

Abschlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt „Architektonische Komplexe“

1 Allgemeine Angaben

1.1 DFG-Geschäftszeichen

KO 1488/8-1, 8-2

1.2 Antragsteller

Prof. Dr. ès. sc. tech. Niklaus Kohler

1.3 Institut/Lehrstuhl

Institut für Industrielle Bauproduktion (ifib)
Fakultät für Architektur
Universität Karlsruhe (TH)

1.4 Aus DFG-Mitteln bezahlte wissenschaftliche Mitarbeiter mit Angabe des Beschäftigungszeitraums

Dr. rer. nat. Patrick Erik Bradley	01.09.2004 – 31.12.2006
Dipl.-Ing. Norbert Paul	01.09.2004 – 31.12.2007
Dipl.-Ing. Martin Behnisch	01.01.2007 – 31.12.2007

1.5 Thema des Projekts

Topologisches Modellieren als Grundlage für raum-zeitlich konsistente Gebäudeinformationssysteme

1.6 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

01.09.2004 – 31.12.2007

1.7 Fachgebiet, Arbeitsrichtung

Architektur, Geodäsie, Mathematik

Arbeitsrichtung: Gebäudeproduktmodellierung, Vermessung, Computer Aided Architectural Design (CAAD)

1.8 Verwertungsfelder

Bauplanung

1.9 Am Projekt beteiligte Kooperationspartner

2 Zusammenfassung

2.1 Darstellung der wesentlichen Ergebnisse

Topologie ist eine wesentliche Grundlage der Gebäudemodellierung. Daher wurden topologische Räume und ihre Darstellung am Rechner untersucht. Dabei entstand zunächst das Datenmodell $\mathcal{DKetKomp}$ als Kategorie der relationalen Kettenkomplexe. Dieses ist im Wesentlichen die Übertragung der Definition von Kettenkomplexen in das relationale Datenmodell. Aus der Definition der Topologie in $\mathcal{DKetKomp}$ entstand \mathcal{DTop} , die Kategorie der topologischen Datenbanken, welche sich als ein für jeden endlichen topologischen Raum hinreichend mächtiges Datenmodell erwies. Ursprünglich waren die Datenmodelle $\mathcal{DKetKomp}$ und \mathcal{DTop} lediglich als Referenzmodelle zum topologischen Modellieren vorgesehen. Die gefundenen Datenmodelle erwiesen sich jedoch darüber hinaus als von sehr einfacher Natur und in naheliegender Weise implementierbar, sodass diese selbst als geeignet für die konsistente raum-zeitliche Modellierung von Gebäuden in verschiedenen Detaillierungsstufen angesehen werden konnten.

Die Kategorie $\mathcal{DKetKomp}$ erlaubt die Speicherung topologischer Komplexe mit relativ wenig Informationsverlust, \mathcal{DTop} erlaubt gar die Informationsverlustfreiheit in der Speicherung endlicher topologischer Räume und ist asymptotisch effizienteste Datenstruktur für Alexandrovräume. Die kategorielle Sichtweise an sich erlaubt die Datenbankmodellierung von Beziehungen zwischen architektonischen Räumen vermöge ihrer Morphismen.

Es konnten topologische Datenbankabfragen entwickelt werden, was ein allgemeines Datenmodell zum topologischen Modellieren mit relationalen Datenbanken ergibt. Hierbei muss eine Abfragesprache i.A. die transitive Hülle einer Relation berechnen können, was in den meisten praktisch auftretenden Fällen jedoch nicht erforderlich sein dürfte.

Schließlich wurden die Euler-Operatoren aus der Volumenmodellierung zu Euler-Poincaré-Operatoren für architektonische Komplexe erweitert und gezeigt, dass diese sich algebraisch aus zwei fundamentalen Operatoren aufbauen lassen. Für die Berechnung der Bettizahlen von topologischen Modellen architektonischer Komplexe wurde ein Algorithmus gefunden, und dieser verwendet dabei Euler-Poincaré-Operatoren.

2.2 Ausblick auf künftige Arbeiten und Beschreibung möglicher Anwendung

In der Zukunft sollte die Kopplung von Geometrie und Topologie theoretisch und in großer Allgemeinheit untersucht werden, damit spätere Implementierungen in raumzeitlichen Informationssystemen nicht auf spezielle Geometrien (z.B. konvexe Polyeder) festgelegt sind. Weiter sollte eine Theorie relativer Euler-Poincaré-Operatoren entwickelt werden, um auch für Morphismen Konsistenzbedingungen zu haben und topologische Invarianten berechnen zu können.

