

Flexible Modellierung und Verwaltung temporaler 3D-Geodaten

Alexander ZIPF und Sven KRÜGER - European Media Laboratory EML, Heidelberg

Zusammenfassung

Im Rahmen des Deep Map-Projektes [Malaka und Zipf 1999, Zipf, *et al.* 2000] des European Media Laboratory (EML) wurde ein flexibles und umfassendes temporales objektorientiertes Modell entwickelt, mit dem die Verwaltung dreidimensionaler Geo-Objekte eines Stadtbildes über Epochen hinweg ermöglicht werden soll, entworfen und implementiert. Damit wird auch die Grundlage der Datenverwaltungskomponenten von zukünftig zu entwickelnden temporalen 3D-GIS („4D-GIS“, oder „3D-TGIS“) gelegt. Das temporale Modell wurde auch in XML-Schemata überführt und mit der Geographic Markup Language (GML) des OpenGIS Consortiums gekoppelt.

1. Einleitung

Konventionelle geographische Informationssysteme sind i.d.R. „statische“ GIS, da sie die Dynamik von Geoobjekten nicht ausreichend in ihrem Datenmodell und ihrer Funktionalität berücksichtigen. Sollen aber Objekte, Phänomene und Prozesse unsere Umwelt in ihrem zeitlichen Verlauf abgebildet werden, sind die meisten 2D- oder 3D-Systeme überfordert. ScheuGenpflug [1999] fordert, daß ein TGIS Funktionen zur Datenspeicherung, -änderung, -analyse und -visualisierung zur Verfügung stellen muß. Derartige Funktionen sind komplexer als in herkömmlichen GIS und aktueller Forschungsgegenstand.

Zu den technischen Merkmalen des Prototypen zählen eine 3-tier Anwendungsarchitektur, die zusammen mit Java ein hohes Maß an Flexibilität und Plattformunabhängigkeit garantiert. Mit diesem Modell soll in Deep Map ein Beitrag zur Realisierung der längerfristigen Vision des Deep Map-Systems - der Verwirklichung virtueller Zeitreisen geleistet werden.

In dem Bereich temporale Datenverwaltung für 3D-Geoobjekte leistet das vorgestellte Modell einen Beitrag zur Entwicklung eines temporalen 3D-GIS. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie die komplexe Dimension der Zeit in ihren Ausprägungen modelliert werden kann. Zudem wird ein Modell vorgestellt, welches dieses zeitliche Teilmodell mit einem 3D-Geometriemodell nach MOLENAAR und einem thematischen Modell für ein Stadtinformationssystem kombiniert um raum-zeitliche Zusammenhänge abbildbar zu machen.

2. Aspekte raumzeitlicher Datenmodellierung

Ein Geoobjekt besteht nach geltender Lehrmeinung aus den Aspekten Thematik, Geometrie, Topologie und Zeit [STREIT 1998, BILL und FRITSCH 1991]. Noch bilden bisherige GIS nicht alle Aspekte gleichermaßen gut ab. Gerade die temporale Dimension ist ein wichtiger Aspekt fast aller Phänomene der realen Welt. So existieren gerade in der GIS-Praxis viele Anwendungen, in denen die Notwendigkeit besteht, den Zeitfaktor, also die Änderung von Objekten über einen Zeitraum zu berücksichtigen. Traditionelle Datenbank- sowie GIS-Systeme lieferten bisher i.d.R. nur ein Abbild der realen Welt zu einem bestimmten Zeitpunkt (gewöhnlich „jetzt“). Dieses Abbild nennt man auch einen Schnappschuß („Snapshot“) der realen Welt. Es bestand also Bedarf an neuen Datenbankmodellen, die den Ansprüchen zeitvarianter Daten genügen [vgl. TANSEL *et al.* 1993, SNODGRASS und AHN 1986]. Die ersten Arbeiten auf dem Gebiet temporaler Datenmodelle konzentrierten sich auf die Erweiterung des Relationenmodells von CODD [1970]. Aber auch auf dem Gebiet der objektorientierten Datenbanken wurden in den letzten Jahren temporale Modelle entwickelt. Neben früheren Arbeiten bieten hierzu geben SKJELLAUG [1997a,b], SKJELLAUG und BERRE [1997], BØHLEN, JENSEN und SKJELLAUG [1998] einen Überblick]. Möglichkeiten zur objektorientierten Integration temporaler Modelle in 2D-GIS zeigen u.a. WACHOWICZ [1999], SKJELLAUG [1996] und [BREUNIG 2000].

Um die Grundelemente zur Modellierung des temporalen Rahmenwerks darzustellen, werden einige wichtige Begriffe kurz definiert. Snodgrass und Ahn [1995] definieren das Konzept der *Uhr* folgendermaßen: „Eine *Uhr* ist eine Zusammenfassung eines periodischen physikalischen Prozesses mit einer Methode zu dessen Messung“. Die Periode des benutzten physikalischen Prozesses heißt „*Chronon*“, während die Dauer der Periode als „*Granularität*“ bezeichnet wird. Ein *Kalender* dagegen ist eine Abstraktion einer bestimmten Zeit. Die Zeit wird dabei in geeignete Abschnitte unterteilt. Die Zeitlinie der Basisuhr muß durch eine Menge passender Kalender abgedeckt werden (*kalendarisches System*). Eine *Granularität* wiederum wird durch eine Länge und einen Ausgangspunkt bestimmt.

3. Topologische Modellierung dreidimensionaler geometrischer Daten

Die Entwicklung des 3D-Geometriemodells orientierte sich stark an dem Modell von MOLENAAR. Dieses vereint die geometrischen und topologischen Daten auf sehr elegante Weise in einer Datenstruktur und ermöglicht es so, viele topologische Eigenschaften direkt aus der Geometrie abzuleiten. Bei dem gewählten topologischen 3D-Datenmodell von Molenaar handelt es sich um eine Weiterentwicklung des vektorbasierten Modells (Single-Valued Vector Map), das MOLENAAR [1989, 1990] für die Verwaltung von thematischen, topologischen und 2D-Geometriedaten vorstellte. Als Grundbestandteile dienen die Primitive Node (Punkt), Arc (Linie) und Face (Fläche). Zur Kopplung der räumlichen mit den thematischen Daten werden Identifikationsnummern (Feature Identifier) verwendet. MOLENAAR [1990] führte zur Modellierung der dritten Dimension die Primitive Edge und Body (Körper) in das ursprüngliche Modell ein.

