

THOMAS BRINKHOFF

Räumliche Netzwerk- und Topologiedatenbanken

Räumliche Netzwerk- und Topologiedatenbanken stellen einen wichtigen Spezialfall von Geodatenbanken dar. Anwendungsfelder sind zum Beispiel Netzinformationssysteme, die Telekommunikation und der Bereich der Verkehrstelematik. In diesem Beitrag wird der Stand der Standardisierung entsprechender Klassenmodelle vorgestellt, es werden zweckmäßige Analyseoperationen und Datenanfragen erörtert und verschiedene Verfahren zur physischen Datenbankorganisation dargestellt. Zudem wird die Umsetzung von Netzwerk- und Topologiedatenbanken durch konkrete Geodatenbanksysteme behandelt.

1 Einleitung

Mit der zunehmenden Nutzung von räumlichen Informationen steigt auch der Bedarf, Geodaten geeignet zu verwalten und abzufragen. Diese Aufgabe wird verstärkt (objektrelationalen) Geodatenbanksystemen übertragen [Brinkhoff 2005; Rigaux et al. 2002], womit auch ein Übergang von proprietären Lösungen zu offenen Geoinformationsinfrastrukturen unterstützt wird.

Einen wichtigen Spezialfall von Geodatenbanken stellen räumliche Netzwerkdatenbanken dar: Sie kombinieren die Repräsentation der Netzwerktopologie mit Lageinformationen. Solche Datenbanken dienen u.a. zur Speicherung und Analyse von Straßennetzen (z.B. für Straßennetze und andere Anwendungen der Verkehrstelematik) und von Telekommunikationsnetzen (z.B. für Telefon- und Breitbandkabelnetze). Traditionelles Hauptanwendungsgebiet von Netzinformationssystemen (NIS) ist die Erfassung, die Dokumentation, der Betrieb und die Analyse von Ver- und Versorgungsnetzen (z.B. Strom-, Wasser-, Kanal- und Gasnetze bei Energieversorgungsunternehmen).

Nicht nur die Verwaltung von linienhaften Topologien ist für Geodatenbanksysteme von hervorgehobener Bedeutung, auch die Behandlung von flächenhaften Topologien stellt einen wichtigen Aspekt dar. Die Topologie kann entweder explizit durch Angaben entsprechender Beziehungen modelliert oder implizit aus der Geometrie abgeleitet werden. Bei der expliziten Modellierung ist es erforderlich, dass bei Änderungen der Geometrie auch alle betroffenen topologischen Beziehungen angepasst werden. Ohne explizite Modellierung wird eine topologische Eigenschaft bei Bedarf aus der Geometrie abgeleitet. So bestimmt das Geodatenbanksystem anhand der gespeicherten Koordinaten, ob zwei Flächen z.B. eine Überlappung aufweisen. Allerdings hat auch dieses Vorgehen Nachteile: Zum einen kann eine solche Vorgehensweise recht rechenaufwendig sein und zum anderen kann es aufgrund fehlerhafter oder ungenauer Geometriedaten zu falschen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Topologie kommen.

Nachfolgend werden die Besonderheiten von räumlichen Netzwerk- und Topologiedatenbanken hinsichtlich Modellierung, Analyseoperationen und Anfragen sowie der physischen Daten-

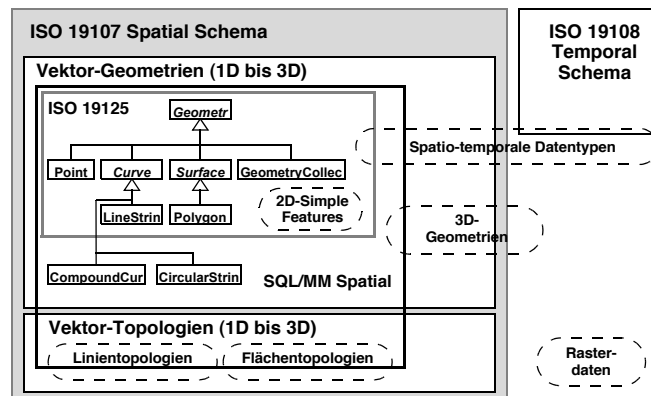
bankorganisation konzeptionell vorgestellt und die aktuelle Umsetzung dieser Ansätze durch konkrete Geodatenbanksysteme näher betrachtet.

2 Geometrie- und Topologieklassenmodelle

Einen wichtigen Aspekt offener interoperabler Geoinformationssysteme stellt die Standardisierung des verwendeten Geometrie-klassenmodells dar. Hierzu haben das *Open Geospatial Consortium (OGC)* und die *International Organization for Standardization (ISO)* eine Reihe von Spezifikationen erarbeitet.

Abbildung 1 illustriert, wie wichtige räumliche Datenrepräsentationsformen zu den nachfolgend vorgestellten Standards in Beziehung stehen.

Abb. 1: Schematische Übersicht über die Geodatenbanknormen ISO 19125-2 und »SQL/MM Spatial« im Verhältnis zu anderen ISO-Normen und zu den wichtigsten räumlichen Datenrepräsentationen



2.1 ISO 19107 Spatial Schema und ISO 19125 Simple Feature Access

Grundlage der Standardisierung von Geometrieklassen ist *ISO 19107:2003* »Geographic Information – Spatial Schema«, das ein konzeptionelles Datenmodell zur Beschreibung der räumlichen Eigenschaften von Geobjekten beinhaltet. Es umfasst sowohl die (Vektor-)Geometrie als auch die (Vektor-)Topologie bis zu einer maximalen Dimension von 3 und definiert zugehörige Operationen.

Auf dieser Basis steht das *Simple Feature Model*, das ursprünglich vom OGC erarbeitet wurde und nun als *ISO 19125:2004* »Simple Feature Access« genormt vorliegt. *Simple Features* sind Geometrien im zweidimensionalen Raum, deren Stützpunkte geradlinig miteinander verbunden sind. Während der erste Teil der Norm das Klassenmodell mit geometrischen Datentypen und zugehörigen Operationen beschreibt, behandelt der zweite Teil (»SQL option«) dessen Umsetzung in ein Datenbankschema.