Als Ziel für eine mögliche praktische Anwendung ist die Implementierung zu marktreifen Informations- und Planungswerkzeugen in der Bauplanung zu

nennen. Ebenso sollten die Ergebnisse die Ausarbeitung vereinfachter Standards in der Gebäudeinformationsmodellierung erlauben, welche deren Topologie berücksichtigen. Schließlich sollte eine Weiterentwicklung der Projektergebnisse zukünftig zu höherdimensionalen Informationssystemen beispielsweise für geographische Daten führen können.

3 Arbeits- und Ergebnisbericht

Eine detaillierte Ausführung findet sich im Technischen Bericht [5].

3.1 Ausgangslage

Die Entwicklung von räumlich und zeitlich konsistenten Produktmodellen für den Lebenszyklus von Gebäuden führt immer auch zu einer Beschäftigung mit deren topologischen Eigenschaften. Topologie ist somit eine Grundlage der Modellierung und ist auch zumindest implizit in allen bisherigen Ansätzen zur Gebäudemodellierung vorhanden.

Ausgangsfrage. Die eingangs des Projekts gestellte Frage lautete angesichts der existierenden teilweise hoch komplexen Datenmodelle im Bereich der Gebäudeinformationssysteme:

Gibt es eine einheitliche konsistente Theorie zur raum-zeitlichen Modellierung von Gebäuden in ihrem Lebenszyklus, und wie ist diese implementierbar?

Eine Bejahung der Frage wäre der Nachweis der Existenz eines integrierten Datenmodells, welches räumlich und zeitlich konsistent ist.

Zielsetzung. Als Projektziel wurde dieser Nachweis durch die Entwicklung einer Theorie gesetzt, welche auf der mengentheoretischen und algebraischen Topologie gründet. Das Modell sollte sich aus drei Teilmodellen zusammensetzen:

- topologisches Modell,
- metrisches Modell,
- architektonisches Modell.

Die Tragfähigkeit des Modells sollte am Ende prototypisch demonstriert werden.

Arbeitshypothesen. Es wurde für das Projekt vorausgesetzt, dass eine Zuhilfenahme der Mathematik, insbesondere der Topologie, erforderlich ist. In der Mathematik werden topologische Räume mit bestimmten algebraischen Eigenschaften als Komplex bezeichnet. Diese sind zur Beschreibung von Architektur

(oder ähnlich strukturierten Räumen wie z.B. Schiffe oder geologische Schichtungen) geradezu prädestiniert. Eine formale Beschreibung architektonischer Räume als dreidimensionale Komplexe der Form

$$\text{Volumen} \xrightarrow{\partial_V} \text{Flächen} \xrightarrow{\partial_F} \text{Kanten} \xrightarrow{\partial_K} \text{Punkte}$$

sollte zur Entwicklung eines konsistenten Datenmodells führen, in welchem der Ablauf $\text{Aufmass} \rightarrow \text{Zeichnen} \rightarrow \text{Planen}$ integriert ist.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Nach Anfertigung einer Internetpräsenz und Auswahl der studentischen Mitarbeiter wurde ein eigener Rechner als Projektserver bereitgestellt. Um den Hilfskräften das nötige Vorwissen zu vermitteln, wurde am ifib ein Seminar mit dem Titel *Einführung in die algebraische Topologie für die Architektur* für Projektteilnehmer und Interessierte abgehalten. Die Themen umfassten: Topologie, Algebraische Topologie und das Relationale Datenmodell. Es ergab sich eine Fortführung von Lehrveranstaltungen zu projektrelevanten Themen: die Vorlesungen *Mathematik für Architekten*, *Das elektronische Büro* und *Datenbanken für Architekten*, sowie später die Arbeitsgemeinschaft *Raumzeitinformationssysteme und Geodäsie*, in welcher die Habilitationsschrift [7] studiert wurde.

Im Projektverlauf zeigte sich, dass die direkte Übertragung der formalen Definition von „Komplex“ in ein relationales Datenbankschema erstaunlich einfach ist. Durch geringfügige Modifikationen konnte auch der Verlust an topologischer Information kontrolliert werden. Somit war ein Referenzmodell für topologische Datenstrukturen gegeben. Das Vorbild hierfür waren die abstrakten Turing-Maschinen als Referenzmodell für die Programmiersprachen. Eine Verallgemeinerung führte zu den topologischen Datenbanken, die sich als geeignetes Referenzmodell für beliebige endliche topologische Räume erwiesen. Dieses wurde mit $\mathcal{D}Top$ bezeichnet, das Referenzmodell für die Kettenkomplexe mit $\mathcal{DKetKomp}$.

