

Konzept und Umsetzung einer räumlichen Anfragesprache für digitale Bauwerksmodelle

Stefanie Schraufstetter, André Borrmann, Ernst Rank

Lehrstuhl für Bauinformatik

Kurzfassung: Das Paper motiviert die Entwicklung einer räumlichen Anfragesprache für 3D-Bauwerksmodelle, führt in die formale Definition der räumlichen Typen und Operatoren ein und beschreibt zwei Varianten der Implementierung der räumlichen Operatoren.

1 Einleitung

Zur besseren Unterstützung des Datenaustauschs bzw. der durchgängigen Datenerhaltung im Bauplanungsprozess und den sich anschließenden Nutzungsphasen wird bereits seit den frühen 90er Jahren die Nutzung eines digitalen Bauwerksmodells propagiert [7]. Dank der umfangreichen Standardisierung in Form der sogenannten *Industry Foundation Classes* (IFC) und deren Unterstützung durch die führenden CAD- und CAE-Anbieter beginnt sich dieser Ansatz auch in der Praxis zu etablieren [15].

Im Gegensatz zur herkömmlichen Abbildung von Bauwerken mittels zweidimensionaler Pläne steht hierbei ein Bauwerksinformationsmodell (BIM) bzw. Produktmodell im Mittelpunkt der Betrachtung, das die Bauteile, deren Eigenschaften und Beziehungen gemäß dem objektorientierten Paradigma beschreibt und aus dem je nach Anwendung 3D-Geometriemodelle oder 2D-Pläne abgeleitet werden können.

Zur zentralen Verwaltung von BIMs kommen sogenannte Produktmodellserver zum Einsatz [10], die in der Regel auf das Vorhalten von in der Beschreibungssprache EXPRESS definierten Modellen spezialisiert sind. Diese Produktmodellserver erlauben zwar in der Regel dem Nutzer, Anfragen zu stellen, um einen Teil des Gesamtmodells zu extrahieren, allerdings beschränken sich die dabei im Konditionalteil der Anfrage einsetzbaren Prädikate auf einfache numerische Vergleiche. Räumliche Anfragen, also Anfragen, die sich auf die Geometrie der Bauteile und ihre räumlichen Beziehungen beziehen, sind damit nicht möglich. Das hier beschriebene Forschungsprojekt leistet einen Beitrag, um diese technologische Lücke zu schließen.

2 Räumliche Anfragesprache

Durch die Einbindung von räumlichen Konzepten in eine Anfragesprache wird dem Nutzer eine höhere Abstraktion räumlicher Daten zur Verfügung gestellt, die der menschlichen Wahrnehmung und Denkweise besser entspricht [8].

Beispiele für den Einsatz einer räumlichen Anfragesprache sind:

- „Finde alle Wände *im* ersten Geschoss.“
- „Welche Stützen *berühren* Decke 1 *von unten*.“
- „Wie viele Heizkörper befinden sich in Raum 107?“

Mit Hilfe derartiger Selektionen können Partialmodelle aus einem zentral verwalteten Bauwerksmodell gewonnen werden. Im Kontext asynchroner kooperativer Planungsarbeit ist die Partialmodellbildung eine wesentliche Voraussetzung für eine reibungsfreie Zusammenarbeit, da die resultierenden Teilmodelle die „Hoheitsgebiete“ der einzelnen Planer markieren, in denen sie weitestgehend konfliktfrei, d.h. ohne weitere Abstimmungen Entscheidungen treffen können. Weiterhin können die aus einer räumlichen Anfrage resultierenden Teilmodelle als Input für numerische Simulations- und Analyseprogramme, wie FEM-Berechnungen [18] und Raumluft-Strömungssimulationen [20] verwendet werden. Daneben eignet sich eine solche Anfragesprache auch zur räumlichen Analyse (Abb. 1) und zum automatisierten Setzen von Assoziationen mit geometrisch-topologischer Semantik im Produktmodell.