Das Simple Feature Model unterstützt keine explizite Modellierung von topologischen Beziehungen. Stattdessen stehen Operationen zur Verfügung, mit denen zwei Geometrien bezüglich eines topologischen Prädikats getestet werden können.

Um die Semantik der topologischen Prädikate exakt festlegen zu können, bedient man sich der *Dimensionally Extended 9-Intersection Matrix (DE-9IM)* [Clementini & Di Felice 1996]. Dazu wird der Datenraum für jede Geometrie G in den Rand G_R , das Innere G_I und das Äußere G_A eingeteilt. Diese drei Teilbereiche sind paarweise disjunkt. Für Polygone ist deren Definition offenkundig. Für Linien bilden die beiden Endpunkte den Rand und die übrigen Punkte auf der Linie das Innere. Bei einem Punkt bildet dieser das Innere des Punktes; der Rand ist für Punkte hingegen leer.

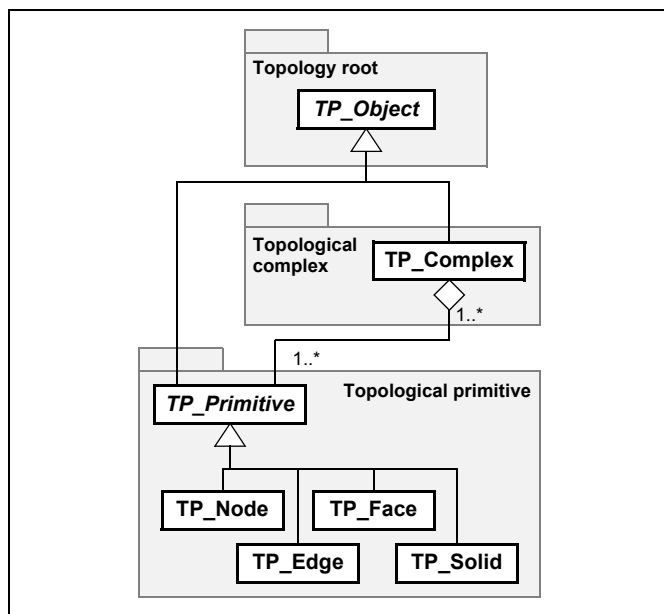
Die DE-9IM gibt für zwei Geometrien A und B die maximale Dimension d der neun Geometrien an, die entstehen, wenn man von den jeweils drei Teilbereichen der beiden Geometrien den Schnitt berechnet (falls kein Schnitt vorliegt, liefert d den Wert -1 als Ergebnis):

$$\begin{bmatrix} d(A_I \cap B_I) & d(A_I \cap B_R) & d(A_I \cap B_A) \\ d(A_R \cap B_I) & d(A_R \cap B_R) & d(A_R \cap B_A) \\ d(A_A \cap B_I) & d(A_A \cap B_R) & d(A_A \cap B_A) \end{bmatrix}$$

Über die Vorgabe von Matrizen, die neben den vier berechneten Dimensionswerten (-1, 0, 1 und 2) auch die Werte T ($d \geq 0$) und * (d beliebig) enthalten dürfen, werden die topologischen Prädikate »disjoint«, »touches«, »crosses«, »within«, »overlaps« und »contains« definiert. Das Prädikat »intersects« entspricht der Negation von »disjoint«.

Die ISO-Norm 19107 »Spatial Schema« beschreibt – wie bereits erwähnt – neben Geometrien auch Topologien bis zu einer maximalen Dimension von 3. Das entsprechende Paket »Topology« besteht, wie in Abbildung 2 dargestellt, aus drei Unterpaket:

Abb. 2: Das Paket »Topology« von ISO 19107 »Spatial Schema

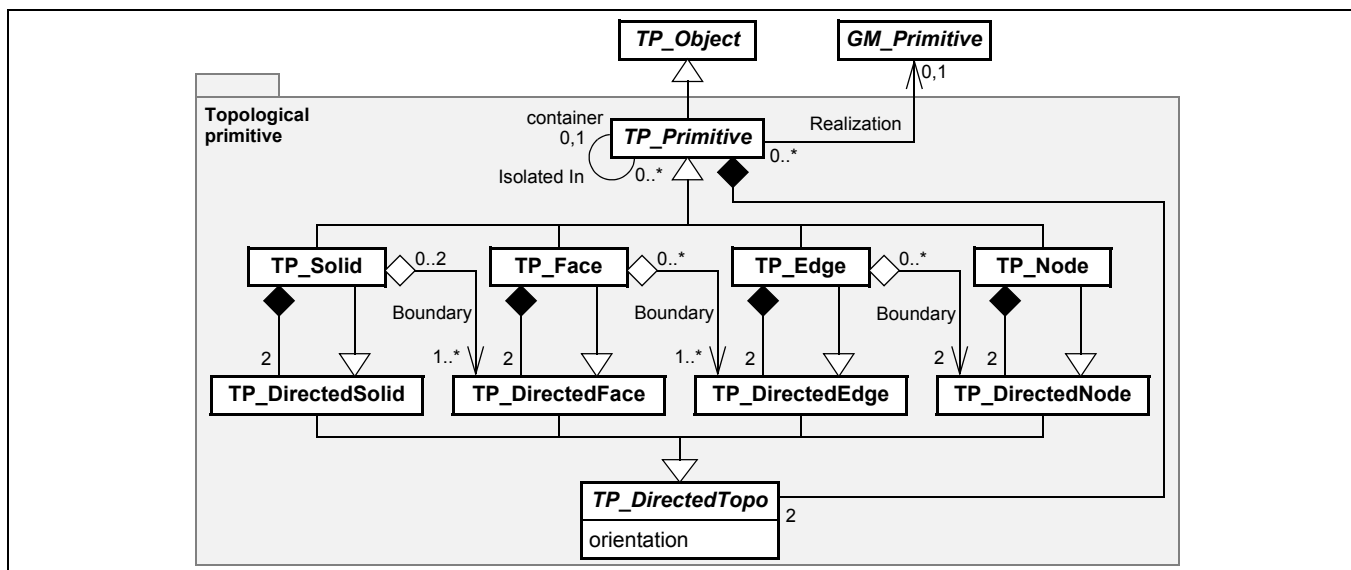


- »Topology root« enthält die abstrakte Oberklasse »TP_Object«.
- »Topological complex« dient zur Beschreibung zusammengesetzter komplexer topologischer Primitive.
- »Topological primitive« modelliert *topologische Primitive*; deren Oberklasse ist die abstrakte Klasse »TP_Primitive«.