Für $\mathcal{D}Top$ wurde untersucht, wie sich die grundlegenden Begriffe der Topologie auf relationale Datenbanken übertragen lassen. Für Standardkonstruktionen wie Produktraum, Spurtopologie oder Verkleben, sowie für die Bestimmung von Initial- und Finaltopologien, wurden entsprechende relationale Datenbankabfragen formuliert. Da $\mathcal{D}Top$ eher die *mengentheoretische* Topologie betrifft, wurde dessen ausführliche Behandlung in der Dissertation „Topologische Datenbanken für Architektonische Räume“ [10] vorgenommen. Das Modell $\mathcal{DKetKomp}$ mit seiner Ausrichtung auf die *algebraische* Topologie wurde als Grundlage für das weitere Projekt genommen.

Der Bezug zur Architektur wurde durch die Formulierung von Postulaten hergestellt. Diese präzisieren die Formulierung im ersten Antrag, wonach Architektur immer auch eine Zerlegung des euklidischen Raums ist.

Es wurde eine Definition des Begriffs „Architektonischer Komplex“ als gewichteter Graph festgelegt und die Euleroperatoren auf architektonische Komplexe verallgemeinert und studiert [2].

Für die Implementierung wurden keine weiteren topologischen Datenstrukturen mehr gesucht, sondern mit der durch das Referenzmodell selbst nahegelegten Implementierung fortgefahren [9, 11]. Dazu wurde eine MySQL-Datenbank mit einem relationalen Kettenkomplex auf dem Projektserver und ein Java-Client zu dessen Visualisierung bereitgestellt. Eine topologische Datenbank zur Visualisierung dynamischer urbaner Daten wurde eingerichtet.

Erste Ergebnisse wurden auf dem Forum Bauinformatik 2005 in Cottbus publiziert [12]. Der ausführlichere Beitrag [4] wurde bei der Zeitschrift *Formal Aspects of Computing* leider abgelehnt. Dessen Überarbeitung wurde in der Zeitschrift *The Computer Journal* auf Wunsch des Herausgebers Fionn Murtagh eingereicht. Die Implementierungsstrategie wurde in [8] veröffentlicht. Eine ausführliche Darstellung der im Projektverlauf durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse wurde im technischen Bericht [5] festgehalten.

Abweichungen. Es folgt eine Betrachtung der betroffenen Arbeitspakete.

DTop 1. Statt einer Datenstruktur wurde gleich eine Erweiterung des relationalen Datenmodells für das topologische Modellieren von Architektur entwickelt. Anstelle der Reichweite von Veränderungen wurde im Hinblick auf Versionskontrolle ein Konzept zur Übertragung der Unix-Befehle `diff` und `patch` auf topologische Räume behandelt.

Met 1. Die Geometrie bei Skizzierungen und die dauerhaften Bettzahlen wurden nicht untersucht.

Top2. Auf die Berechnung von relativen Bettzahlen wurde verzichtet.

DTop 2. Die entwickelten Modelle erübrigten eine Verallgemeinerung der PLAV-Struktur. Die Entscheidung der Äquivalenz topologischer Räume würde auch das Problem der Äquivalenz von Graphen lösen. Dies ist jedoch ein NP-Problem von dem noch nicht bekannt ist, ob es NP-vollständig ist oder nicht.

Met 2. Dieses Arbeitspaket erfordert die Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut Karlsruhe. Deren Antrag wurde jedoch nicht bewilligt, weshalb dieses Paket auch nicht bearbeitet wurde.

Imp 1. Mit der Implementierung wurde zwei Monate später als vorgesehen erst im November 2005 begonnen.

DTop 3. Da die entwickelten Modelle keine Dimensionsbeschränkung haben, war eine gesonderte Berücksichtigung der Zeit nicht mehr notwendig.

Imp 2. Ein lauffähiger Prototyp wurde leider nicht erreicht.

DKomp. Für die Untersuchung der architektonischen Komplexe konnte auf Filtrierungen verzichtet werden. Zu deren algebraischer Topologie waren grundlegende Überlegungen notwendig. Transaktionen wurden nicht behandelt.

DHKomp. Dieses Arbeitspaket wurde zu Gunsten von DKomp aufgegeben.