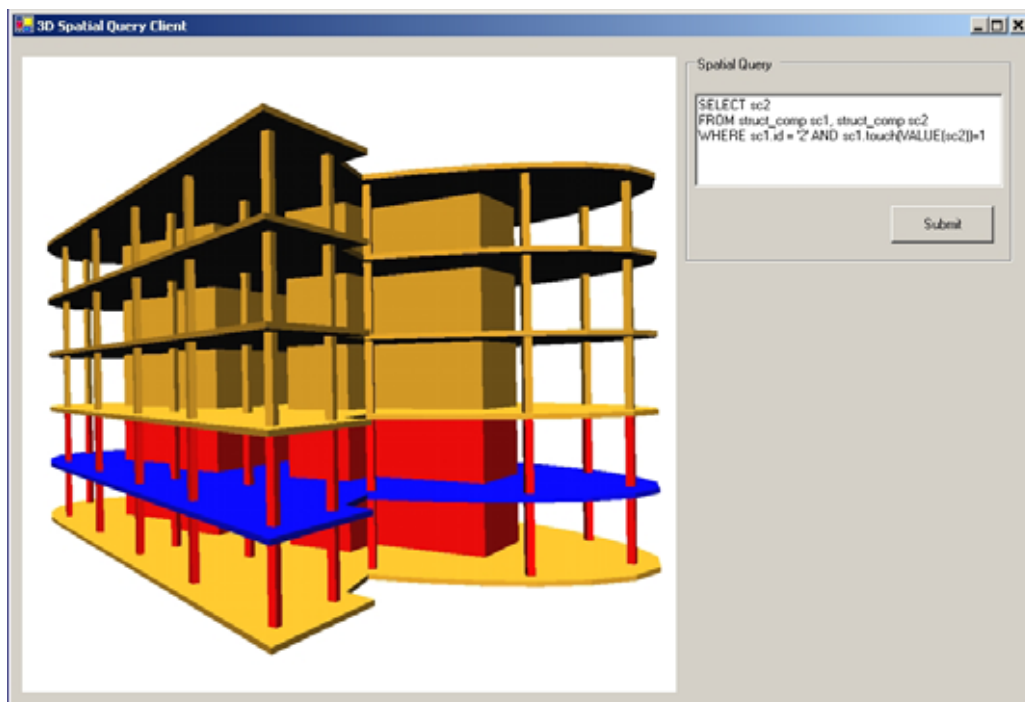


Abb. 1: Räumliche Analyse eines Bauwerksmodells. Alle Bauteile, die die erste Deckenplatte berühren, sind rot markiert.

3 Räumliche Typen und Operatoren

Notwendige Voraussetzung für die Entwicklung einer räumlichen Anfragesprache ist die Definition einer abstrakten räumlichen Algebra, also die formale Beschreibung der Semantik der räumlichen Typen und der für sie verfügbaren räumlichen Operatoren. In [3] wurden die vier räumlichen Typen *Point*, *Line*, *Surface* und *Body* definiert, um räumliche Objekte mit unterschiedlicher Dimensionalität beschreiben zu können. Dies ist notwendig, da im Ingenieurwesen häufig dimensionsreduzierte Betrachtungsweisen zum Einsatz kommen. Unsere formalen Definitionen dieser räumlichen Typen basieren auf der mathematisch fundierten Punktmengentheorie und der darauf aufbauenden Punktmengentopologie [3] [12]. Letztere dient der eindeutigen Beschreibung des Inneren, des Äußeren und des Randes für jeden der drei Typen, die die Grundlage für die Formalisierung topologischer Beziehungen bildet.

Die für die räumlichen Typen verfügbaren Operatoren haben metrische, topologische oder direktionale Semantik. Mit Hilfe der metrischen Operatoren wie *distance*, *fartherThan* und *closerThan* können Abstände zwischen räumlichen Objekten als Selektionskriterium herangezogen werden.

Topologische Operatoren können hingegen verwendet werden, um das Auftreten bestimmter Lagebeziehungen zwischen zwei räumlichen Objekten abzufragen. Zur formalen Definition der Semantik dieser Operatoren wurde in [6] das im 2D-GIS-Bereich etablierte 9-Intersection Model (9-IM) auf den 3D-Raum ausgeweitet.