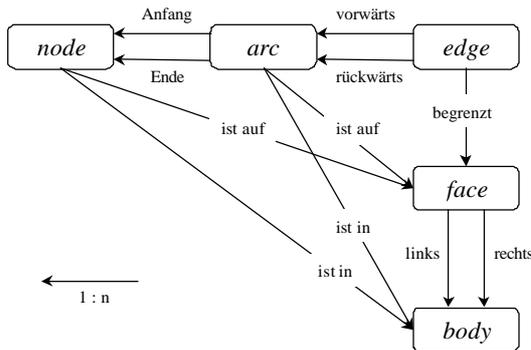


Abb. 1: Topologischer Zusammenhang zwischen den 3D-Primitiven [nach MOLENAAR 1990].

Die Realisierung der Topologie der auf diesen 5-Primitiven basierenden Objekte erfolgt durch verschiedene 1:n-Beziehungen (vgl. Abb. 1). Dabei sind folgende topologische Zusammenhänge erkennbar: Zu jedem Arc existiert genau ein Anfangs- sowie Endpunkt (Nodes). Ein Node kann jedoch zu mehreren Arcs gehören. Ähnlich kann eine Face maximal zwei Bodys begrenzen und ein Body aus mehreren Face's bestehen. Weiterhin existieren Verweise zwischen Arc und Node zu der Fläche, auf der sie sich bzw. auf den Körper, in dem sie sich befinden. Face und Body bestehen wiederum aus mehreren Node's oder Arcs.

Das bisherige Datenmodell beschreibt die Topologie maximal dreidimensionaler Objekte. Die geometrischen Daten werden integriert, indem den Primitiven weitere Informationen (Views) zugeordnet werden. Für eine Node sind das die Koordinaten, für ein Arc sind es Informationen wie z.B. Koordinaten der Zwischenpunkte oder Funktionen die zur Definition des Verlaufes zwischen Anfangs- und End-Node dienen.

Für ein Face beschreiben diese Daten die jeweilige Form der Fläche. Das Primitiv Body benötigt keine geometrische Beschreibung, weil es durch die begrenzenden Faces beschrieben wird. Eine ausführlichere Darstellung findet sich in [MOLENAAR 1990]. Die Realisierung der Geometrieklassen in dem hier vorgestellten 4D-Prototyp erfolgt analog dem zugrundeliegenden 3D-Modell mit den Primitiven Punkt, Linie, Fläche und Körper. Diese werden hier entsprechend der Dimension als 0-Cell (*cell0*), 1-Cell (*cell1*), 2-Cell (*cell2*) sowie 3-Cell (*cell3*) bezeichnet (vgl. Abb. 2). Die verwendeten raumzeitlichen Strukturen innerhalb des geometrischen Modellbereichs umfassen nur die Primitive 2-Cell oder 3-Cell. Zur Realisierung dieses räumlich-zeitlichen Zusammenhanges dient die Klasse *combCell*, von der die beiden Primitive 2-Cell und 3-Cell diese Eigenschaften erben. Neben der Vermeidung von Redundanz besteht ein weiterer Vorteil dieser Realisierungsvariante in der Entkopplung der räumlichen Komponente von den raum-zeitlichen Beziehungen. So kann die räumliche Komponente, unter der Bedingung, daß die neue Komponente ebenfalls von der Klasse *combCell* erbt, einfach ersetzt werden.

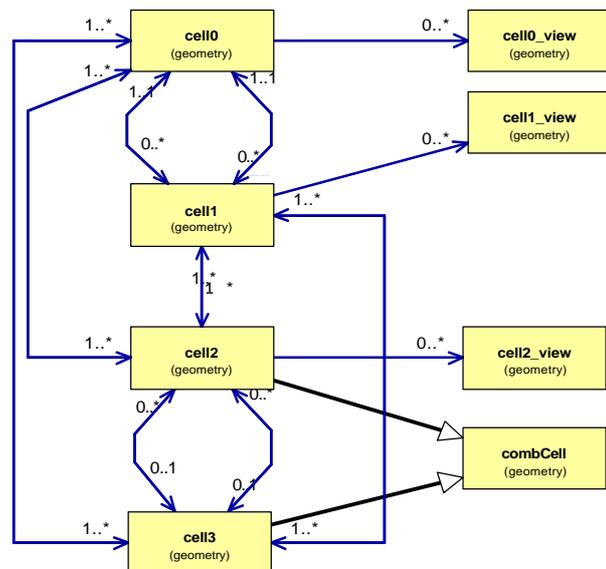


Abb. 2: Klassendiagramm für räumliche Informationen

4. Modellierung thematischen Daten für Deep Map

Auch die thematischen Strukturen wurden unter Verwendung der Objektorientierung realisiert. Bedingt durch das Einsatzgebiet des Deep Map-Systems orientiert sich das Teilmodell der thematischen Daten an einem Stadt-szenario. Zu den wichtigsten modellierten 3D-Objekten gehören Gebäude, Denkmäler, Brücken, Brunnen, Tore und Straßen. Teile von 3D-Objekten sind z.B. Grundkörper, Treppe, Turm, Dach, Hof und Mauer. Gerade bei komplexen 3D-Objekten ist es sinnvoll, einzelne Gebäudeteile zu einer semantischen Einheit zusammenzufassen. So ist es in dem thematischen Modell möglich, Teile von 3D-Objekten wie den Grundkörper, das Dach und die Anbauten des südlichen Seitenflügels eines Gebäudes zu dem komplexen Teil „südlicher Seitenflügel“ zusammenzufassen und bei einer Anfrage an den Datenbestand zu verwenden.

