Einbeziehung von Attributen für unterschiedliche Simulationsverfahren. Bei der Strukturanalyse werden beispielsweise im geometrischen Modell Volumenobjekten Materialien und Flächenobjekten Verschiebungs- und Spannungsrandbedingungen zugeordnet. Für eine thermische Gebäudesimulation sind z.B. Angaben zum Fassadenaufbau bzw. zu den Wärmeleitungseigenschaften einzelner Bauteile oder optische Verglasungskennwerte wichtig.

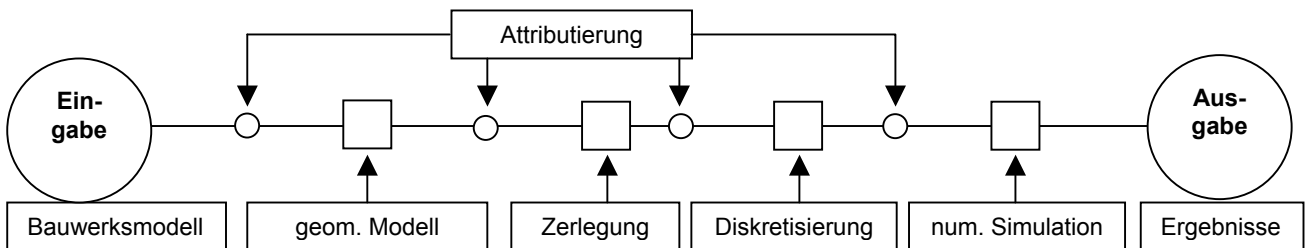


Abbildung 3: Attributierung der Modelle in den Bearbeitungsphasen.

## Zerlegung der Geometrie im Verbindungsmodell

Das Verbindungsmodell ist ein Zwischenmodell zwischen dem geometrischen Modell und nachfolgenden mechanischen und thermischen Modellen. Neben der Strukturanalyse, auf der der Fokus dieses Beitrags liegt, schafft das Verbindungsmodell die Voraussetzung für weitere Modelle wie zur Simulation von Innenraumluftrömungen oder für ein thermisches Mehrzonenmodell bei Gebäuden.

### Grundlagen der geometrischen Zerlegung

Gegeben sei ein Geometriemodell, für das gilt:

$$\Omega \subset \mathbb{R}^3$$

Ohne dies hier detailliert zu definieren, wollen wir unter dem geometrischen Modell einen oder mehrere im Sinne einer Boundary-Representation aufgebaute Körper betrachten. Dabei handelt es sich insbesondere um eine abgeschlossene Menge. Es wird im Folgenden auch als Gesamtheit bezeichnet. Diese Gesamtheit wird in  $m+n$  Elemente zerlegt. Der Begriff Element wird hier im Sinne der anschaulichen Mengentheorie verwendet und ist daher *nicht* mit dem Begriff der ‚finiten‘ Elemente zu verwechseln.

Für alle  $m+n$  Elemente  $\omega_i$  mit  $i = 1, \dots, m$  und  $\omega_j$  mit  $j = 1, \dots, n$  gilt:

$$\bigcup_{i=1, \dots, m} \omega_i = \Omega^K \subset \mathbb{R}^3,$$

$$\bigcup_{j=1, \dots, n} \omega_j = \Omega^D \subset \mathbb{R}^3.$$

$\Omega^K$  bezeichnet die Menge der Kopplungsobjekte,  $\Omega^D$  die der Differenzobjekte. Es gilt:

$$\Omega^K \subset \Omega,$$

$$\Omega^D \subseteq \Omega.$$

Die Vereinigung dieser beiden Teilmengen ergibt wieder die Gesamtheit  $\Omega$ :

$$\Omega^K \cup \Omega^D = \Omega \subset \mathbb{R}^3$$

Jedes Kopplungs- und Differenzobjekt ist ein abgeschlossener Körper  $\omega_i, \omega_j \subset \mathbb{R}^3$ . Knoten, Kanten und Flächen des Volumens sind Teile des Körpers. Zur Erläuterung der in diesem Abschnitt verwendeten Bezeichnungen von Schnittmengen sei folgende Anmerkung gemacht:

Unter der Voraussetzung eines konsistenten Modells, das aus Volumina besteht, die durch die Menge ihrer Knoten, Kanten und Flächen vollständig beschrieben sind, resultieren je nach Art der Nachbarschaft zweier Objekte folgende *Schnittmengen-Typen*:

Schnittmengen-Typ kk: Die Schnittmenge von Objekten, die über eine Fläche benachbart sind, besteht aus Flächen, Kanten und Knoten.

Schnittmengen-Typ kk: Die Schnittmenge von Objekten, die über eine Kante benachbart sind, besteht aus Kanten und Knoten.

Schnittmengen-Typ k: Die Schnittmenge von Objekten, die über einen Knoten benachbart sind, besteht aus Knoten.

Im Folgenden werden die beiden Objekttypen ‚Differenzobjekt‘ und ‚Kopplungsobjekt‘ hinsichtlich ihrer Nachbarschaftsbeziehungen, Schnittmengen und Topologien charakterisiert.

Schnittmengen zweier Differenzobjekte können vom Typ  
k oder kk sein.

Schnittmengen zweier Kopplungsobjekte können vom Typ  
k, kk oder kkf sein.

Schnittmengen von Differenzobjekten und Kopplungsobjekten können vom Typ  
k, kk oder kkf sein.

Während für Kopplungsobjekte zwingend die topologische Struktur eines Hexaeders vorausgesetzt wird, können Differenzobjekte auch andere Topologien haben.

Betont sei, dass der hier verfolgte Ansatz *nicht* auf völlig allgemeine 3D-Strukturen anwendbar ist. Er beschränkt sich auf in der Baupraxis übliche geometrische Objekte, die zu Tragwerkselementen wie Platte, Stütze, Scheibe und Balken korrespondieren, hier aber strikt dreidimensional betrachtet werden.

### Erläuterung an Standardobjekten

Welche Schritte erforderlich sind, um ein Verbindungsmodell mit den oben beschriebenen Objekten zu erhalten, ist Thema des folgenden Abschnitts. Wesentlich dabei sind die Boole'schen Operatoren DURCHSCHNITT und DIFFERENZ.

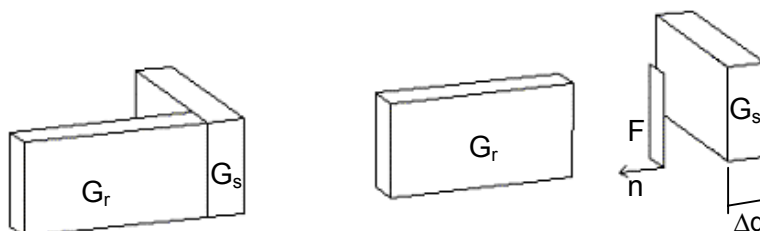


Abbildung 4: Zwei benachbarte Objekte  $G_r$  und  $G_s$  mit Kontaktfläche  $F$  und zugehörigem Normalenvektor  $n$ .

Ausgangspunkt ist das bereits oben definierte Geometriemodell  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ , das zunächst aus einer Menge geometrischer Objekte  $G_k$  besteht, für die gilt:

$$G_k \subseteq \Omega \quad \text{mit } k = 1, \dots, l,$$

$$\bigcup_{k=1, \dots, l} G_k = \Omega.$$

Für jeweils zwei geometrische Objekte  $G_r, G_s$  (siehe Abb. 4) wird folgender Algorithmus ausgeführt:

1. Haben  $G_r, G_s$  eine Schnittmenge vom Typ  $kkf$ ?
  - Falls dies nicht zutrifft, werden diese Objekte nicht weiter untersucht.
  - Falls dies zutrifft wird mit Punkt 2 fortgefahren.
2. Lege von  $G_r$  eine Kopie  $G_r'$  an und verschiebe  $G_r'$  in Richtung von  $n$  um die ‚augenscheinliche Dicke‘  $-\Delta d$  (siehe Abb. 4).
3. Lege von  $G_s$  eine Kopie  $G_s'$  an.
4. Die Objekte des Verbindungsmodells ergeben sich dann wie folgt:

$$\omega_1 := G_r' \cap G_s' \subset \Omega^K,$$

$$\omega_2 := G_r \subset \Omega^D,$$

$$\omega_3 := G_s \setminus \omega_1 \subset \Omega^D.$$

### Relationaler Gebäudegraph

Im Laufe der Ermittlung der Objekte des Verbindungsmodells wird ein rel. Gebäudegraph aufgebaut. Eine Relation liegt dann vor, wenn ein geometrisches Objekt mit einem anderen geometrischen Objekt über eine gemeinsame Fläche in Kontakt tritt. Die Relation wird in einer Adjazenzmatrix für nachfolgende Operationen vorgehalten.

	$G_1$	$G_2$	$G_3$		
$G_1$					
$G_2$	◆				
$G_3$	◆	◆			

Abbildung 5: Adjazenzmatrix

Die hier abgebildete Adjazenzmatrix ist dem Modell aus Abbildung 6 zugeordnet. Darin sind Elemente der Relationen in der unteren Dreiecksmatrix eingetragen. Reflexive Beziehungen sind nicht dargestellt. Infolge der Zerlegung des geometrischen Modells werden neue Objekte erzeugt und bestehende gelöscht (Boole'sche Operatoren). Dies führt zu einer fortlaufenden Änderung der Adjazenzmatrix.

## Beispiel

Um dieses Verfahren anschaulich darzustellen, folgt nun ein Beispiel mit drei Ausgangsobjekten:

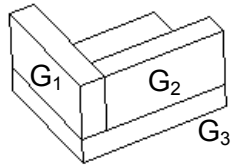


Abbildung 6: Konfiguration mit drei Objekten  $G_1$ ,  $G_2$  und  $G_3$

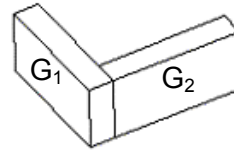


Abbildung 7: Nach Schritt 1 zwei Objekte ausgewählt

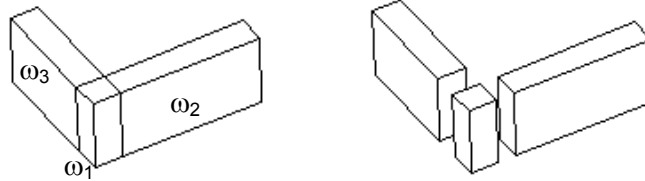


Abbildung 8: Objekte  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  nach den Schritten 2-3

Die Schritte werden nun auf alle Objektpaare (Eintrag in der Adjazenzmatrix) rekursiv angewendet.

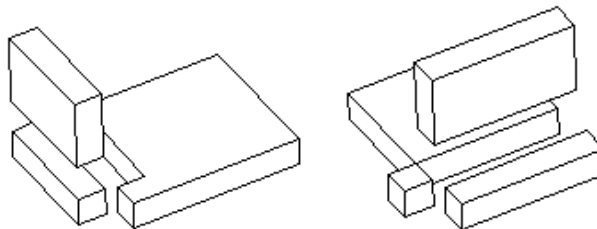


Abbildung 9: Rekursive Anwendung der Schritte 1-3

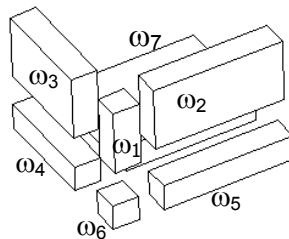


Abbildung 10: Verbindungsmodell mit Kopplungsobjekten und Differenzobjekten

In Abbildung 10 sind die Differenzobjekte  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_7 \subset \Omega^D$  und die Kopplungsobjekte  $\omega_1$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ ,  $\omega_6 \subset \Omega^K$  dargestellt.