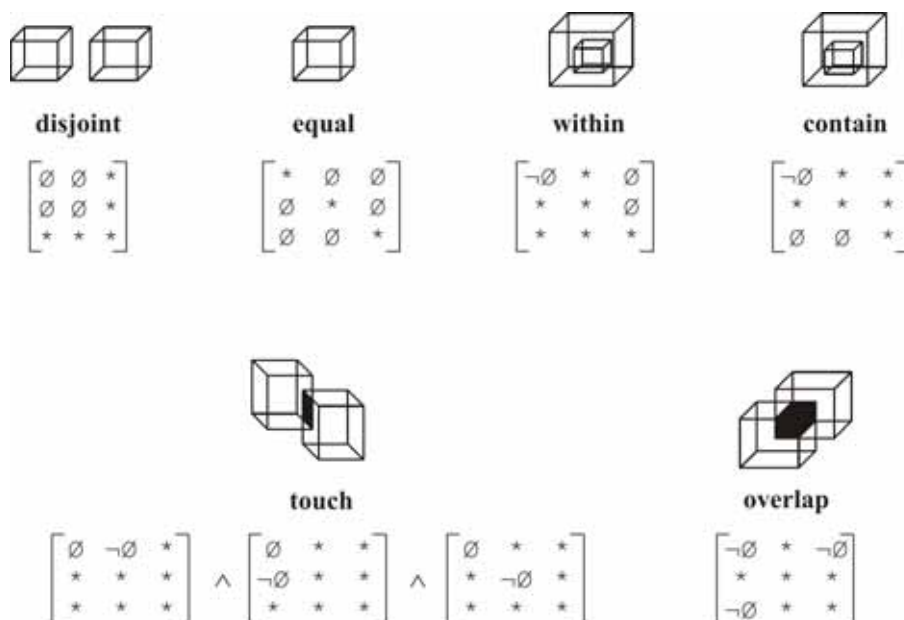


Abb. 2: Die 9-Intersection-Matrizen zur formalen Definition der Semantik der topologischen Operatoren. In die Matrix wird jeweils die Schnittmenge zwischen dem Inneren, Äußeren und dem Rand der beiden räumlichen Operanden eingetragen. Ein Stern markiert Stellen bei denen keine Spezifikation notwendig ist.

Das 9-IM verwendet zur Beschreibung einer topologischen Beziehung eine 3x3 - Matrix, die die neuen Schnittmengen zwischen jeweils dem Rand, dem Inneren und dem Äußeren der beiden Objekte beinhaltet [9]. Einträge in der Matrix können die leere oder die nicht-leere Menge sein. Auf diese Weise konnten die fünf sich gegenseitig ausschließenden topologischen Prädikate *disjoint*, *equal*, *contain*, *within*, *touch* und *overlap* formal definiert werden (Abb. 2).

Durch directionale Operatoren wie *above*, *below*, *eastOf*, *westOf*, *northOf* and *southOf* können Richtungsbeziehungen als Selektionskriterium in die Anfrage einfließen. Da die in der Literatur aufgeführten Modelle zur formalen Beschreibung direktonaler Beziehungen entweder nur für punktförmige Referenz- und Zielobjekte angewandt werden können [14] oder zur Approximation des Referenzobjekts dessen Bounding Box benutzen [9], mussten sie als ungeeignet für die Verwendung in einer räumlichen Anfragesprache für Bauwerksmodelle bewertet werden. Daher wurden zwei neue, eigene Modelle zur Beschreibung direktonaler Modelle entwickelt und mit Hilfe der Punkt-mengentheorie formal definiert [5]. Die Notwendigkeit der Einführung zweier divergierender Modelle leitet sich aus den unterschiedlichen Bedürfnissen verschiedener Anwendungsszenarien ab. Aus dem selben Grund wurden für beide Modelle eine strikte und eine relaxierte Variante definiert. In beiden Modellen bildet das Koordinatensystem den durch den Nutzer gewählten Referenzrahmen.