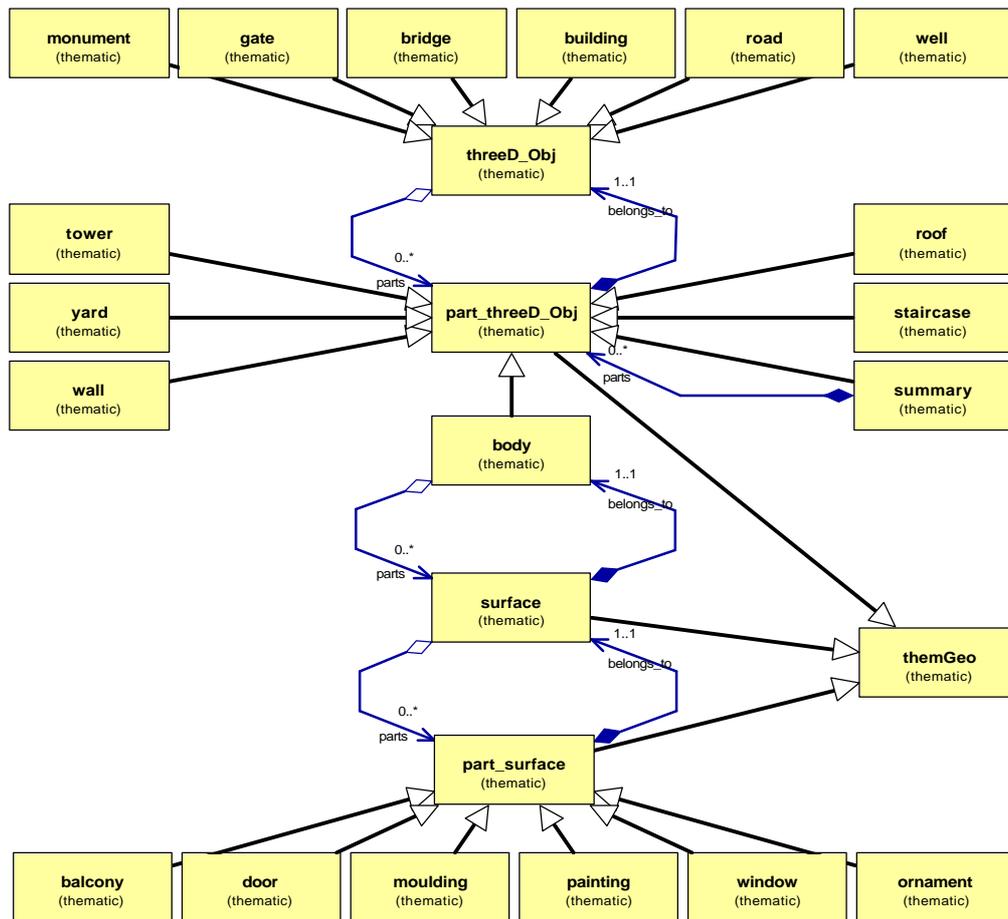


Abb. 3: Klassendiagramm für thematische Informationen

Eine weitere Anforderung an das Datenmodell besteht darin, Anfragen zu den Fassaden eines Gebäudes wie „Welche Teile befinden sich auf der nördlichen Fassade eines Objektes?“ oder „Welche Eigenschaften besitzt das Fenster neben der Eingangstür“ zuzulassen. So können beispielsweise einer Fassade Objekte wie Balkon, Tür, Fenster, Gesims, Wandmalerei und Ornament zugeordnet werden. Einen Ausschnitt des thematischen Teilmodells zeigt Abbildung 3. Wie aus dieser Abbildung erkennbar, wurden die Klassen *threeD_Obj*, *part_threeD_Obj*, *surface* und *part_surface* für die Realisierung der Kernbestandteile 3D-Objekt, Teil eines 3D-Objektes, Fassade und Teil einer Fassade verwendet. In diesen Klassen erfolgt die Modellierung der für die Subtypen geltenden Eigenschaften. So ermöglicht die Verwendung der Generalisierung, neben der Vermeidung von Redundanz bei der Subtypdefinition, eine gut erweiterungsfähige Struktur. So ist eine Integration neuer Subtypen durch die Definition einer Vererbungsbeziehung zur jeweiligen Kernklasse möglich.

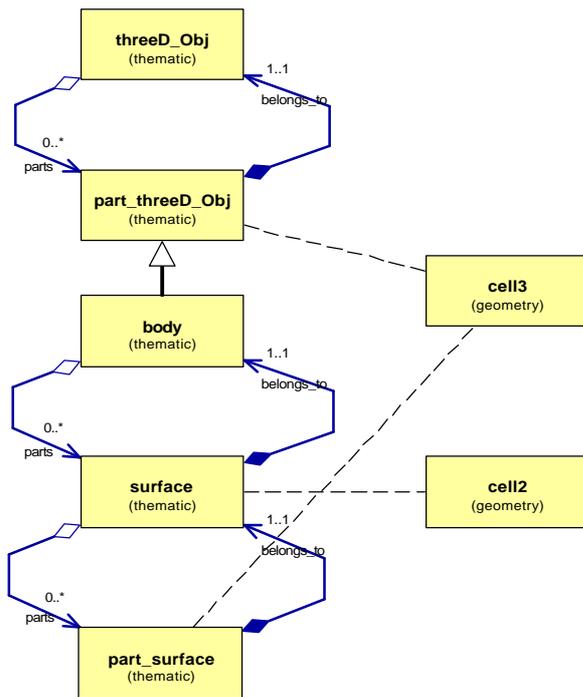


Abb. 4: Klassendiagramm zum Zusammenhang zw. Thematik und Geometrie

Zur Beschreibung der zwischen den Klassen bestehenden Zusammenhänge kamen bidirektionale 1:n Beziehungen zum Einsatz, die zwischen 3D-Objekten und deren Teilen, Grundkörpern und deren Fassaden und zwischen Fassaden und deren zugehörigen Teilen bestehen. Im realisierten Prototypen werden nur Teile von 3D-Objekten, Fassaden und Teile von Fassaden mit raum-zeitlichen Datenstrukturen verknüpft. Um diese Zuordnung flexibel ändern zu können - beispielsweise für ein anderes thematisches Beschreibungsmodell - wird diese Beziehung innerhalb der Klasse *themGeo* definiert. Abbildung 4 zeigt die gegenseitige Zuordnung thematischer und geometrischer Daten. Zur geometrischen Beschreibung der beiden thematischen Klassen *part_threeD_Obj* und *part_surface* wird das Primitiv *cell3* (Körper) sowie für die thematische Klasse *surface* das Primitiv *cell2* (Fläche) verwendet. Liegen für Teile eines 3D-Objektes oder für Teile einer Fassade nur 2D-Informationen vor, kann der Modellierer durch Ausnutzung der hierarchische Struktur des räumlichen Beschreibungsmodells, diese Körper durch 3-Cells die nur eine Fläche (2-Cell) umfassen, räumlich modellieren. Die Beschreibung des 3D-Objektes erfolgt durch die zu diesem angelegten Teile und deren 3-Cells.