Das Modell repräsentiert topologische Primitive durch die Klassen »TP_Node« für *Knoten*, »TP_Edge« für *Kanten*, »TP_Face« für *Maschen* und »TP_Solid« für *Körper*. Abbildung 3 zeigt das entsprechende UML-Klassendiagramm.

Insbesondere für Kanten kann deren Ausrichtung eine entscheidende Rolle für Anwendungen spielen. Daher gibt es zu jedem

Abb. 3: Das Teilpaket »Topological primitive« aus ISO 19107 »Spatial Schema« dient der Beschreibung 0- bis 3-dimensionaler topologischer Primitive



»TP_Primitive«-Objekt zwei unterschiedlich *gerichtete topologische Primitive*, die durch Unterklassen zur Klasse »TP_DirectedTopo« repräsentiert werden. Dabei gibt das Attribut »orientation« an, ob die gespeicherte Richtung beibehalten werden soll (+) oder umgekehrt wird (-). So wird der Rand (»Boundary«) einer Masche durch eine Folge von Kanten beschrieben, die einheitlich ausgerichtet sind. Die Bedeutung gerichteter Knoten ist weniger offenkundig: Ein gerichteter Knoten mit positiver Orientierung bildet den Anfangsknoten einer Kante und eine negative Orientierung steht für den Endknoten. Einem topologischen Primitiv kann über die Beziehung »Realization« eine geometrische Repräsentation zugeordnet werden. Umgekehrt kann ein topologisches Primitiv für mehrere geometrische Primitive die Topologie darstellen.

Knoten, die zu keiner Kante gehören, werden als *isolierte Knoten* bezeichnet. Für diesen Zweck steht die Beziehung »Isolated In« zur Verfügung. Dabei muss die Dimension der isolierten Primitive um mindestens 2 kleiner sein als die der Primitive, die in der Rolle »container« auftreten. Beträgt der Dimensionsunterschied nur 1, so wird diese Situation über die »Boundary«-Beziehung gehandhabt; so gehört eine isolierte Kante in einer Masche zum Rand der Masche.

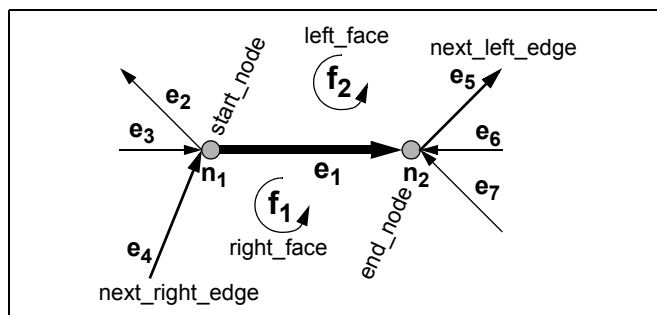
2.2 SQL/MM Spatial (3. Edition)

Die ISO/IEC-Norm 13249-3:2006 *SQL/MM Spatial* ist ein weiterer datenbankspezifischer Standard, der nun mit der Edition von 2006 in der 3. Fassung vorliegt. SQL/MM Spatial kann man als eine Art Erweiterung des Simple Feature Model auffassen. Ergänzungen sind u.a. die Unterstützung von Kreisbögen, Methoden zum Validieren von Geometrien, Koordinatentransformationen, Winkel- und Richtungstypen sowie Methoden zur Bereitstellung von GML (Geography Markup Language).

SQL/MM Spatial (3. Edition) enthält außerdem ein Netzwerk- und ein Topologiedatenbankschema, die aber deutlich einfacher als das Datenmodell von ISO 19107 »Spatial Schema« sind. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die dort spezifizierten Schemata »Topo-Net« für Netzwerktopologien und »Topo-Geo« für allgemeine Topologien. Die meisten Attribute und Beziehungen sind selbsterklärend. Die zu Maschen korrespondierende Geometrie kann aus den in den Kanten gespeicherten Liniengeometrien abgeleitet werden; daher ist in »ST_FACE« nur ein minimal um-

gebendes Rechteck (»mbr«) zu Approximationszwecken (insbesondere für die Nutzung durch einen räumlichen Index) gespeichert. Die Beziehung »containing_face« dient der Zuordnung von isolierten Knoten zu den umgebenden Maschen. Die Beziehungen »next_left_edge« und »next_right_edge« verweisen auf fortlaufende Kanten. So ist in Abbildung 5 e_5 die »next_left_edge« von e_1 , da f_2 hinsichtlich der Richtung der Kante (von n_1 nach n_2) links der Kante liegt und bei Ablaufen der Randkanten von f_2 entgegen dem Uhrzeigersinn e_5 auf e_1 folgt. Analog entspricht e_4 der »next_right_edge« von e_1 .

Abb. 5: Beispiel für die Beziehungen von Kanten im Topologiemodell von SQL/MM Spatial



SQL/MM Spatial definiert Operationen, mit denen man topologische Primitive hinzufügen, entfernen und modifizieren kann.

2.3 Lineare Bezugssysteme

ISO 19125 und SQL/MM Spatial erlauben es, Geometrien ein *räumliches Bezugssystem* zuzuordnen, damit die Koordinaten als Beschreibung von Lage- und Ausdehnungsinformationen in einem realen Datenraum interpretiert werden können. Dies ist zum Beispiel erforderlich, um aus den Koordinaten konkrete Abstands- und Flächeninhaltsangaben berechnen zu können. Ein räumliches Bezugssystem besteht aus einem *Koordinatensystem*, einem Geltungsbereich und Angaben, die es erlauben, Daten aus unterschiedlichen Koordinatensystemen auf ein globales System abzubilden.

