

Das Konzept der Graphen-Grammatik zur Formalisierung topologischer Veränderungen von Geo-Objekten

The Concept of Graph Grammars for Formalizing Topological Changes of Geo-Objects

Jochen Wittmann

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin · wittmann@htw-berlin.de

Zusammenfassung: Viele Anwendungen im Bereich der Umweltsimulation beschränken sich nicht auf die Dynamik von eindimensionalen Bestandsgrößen, sondern versuchen zusätzlich, die räumliche Dimension der untersuchten Objekte mit ihren dynamischen Veränderungen zu beschreiben. In dieser Situation zeigt der Artikel, dass es einer allgemeinen Spezifikationsebene bedarf, die es erlaubt, anwendungsnah und problemspezifisch die Dynamik von Objekten mit Raumbezug abzubilden und andererseits die Möglichkeit gibt, diese Spezifikation effektiv, transparent und effizient durch einen Simulationsalgorithmus abzuarbeiten. Dabei sollen insbesondere die aus den topologischen Eigenschaften der Objekte abgeleiteten semantische Konsistenzbedingungen eingehalten werden. Zu diesem Zweck werden die Möglichkeiten der Dynamik für die GIS-Primitive Punkt, Linie und Polygon klassifiziert. Anschließend wird der Ansatz der Graphen-Grammatiken aus dem Bereich der Formalen Sprachen auf die Probleme der Dynamikspezifikation von Topologien von raumzeitlichen Objekten übertragen und das algorithmische Optimierungspotenzial für die Implementierung dieses Ansatzes aufgezeigt.

Schlüsselwörter: Dynamische Modelle, Modellspezifikation, 4D, Topologie, Simulation, Graphen-Grammatik

Abstract: Many applications in the field of environmental simulation are not limited to the dynamics of one-dimensional inventory variables, but additionally try to describe the spatial dimension of the investigated objects with their dynamic changes. In this situation, the article shows that a general specification level is required, which allows to model the dynamics of objects with spatial reference in an application-oriented and problem-specific way. On the other hand, it is possible to process this specification effectively, transparently and efficiently by a simulation algorithm. In particular, the semantic consistency conditions derived from the topological properties of the objects should be adhered to. For this purpose, the possibilities of dynamics for the GIS-primitives point, line and polygon are classified. Subsequently, the approach of graph grammars from the field of formal languages is transferred to the problems of dynamic specification of topologies of spatio-temporal objects and the algorithmic optimization potential for the implementation of this approach is shown.

Keywords: Dynamic models, model specification, 4D, topology, simulation, graph grammar

1 Einleitung

Die Anforderungen an Analyse, Modellierung und Simulation von dynamischen Prozessen haben sich in den letzten Jahren grundlegend verändert. Einerseits durch eine zunehmende Verbreitung von Smartphones mit automatischer Positionsermittlung über GPS-Satelliten auf Seite der Datenerfassung, die selbst für den Consumer-Bereich zum Standard geworden ist, und andererseits mit dem freien, komfortablen und schnellen Zugriff auf geographisches Karten- und Bildmaterial z. B. durch das Web-GIS von Google (Google Maps, 2019) oder bei

OpenStreetMap (2019). Die Ansätze zur Modellierung können nun geographisch differenziert mit hoher räumlicher Auflösung erfolgen. Vonseiten der Informatik wird dieser Trend durch die Konzepte der objektorientierten Programmiersprachen bzw. der individuenbasierten Modellierungstechniken unterstützt, die die Behandlung einer Vielzahl auch räumlich differenzierter Objekte bzw. Individuen auf relativ einfache und anschauliche Weise möglich machen, wie es z. B. in Ortmann (1999) speziell für die Dynamikmodellierung erläutert ist oder eine allgemeine Einführung in die objektorientierte Programmierung, wie z. B. in Balzert (1999) lehrt. Während die Erfassung und Speicherung von Raum-Zeit-Daten durch entsprechende objektorientierte Datenbankkonzepte im Wesentlichen gelöst ist, gestaltet sich die Spezifikation von dynamischen Modellen mit Raum- und Zeitbezug schwierig. Eine detaillierte Analyse der entsprechenden Ansätze aus dem Bereich der Modellspezifikation einerseits und den Geoinformationssystemen andererseits findet sich in vorausgehenden Arbeiten des Autors, z. B. in Wittmann (2019).