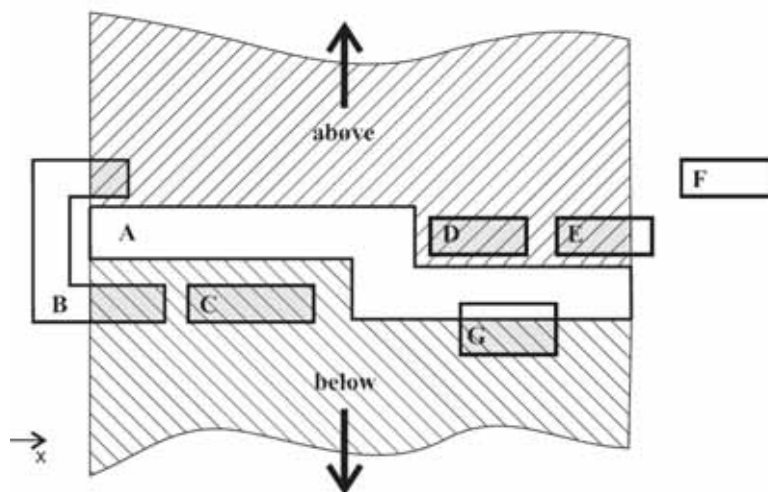


Abb. 3: Das projektionsbasierte Richtungsmodell verwendet die Extrusion des Referenzobjekts A entlang der betrachteten Koordinatenachse als Richtungspartition. In der strikten Variante des Operators *above* wird lediglich für das Zielobjekte D *wahr* zurückgegeben, in der relaxierten Variante hingegen auch für die Objekte B, E und G.

Beim projektionsbasierten Modell wird das Referenzobjekt entlang der betrachteten Koordinatenachse extrudiert (Abb. 3). Der jeweilige Operator gibt genau dann *wahr* zurück, wenn es eine Überlappung zwischen dem dabei überstrichenen Raum und dem Zielobjekt gibt. Bei der relaxierten Variante der projektionsbasierten Operatoren ist es ausreichend, wenn ein Teil des Zielobjekts den Extrusionskörper schneidet. Bei der

strikten Variante muss der Zielkörper hingegen vollständig innerhalb der Extrusion liegen.

Das zweite Modell basiert auf Halbräumen (Abb. 4). Diese werden durch die Seiten der Bounding Box gebildet, die das Referenzobjekt umgibt. Jeder dieser Halbräume bildet eine Richtungspartition: Fällt das Zielobjekt in eine dieser Richtungspartitionen, gibt der dazugehörige Operator *wahr* zurück. Auch hier gibt es wiederum strikte und relaxierte Varianten der Operatoren, die analog zum projektionsbasierten Modell definiert sind.

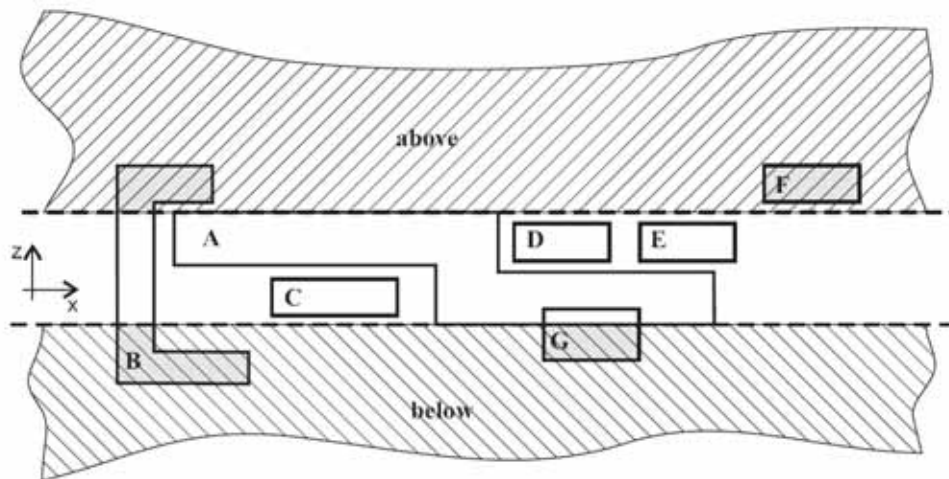


Abb. 4: Beim Halbraum-basierten Richtungsmodell werden die Richtungspartitionen durch Halbräume gebildet, die durch die Seiten der Bounding Box gebildet werden, die das Referenzobjekt umgibt. Die strikte Variante des Operators *above* gibt für die Zielobjekte B und F *wahr* zurück die relaxierte Variante hingegen nur für das Objekte F.