Für Netzwerkdaten spielen in Ergänzung *lineare Bezugssysteme* eine wichtige Rolle. Sie erlauben die Identifizierung von Punkten auf einer Linie durch Abstandsangaben zu einem ausgezeichneten Anfangspunkt. Abbildung 6 zeigt einen Streckenzug, dessen Streckenpunkte neben Koordinaten auch Abstandsangaben aufweisen.

Liegt für eine Position auf einem Linienzug keine Abstandsangabe vor, so muss dieser Abstand aufgrund benachbarter Abstandsangaben und der Länge des Linienzuges interpoliert werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass aufgrund unterschiedlicher Messverfahren bei der Längenmessung und bei der Bestimmung der Lage und des Verlaufs eines Linienzuges die aus der Geometrie bestimmten Längenangaben von den gespeicherten Abstandsangaben abweichen können.

Zwei wichtige Operationen auf Basis eines linearen Bezugssystems sind die Berechnung des Abstands zum Anfangspunkt für einen beliebigen Punkt (x,y) auf dem Linienzug und die Berechnung der Koordinaten eines Punktes auf dem Linienzug aus einer Abstandsangabe.

Abb. 4: Die Pakete »Topo-Geo« und »Topo-Net« aus SQL/MM Spatial (die Vererbungsstruktur ist zur Veranschaulichung durch den Autor dieses Beitrags eingeführt worden)

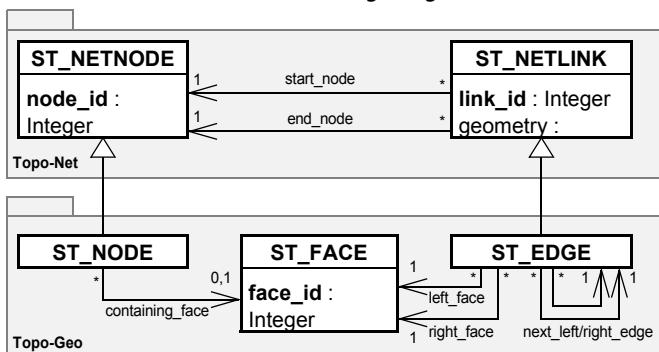
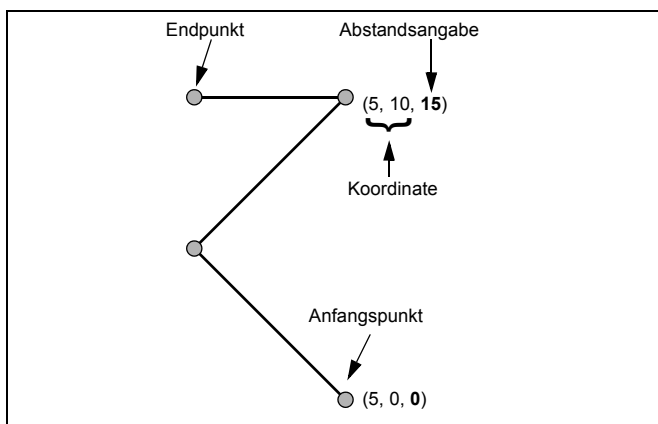


Abb. 6: Beispiel für die Nutzung eines linearen Bezugssystems



SQL/MM Spatial erlaubt für jede Koordinate einer Geometrie die zusätzliche Speicherung eines Messwerts (»Measure«). Die Operationalität ist recht schwach: Über die Funktion »IsMeasured« kann für eine Geometrie abgefragt werden, ob der Messwert gesetzt ist. Außerdem ist es möglich, für eine Geometrie die gespeicherten Koordinate(n) zu bestimmen, bei denen der gespeicherte Messwert mit einem spezifizierten Wert übereinstimmt (»ST_LocateAlong«) bzw. in einem vorgegebenen Intervall liegt (»ST_LocateBetween«).

3 Analyseoperationen in Netzwerkdatenbanken

Eine Netzwerkdatenbank sollte eine Reihe von Analyseoperationen anbieten, die möglichst direkt in der Datenbank ausgeführt werden, um unnötige Übertragungskosten und Suchanfragen zu vermeiden.

Die *Erreichbarkeit* eines Knotens d von einem Knoten s entspricht der Fragestellung, ob es (mindestens) einen Weg von s nach d gibt. Damit verwandt ist die Bestimmung aller Knoten, die von s aus erreicht werden können. Mit anderen Worten: Es wird der größte zusammenhängende (Teil-)Graph berechnet, der s umfasst. Eine solche Operation kann zum Beispiel zur Kontrolle der Digitalisierung eines Netzwerkes dienen.

Eine Variante stellt eine *Netzwerkverfolgung* dar, mit der alle Knoten oder Kanten bestimmt werden, die vom Knoten s unter Einhaltung einer maximalen Weglänge erreicht werden können. Im Rahmen von ortsbezogenen Diensten ist die Bestimmung aller Sehenswürdigkeiten, Gaststätten, Haltestellen usw., die von der aktuellen Position innerhalb von maximal n Minuten erreicht werden können, ein Beispiel für eine Anwendung. Für Standortanalysen oder (Geo-)Marketingaktionen kann man so den Einzugsbereich eines Geschäftes oder einer ähnlichen Einrichtung bestimmen.