In diesem Beitrag sollen nun zunächst die GIS-Primitive Punkt, Linie und Polygon auf ihre potenziellen dynamischen Eigenschaften hin untersucht und klassifiziert werden. Anschließend wird der Ansatz der Graphen-Grammatiken, der aus dem Bereich der formalen Sprachen stammt, auf das die Dynamikspezifikation der Geo-Objekte übertragen. Am Ende steht eine Abschätzung des Potenzials dieses Ansatzes in Bezug auf lauffzeit-technische und modellierungstechnische Aspekte.

2 Dynamikbeschreibung auf der Basis der GIS-Primitive

Nach der vorausgehenden Analyse soll nun ein konstruktiver Vorschlag entwickelt werden, wie Dynamik von Geoobjekten beschrieben und algorithmisch behandelt werden kann. Im Folgenden Abschnitt wird für die Primitive des GIS Punkt, Linie, Polygon und Topologie klassifiziert und spezifiziert, wie sich Bewegung ausdrücken kann.

2.1 Dynamik von Geo-Objekten

Für jedes der Primitive soll hier klassifiziert werden, welche Möglichkeiten der dynamischen Veränderungen auftreten und wie diese im Modell zu beschreiben sind. Dabei fließen sowohl die Klassifikation von Yattaw (1999) als auch die Klassifikation von Modellbeschreibungsmethoden aus Wittmann (2019) ein und werden zu einer Dynamikbeschreibung für Geoobjekte zusammengeführt. Abbildung 1 zeigt die Klassifikation im Überblick.

2.1.1 Typ Point

Im einfachsten Fall liegt ein Punkt-Feature vor. Je nach Modellziel kann sich ein Punktobjekt entweder durch eine kontinuierliche Bewegung im Raum bewegen oder aber plötzliche, sprunghafte Positionsveränderungen durchführen. Im ersten Fall kann diese kontinuierliche Bewegung durch einen Bewegungsvektor, also die Angabe von Richtung und Geschwindigkeit, dargestellt werden, mathematisch lässt sich die Beschreibung auf eine Differentialgleichung zurückführen.

Im Fall der sprunghaften Positionsänderung muss man auf die Konzepte der diskreten Simulation zurückgreifen und die Positionsänderung als diskretes Ereignis interpretieren, dessen Ausführung ohne Zeitverzug (also eben sprunghaft) erfolgt und das durch eine wie auch immer geartete logische Bedingung ausgelöst wird.

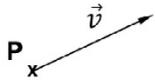
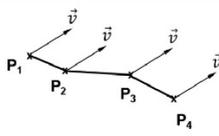
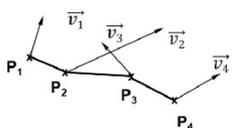
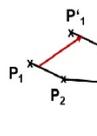
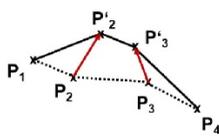
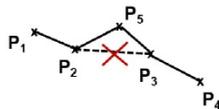
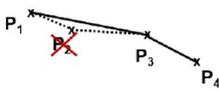
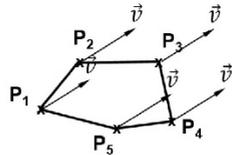
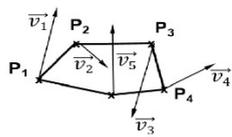
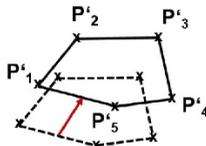
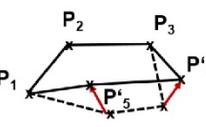
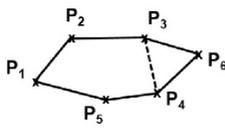
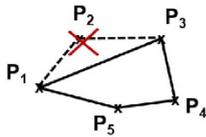
	continuous movement	sudden movement	topological change
point	 <p>v with velocity direction</p>	 <p>triggered by event condition</p>	 <p>create Point delete point</p>
line	 <p>(1) v identical for all supporting points</p>  <p>(2) v_i for supporting point i</p>	 <p>(1) for the complete line</p>  <p>(2) individually for a subset of supporting points</p>	 <p>(1) create additional point</p>  <p>(2) delete point of the line</p>
polygon	 <p>(1) v identical for all supporting points</p>  <p>(2) v_i for supporting point i</p>	 <p>(1) for the complete object</p>  <p>(2) individually for a subset of supporting points</p>	 <p>(1) create additional point</p>  <p>(2) delete point of the object</p>

Abb. 1: Dynamikspezifikation für GIS-Primitive

Neben diesen Bewegungsformen eines zum aktuellen Zeitpunkt im System bzw. im Modell existierenden Punkt-Objektes sind dynamische Veränderungen in der Topologie möglich, die in diesem Fall das Erzeugen bzw. das Löschen eines Punkt-Objektes abbilden.