Imp. Der angestrebte Prototyp wurde nicht fertig gestellt.

Besondere Probleme. Insbesondere die Imp-Pakete erwiesen sich als mit Schwierigkeiten behaftet, obwohl die Arbeiten zunächst viel versprechend aussahen. Im Projektverlauf wurde jedoch eine grundlegende Überarbeitung des Konzepts erforderlich. Zunächst war eine Vielzahl von Implementierungen der

Schnittstelle `Complex` entstanden. Diese unterschieden sich lediglich in den Implementierungen der Java-Schnittstellen `Set` und `Map`. Das Benennungsschema für die Datenbanktabellen wurde im Laufe des Projekts als zu unflexibel erkannt und durch einen Komplexkatalog ersetzt. Der neue gewählte Ansatz erforderte eine sehr zeitaufwändige Refaktorisierung des gesamten Projekts auf das neue Konzept. Dadurch wurde letztlich eine Fertigstellung des Prototyps zum Projektende nicht gewährleistet. Der technische Bericht [5] enthält eine ausführliche Beschreibung der verfolgten Ansätze sowie der fertig gestellten Programmbestandteile.

3.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Ergebnisse. Die Beobachtung, dass Architektur Räume partitioniert, führt zunächst zum Begriff der *architektonischen Darstellung* als Partition eines Raums in endlich viele Teile, die jeweils homöomorph zu einem zusammenhängenden offenen Teil eines euklidischen Raums \mathbb{R}^q sind. Die Beliebigkeit der Dimensionszahl q sei hier hervorgehoben, da Bauwerke nicht allein räumliche¹ Information enthalten. Es ergeben sich die Postulate, welche den topologischen Methoden zur Behandlung architektonischer Räume Zugang verschaffen [4, §4.2]:

Postulat 1. *Architektonisches Entwerfen ist die Festlegung einer architektonischen Darstellung eines kompakten Raumes.*

Postulat 2. *Eine architektonische Darstellung beim Entwerfen in der Praxis lässt sich stets derart verfeinern, dass der dadurch entstehende Quotientenraum die Struktur eines endlichen CW-Komplexes aufweist.*

Postulat 1 ergibt eine Beziehung zwischen Architektur und Topologie. Postulat 2 wiederum ordnet dieser Architektur CW-Komplexe zu, und die Endlichkeit ermöglicht deren Speicherung in einer Datenbank. Ein natürliches Datenmodell für einen CW-Komplex bildet sein Kettenkomplex, dessen Randoperator ∂ eine Matrix mit i.d.R. vielen Nulleinträgen ist. Aus topologischer Sicht sind die meisten davon überflüssig. Deren Entfernung führt zu einer partiellen Matrix, welche die neue Datenstruktur *DKetKomp* der *relationalen Kettenkomplexe* konstituiert. Diese haben signifikant weniger Informationsverluste als Kettenkomplexe [4, §6.5]. Es stellte sich heraus, dass *DKetKomp* eine topologische Verallgemeinerung von CW-Komplexen umfasst: die *architektonischen Komplexe*. Im Gegensatz zu CW-Komplexen sind deren Bausteine nicht Zellen, sondern allgemeinere zusammenhängende offene Teilräume von \mathbb{R}^q , genannt *Regionen*.

Die in der Volumenmodellierung bekannten Euler-Operatoren erlauben eine Verallgemeinerung zu *Euler-Poincaré-Operatoren* für architektonische Komplexe. Ihre Wichtigkeit für die Modellierung liegt darin, dass mit ihnen Komplexe derart verändert werden können, dass die Konsistenzregel $\partial \circ \partial = 0$ stets gewahrt wird. Es ergab sich das in [2, §6] präziser formulierte Resultat:

Satz 1. *Die unendlich vielen Euler-Poincaré-Operatoren lassen sich algebraisch aus zwei fundamentalen Euler-Poincaré-Operatoren aufbauen.*

¹im üblichen Wortsinn

Formeln zur Berechnung von Euler-Poincaré-Operatoren als Linearkombination von sog. *elementaren* Operatoren finden sich in [2, Prop. 6.7,6.13], wobei sich für gerade und ungerade Dimension technische Unterschiede ergaben. Die Problematik, dass Bettizahlen für architektonische Komplexe keine direkte topologische Interpretation haben, wurde durch algorithmisches Umwandeln in CW-Komplexe mithilfe von Euler-Poincaré-Operatoren gelöst [2, Alg. 8.16].