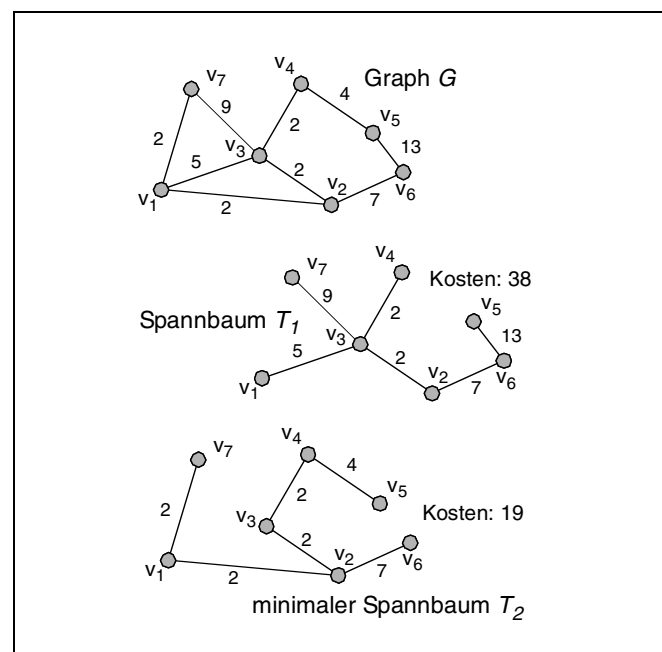
Eine der wichtigsten Netzwerkanalyseoperationen ist die Bestimmung des *kürzesten Weges* zwischen zwei Knoten. Jedes Navigationssystem berechnet den kürzesten Weg unter Berücksichtigung der erwarteten Geschwindigkeit auf den Wegkanten (= Straßen). SQL/MM Spatial (3. Edition) enthält die Funktionen »ST_ShortestUndPath« und »ST_ShortestDirPath«, die auf Basis

von (un-)gerichteten, gewichteten *Liniengeometrien* den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten berechnen.

Beim *Problem des Handlungsreisenden* wird in einem Graphen G der kürzeste Weg gesucht, der alle Knoten besucht und wieder zum Ausgangsknoten zurückkehrt. Aufgrund der exponentiellen Laufzeit zur Lösung dieser Aufgabe werden oft Näherungslösungen verwendet.

Beim *Spannbaumproblem* wird für einen ungerichteten, zusammenhängenden Graphen G ein Baum T bestimmt, der alle Knoten des Graphen G verbindet, wobei eine Teilmenge der Kanten von G die Kanten von T bilden. Abbildung 7 zeigt für einen Graphen G zwei mögliche Spannäume. Ist G ein Graph mit Kantengewichten, so gewinnt die Bestimmung des *minimalen Spannbaums* an Bedeutung: Hierbei wird der Spannbaum berechnet, bei dem die Summe der Kosten der Kanten minimal ist. Solche Bäume werden zum Beispiel zum systematischen Aufbau von Kommunikationsnetzen benötigt.

Abb. 7: Spannäume eines Graphen



4 Physische Organisation von Netzwerkdatenbanken

Um Netzwerke in Datenbanken speichern zu können, müssen sie – ebenso wie dies bei herkömmlichen und bei räumlichen Daten der Fall ist – auf kleinere Einheiten (d.h. auf Datenbankblöcke) verteilt werden, um so auf dem Hintergrundspeicher abgelegt werden zu können. Bei dieser Zerlegung können graph- oder raumbasierte Ansätze verfolgt werden.

Bei einer Zerlegung nach rein *räumlichen Kriterien* betrachtet man die Knoten als Punkte im Raum, die eine herkömmliche räumliche Indexstruktur wie ein R-Baum oder linearer Quadtree verwaltet. So können effizient räumliche Anfragen bearbeitet werden. Allerdings ist hierbei insbesondere problematisch, dass

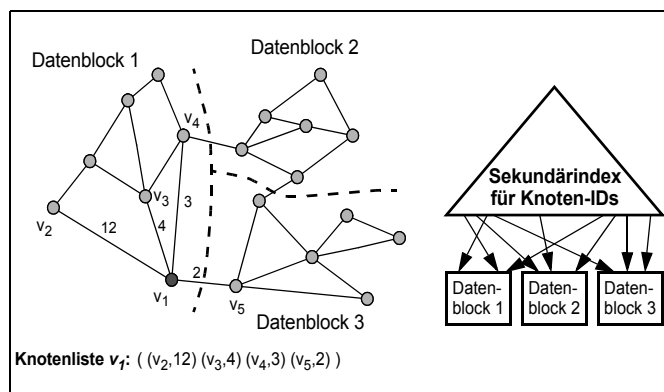
»schnelle« Wege (z.B. Wege, die im Wesentlichen aus Autobahnverbindungen bestehen) in der Regel auf viele Datenbankblöcke verteilt werden und damit nur unter hohen I/O-Kosten eingelesen werden können.

Ein alternativer Ansatz ist eine Zerlegung nach *Eigenschaften des Graphen* ohne Berücksichtigung räumlicher Aspekte. Dabei wird versucht, den *Connectivity Residue Ratio (CRR)* zu maximieren. Der CRR entspricht dem Verhältnis der Anzahl der durch die Zerlegung nicht aufgeteilten Kanten zur Gesamtzahl der Kanten:

$$CRR = \frac{\text{[unzerlegte Kanten]}}{\text{[Kanten]}}$$

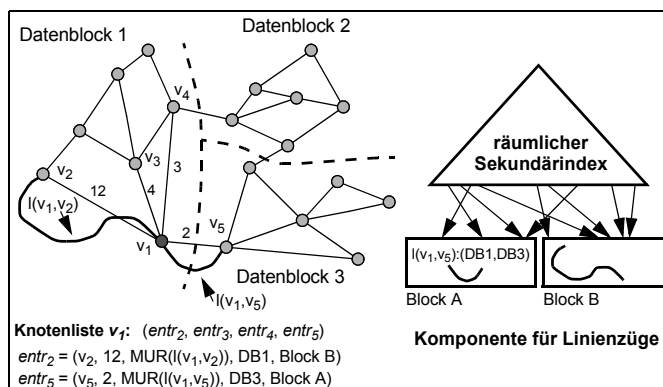
Ein entsprechendes Verfahren ist die *Connectivity Clustered Access Method (CCAM)* [Shekhar & Liu 1997]. CCAM teilt die Menge der Knoten rekursiv unter Maximierung des CCR in zwei Mengen auf, bis die jeweiligen Knotenbeschreibungen in einen Datenblock hineinpassen. Eine Knotenbeschreibung besteht dabei aus der Knoten-ID, der zugehörigen Punktkoordinate sowie aus Knotenlisten, die die IDs der Vorgänger- und der Nachfolgerknoten enthalten und damit die auf den Knoten gerichteten und von dem Knoten ausgehenden Kanten spezifizieren (in Abb. 8 ist für v_1 die Knotenliste ohne Unterscheidung der Richtung und mit einem Kantengewicht angegeben). Wird ein Graph durchlaufen, muss mithilfe der Knoten-IDs auf Nachbarknoten zugegriffen werden. Befindet sich der gesuchte Knoten nicht im gleichen Datenblock wie der Knoten, von dem die Suche ausgeht (z.B. beim Übergang von v_1 nach v_5), muss der zugehörige Block bestimmt werden. Dazu dient ein Sekundärindex, der die Knoten-IDs mit den Blocknummern verwaltet. Bei entsprechender Codierung der Knoten-ID können gleichzeitig auch räumliche Anfragen vom Sekundärindex unterstützt werden.