Beispiele sind offensichtlich: für den kontinuierlichen Fall ein kontinuierlich fahrendes Fahrzeug oder ein Vogel, der kontinuierlich im 3D-Raum fliegt. Eine nur zu diskreten Zeitpunkten gemessene bzw. beobachtete Position eines Tieres bei Tierwanderungen oder aber alle Bewegungen zwischen Haltestellen eines ÖPNV-Verkehrsmittels, bei dem der eigentliche Fahrweg nicht wesentlich für den Modellzweck ist, sondern nur die Info wann sich das Fahrzeug laut Fahrplan an welcher Haltestelle befindet. Das Erscheinen und Verschwinden vom Punktobjekten bedarf wohl keiner weiteren Beispiele, es kann sowohl mit dem kontinuierlichen Fall als auch mit dem diskreten Fall kombiniert werden.

2.1.2 Typ Line

Für Linienobjekte ist die Dynamik weiter zu differenzieren: Es kann sich um eine Bewegung des Linienobjektes als Ganzes handeln oder aber das Linienobjekt ändert seine Form nur in Teilen, indem sich nur eine Teilmenge der definierenden Punkte bewegt, die übrigen Stützstellen ihre Position jedoch beibehalten. Beide Varianten sind sowohl für den kontinuierlichen als auch für den diskreten Fall möglich. Hinzu kommen die Veränderungen in der Topologie, die sich durch die elementaren Methoden „Stützstelle hinzufügen“ und „Stützstelle entfernen“ abbilden lassen.

Beispiel für den kontinuierlichen Fall könnte die dynamische Entwicklung einer Küstenlinie sein, der diskrete Fall kann beispielsweise eine Absperrung oder einen Zaun abbilden, der einmal jährlich neu an geographische Gegebenheiten angepasst wird, beispielsweise als Schutz für Spaziergänger an die kontinuierliche Veränderung einer Steilküste.

Wird die Liniendynamik durch die Dynamik einer Teilmenge der Stützstellen beschrieben, so ist für die Modellierung bedeutsam, dass durch die für die Einzelpunkte getrennt spezifizierte Dynamik die Semantik und Topologie der Linie als Ganze nicht verletzt wird (z. B. die Eigenschaft kreuzungsfrei). Entsprechend muss bei der Beschreibung oder zumindest bei der anschließenden Abarbeitung der Beschreibung in der Simulation darauf geachtet werden, dass semantische Verstöße zu einer Fehlermeldung und zum Abbruch der Simulation führen.

2.1.3 Typ Polygon

Für Objekte des Typs Polygon gelten analog dieselben Bemerkungen wie für Linienobjekte. Polygone können sich mit allen ihren Stützstellen synchron kontinuierlich oder plötzlich bewegen. Zeigt nur eine Teilmenge der Stützstellen des Polygons Dynamik, so kann diese wiederum durch einen Bewegungsvektor (kontinuierlich) oder durch ereignisartige, sprunghafte Veränderungen der Position der Stützstellen spezifiziert werden. Auch hier kann es durch die Einzeldynamik von Stützstellen zur Verletzung der topologischen Eigenschaften des Polygons kommen. Für solche Fälle sind entsprechende Vorkehrungen bei Modellbeschreibung und Simulation zu treffen.

Die entsprechenden topologischen Dynamikalternativen verhalten sich analog zu den zuvor besprochenen. Beispiel für ein diskretes Bewegen eines Polygonobjektes ist das tägliche Umstellen eines Schafpferchs als Ganzes oder mit Anpassung der Pfähle an geographische Gegebenheiten. Die kontinuierliche Entwicklung eines Polygons bildet beispielsweise die Entwicklung eines Siedlungsgebietes. Bei diesem Beispiel werden die Stützstellen unterschiedliche Bewegungsmuster aufweisen. Die kontinuierliche Bewegung einer durch einen kontinuierlich fahrenden Traktor gezogenen Egge über ein Feld kann als Beispiel für eine kontinuierliche aber formerhaltende Dynamik gelten.