Ein wichtiges Anliegen des Projekts war neben der Behandlung von Objekten (z.B. Bauwerke) auch die Einbeziehung der Beziehungen zwischen betrachteten Objekten (z.B. Veränderung, Detaillierung). Dies führte zur *kategorialen* Sicht, die eine konsistente Modellierung von Informationen verschiedener Detaillierungsstufen und deren Zusammenhänge erlaubt.

Stand im Projekt selbst die algebraische Topologie im Vordergrund, so lag in der Dissertation [10] die mengentheoretische Topologie im Fokus. Dort wird der neue Begriff *topologischer Datentyp* eingeführt und studiert. Eine *topologische Datenbank* ist eine Familie topologischer Datentypen. Letztere bilden eine Kategorie \mathcal{DTop} und wurden als kategoriell äquivalent zu den Alexandrovräumen erkannt. Dieses Ergebnis schreiben wir Alexandrov selbst zu (ohne kategorielle Formulierung). Die Bedeutung für das Projekt liegt darin, dass die Objekte von $\mathcal{DKetKomp}$ eine Alexandroptopologie haben, also selbst einer topologischen Datenbank zugeordnet werden können.

\mathcal{DTop} bedeutet eine Erweiterung des relationalen Datenmodells um Topologie und bildet eine Datenstruktur, auf die sich jedes topologische Datenmodell zurückführen lässt. Im Fall von Komplexen ist $\mathcal{DKetKomp}$ die Referenzstruktur. Auf Grund ihrer Einfachheit lassen sie sich in naheliegender Weise implementieren [10, 8]. Der folgende Satz ist theoretisch von Belang [4, Thm. 8.25]:

Satz 2. *Kann eine relationale Abfragesprache \mathcal{L} die Stetigkeit in \mathcal{DTop} entscheiden, so kann \mathcal{L} auch entscheiden, ob ein Paar (a, b) in der transitiven Hülle einer Relation liegt oder nicht.*

Entsprechend gilt, dass die Berechenbarkeit der Initialtopologie die Berechenbarkeit der transitiven Hülle benötigt [4, Thm. 8.26]. Es ergab sich jedoch das aus praktischer Sicht bedeutsame Ergebnis [10, §4.3]:

Satz 3. *\mathcal{DTop} hat quadratische Speicherkomplexität und ist asymptotisch effizienteste Datenstruktur für Alexandrovräume. Bei festgelegter Schranke für den Grad einer Relation ist die Speicherkomplexität linear.*

In der Praxis dürfte der Grad einer Relation als beschränkt angenommen werden.

Ein Kriterium zur Entscheidung der Monotonie stetiger Abbildungen in \mathcal{DTop} wurde gefunden. Diese sind für die Modellierung von Detaillierungen relevant [10, Satz 4.25]. Ein UML-Schema für Planungssysteme [10, Abb. 6.9] sowie ein Konzept für Detaildatenbanken wurden entwickelt [10, §6.6].

Für die Realisierung wurde ein abstrakter Typ `Complex<T>` mit Implementierung `ComplexImpl<T>` geschaffen, wobei vermöge Generics der Zelltyp als Typparameter `T` übergeben wird. Zellen und Randoperator werden dem Komplex als

Objekte von $\text{Set}\langle T \rangle$ und $\text{Matrix}\langle T, T, \text{Integer} \rangle$ zugeordnet. Die Beschränkung auf konvexe Polytope als Zellen ermöglicht die Verwendung von JLinAlg . Das Konzept zur Implementierung von $\mathcal{DKetKomp}$ ist in [8] veröffentlicht.

Das Umfeld. Nähe besteht zu Arbeiten von E. Rank (TU München) in Räumlichen Datenbanken und Bauplanung, P. Milbradt (Hannover) in Algorithmischer Geometrie, sowie 3D/4D-GIS (M. Breunig, Osnabrück). Die G-Maps von P. Lienhardt (Poitiers) sind eine weitere topologische Datenstruktur. Umfassende Anwendung von Topologie gibt es an der Stanford University im Projekt *Topological Methods in Scientific Computing, Statistics and Computer Science*.

3.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Vermöge \mathcal{DTop} wurde das relationale Datenmodell um Topologie erweitert, und zusammen mit $\mathcal{DKetKomp}$ existieren nun einfache Referenzstrukturen für die topologische Modellierung, deren naheliegende Implementierung sich geradezu aufdrängt [10, 8]. Dieses Resultat geht über die Erwartungen des Projektverlaufs weit hinaus und lässt eine erhebliche Simplifikation existierender Gebäudeinformationsmodelle erwarten.