Abb. 8: Beispiel für die Connectivity Clustered Access Method



Ein ähnlicher Ansatz wurde in [Papadias et al. 2003] vorgeschlagen. In dieser Architektur enthalten die Verweise auf Nachbarknoten im Gegensatz zu CCAM zusätzlich die Nummer des Blocks, in dem der Nachbarknoten gespeichert ist (in Abb. 9 durch DBn kenntlich gemacht). Somit ist für das Durchlaufen des Graphen kein Zugriff auf einen Sekundärindex notwendig. Zu jeder Kante (v_i, v_j) gibt es einen korrespondierenden Linienzug $l(v_i, v_j)$, der von einer separaten Komponente verwaltet wird. Die Einträge dort enthalten die Blocknummer des Anfangs- und des Endknotens. Die minimal umgebenden Rechtecke (MUR) um die Linienzüge

Abb. 9: Beispiel für die Architektur nach [Papadias et al. 2003]



werden über einen räumlichen Sekundärindex organisiert, sodass räumliche Anfragen unterstützt werden. In einem Eintrag der Knotenliste ist ebenfalls das MUR sowie ein Verweis auf den Speicherort des korrespondierenden Linienzuges gespeichert.

5 Netzwerkdatenbank-Anfragen

Die Realisierung der in Abschnitt 3 vorgestellten Netzwerk-Analyseoperationen als Datenbank Anfragen stützt sich typischerweise auf traditionelle Graphalgorithmen ab (z.B. den Dijkstra- oder A*-Algorithmus für die Berechnung kürzester Wege). Als Besonderheit wird aber ggf. auch das Vorhandensein einer räumlichen Indexstruktur (oft eines R-Baums [Guttman 1984]) vorausgesetzt. Ein Beispiel hierfür ist der Lösungsvorschlag von [Li et al. 2005] für die »Trip Planning Query«, die für ein Netzwerk mit kategorisierten Knoten den kürzesten Weg zwischen einem Start- und einem Zielknoten berechnet, wobei jede Kategorie (aus einer gegebenen Kategorieuntermenge) mindestens einmal von einem Wegknoten abgedeckt werden muss.

Eine häufig betrachtete Fragestellung für Geodatenbanksysteme ist die Berechnung der k nächsten Nachbarn (» k -Nearest Neighbour Query«, k -NNQ). Während in herkömmlichen Geodatenbanken die Berechnung auf der euklidischen Distanz beruht, sind in Netzwerkdatenbanken Netzwerkdistanzen (ggf. unter Berücksichtigung von Kanten- und/oder Knotengewichten) zu berücksichtigen. Nachbarn eines Anfrageobjektes im Sinne der Anfrage sind Objekte (z.B. spezielle Geschäfte oder auch Verkehrsteilnehmer), die mit dem Netzwerk verbunden sind [Jensen et al. 2003]. Zur effizienten Bearbeitung dieser Anfrage können Voronoi-Diagramme [Kolahdouzan & Shahabi 2004], Varianten des Dijkstra-Algorithmus [Almeida & Güting 2006] oder spezielle (approximative) Distanzindexe [Hu et al. 2006] eingesetzt werden.

»Continuous k -Nearest Neighbour Queries« bestimmen die k nächsten Nachbarn entlang eines Weges durch das Netzwerk (z.B. der Fahrstrecke eines Fahrzeuges) [Kolahdouzan & Shahabi 2005].

6 Unterstützung durch konkrete Geodatenbanksysteme

In diesem Abschnitt soll die Unterstützung von Netzwerk- und Topologiedatenbanken durch konkrete Geodatenbanksysteme be-

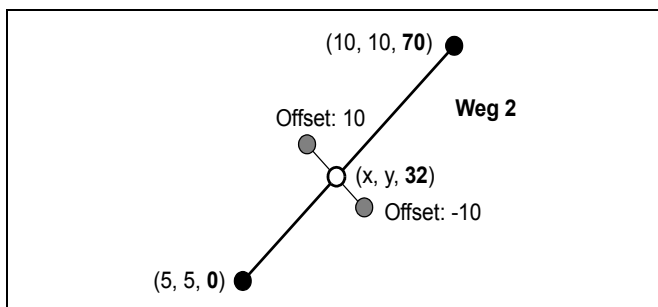
handelt werden. Dazu wird insbesondere *Oracle Spatial 10* betrachtet.

6.1 Lineare Bezugssysteme

In *Oracle Spatial* können Linienzüge, Linienzugkollektionen und Polygone ein lineares Bezugssystem aufweisen. Dann besitzt jede Koordinate einen zusätzlichen Koordinatenwert, der die Abstandsangabe aufnehmen kann. Die Abstandsangaben können gesetzt sowie teilweise oder auch vollständig mithilfe der Geometrie interpoliert werden.

Es können Längen, Punktkoordinaten aus Abstandsangaben und Abstandsangaben aus Punktkoordinaten berechnet werden. Als Besonderheit unterstützt Oracle auch Punkte, die neben der Leitung liegen, durch die Angabe einer Distanz (»Offset«) zwischen dem Punkt und der Liniengeometrie. Abbildung 10 zeigt ein entsprechendes Beispiel.