5. Ein objektorientiertes Modell für temporale Daten

Da bisherige GIS und RDBMS noch unzureichende Mittel zur Verwaltung temporaler Daten besitzen, wird das modellierungsstarke Paradigma der Objektorientierung zur Modellierung eines allgemeinen Zeit-Frameworks verwendet. Dieses wird in einem weiteren Schritt mit den vorgestellten Teilmodellen für Geometrie und Thematik zu einem Gesamtmodell für temporale 3D-Objekte zusammengeführt. Unterschiedlichen Anwendungen stellen in bezug auf temporale Unterstützung recht komplexe und vielschichtige Anforderungen.

Um eine anpassungsfähige Struktur zu schaffen, die diesen vielfältigen Erfordernissen gerecht werden kann, wurden zunächst die Dimensionen, die den Modellierungsraum eines allgemeinen temporalen Modells begrenzen, identifiziert und deren Komponenten und Eigenschaften bestimmt. Hierauf aufbauend wurde ein Framework entwickelt, das durch die Bereitstellung von Klassen und zugehörigen Eigenschaften Designalternativen für temporale Modelle unterstützt. Hierbei können folgende Aspekte unterschieden werden:

- *Temporale Struktur* – beschreibt ein Gerüst mit Aussagen zu den zeitlichen Primitiven, zeitlichen Domänen und zur zeitlichen Determiniertheit (d.h. bestimmte oder unbestimmte Zeitangaben).
- *Temporale Ordnung* – beschreibt die Möglichkeiten zeitlicher Ordnungen über temporalen Strukturen.
- *Temporale Historie* – beschreibt die Semantik, also den durch die temporalen Daten darzustellenden Zusammenhang.
- *Temporale Repräsentation* – beschreibt die Vorgehensweise zur physischen und kalendarische Darstellung und Konvertierung temporaler Strukturen.

5.1 Temporale Struktur

Die temporale Struktur bildet mit ihren Bestandteilen das Grundgerüst eines temporalen Modells. Die Abbildung stellt die hierarchische Ordnung der einzelnen Grundbausteine einer temporalen Struktur dar. Dieses Grundgerüst kann folgende Eigenschaften aufweisen [SNODGRASS 1992]:

1. *Temporale Primitive* werden entweder *absolut* (*anchored*, Zeitpunkt, Bsp: 09.05.1999) oder *relativ* (*unanchored*, Zeitspanne, Bsp: 30 Tage) dargestellt.
2. *Temporale Domäne*: Hier können diskrete von kontinuierlichen Domänen unterschieden werden. In der Regel verwenden Arbeiten auf dem Gebiet der temporalen Datenbanken eine diskrete Zeitdomäne.
3. *Temporale Determiniertheit*: Bei *determinierten* (*deterministic*) temporalen Primitiven liegt bezüglich Zeitpunkt oder Dauer eines Phänomens vollständiges und genaues Wissen vor. Bei *nichtdeterminierten* (*indeterministic*) [DYRESON und SNODGRASS 1993] Fällen sind diese nicht exakt bestimmt. Ein temporales Modell, das temporale Informationen der realen Umwelt verwalten soll, muß beide Varianten unterstützen.