2.1.4 Bemerkungen zur vorausgehenden Klassifikation

Bemerkung 1: Grundsätzlich ist die Modellierung über die Angabe eines Bewegungsvektors oder durch die Angabe eines diskreten Ereignisses möglich. Der kontinuierlich zu interpretierende Bewegungsvektor reicht zur Dynamikspezifikation aus und wird für physikalisch-naturwissenschaftliche Modelle bevorzugt. Er ermöglicht die Simulation mit Zeitschritten, die gegen Null gehen, also eine sehr hohe zeitliche Auflösung. Diese bedingt jedoch auch einen erheblichen Rechenzeitbedarf für so beschriebene Modelle. Daher ist die Alternative der diskreten Modelle zu bedenken, die zwar immer nur sprunghafte Änderungen des Systemzustands zulassen, in der Regel jedoch wesentlich weniger Rechenzeit beanspruchen. Im Fall der diskreten Ereignisse ist die Angabe einer logischen Bedingung (wann das Ereignis stattfindet.) und eines in beliebiger formalen Sprache zu formulierenden „Effekts“ des Ereignisses (Was zum Ereigniszeitpunkt geschieht.) notwendig.

Bemerkung 2: In der tabellarischen Übersicht der unterschiedlichen Dynamik-Spezifikationsvarianten fällt auf, dass eine kontinuierliche Spezifikation von Änderungen in der Topologie nicht vorgesehen ist. Dies ist durch die mengentheoretische Definition der Topologie begründet: ein Element einer Menge (Ecke oder Kante) ist entweder vorhanden oder nicht. Ein „Wachsen einer Kante muss demnach durch die Bewegung der die Kante definierenden Stützstellen nachgebildet werden.

Bemerkung 3: Beim Erzeugen von neuen Objekten (Punkten oder Stützstellen) wurde in der Beschreibung allein der Dynamikaspekt diskutiert und die Auswirkung auf die Topologie beschrieben. Selbstverständlich müssen beim Erzeugen auch sämtliche Attribute der neu erzeugten Objekte sinnvoll parametrisiert werden.

Bemerkung 4: In diesem Abschnitt sollten allein und ausschließlich die Spezifikationsmöglichkeiten für die dynamischen Beziehungen für Geo-Objekte klassifiziert werden. Die Frage, wie sich Betrag und Richtung eines Bewegungsvektors berechnen lassen und wie weit und wohin eine Stützstelle bei einem Ereignis springt, hängt von diversen anderen Größen, oder ganz allgemein formuliert, vom aktuellen Systemzustand ab.

3 Graphen-Grammatiken als Ansatz zur Formalisierung von topologischen Veränderungen

Mit den Standardverfahren der kontinuierlichen und diskreten Simulation lassen sich eine Reihe der in Abbildung 1 klassifizierten Fälle behandeln. Allerdings ergeben sich Schwierigkeiten, wenn die Bewegung für Teile eines Objekts unterschiedlich erfolgt, weil durch diese Bewegung die Konsistenz der Topologie der Objekte gegebenenfalls verletzt wird (neue Schnittpunkte bei Linien entstehen, ein Polygon entwickelt sich zu zwei Teilpolygonen, ...). Daher erscheint es sinnvoll, die Spezifikation dynamischer Veränderungen nicht an die Beschreibung der Dynamik einzelner Bestimmungsstücke eines Objektes (z. B. einzelne Punkte als Stützstellen) zu binden, sondern die Dynamikspezifikation auf höherer Ebene für eine komplexere Situation anzugeben. Damit können, wie sich zeigen wird, Konsistenzprobleme an der Wurzel vermieden werden.