Abb. 10: Beispiel für Offsets bei Nutzung eines linearen Bezugssystems



Auch *PostGIS* – die Geodatenbankenerweiterung von PostgreSQL – unterstützt lineare Bezugssysteme. Die in Abschnitt 2.3 vorgestellte Funktionalität von SQL/MM Spatial steht zur Verfügung, wobei zusätzlich Abstandsangaben interpoliert werden können. Auch ist es möglich, für Punkte, die neben der Leitung liegen, Abstandsangaben zu berechnen.

6.2 Netzwerkdatenmodell

In Anlehnung an SQL/MM Spatial bietet Oracle ein Netzwerk- und ein Topologiedatenmodell an.

Für die Speicherung von Netzwerken können im »Oracle Network Data Model« Knoten- und Kantentabellen angelegt werden, die prinzipiell wie die in Abbildung 4 dargestellten Klassen aufgebaut sind. Als zusätzliche Attribute stehen für Knoten und Kanten jeweils ein Name, ein Typ (= Kategorie) und ein Kostenwert zur Verfügung.

Für die Repräsentation der Geometrie werden vier Varianten unterstützt:

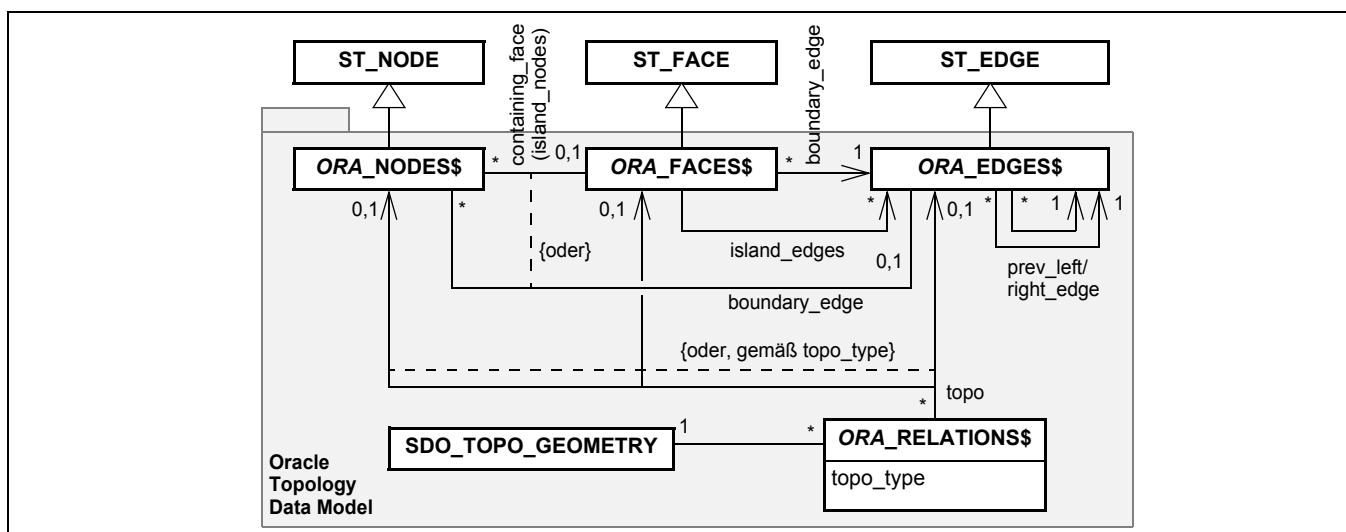
- logische Netzwerke ohne Geometrie,
- Netzwerke mit Geometrien, die herkömmliche Koordinaten nutzen,
- Netzwerke, deren Geometrien auf einem linearen Bezugssystem beruhen und
- Netzwerke, deren Geometrien durch das allgemeine Topologiedatenmodell repräsentiert werden.

Die Funktionalität auf dem Netzwerk deckt in etwa die in Abschnitt 3 vorgestellten Operationen ab. Der Aufruf erfolgt über PL/SQL- oder Java-Methoden. Die Teile des Netzwerks, auf denen eine Analyseoperation ausgeführt wird, werden dazu in den Datenbank Hauptspeicher geladen.

6.3 Topologiedatenmodell

Auch das »Oracle Topology Data Model« weist gewisse Erweiterungen gegenüber SQL/MM Spatial auf. Abbildung 11 stellt diese in einer Übersicht dar. Bei der Repräsentation von isolierten topologischen Primitiven werden auch in Maschen liegende isolierte Kanten explizit gespeichert (»island_edges«). Außerdem ist die Beziehung für isolierte Knoten nicht gerichtet (»island_nodes«). Von Knoten und Maschen wird explizit eine begrenzende Kante referenziert (»boundary_edge«). Die beiden Beziehungen »prev_left_edge« und »prev_right_edge« erlauben die Randkanten von Maschen in beiden Umlaufsrichtungen zu verfolgen. Be-

Abb. 11: Erweiterungen des Topologiedatenmodells von SQL/MM Spatial durch Oracle Spatial



zogen auf die Kante e_1 in Abbildung 5 ist die Kante e_2 die »prev_left_edge« und die Kante e_7 die »prev_right_edge«.

Durch diese Ergänzungen ist das Datenmodell zwar aufwendiger zu pflegen, andererseits werden aber auch Auswertungen der topologischen Struktur durch die zusätzlichen Attribute erleichtert.

Mithilfe der Klasse »SDO_TOPO_GEOMETRY« kann ein Attribut in einer beliebigen Tabelle ein Topologieobjekt repräsentieren. Es steht über »ORA_RELATIONSS« in einer n-zu-m-Beziehung zu den topologischen Primitiven (»ORA« ist jeweils der Platzhalter für den Namen einer spezifischen Topologie). Über die Nutzung entsprechender PL/SQL- bzw. Java-Methoden werden die dargestellten Tabellen ausgehend von einer Geometrie teilweise oder vollständig automatisch von Oracle geführt.

Für Anfragen stehen die in Abschnitt 2.1 genannten topologischen Prädikate (mit Ausnahme von »disjoint«) zur Verfügung.