4 Umsetzung der Anfragesprache auf Basis von SQL:1999

Die technische Umsetzung der räumlichen Anfragesprache wurde auf Basis der weit verbreiteten deklarativen Anfragesprache SQL:1999 realisiert. Diese jüngste Version des internationalen Standards beschreibt objekt-relationale Datenbanksysteme (ORDBMS), also Datenbanken, die die Erweiterung der Basisdatentypen um nutzerdefinierte, komplexe Datentypen erlauben, die zudem Memberfunktionen aufweisen können [19]. Entsprechend wurden die vier räumlichen Typen als komplexe Datentypen modelliert und die für sie verfügbaren räumlichen Operatoren als Memberprozeduren dieser Typen. Als Implementierungsbasis diente uns dabei das kommerzielle ORDBMS Oracle. Die im nächsten Abschnitt beschriebenen Algorithmen zur Auswertung der entsprechenden räumlichen Operatoren wurden mit Hilfe von *Java Stored Procedures* umgesetzt, also Prozeduren, die auf der Serverseite gespeichert und ausgeführt werden.

5 Implementierung räumlicher Operatoren

Zur Implementierung der räumlichen Operatoren wurden verschiedene Algorithmen entwickelt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Eine Implementierungsvariante beruht auf dem Einsatz der Datenstruktur *Oktalbaum* bzw. seinen Derivaten, die andere Variante verwendet die *Boundary Representation* der Operanden.

5.1 Oktalbaumbasierte Implementierung

Beim Oktalbaum handelt es sich um eine hierarchische Struktur, die zur Beschreibung eines Körpers den 3D-Raum rekursiv zerteilt. Jeder Knoten im dabei entstehenden Baum repräsentiert eine würfelförmige Zelle, die einen Vorgänger (Elternzelle) und entweder 0 oder 8 Nachfolger (Kindzellen) hat [16]. In der Regel wird jeder Zelle eine Farbe zugewiesen: Vollständig außerhalb des zu beschreibenden Objekts liegende Zellen sind weiß, vollständig innerhalb liegende Zellen sind schwarz und auf dem Rand liegende Zellen sind grau. Während schwarze und weiße Zellen nicht weiter verfeinert werden und somit Blattknoten im Oktalbaum darstellen, repräsentieren graue Zellen immer Knoten, die Kindzellen besitzen. Alle Kindzellen sind gleich groß und ihre Vereinigung ergibt die Elternzelle, wodurch das Verhältnis der Kantenlänge einer Kindzelle zur Elternzelle auf 1:2 festgelegt ist. Betrachtet man eine Zelle an einer beliebigen Position im Baum mit ihrer kompletten nachfolgenden Struktur, so erhält man wieder einen Oktalbaum. Diese Eigenschaft vereinfacht die Anwendung rekursiver Algorithmen.

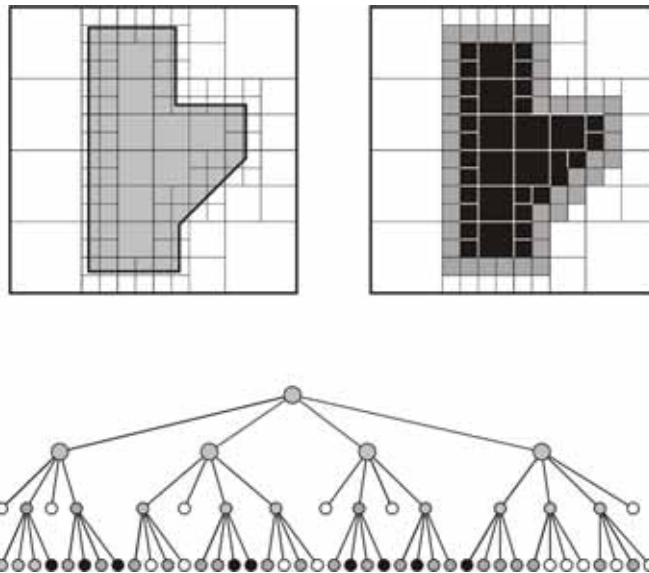


Abb. 5: Ein Quadtree zur Diskretisierung einer 2D-Region. Schwarze Zellen liegen vollständig innerhalb, weiße Zellen vollständig außerhalb und graue Zellen auf dem Rand der Region. Weiße und schwarze Zellen werden nicht weiter verfeinert. Die Oktalbaumcodierung arbeitet analog für den 3D-Raum.