## Diskretisierung der geometrischen Modelle

Die spezifischen geometrischen Eigenschaften des Verbindungsmodells begründen Vorteile bei der nun folgenden Diskretisierung der geometrischen Modelle. Aus Sicht der Strukturanalyse schafft das Verbindungsmodell die Voraussetzung für eine automatische Vernetzung in Hexaederelemente (siehe nächster Absatz). Dies ist wiederum Voraussetzung für eine Analyse der gesamten 3D-Struktur mittels einer Finite-Elemente Berechnung (siehe Abschnitt Strukturanalyse). Hinsichtlich der thermischen Gebäudesimulation liefert das Verbindungsmodell alle relevanten Objekte und Beziehungen, die für die Definition von Zonen nötig sind.

## Diskretisierung der Geometrie für eine Finite-Elemente-Analyse

Die Vernetzung erfolgt nun mittels eines Verfahrens, das sich bei den im Bauwesen auftretenden platten-, scheiben- oder schalenartigen Bauteilen anbietet, und welches im Folgenden kurz vorgestellt werden soll:

Ausgehend vom Verbindungsmodell werden in einem ersten Schritt von den ‚stabförmigen‘ Verbindungsobjekten Randhexaeder abgetrennt und die verbleibende Teilstruktur dann in eine gerade Anzahl von Teilobjekten unterteilt (Die Bildung dieser Teilobjekte kann dabei aufgrund von Vorgaben zur maximal gewünschten Elementkantenlänge bzgl. der Diskretisierung in der FEM erfolgen).

Die mit der Unterteilung der Verbindungselemente erzeugten Knoten werden dann auf die angrenzenden Kanten des Flächenobjektes übertragen und auf diesen anschließend sog. Randschichtelemente erzeugt. Diese sind insbesondere sinnvoll, um die an den Plattenrändern auftretenden Spannungskonzentrationen numerisch feiner auflösen zu können.

Da die platten- und scheibenartigen Bauteile in der Regel über eine ausgezeichnete Fläche (z.B. Mittel- oder Oberfläche) verfügen, lässt sich dann das Innere des Bauteiles leicht vernetzen. Dabei werden auf dieser Fläche mit einem 2D-Freivernetzer Viereckselemente generiert, welche dann zu Hexaederelementen extrudiert werden können.

Da sich nach der Abspaltung des Verbindungsmodells die restlichen Objekte nur noch an den Kanten berühren und diese durch die Übertragung der Knoten vom Verbindungsmodell bereits unterteilt sind, kann damit jedes Objekt dieses Differenzmodells unabhängig von den anderen vernetzt werden. Nach rekursiver Anwendung dieser Methode auf alle Objekte lässt sich dann die gesamte Struktur in Hexaederelemente vernetzen (siehe Abbildung 11).

Die vorher aufgebrachten Attribute werden dabei entsprechend auf die neu erzeugten Elemente übertragen. Da sich die diskretisierte Geometrie immer noch auf den gleichen Geometriekern stützt wie die Ausgangsgeometrie, lassen sich Änderungen der Attributierung auch an dem vernetzten Modell durchführen (siehe Abschnitt: Attributierung der Geometrie).