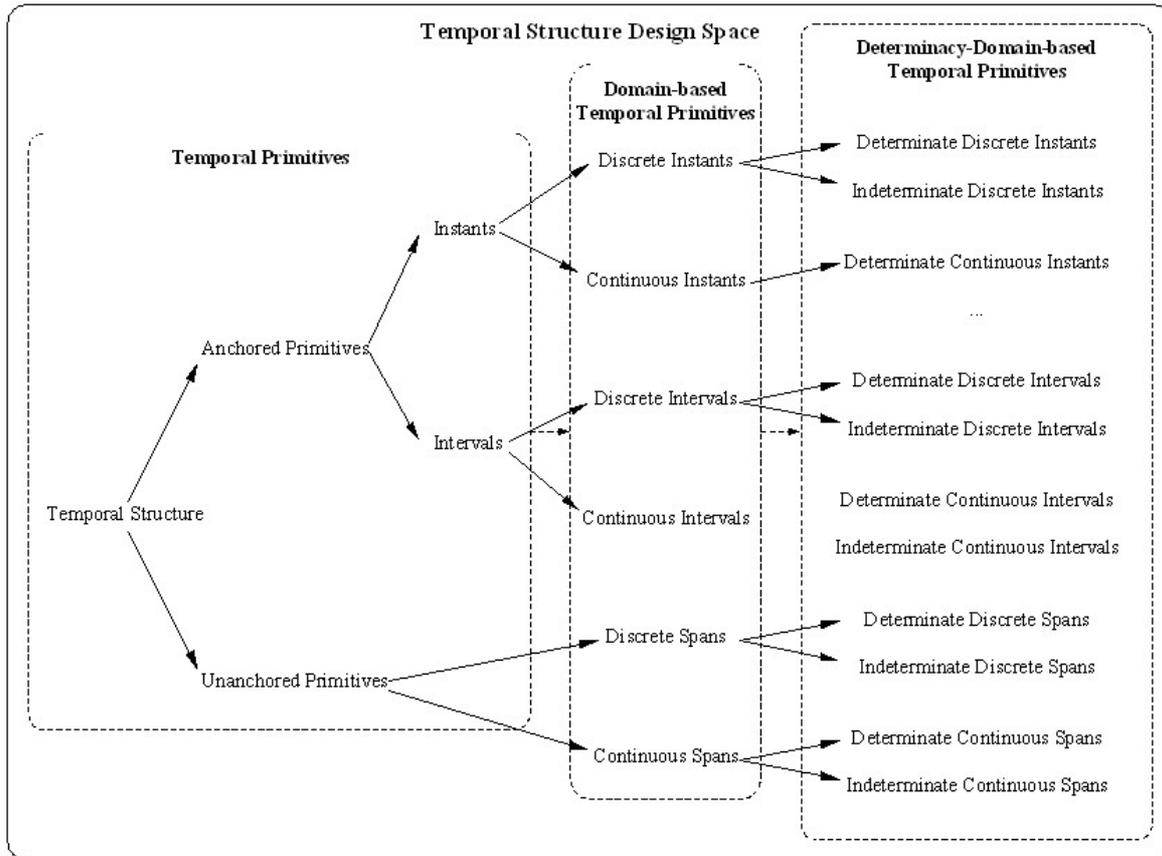


Abb. 5: Designalternativen einer temporalen Struktur

Dabei besteht die oberste Ebene aus absoluten (anchored) und relativen (unanchored) temporalen Primitiven. Die nächste Hierarchiestufe ergänzt die Struktur um Domänen, die entweder einen diskreten (discrete) oder kontinuierlichen (continuous) Charakter haben. Den letzten Bestandteil bilden die determinierten und nicht-determinierten Primitive. Wie schon durch die hierarchische Darstellung angedeutet, besteht eine temporale Struktur aus einer Kombination aller hier dargestellten temporalen Primitive. Durch die Kombination der Eigenschaften der drei Ebenen stehen zur Modellierung von temporalen Sachverhalten elf (es fallen nichtdeterminierte kontinuierliche Zeitpunkte aufgrund der sich gegenseitig ausschließenden Eigenschaften weg) temporale Primitive zur Verfügung. Für die vorgestellten Datentypen kann eine Vielzahl von Operatoren definiert werden. KRÜGER [2000] bietet ausführlichere Erläuterungen der realisierten Operatoren. In SNODGRASS [1995] werden die Operatoren nach ihrem Einsatzzweck und den jeweiligen Argument- und Ergebnistypen wie folgt untergliedert:

- *Build-in-Funktionen* ermöglichen die Typumwandlung zwischen temporalen Datentypen als auch Verknüpfungs- oder Vergleichsoperationen.
- *Arithmetische Operatoren* bieten eine Adaption der Grundrechenarten.
- *Vergleichsoperatoren* liefern einen booleschen Wert (zur Überprüfung von Selektionsbedingungen).
- *Aggregatfunktionen* Auch die SQL-typischen Aggregatfunktionen COUNT, SUM, AVG, MAX und MIN können auf temporale Datentypen angewendet werden.

5.2 Temporale Repräsentation

Die beschriebenen temporalen Primitive stellen die Grundlage einer Darstellung temporaler Daten dar. Bei einem Zeitwert, der durch eine Instanz eines temporalen Datentyps dargestellt wird, ist es notwendig, zwischen der logischen und physischen Repräsentation zu unterscheiden. Wird der Zeitwert mittels eines Kalenders beschrieben, handelt es sich um eine logische Repräsentation. Die im Framework realisierten temporalen Datentypen repräsentieren einen Wert dagegen kalenderunabhängig. Ein Zeitpunkt wird also nicht als Wert einer Granularität, sondern intern als Chrononzahl bezüglich der Basisuhr gespeichert. Kalendarien definieren die für die logische Darstellung nutzbaren Granularitäten und stellen Funktionen zur Überführung der logischen in die physische Darstellungsform bereit (vgl. Abb. 7).

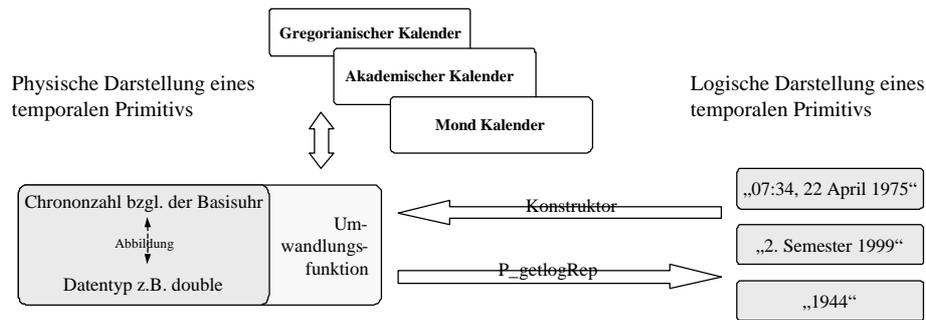


Abb. 6: Kalenderunabhängige Repräsentation

5.3 Temporale Ordnung

In einem temporalen Modell läßt sich der Verlauf der Zeit als *linear*, *sublinear* oder als *verzweigend (branching)* klassifizieren. Einer linearen und sub-linearen Ordnung liegt zugrunde, dass die Zeit die in dieser abgebildet wird, ausgehend von der Vergangenheit bis zur Zukunft in einer linear geordneten Weise abläuft. Beide unterscheiden sich nur bzgl. der Verwaltung der untergeordneten zeitlichen Primitive. Im linearen Fall wird so von den temporalen Primitiven gefordert, dass sich diese in ihren zeitlichen Grenzen nicht überlappen. Im sub-linearen Fall dagegen ergeben sich diesbezüglich keine Einschränkungen. Eine sub-lineare Ordnung kann auch zur Verwaltung von nicht-determinierten zeitlichen Zusammenhängen verwendet werden, z.B. für eine Beschreibung von Veränderungen eines Objektes, die zwar zeitlich getrennt nacheinander erfolgten, aber deren zeitliche Einordnung nur in einem unbestimmten Rahmen möglich ist. So sei als Beispiel bekannt, dass ein Brand das Dach eines Hauses irgendwann im Mai 1940 zerstörte. Um die beiden verschiedenen Zustände raumzeitlich zu modellieren, werden aufgrund der zeitlichen Unbestimmtheit zwei nicht-determinierte Intervalle verwendet. Diese müssen sich in Ihren Grenzen überlappen, da nicht genau klar ist wann der Brand, also die Zustandsänderung, erfolgte (vgl. Abb. 8, Bild B).