Sowohl für die metrischen [4] und direktionalen [5] als auch für die topologischen Operatoren [6] wurden Algorithmen auf Basis der Oktalbaumstruktur entwickelt. Allen Algorithmen gemeinsam ist, dass die Operanden jeweils in einem separaten Oktalbaum codiert und die resultierenden Bäume im folgenden in Form einer simultanen, rekursiven Breitensuche abgearbeitet werden. Dabei werden auf jeder Hierarchieebene die jeweiligen Oktantenpaare bestimmten operatorspezifischen Tests unterworfen. Diese entscheiden, ob die Rekursion mit positivem oder negativem Ergebnis abgebrochen wird oder eine weitere Verfeinerung notwendig ist. Die maximale Rekursionstiefe wird durch den Nutzer festgelegt, der auf diese Weise zwischen der erforderlichen Genauigkeit und dem benötigten Rechenaufwand abwägen kann.

Koppelt man die Erzeugung des Oktalbaums an die Abarbeitung des Algorithmus, muss dieser nur an den Stellen in der nötigen Feinheit aufgebaut werden, die für den jeweiligen Operator von Interesse, d.h. von Bedeutung für seinen Rückgabewert sind.

5.2 BRep-basierte Implementierung

Eine andere Variante der Implementierung ist durch die Ausnutzung der in der Datenbank abgelegten BRep-Struktur der einzelnen Bauteile gegeben. Im Gegensatz zur Oktalbaum-basierten Implementierung arbeitet diese direkt mit den Facetten, d.h. auf der exakten Struktur, und liefert dementsprechend auch exakte Ergebnisse. Naive Implementierungen auf Basis der BRep-Struktur erfordern einen hohen Rechenaufwand oder sind zum Beispiel auf konvexe Körper beschränkt. In unserem Ansatz nutzen wir deshalb eine hierarchische Repräsentation der facettierten Objekte. Diese ermöglicht es, mittels einer *divide-and-conquer*-Strategie die für das Endergebnis unbedeutenden Teilbereiche des Objekts ähnlich wie im Oktalbaum-basierten Ansatz frühzeitig auszuschließen und so überflüssige Berechnungen einzusparen. Für das Ergebnis interessante Stellen werden dagegen immer detaillierter betrachtet.

Zur hierarchischen Objektrepräsentation wurden AABB-Bäume gewählt. AABB-Bäume sind Binärbäume, die rekursiv durch Aufteilung des Raumes jeweils entlang einer Koordinatenrichtung gebildet werden. Jedem Knoten des Baumes ist ein Hüllvolumen in Form eines Quaders (axis-aligned bounding box, AABB) zugewiesen, das die beiden Hüllvolumen seiner Kinder umschließt (Abb. 6). Die Blätter des Baumes enthalten eine oder mehrere Facetten des Geometrieobjekts sowie das Hüllquader, das diese Facetten beinhaltet. Für die konkrete Partitionierung der Facetten gibt es verschiedene Strategien, die jedoch alle die Lokalität der Facetten berücksichtigen [2].