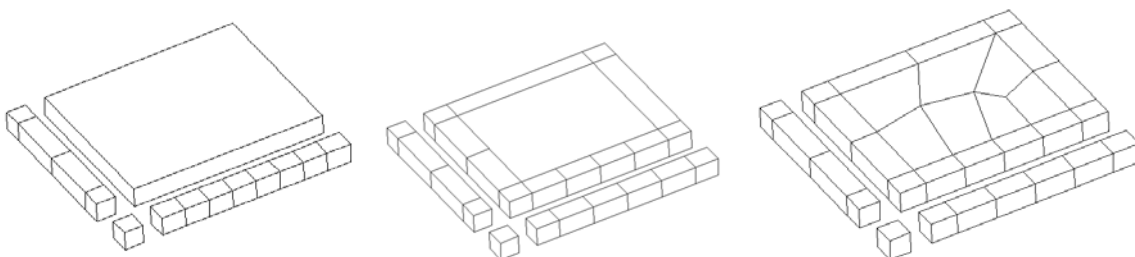


Abbildung 11: Makrobasierte Vernetzung einer Platte mit Hexaederelementen

## Interaktive Zonierung für die thermische Gebäudesimulation

Ähnlich wie zur Strukturanalyse kann das attributierte Verbindungsmodell in Verbindung mit dem Objektmodell der IFC-Beschreibung auch als Ausgangspunkt für eine thermische Gebäudesimulation unter Verwendung von Mehrzonenmodellen und CFD-Methoden dienen [TrRoRa2003].

Weiter oben wurde bereits beschrieben, wie im Laufe der Zerlegung ein *Bauteilgraph* (relationaler Gebäudegraph, Verbindungstyp 'kkf') erstellt wird. Um eine interaktive Zonierung zu ermöglichen, wird ein weiterer Graph, der sogenannte *Kantengraph* benötigt. Bei diesem Graphen handelt es sich um die Menge der Beziehungen zwischen allen Flächen des zerlegten Modells mit Verbindungstyp 'kk', wobei Flächen Löcher enthalten können. Jeder *Knoten* des Graphen korrespondiert somit mit einer (evtl. mit Löchern behafteten) Fläche eines Volumenkörpers und jede *Kante* des Graphen repräsentiert eine Beziehung zwischen zwei dezidierten Flächen (desselben oder verschiedenen Volumenkörpers). Dieser Kantengraph ermöglicht es, mit Hilfe der durch den ACIS Geometriekern [CoLi2001] zur Verfügung gestellten Algorithmik, die Menge aller geschlossenen B-rep Körper im Modell zu finden und alle Raumluftvolumina zu extrahieren. Mit Kenntnis der Innenraumvolumina ist es nun möglich, Wände als innenliegend, zonenbenachbart oder an die äussere Umgebung grenzend zu identifizieren. Diese ganzheitliche Herangehensweise

ist erforderlich, da im Objektmodell der IFC nicht alle Nachbarschaftsbeziehungen verfügbar sind bzw. sich diese durch den oben beschriebenen Zerlegungsprozess potentiell verändern. Die Umsetzung dieses Algorithmus ist Gegenstand eines laufenden Projektes [TrRaScKaCr2003] und wird in einer künftigen Veröffentlichung ausführlich beschrieben werden.

Ausgehend von einer B-rep Beschreibung eines Innenraumvolumens kann nun auch ein Strömungsgebiet diskretisiert werden. Für die dazu nötige Tessellierung (Facettierung), Oktaalbaum-basierende Diskretisierung und Überführung in eine 3D Voxelgeometrie wird auf die ausführlichen Darstellungen in [TrKrKüRa2001] und [Cr2003] verwiesen.

## Numerische Simulation

### Strukturanalyse

Die Strukturanalyse der vernetzten Struktur erfolgt ohne Verwendung dimensionsreduzierten Ansätzen mit strikt dreidimensionalen Finiten-Elementen höherer Ordnung. Um die Genauigkeit einer Berechnung zu erhöhen, wird bei der hier verwendeten sog. *p-Version* im Gegensatz zur klassischen *h-Version* die Struktur des Netzes beibehalten und stattdessen der polynomiale Ansatz des Verschiebungsfeldes erhöht. Verschiedene Untersuchungen [Dü2002] dazu haben gezeigt, dass sich besonders räumliche Strukturen, die aus gemischt dünnwandigen/massiven Bauteilen bestehen, mit der *p-Version* vorteilhafter berechnen lassen, als mit klassischen Ansätzen (Schalentheorie, 3D *h-Version*).