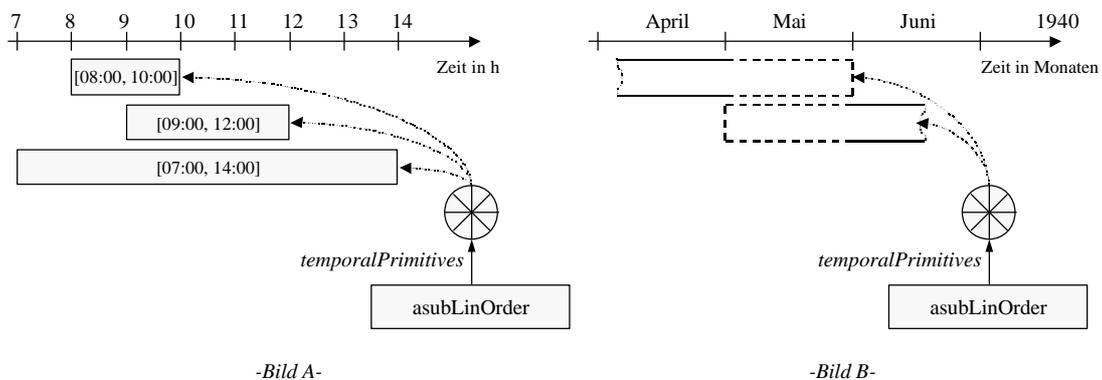


Abb. 7: Beispiele für die Verwendung einer sub-linearen Ordnung

Innerhalb einer verzweigenden Ordnung wird die Zeit nur bis zu einem bestimmten Punkt als linear betrachtet. Die in einer verzweigenden Ordnung verwendete Baumstruktur definiert in jedem sich aufspannenden Zweig eine partielle Ordnung der Zeit, die selbst auch wieder einen verzweigenden Charakter hat. Als Beispiele können städtebauliche Planungsvorhaben dienen, für die verschiedene Alternativszenarien entwickelt werden, aber auch nicht realisierte historische Planungsvorhaben wie die Absichten zur Umgestaltung Heidelbergs im „3. Reich“ durch Speer/Freeze. Diese Vorhaben wurden von FLECHTNER [2000] kritisch untersucht und als 3D-Modell für Deep Map visualisiert. Mit den hier vorgestellten Konstrukten können auch solche „alternativen Realitäten“ verwaltet werden.

5.4 Temporaler Historientyp

Für ein historisch orientiertes Touristeninformationssystem - und ein diesem zugrundeliegenden temporalen GIS - ist die Analyse der Entwicklung sowie der Veränderungen von Geoobjekten, als eine Grundfunktionalität zu betrachten. Eine der wichtigen Anforderungen an ein temporales Modell ist somit, die Entwicklung von Objekten der Realwelt über die Zeit, z.B. die verschiedenen angenommenen Zustände (Werte), darzustellen und zu verwalten. Die Wertemenge bildet die „temporale Historie“ des fraglichen Objektes. Diesbezüglich sind zwei Grundtypen unterscheidbar, nämlich die Gültigkeitszeit- und Aufzeichnungszeit-Geschichte (valid time- / transaction time-history) [SNODGRASS and AHN 1985]. Die Gültigkeitszeit beschreibt die Zeit, für die ein Entity in

der modellierten Realität gültig oder eine Aussage über dieses wahr ist. Z.B. „Statue A befindet sich vor Gebäude B“. Mit der Aufzeichnungszeit-Geschichte wird der Zeitpunkt, zu der ein Wert in die Datenbank abgelegt wird, festgehalten.

5.5 Zusammenspiel der temporalen Komponenten

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die notwendigen Elemente und deren Designalternativen für ein objektorientiertes Modell beschrieben, welches die Modellierung temporaler Modelle ermöglichen soll. Im Folgenden wird näher auf die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bestandteilen eingegangen.

Ein temporales Modell kann eine oder mehrere Gültigkeitszeit-, Aufzeichnungszeit-, Ereignis- oder Benutzerdefinierte Geschichten unterstützen. Jede dieser Geschichten besteht wiederum aus einer Menge von temporalen Ordnungen die entweder lineare, sub-lineare oder verzweigende Eigenschaften aufweisen. So ist es zu linearen Ordnungen gehörenden zeitlichen Strukturen nicht möglich, sich in ihren Grenzen zu überlappen. Sie bilden eine totale zeitliche Ordnung. Demgegenüber ist es bei einer sub-linearen oder verzweigenden Ordnung zulässig, daß sich (absolute) temporale Primitive überlappen und im letzteren Fall mehrere partielle zeitliche Ordnungen bilden. Jede dieser temporalen Ordnungen umfaßt eine temporale Struktur, die entweder aus allen oder aus einer Teilmenge der 11 verschiedenen temporalen Primitiven, die in Abbildung 5 dargestellt werden, besteht. Für jedes temporale Primitiv ist es nötig, eine Abbildung aus dessen physischer Darstellung (real, integer) in eine logische Darstellung („11 März 1971, 7:15:44“) und umgekehrt zu definieren. Um dies flexibel zu verwirklichen, können verschiedene Kalender definiert und den temporalen Primitiven zugeordnet werden. Diese Beziehungen zwischen den Elementen werden in Abbildung 9 schematisch durch eine „hat“-Beziehung dargestellt. Dieser Abbildung zeigt eine Zusammenfassung der verschiedenen Modellierungsalternativen für eine temporale Struktur.