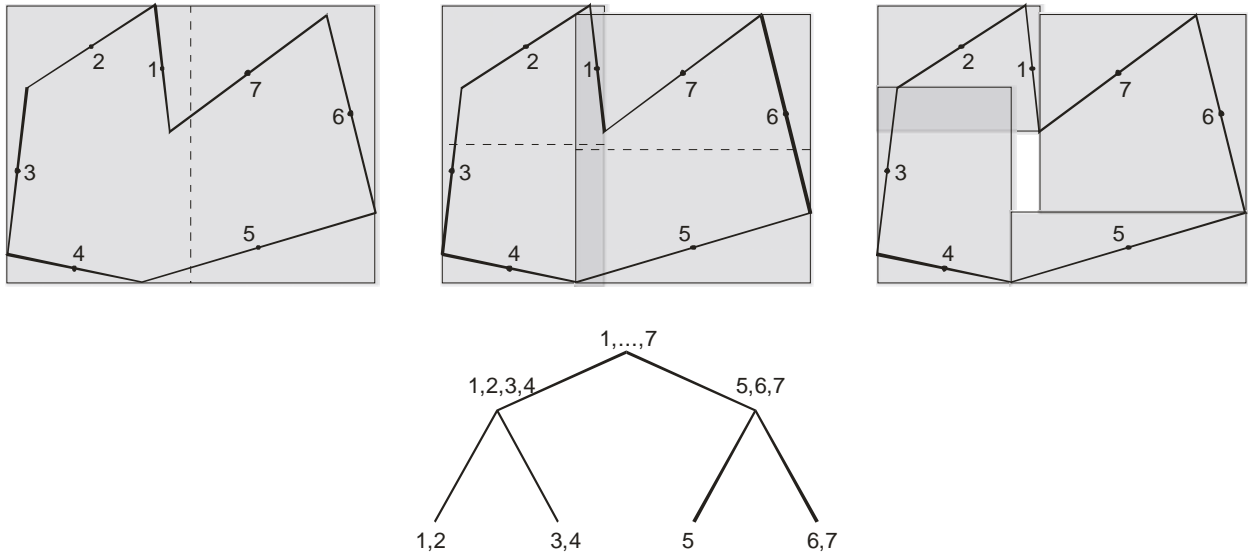


Abb. 6: Generierung eines AABB-Baums am Beispiel eines Polygons in 2D. Der Raum wird auf jeder Verfeinerungsstufe jeweils entlang der längsten Achse in zwei Hälften geteilt. Dabei werden die Kanten des Polygons über ihren Mittelpunkt einer der Hälften zugeordnet. Anschließend wird um alle zu einer Hälfte gehörenden Kanten eine Bounding Box gelegt, für die die Aufteilung rekursiv wiederholt wird.

Die Wahl der AABB-Baum-Datenstruktur begründet sich in der einfachen Struktur, die zum einen eine schnelle Generierung des Baumes und zum anderen extrem simple und somit kostengünstige Tests auf den AABBs, wie z.B. Schnitttests, ermöglicht.

Die konkrete *divide-and-conquer*-Strategie hängt vom jeweiligen Operator ab. Die Grundidee ist dabei stets ähnlich der des Oktalbaum-basierten Ansatzes. In einem breitenorientierten Durchlauf der AABB-Bäume der beiden Operanden erfolgt eine Paarbildung der Hüllvolumina. Einfache Tests auf diesen AABB-Paaren bestimmen, wo weiter verfeinert werden muss. In den Blättern des AABB-Baumes erfolgen schließlich exakte Tests mit den Facetten. So wird zum Beispiel bei metrischen Operatoren der GJK-Algorithmus zur Berechnung des Abstands zweier konvexer Facetten herangezogen [13], bei topologischen Operatoren unter anderem ein Schnitttest [1]. Auf Grund der einfachen Geometrie der Facetten ist der Aufwand für diese Tests äußerst gering.

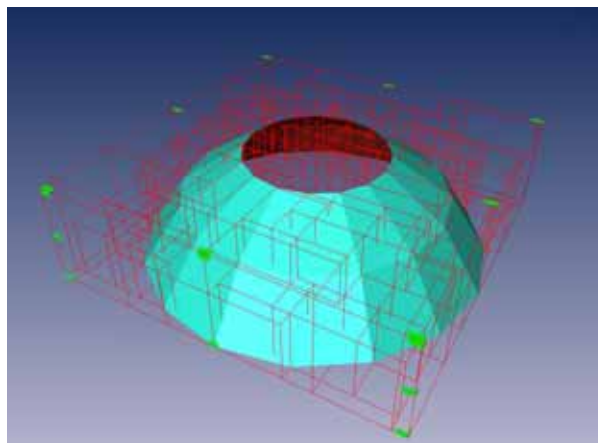


Abb. 7: Hierarchische Geometrirepräsentation mittels AABB-Bäumen in 3D.