Damit bietet sich dieses Verfahren gerade für die in diesem Beitrag gezeigten Strukturen aus überwiegend platten- und scheibenartigen Bauteilen an. Ein weiterer Vorteil der *p-Version* ist auch, dass sich diese sehr unempfindlich gegenüber stark verzerrten Elementen verhält. So können die Gebäudestrukturen mit relativ großen Elementen vernetzt werden, wodurch die Anzahl der Elemente im Gesamtsystem im Vergleich zur *h-Version* deutlich geringer ist.

Die Berechnung einer gesamten Gebäudestruktur erfordert jedoch weiterhin große Rechenkapazitäten. Zur Finite-Element-Analyse bietet sich daher eine Client-Server-Architektur an, bei der die Berechnung auf eine leistungsfähige Hardware ausgelagert wird. Die Einbeziehung der FE-Software geschieht dabei für den Benutzer vollkommen transparent.

### Thermische Gebäudesimulation

Gegenstand eines weiteren Projektes ist die Kopplung von dynamischer Gebäudesimulation mit CFD-Methoden zur Untersuchung des Energiehaushalts und Komforts von Gebäuden basierend auf dem IFC-Produktmodellstandard [TrRaScKaCr2003].

Gegenwärtig wird ein gegenüber klassischen Verfahren alternatives Verfahren zur numerischen Simulation von Strömungs- und Transportvorgängen [Kr2001, Toe2001, CrKrKüRaTr2002] entwickelt. Schwerpunkt ist die Erweiterung des sogenannten Gitter-Boltzmann Verfahrens hinsichtlich konvektiver Strömungsvorgänge. Dabei wird das hybride thermische Gitter-Boltzmann Verfahren (HTLBE) entsprechend den Arbeiten von [LaLu2002] und [dHuGiKrLaLu2002] verwendet. Im Bereich der thermischen Gebäudesimulation kommt das Mehrzonen-Gebäudemodell der objektorientierten Simulationsumgebung SMILE [NyBa2001] zum Einsatz. Die Realisierung der Kopplung zwischen beiden numerischen Verfahren und des iterativen Lösungsprozesses (Mehrfeldproblem) erfolgt mit Hilfe eines partitionierten Lösungsansatzes. Ergebnisse werden in kommenden Veröffentlichungen präsentiert.

### Beispiel

Das folgende Beispiel zeigt den prinzipiellen Ablauf von Diskretisierung und Simulation anhand eines Referenzgebäudes. Das Gebäude besteht aus Wänden, Türen, Fenstern, Öffnungen und Platten. Die Bilderfolge auf der linken Seite zeigt die Zerlegung eines Teilmodells für eine Struktursimulation gemäss oben beschriebener Methodik. Die Ergebnisse der Strukturanalyse sind in Form eines Plots der Verschiebungen, die von vertikalen Lasten auf den Wänden verursacht werden, dargestellt. Auf der rechten Seite ist ein aus dem Verbindungsmodell gewonnenes



Raumluftvolumen eines Atriums und dessen Tesselierung zu erkennen. Das triangulierte Oberflächennetz dient später als Eingabeparameter für eine Oktaalbaum-basierende Diskretisierung (vgl. vorherigen Abschnitt zur numerischen Simulation) für den Strömungslöser. Das abgebildete CFD Modell wurde verwendet, um die Schichtung der Raumlufttemperaturen und ein potentielles Zugrisiko innerhalb des Atriums zu untersuchen. Im Sinne einer Vorstudie wurde hierfür zunächst ein unidirektionales Kopplungsinterface implementiert, das das thermische Mehrzonen-Gebäudemodell von SMILE mit dem kommerziellen CFD Paket CFX-5, verbindet [TrRoRa2003]. Das Bild zeigt Stromlinien der turbulenten Strömung, die an einer Öffnung injiziert werden.