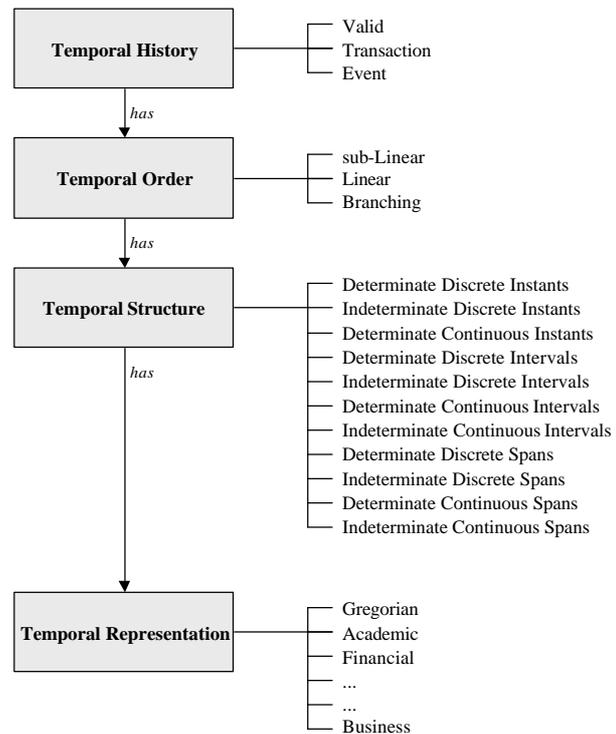


Abb. 8: Primitive für ein temporales Modell

6. Integration von 3D-Geometriedaten und Sachdaten mit dem Zeit-Framework

Der objektorientierte Ansatz erlaubt es, die verschiedenen Aspekte eines Geobjektes und damit auch die verschiedenen temporalen Konstrukte als eigene Klassen zu modellieren und diese dann miteinander in Beziehung zu setzen. Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang der Hauptklassen des resultierenden Datenmodells. Die Vorgehensweise zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs eines 3D-Objektes gestaltet sich so, dass der ersten Schritt immer die Anlage einer thematischen Struktur bildet. Zu jeder thematischen Struktur ist es durch die Zuordnung einer temporalen Ordnung möglich, die sich über die Zeit verändernden räumlichen Daten zu modellieren. Innerhalb einer Ordnung kommen zur Abbildung des raum-zeitlichen Zusammenhanges Objekte vom Typ *combTempCell* zum Einsatz, mit denen neben einer räumlichen Darstellung ebenfalls die für diese Daten geltende Gültigkeitszeit verwaltet werden kann. Um die Funktionsweise in der beschriebenen Form zu ermöglichen, mussten Strukturen zur Kopplung der drei Datenmodelle in das Gesamtmodell integriert werden. Hierfür wurden die Klassen *themGeo* und *combCell* eingeführt. Diese bilden die Beziehung zwischen thematischen Objekten und temporalen Ordnungen sowie die Beziehung zwischen der zeitlichen und räumlichen Komponente innerhalb einer raum-zeitlichen Struktur ab. Die eigentlich zu verknüpfenden thematischen und räumlichen Klassen konnten somit flexibel durch die Definition einer Vererbungsbeziehung zu der Klasse *themGeo* bzw. *combCell* modelliert werden. Durch die Entkopplung der zur Verknüpfung dienenden Struktur vom thematischen und räumlichen Datenmodell ist es zudem einfach möglich, diese Beschreibungsmodelle komplett durch andere zu ersetzen, beispielsweise zur Anpassung an eine andere Domäne.

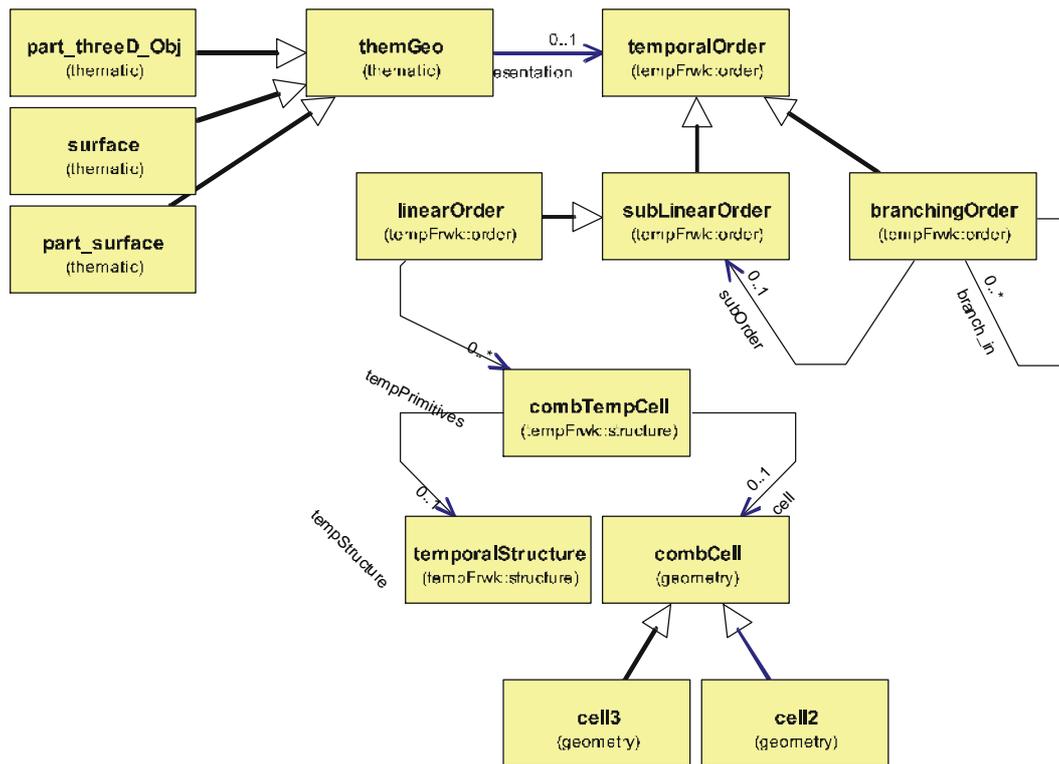
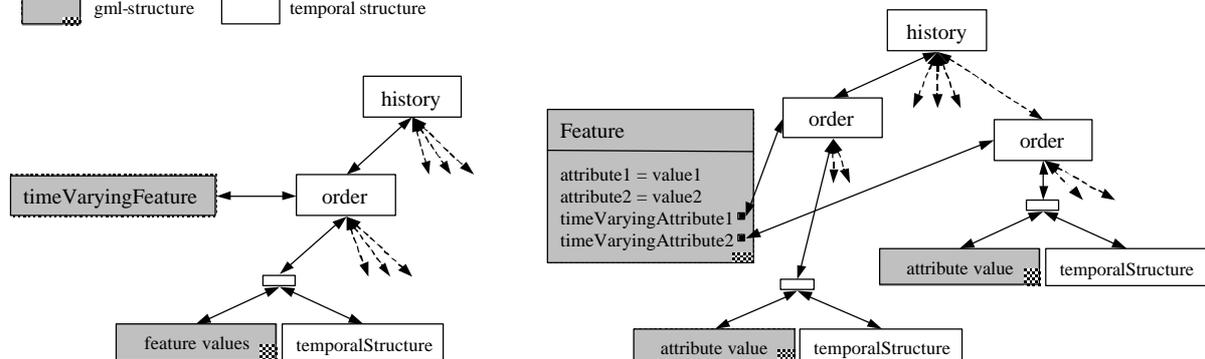


Abb. 9: Klassendiagramm zum Zusammenhang zwischen thematischen, räumlichen und temporalen Daten

7. Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt konnte ein mächtiges Datenbankmodell als Grundlage für das Touristeninformationssystem Deep Map vorgestellt werden. Weitergehende Arbeiten sind notwendig, z.B. die Implementierung multidimensionale Indexverfahren für die Realisierung leistungsfähiger Zugriffe auf große Datenmengen. Derartige Ansätze werden in weiteren Arbeiten am EML bearbeitet. Gleiches gilt für die Entwicklung einer geeigneten raumzeitlichen Abfragesprache. Zudem wurde ein Vorschlag erarbeitet, wie das vorgestellte temporale Framework in XML als XML-Schema repräsentiert werden kann und mit dem Standard des Open GIS Consortiums fuer zweidimensionale Vektorgeometrie - der Geographic Markup Language (GML) – zusammengeführt werden kann, um mittels XML raumzeitliche Objekte standardisiert beschreiben zu können [Zipf und Krüger 2001]. Hierbei sind sowohl Alternativen fuer Objekt- als auch Attributzeitstempelverfahren realisierbar (Abb. 11).