6 Zusammenfassung

Eine räumliche Anfragesprache für dreidimensionale Gebäudemodelle stellt dem Nutzer eine höhere Abstraktion geometrischer Informationen zur Verfügung und eröffnet ein breites Spektrum von Anwendungsgebieten, darunter die Bildung von Partialmodellen anhand räumlicher Kriterien und die räumliche Analyse von Bauwerksmodellen. Grundlage für die Entwicklung einer räumlichen Anfragesprache ist die formale Spezifikation der Semantik der räumlichen Typen und der räumlichen Operatoren. Die topologische, metrische und direktionale Operatoren wurden mit Hilfe von Punktmengentheorie und Punktmengentopologie definiert. Zur Implementierung dieser Operatoren wurden zwei Varianten entwickelt, eine oktalbaumbasierte und eine auf der *Boundary Representation* der Operanden beruhende.

7 Ausblick

Im Fokus unserer zukünftigen Forschungsarbeit liegt die weitere Beschleunigung der entwickelten Algorithmen durch den Einsatz von räumlichen Indizierungstechniken innerhalb der Datenbank. Ein weiteres Ziel ist die Speicherung der mit den einzelnen Bauteilen assoziierten nicht-geometrischen Informationen aus dem Produktmodell wie Bauteiltyp, Material etc., um diese Daten ebenfalls als Selektionskriterium in einer Anfrage einsetzen zu können. Schließlich soll anhand realistischer Anwendungsfälle der Nutzen der von uns entwickelten räumlichen Anfragesprache nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Akenine-Möller, T.: A Fast Triangle-Triangle Intersection Test. *Journal of Graphical Tools*, 1997, 2(2) 25-30
- [2] van den Bergen, G.: Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees. *J. Graph. Tools*, 1997, 2(4) 1-13
- [3] Borrmann, A., van Treeck, C. & Rank, E.. Towards a 3D Spatial Query Language for Building Information Models. In: *Proc. of the Joint Int. Conf. for Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, 2006.
- [4] Borrmann, A.; Schraufstetter, S.; van Treeck, C.; Rank, E.: An iterative, octree-based algorithm for distance computation between polyhedra with complex surfaces. *Proc. of the Int. ASCE Workshop on Computing in Civil Engineering*, 2007
- [5] Borrmann, A.; Schraufstetter, S.; van Treeck, C.; Rank, E.: An octree-based implementation of directional operators in a 3D Spatial Query Language for Building Information Models. *Proc. of the 24th CIB-W78 Conference*, 2007
- [6] Borrmann, A.: Computerunterstützung verteilt-kooperativer Bauplanung durch Integration interaktiver Simulationen und räumlicher Datenbanken. *Dissertation, Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München*, 2007

- [7] Eastman, C.: Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction. CRC Press, 1999
- [8] Egenhofer, M. Spatial SQL: A Query and Presentation Language. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 1994, 6 (1) 86-95
- [9] Egenhofer, M. & Franzosa, R.. Point-Set Topological Spatial Relations. *Int. Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(2), 161–174.
- [10] Eurostep Ltd.: The Eurostep Model Server for IFC. <http://www.eurostep.com/prodserv/ems/ems.html>
- [11] Frank, A.: Qualitative Spatial Reasoning: Cardinal Directions as an Example. *Int. Journal of Geographic Information Systems*, 1996, 10(3) 269-290
- [12] Gaal, S. Point Set Topology. Academic Press, 1964.
- [13] Gilbert, E. G.; Johnson, D. W.; Keerthi S. S.: A Fast Procedure for Computing the Distance between Complex Objects in Three-Dimensional Space. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1998, 4(2) 193-203
- [14] Hong, J.: Qualitative Distance and Direction Reasoning in Geographic Space. Ph.D. thesis, University of Maine, 1994
- [15] IAI – International Alliance for Interoperability. Industry Foundation Classes. <http://www.iai-international.org>
- [16] Meagher, D.: Geometric modeling using octree encoding. *IEEE Computer Graphics and Image Processing*, 1982, 19(2) 129-147
- [17] Peuquet, D.; Zhan, C.: An Algorithm to Determine the Directional Relationship Between Arbitrarily-Shaped Polygons in the Plane. *Pattern Recognition*, 1987, 20(1) 65-74
- [18] Romberg, R. Gebäudemodell-basierte Strukturanalyse im Bauwesen. Dissertation, Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München, 2005
- [19] SQL:1999, ISO-Standard ANSI/ISO/IEC 9075-1:99. International Standards Organization
- [20] van Treeck, C.. Gebäudemodell-basierte Simulation von Raumlufströmungen. Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München, 2004