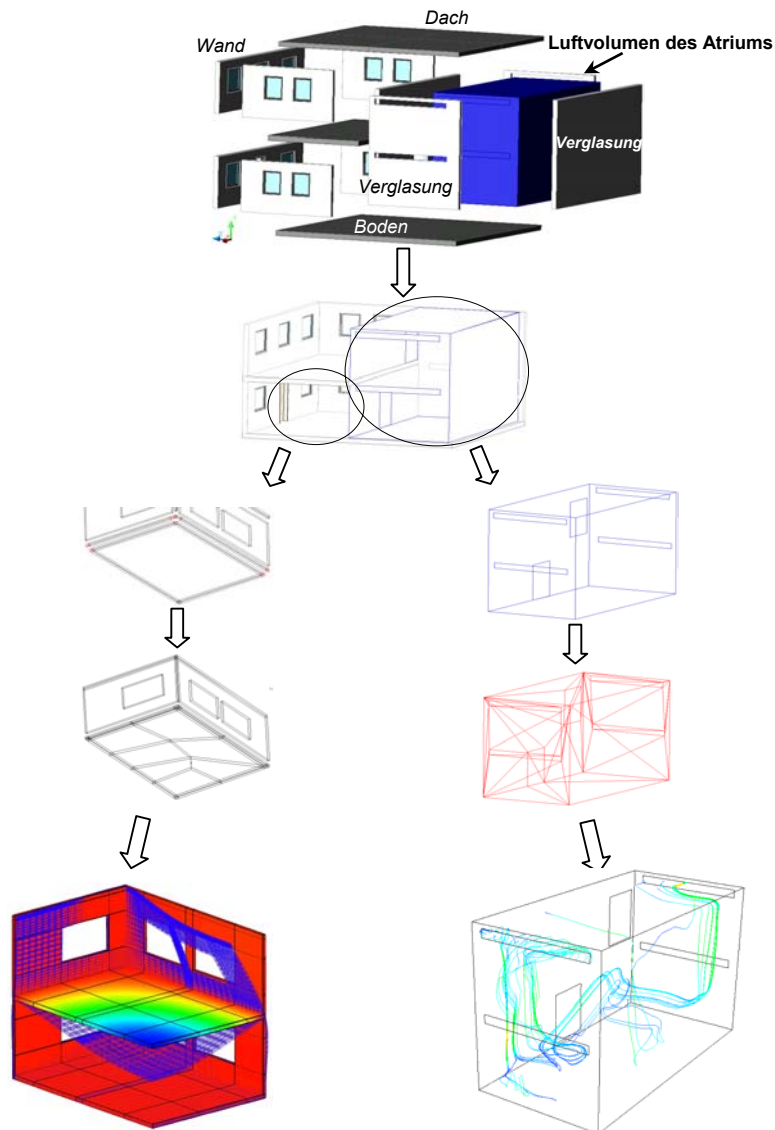


Abbildung 12: Strukturanalyse und Simulation von Raumluftströmungen auf Basis eines gemeinsamen Bauwerksmodells [RaZeBu2002, TrRaScKaCr2003]

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass das Bauwerksmodell als gemeinsame Basis für verschiedene numerische Simulationen eingesetzt werden kann. Dabei spielt das Datenformat beim Austausch von Gebäudeinformationen zwischen CAD-Systemen und nachgeordneten Berechnungstools eine wichtige Rolle. Die IFC der IAI ist ein hoffnungsvoller Schritt zur Lösung dieser Problematik. Die Trennung von Geometrie und Daten spielt bei diesem Ansatz ebenso eine zentrale Rolle. Damit kann zur Verwaltung und Bearbeitung das jeweils beste Werkzeug (Geometriekern, Datenbank) eingesetzt werden. Weiterhin lässt sich das interne Datenschema zur Unterstützung weiterer Simulationsverfahren einfach erweitern.

Die hier exemplarisch beschriebene Modellbearbeitung von der Erstellung des Gebäudemodells bis zur Auswertung der Berechnungsergebnisse stellt nur einen Teilaspekt im gesamten Bearbeitungszyklus in der Projektplanung im konstruktiven Ingenieurbau dar. Hinsichtlich der eingesetzten numerischen Methoden, der Versionierung der Modelle, der verteilten Bearbeitung der Modelle und der effizienten Neuberechnung bei Änderungen ergeben sich noch weitere Fragestellungen, die Gegenstand künftiger Forschungsarbeiten sind.