Unerwartete Fragestellungen. Auf Grund der dualen Behandlung von mengentheoretischen und algebraischen topologischen Datenstrukturen ergab sich die Frage nach dem Vergleich zwischen möglichen praktischen Realisierungen von \mathcal{DTop} und $\mathcal{DKetKomp}$. Insbesondere die Einbeziehung von Geometrie ist dabei zu klären, was auf eine theoretische Behandlung einer Kopplung von Geometrie und Topologie hinausläuft.

Betreffend Detailbibliotheken wurde in [10] die Monotonie als Konsistenzregel erkannt. Es ergibt sich die Frage, ob weitere Konsistenzregeln benötigt werden.

Euler-Poincaré-Operatoren wurden für architektonische Komplexe beliebiger Dimension entwickelt. Eine Entsprechung in der relativen Situation, d.h. für Komplexmorphisamen steht jedoch noch aus. Auch in der absoluten Situation ist die im Algorithmus aus [2] verwendete Zellzerlegung von Regionen noch explizit zu machen. Eine Charakterisierung der topologischen bzw. der CW-Komplexe unter den architektonischen Komplexen sowie eine Komplexitätsbetrachtung ist für die Konsistenzprüfung von topologischen Datenstrukturen noch von Nöten.

Die ursprünglich geplante Einbeziehung der Geodäsie dürfte sich in Zukunft als sehr fruchtbar erweisen im Hinblick auf die Verwaltung großer geographischer Datenmengen.

Beteiligung anderer Partner. Die zu entwickelnden vereinfachten Gebäudeinformationsmodelle und deren Implementierung erfordern die Expertise von Partnern aus dem Bereich der Gebäudeinformation. Die Arbeiten im Umfeld von E. Rank (TU München), etwa im DFG-Projekt Ra 624/17 „Räumliche Ab-

fragesprache für dreidimensionale Bauwerksmodelle“ oder die Dissertation [1] weisen auf eine weitere zukünftige mögliche Zusammenarbeit hin.

Für die Kopplung Geometrie und Topologie ist eine Zusammenarbeit mit Experten aus dem Bereich Computergraphik oder Algorithmische Geometrie und Topologie hilfreich, wie sie etwa im Umfeld von P. Milbradt (Hannover) und Anderen erfolgreich betrieben wird.

Die Einbeziehung der Geodäsie erfordert die Expertise aus dem Bereich der Geodatenbanken und GIS, wie sie beispielsweise aus dem Umfeld von M. Breunig (Osnabrück) geliefert werden kann.

Forschungsinitiative. Eine größer und interdisziplinär angelegte Forschungsinitiative unter Einbeziehung der oben vorgeschlagenen Partner würde wesentliche Fortschritte für den Bereich mathematischer Modellierung in der Architektur, CAAD und GIS erwarten lassen. Hierzu besteht bereits eine erste Zusammenarbeit mit E. Rank (TU München) und M. Breunig (Osnabrück).

3.5 Interdisziplinäre Weiterentwicklung

Architektur. Postulate 1 und 2 sind architekturtheoretischer Natur und haben zur Folge eine Vertiefung der existierenden Verbindung zwischen Architektur und Topologie auf informationstechnischem Niveau. Die theoretische und praktische Ausnutzung der Postulate entwickeln die Architektur- oder Bauinformatik weiter. Das Lemma [5, Lemma 3.2.3] fasst die Beziehung kategoriell zusammen, was eine konsistente Behandlung des Lebenszyklus von Bauwerken in ihren verschiedenen Detaillierungen erlaubt.

Informatik. Die Erweiterung \mathcal{DTop} des relationalen Datenmodells um Topologie sowie die neue Datenstruktur der relationalen Kettenkomplexe $\mathcal{DKetKomp}$ sind der Informatik zuzuordnen und wurden deshalb in der Zeitschrift *The Computer Journal* eingereicht [4]. Insbesondere die kategorielle Sichtweise ist für die Theorie von Informationssystemen und Datenbanken bereichernd. Ebenso ist das Komplexitätsresultat für die Informatik von Interesse.

Mathematik. Die Verallgemeinerung der Euler-Operatoren zu Euler-Poincaré-Operatoren sowie Algorithmen zur Berechnung von Bettizahlen für architektonische Komplexe gehören in die rechnergestützte Geometrie und wurden deshalb auch in einer dort angesiedelten Zeitschrift eingereicht [2].