gml-structure
 temporal structure



A: Objekt-Zeitstempel

B: Attribut-Zeitstempel

Abb. 10: Kombination von GML- und temporalen Teilstrukturen

Die Entwicklung eines flexiblen und effizienten temporalen 3D-Geoinformationssystems ist eine reizvolle und zugleich anspruchsvolle Aufgabe für die weitere GIS-Forschung. Ein alle Aspekte (Datenhaltung, Analyse und Visualisierung) gleichermaßen umfassendes „4D-GIS“ wird mittelfristig nicht zu erwarten sein. Beispielsweise

existieren kaum Arbeiten über die Analyse der möglichen Veränderungen topologischer Beziehungen über die Zeit in vektorbasierten Geoinformationssystemen. Raumzeitliche Analysemöglichkeiten sollten gleichermaßen fachliche Attribute, Geometrie und Topologie berücksichtigen. Ähnlich unbefriedigend ist z.B. das Fehlen von Funktionen zur Inter- oder Extrapolation in vektorbasierten 4D-GIS. Mit dem vorgestellten und für Deep Map realisierten 4D-Datenmodell wurde ein Beitrag zur Verwaltung temporaler GIS Daten erbracht.

Weitergehende Arbeiten am EML betreffen die Umsetzung des vorgestellten Modells auf ein objektrelationales DBMS (Cloudscape von Informix), die Einbindung in eine agentenbasierte Softwareumgebung und verteilte Kommunikationsinfrastruktur im Rahmen des Projektes „Deep Map“ sowie die Integration mit weiteren am EML entwickelten Datenbanken, wie einem OpenGIS-konformen Geodatenserver (FSF für CORBA) [Zipf und Aras 2001].

Dieser Artikel basiert auf einem Beitrag, der zum Symposium für angewandte Geoinformationstechnologie, AGIT 2001, Salzburg eingereicht wurde.

8. Literatur

- BILL, R. und FRITSCH, D. (1991): Grundlagen der Geoinformationssysteme. Bd.1, Hardware, Software und Daten. Wichmann. Heidelberg.
- BØHLEN M., JENSEN C. and SKJELLAUG B. (1998): Spatio-Temporal Database Support for Legacy Applications, In: Proceedings of the 1998 ACM - Symposium on Applied Computing, February 27-March 1, 1998. Atlanta, GA. 226-234.
- BREUNIG, M. (2000): On the way to component-based 3D/4D geoinformation systems. In: Lecture Notes in earth Sciences. Vol 94. Springer. Heidelberg.
- CODD, E. F. (1970): A Relational Model for Large Shared Data Banks. In: ACM 3/1970.
- DYRESON, C.E. und SNODGRASS, R. (1993): Valid-time Indeterminacy. Proceedings of the 9th International Conference on Data Engineering. 335-343.
- FLECHTNER, I. (2000): Architektur im Nationalsozialismus. Bauvorhaben für Heidelberg, Diplomarbeit. Geographisches Institut. Universität Heidelberg.
- KRÜGER, S. (2000): Konzeption und Implementierung eines temporalen objekt-orientierten Modells für 3-dimensionale Geo-Objekte im Deep Map-Projekt. Diplomarbeit. Institut für Praktische Informatik und Medieninformatik, Technische Universität Illmenau.
- MALAKA, R. and ZIPF, A. (2000): Challenging IT research in the framework of a tourist information system. In: Proceedings of ENTER 2000, 7th. International Congress on Tourism and Communications Technologies in Tourism. Barcelona. Spain. Springer Computer Science, Wien.
- MOLENAAR, M. (1989): Single Valued Vector Maps – A Concept in Geographic Information Systems, 18-26.
- MOLENAAR, M. (1990): A Formal Data Structure for Three Dimensional Vector Maps. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling. 830-843.
- SCHEUGENPFLUG, S. (1998): Raum-Zeit-Analysen in Geoinformationssystemen am Beispiel des Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“. Diplomarbeit. Geodätisches Institut. TU München.
- SKJELLAUG, B. (1997a): Temporal Data: Time and Relational Databases. Research Report 246. Department of Informatics, University of Oslo.
- SKJELLAUG, B. (1997b): Temporal Data: Time and Object Databases. Research Report 245. April 1997. Department of Informatics, University of Oslo.
- SKJELLAUG, B. and BERRE, A.-J. (1997): Multi-dimensional Time Support for Spatial Data Models, Research Report 253, May 1997. Department of Informatics, University of Oslo.
- SKJELLAUG, B. (1996): Time and Temporal Data Management - With Examples of a Temporal GIS. September 25, 1996. Agricultural University of Norway.
- SNODGRASS, R. (1995)(Eds.): The TSQL2 Language Design Committee. The TSQL2 Temporal Query Language. Kluwer.
- SNODGRASS, R. and AHN, I. (1986): Temporal database In: IEEE Computer, 19. 35-46.
- SNODGRASS, R. and AHN, I. (1985): A Taxonomy of Time in Databases. In: Proceedings of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. 236-246.
- STREIT (1998): Vorlesung Geoinformatik online. <http://castafiore.uni-muenster.de/vorlesungen/geoinformatik/index.html>
- TANSEL *et al.* (1993): Temporal Databases. Benjamin/Cummings Publishing.
- WACHOWICZ, M. (1999): Object-Oriented Design for Temporal GIS. Taylor and Francis. London.
- ZIPF, A., CHANDRASEKHARA, V., HÄUBLER, J. and MALAKA, R. (2000): GIS hilft Touristen bei der Navigation – ein erster Prototyp des mobilen Deep Map Systems für das Heidelberger Schloß. In: HGG-Journal, Heft 14 (Journal der Heidelberger Geographischen Gesellschaft). Heidelberg.

- ZIPF, A. und ARAS, H. (2001): Realisierung verteilter Geodatenserver mit der OpenGIS SFS für CORBA. In: GIS. 3/2001. Geo-Informationen-Systeme. Zeitschrift für raumbezogene Information und Entscheidungen. Heidelberg. 36-41.
- ZIPF, A. und KRÜGER, S. (2001 submitted): TGML - Extending GML by Temporal Constructs - A Proposal for a Spatiotemporal Framework in XML. Submitted for ACM-GIS 2001. The Ninth ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems. Atlanta. USA.