7 Ausblick

Die Darstellung zeigt, dass nachdem in den letzten Jahren die Speicherung und Anfrage geometrischer Eigenschaften im Vordergrund der Forschung und Entwicklung stand, nun auch topologische Datenmodelle Einzug in die ISO-Standards und konkrete Geodatenbanksysteme finden. Allerdings haben Umfang (und teilweise auch Qualität und Benutzungsfreundlichkeit) dieser Erweiterungen (noch) nicht den Stand der rein geometrischen Datenbankkomponenten erreicht. Wenn aber die Entwicklung mit dem derzeitigen Tempo weiter voranschreitet, wird dieser Umstand bald beseitigt sein.

Ein wichtiger Aspekt ist zurzeit noch Gegenstand der Forschung: Im Bereich *spatio-temporaler Datenbanksysteme* ist eine wichtige Variante die Speicherung und Anfrage von bewegten Objekten, die sich auf einem Netzwerk fortbewegen. Dort stehen u.a. die Modellierung und Anfrage solcher Objekte [Güting et al. 2006], die Erzeugung netzwerkbasierter bewegter Objekte zu Benchmark-Zwecken [Brinkhoff 2002], die Indexierung der bewegten Objekte durch spezielle Indexstrukturen (z.B. der MON-Tree [Almeida & Güting 2005]) und die Ausführung von »Continuous k-Nearest Neighbour Queries« über bewegte Objekte [Mouratidis et al. 2006] im Vordergrund der Arbeiten.

Literatur

- [Almeida & Güting 2005] Almeida, V. T. de; Güting, R. H.: Indexing the Trajectories of Moving Objects in Networks. *GeoInformatica* 9(1), Springer-Verlag, 2005, S. 33-60.
- [Almeida & Güting 2006] Almeida, V. T. de; Güting, R. H.: Using Dijkstra's Algorithm to Incrementally Find the K-Nearest Neighbors in Spatial Network Databases. Proceedings 21st ACM Symposium on Applied Computing, Dijon, France, 2006, S. 58-62.
- [Brinkhoff 2002] Brinkhoff, T.: A Framework for Generating Network-Based Moving Objects. *GeoInformatica*, 6(2), Kluwer Academic Publishers, 2002, S. 155-182.
- [Brinkhoff 2005] Brinkhoff, T.: Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis. Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2005.
- [Clementini & Di Felice 1996] Clementini, E.; Di Felice, P.: A Model for Representing Topological Relationships between Complex Geometric Features in Spatial Databases. *Information Sciences* 90, 1996, S. 121-136.
- [Güting et al. 2006] Güting, R. H.; Almeida, V. T. de; Ding, Z.: Modeling and Querying Moving Objects in Networks. *VLDB Journal* 15(2), Springer-Verlag, 2006, S. 165-190.
- [Guttman 1984] Guttman, A.: R-trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. Proceedings ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Boston, MA, 1984, S. 47-57.
- [Hu et al. 2006] Hu, H.; Lee, D. L.; Lee, V. C. S.: Distance Indexing on Road Networks. Proceedings 32nd International Conference on Very Large Data Bases, Seoul, Korea, 2006, S. 894-905.
- [Jensen et al. 2003] Jensen, C. S.; Kolár, J.; Pedersen, T. B.; Timko, I.: Nearest Neighbor Queries in Road Networks. Proceedings 11th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, New Orleans, LA, 2003, S. 1-8.
- [Kolahdouzan & Shahabi 2004] Kolahdouzan, M.; Shahabi, C.: Voronoi-Based k Nearest Neighbor Search for Spatial Network Databases. Proceedings 30th International Conference on Very Large Data Bases, Toronto, Canada, 2004, S. 840-851.
- [Kolahdouzan & Shahabi 2005] Kolahdouzan, M.; Shahabi, C.: Alternative Solutions for Continuous K Nearest Neighbor Queries in Spatial Network Databases. *GeoInformatica* 9(4), Springer-Verlag, 2005, S. 321-341.
- [Li et al. 2005] Li, F.; Cheng, D.; Hadjieleftheriou, M.; Kollios, G.; Teng, S.-H.: On Trip Planning Queries in Spatial Databases. Proceedings 7th International Symposium on Spatial and Temporal Databases, Angra dos Reis, Brazil, 2005. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3633, Springer-Verlag, 2005, S. 273-290.
- [Mouratidis et al. 2006] Mouratidis, K.; Yiu, M. L.; Papadias, D.; Mamoulis, N.: Continuous Nearest Neighbor Monitoring in Road Networks. Proceedings 32nd International Conference on Very Large Data Bases, Seoul, Korea, 2006, S. 43-54.
- [Papadias et al. 2003] Papadias, D.; Zhang, J.; Mamoulis, N.; Tao, Y.: Query Processing in Spatial Network Databases. Proceedings 29th International Conference on Very Large Data Bases, Berlin, Germany, 2003, S. 802-813.
- [Rigaux et al. 2002] Rigaux, P.; Scholl, M.; Voisard, A.: Spatial Databases, With Applications to GIS. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2002.
- [Shekhar & Liu 1997] Shekhar, S.; Liu, D.: CCAM: A Connectivity-Clustered Access Method for Networks and Network Computations. *IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering*, 19(1), 1997, S. 102-119.



Thomas Brinkhoff

studierte Informatik an der Universität Bremen (Diplom 1990) und promovierte 1994 an der Ludwig-Maximilian-Universität München mit einer Arbeit auf dem Gebiet der Anfragebearbeitung in räumlichen Datenbanken. Nach vierjähriger Industrietätigkeit im Bereich Verkehrstelematik wurde er 1999 zum Professor für Geoinformatik an der FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven berufen. Thomas Brinkhoff ist Autor des ersten deutschsprachigen Lehrbuchs über Geodatenbanksysteme. Seine Arbeitsschwerpunkte umfassen daneben auch mobile Geoinformationssysteme und internetbasierte Geodatendienste.

Prof. Dr. Thomas Brinkhoff
 FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven
 Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG)
 Ofener Str. 16/19
 26121 Oldenburg
 thomas.brinkhoff@fh-oldenburg.de
 www.fh-oow.de/institute/iapg/personen/brinkhoff/