Geodäsie. Der ursprüngliche Plan der Zusammenarbeit mit der Geodäsie ist weiterhin Erfolg versprechend, da es zwischen der Behandlung von Gebäude- oder geographischen Informationen viel Übereinstimmung gibt. Die Projektergebnisse sind relevant im Bereich N -dimensionaler GIS und Raumzeit-GIS, auch unter Einbeziehung verschiedener Detaillierungsstufen. Aus diesem Grund ergibt sich eine geplantes gemeinsames Projekt mit M. Breunig (Osnabrück) [6].

3.6 Verwertungspotenzial

Bewertung. Ein Verwertungspotenzial der erreichten Ergebnisse ist vorhanden, allerdings ist dafür noch ein gewisser Implementierungsaufwand notwendig.

Zukünftige Verwertungsmöglichkeiten. Eine Produktrealisierung der Ergebnisse als topologiebasiertes Gebäudeinformationssystem für die einzelnen Planungsabschnitte ist schon jetzt mit einfacher Geometrie (konvexe Polyeder) prinzipiell möglich. Darüber hinaus gehend sind noch offene Forschungsfragen zu klären, welche die für ein Gesamtplanungswerkzeug notwendige Einarbeitung von Detailbibliotheken sowie die Kopplung allgemeinerer Geometrie an die Topologie betreffen, bevor an eine wirtschaftliche Verwertung zu denken ist.

Für die Bauindustrie lassen die Ergebnisse in der Zukunft die Möglichkeit zur Weiterentwicklung der Standards für Gebäudeinformationsmodelle erwarten, insbesondere der Industry Foundation Classes (IFC).

Verwertungsmaßnahmen. Es wurden weder Verwertungsmaßnahmen eingeleitet noch sind welche in Planung.

Patente, Industriekooperationen o.ä. Es wurden keine Patente angemeldet oder Kooperationen mit der Industrie o.ä. geplant.

3.7 Beteiligte Wissenschaftler

Niklaus Kohler. Antragsteller. Betreuung der Dissertation [10].

Patrick Erik Bradley. Projektmitarbeiter. Informelle Betreuung der Dissertation [10]. Begleitkurse „Einführung in die algebraische Topologie für die Architektur“ und „Anwendungen von Kettenkomplexen in der Architektur“. Leitung der Arbeitsgemeinschaft „Raumzeitinformationssysteme und Geodäsie“. Alexandrovräume kategoriell äquivalent zu topologischen Datenbanken. Architektonische Komplexe als gewichtete Graphen. Euler-Poincaré-Operatoren. Homologie architektonischer Komplexe.

Publikationen: [12, 4, 2, 5, 11].

Norbert Paul. Projektmitarbeiter. Kurs „Relationale Datenbankschemata für topologische Räume“. und „Datenbanken für Architekten“. Dissertation [10]. Topologische Datenbanken und Alexandrovräume. Skizzierungen. UML-Schema für Planungssysteme. Implementierungsstrategie. Komplexität. Erweiterung des relationalen Datenmodells um Topologie. Monotoniekriterium. Konzept für Detailbibliotheken.

Publikationen: [12, 4, 8, 10, 5, 9, 11].

Martin Behnisch. Projektmitarbeiter. Topologische Datenbanken zur Visualisierung urbaner Daten.

Publikationen: [3].

4 Publikationen

4.1 Publikationen in Fachzeitschriften

1. Patrick Erik Bradley. *Euler-Poincaré operators for architectural complexes*. Eingereicht bei *International Journal of Computational Geometry & Applications*. [2]
2. Patrick Erik Bradley und Martin Behnisch. *A topological database for urban space-time data*. In Arbeit. [3]
3. Patrick Erik Bradley und Norbert Paul. *Using the relational model to capture topological information of spaces*. Eingereicht bei *The Computer Journal*. [4]
4. Norbert Paul und Patrick Erik Bradley. *A specification of The COMP*. In Arbeit. [11]

4.2 Kongressbeiträge

1. Norbert Paul und Patrick Erik Bradley. *Relationale Datenbanken für die Topologie architektonischer Räume*. Forum Bauinformatik 2005, Cottbus, 28-30 September 2005. [12]