## Danksagung

Diese Arbeit wird dankenswerter Weise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms ‚Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau‘ (<http://www.dfg.de>) und von der Bayerischen Forschungstiftung (<http://www.forschungsstiftung.de>) finanziell unterstützt.

## Literatur

- [CoLi2001] Coney J., Lim T., 3D modeling with ACIS, Saxe-Coburg Publications, UK.
- [Cr2003] Crouse B. 2003. Lattice-Boltzmann Strömungssimulationen auf Baumdatenstrukturen, Dissertation, Lehrstuhl für Bauinformatik, TU München, eingereicht.
- [CrKrKüRaTr2002] Crouse B., Krafczyk M., Kühner S., Rank E., van Treeck C. 2002. Indoor air flow analysis based on lattice Boltzmann methods, Int. J. Energy and Buildings, 34/9 pp. 941-949, Elsevier.
- [dHuGiKrLaLu2002] d'Humières D., Ginzburg I., Krafczyk M., Lallemand P., Luo L.-S. 2002. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three dimensions, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 360, pp. 437-451.
- [Dü2002] Düster A.. High order finite elements for three-dimensional thin-walled nonlinear continua, PhD thesis, LS Bauinformatik, TU Munich.
- [Eu2003] Eurostep 2003. IFC Classic Toolbox for release 2x, [www.eurostep.com](http://www.eurostep.com) .
- [IAI2003] IAI 2003. International Alliance for Interoperability, IFC Release 2.x, <http://iaiwweb.lbl.gov> .
- [Kr2001] Krafczyk M. 2001. Gitter-Boltzmann Methoden: Von der Theorie zur Anwendung, Professorial Dissertation, LS Bauinformatik, TU Munich.

- [Lä2003] Lämmle A. 2003. Konvertieren eines IFC-Produktmodells in ein ACIS Geometriemodell, Diplomarbeit, LS Bauinformatik, TU München.
- [LaLu2002] Lallemand P., Luo L.-S. 2002. Theory of the lattice Boltzmann method: Acoustic and thermal properties in two and three dimensions, preprint subm. to: The American Physical Society.
- [NyBa2001] Nytsch-Geusen C., Bartsch G. 2001. An object-oriented multizone thermal building model based on the simulation environment SMILE, proc. 7th Int. IBPSA Conf. BS2001, Rio de Janeiro.
- [RaCrTr2002] Rank E., Crouse B. and van Treeck C. 2002. Numerical simulation of air flow for civil engineering constructions on the basis of a product data model, 9th Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering, Taipei, Taiwan.
- [RaZeBu2002] Rank E., Zenger, Ch. 2002. Bericht zum Forschungsprojekt im Schwerpunkt der DFG: Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau, TU Darmstadt
- [St2003] Steinmann, R. 2003. IAI Implementation Support Group, [http://www.iai.fhm.edu/iai\\_isg](http://www.iai.fhm.edu/iai_isg) .
- [Toe2001] Tölke J. 2001. Die Lattice-Boltzmann-Methode für Mehrphasenströmungen, Dissertation, LS Bauinformatik, TU München.
- [TrKrKüRa2001] van Treeck C., Krafczyk M., Kühner S., Rank E. 2001. Direct Building Energy Simulation Based on Large Eddy Techniques and Lattice Boltzmann Methods, proc. BS2001, 7th IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- [TrRoRa2003] van Treeck C., Romberg R., Rank E. 2003. Simulation based on the product model standard IFC, subm. to: IBPSA Conf. Building Simulation 2003, Eindhoven, Netherlands.
- [TrRaScKaCr2003] van Treeck C., Rank E., Schrag T., Katz C., Crouse B. 2003. 1st SIMFAS Project report (funding: Bayerische Forschungsförderung), LS Bauinformatik, TU Munich.