Abstract. Architektur prägt dem Raum durch Partitionierung eine Topologie auf, die zu einem CW-Komplex verfeinerbar ist. Für diesen stellen wir eine Klasse relationaler Datenbankschemata DKetKomp vor und zeigen die Informationsverluste beim Übergang von Architektur zu DKetKomp. Aus DKetKomp wird dann DTop entwickelt und als zu den endlichen topologischen Räumen äquivalente Kategorie vorgestellt. Damit existiert keine Einschränkung bezüglich der Entwicklung von Datenstrukturen für endliche topologische Räume. Relationale Abfragen topologischer Eigenschaften und Konstruktionen werden demonstriert und für stetige Abbildungen eine charakteristische Konsistenzregel vorgestellt. DKetKomp und DTop sind direkt implementierbar und eignen sich als formale Grundlage für die Entwicklung raum-zeitlicher Modelle mit topologischer Information.

2. Norbert Paul. *A Complex-Based Building Information System*. In: Proc. 24th Conf. on Education in CAAD in Europe. Frankfurt am Main, 26-29 September 2007. [8]

Abstract. Volume modeling, finite element computation and spatial information systems have a common basis in topology, especially in the theory of complexes which are higher dimensional generalization of graphs. A complex is a topological space having a certain algebraic structure called "chain complex" and due to its similarity to real world buildings a special kind of complexes are even called "buildings" in mathematics. So it would be consequent to base a building information system upon this theory or at least try to do so. Some manipulations and queries of such spaces can

then be expressed by mappings which are similar to complex-morphisms and generalize the well known Euler operators. Other practical useful operations like assigning a detail to a spatial element (“refinement”), hiding details at lower scale views (“coarsening”) or spatial versioning, however, need a somewhat different kind of mappings. This paper shows a simple relational database representation of a finite complex as a basis for a database backed building information system. The implementation of operations on such a relational complex in Java will also be shown.

4.3 Buchbeiträge

4.4 Studien- und Diplomarbeiten, Dissertationen, Habilitationen, Berichte, sonstige Publikationen

1. Norbert Paul. *Topologische Datenbanken für Architektonische Räume*. Eingereichte Dissertation (2007). [10]
2. Patrick Erik Bradley und Norbert Paul. *Topologie als Grundlage für Informationssysteme*. Technischer Bericht (2008). [5]
3. Norbert Paul. *Pflichtenheft zum Forschungsprojekt Architektonische Komplexe*. Technischer Bericht (2008). [9]

Literatur

- [1] BORRMANN, ANDRÉ: *Computerunterstützung verteilt-kooperativer Bauplanung durch Integration interaktiver Simulationen und räumlicher Datenbanken*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2007.
- [2] BRADLEY, PATRICK ERIK: *Euler-Poincaré Operators for architectural complexes*. Eingereicht bei *International Journal of Computational Geometry & Applications*.
- [3] BRADLEY, PATRICK ERIK und MARTIN BEHNISCH: *A topological database for urban space-time data*. in Arbeit.
- [4] BRADLEY, PATRICK ERIK und NORBERT PAUL: *Using the relational model to capture topological information of spaces*. Eingereicht bei *The Computer Journal*.
- [5] BRADLEY, PATRICK ERIK und NORBERT PAUL: *Topologie als Grundlage für Gebäudeinformationssysteme*. Technischer Bericht 2008-01, Institut für Industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe, 2008.
- [6] BREUNIG, MARTIN, PATRICK ERIK BRADLEY, NORBERT PAUL und ANDREAS THOMSEN: *Modellierung und Verwaltung der Topologie in CAD-Systemen*. Antragstext, 2007.

- [7] GIELSDORF, FRANK: *Ausgleichsrechnung und raumbezogene Informationssysteme*. Habilitationsschrift. Technische Universität Berlin, 2005.
- [8] PAUL, NORBERT: *A Complex-Based Building Information System*. In: *Proc. 24th Conf. on Education in Computer Aided Arch. Design in Europe*, 2007.
- [9] PAUL, NORBERT: *Pflichtenheft zum Prototypen des Forschungsprojekts Architektonische Komplexe*. Technischer Bericht 2008-02, Institut für Industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe, 2008.
- [10] PAUL, NORBERT: *Topologische Datenbanken für Architektonische Räume*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2008.
- [11] PAUL, NORBERT und PATRICK ERIK BRADLEY: *A specification of The COMP*. in Arbeit.
- [12] PAUL, NORBERT und PATRICK ERIK BRADLEY: *Relationale Datenbanken für die Topologie architektonischer Räume*. In: *Forum Bauinformatik 2005. Junge Wissenschaftler forschen*, 2005.