Zu diesem Zweck wird im Folgenden ein Ansatz von Schneider (Schneider, 2019) referiert, der aus dem Bereich der formalen Sprachen stammt und sich mit sogenannten Graphen-Ersetzungssystemen bzw. Graphen-Grammatiken auseinandersetzt. Die Definitionen und das

Beispiel der folgenden zwei Abschnitte sind wörtlich mit nur kleinen Anpassungen aus dem genannten Skript von Schneider übernommen, welches den Stand der Forschung kompetent und kompakt zusammenfasst. Die Übertragung auf die Situation der Geo-Objekte erfolgt dann im dritten Abschnitt dieses Kapitels.

3.1 Definitionen

Die Definition der Graphen-Grammatik ist motiviert durch die allgemein bekanntere Definition der Chomsky-Grammatik, die nicht auf Graphen, sondern auf Zeichenketten arbeitet:

Definition (Chomsky Grammar (Chomsky, 1959)):

A Chomsky grammar (phrase structure grammar) is a quadruple $G = (T, N, P, S)$ where T and N are disjoint finite sets (alphabets), S is a distinguished element of N , and P is a finite subset of $L^*NL^* \times L^*$ with $L = T \cup N$.

Die Elemente der Mengen T und N werden Terminalsymbole bzw. Nicht-Terminalsymbole genannt. S ist das Startsymbol. P ist eine Menge von Produktionen bzw. Ersetzungsregeln. Statt der Tupelschreibweise (u, v) werden die Produktionen für gewöhnlich in der sogenannten Backus-Naur-Form als $u ::= v$ angegeben.

Definition (Chomsky Language):

Jede Chomsky-Grammatik definiert eine Menge von Zeichenketten, die unter Verwendung der Produktionen und ausgehend vom Startsymbol abgeleitet werden können und ausschließlich aus Terminalsymbolen bestehen. Diese Menge wird Chomsky-Sprache zur Grammatik G genannt:

$$L(G) := \{w \mid w \in T^* \wedge S \xRightarrow{*G} w\}$$

In einem zweiten Schritt können wir Chomskys Ansatz zur Formalisierung des Begriffs einer Graphen-Grammatik verallgemeinern. Der Hauptpunkt ist, Produktionen anzuwenden, bis eine Art Normalform erreicht ist. Dazu hat Chomsky Terminalsymbole von nicht-terminalen unterschieden. Produktionen werden angewendet, bis die Zeichenkette keine nicht-terminalen Symbole mehr enthält. Wir können diese Idee leicht auf Graphen-Grammatiken übertragen: (hier wieder die wörtlichen Definitionen aus (Schneider, 2019):

Definition (Graph grammar):

A graph grammar is given by a quadruple $\mathcal{G} = (L, T, P, S)$ with P being a finite set of graph productions in a category of labeled (hyper-)graphs using L as the labeling alphabet. $T \subseteq L$ is called the terminal alphabet, S is the starting graph.

Definition (Graph language):

If \mathcal{G} is a graph grammar, then the set

$$\mathcal{L}(\mathcal{G}) := \{G \mid S \xRightarrow{*G} G \wedge l_{EG}[E_G] \subseteq T_E \wedge l_{VG}[V_G] \subseteq T_V\}$$

is called the language of \mathcal{G} .

Da diese Definitionen mathematisch anspruchsvoll sind, muss an dieser Stelle zur weiteren Erläuterung und Vertiefung auf die Originalquelle verwiesen werden. Die Bedeutung des Ansatzes soll im Folgenden zunächst durch ein etwas ausführlicheres Beispiel veranschaulicht werden, bevor die Übertragung auf die Situation der Geo-Objekte erfolgt.

3.2 Beispiel Graphen-Ersetzung

Abbildung 2 zeigt die Situation am Beispiel der Relation “is_mother”. Die Knoten des gegebenen Graphen sind Personen von weiblichem (f), männlichen (m) oder beliebigem (x) Geschlecht. Die Knoten sind zur Identifikation mit hochgestellten ganzen Zahlen durchnummeriert. Zwischen den Knoten besteht die Relation “is_mother”, ebenfalls mit hochgestelltem Identifikator.

Als Produktion wird ein dreiteiliges Ersetzungsschema angegeben: Auf der linken Seite wird ein Ausschnitt eines Graphen als parametrisierte Ist-Situation beschrieben. In der Mitte steht der sogenannte Interface-Graph und auf der rechten Seite muss die Situation nach Anwendung der Produktion angegeben werden. Sinn der Produktion ist es, die Relation “sister_of” zu ergänzen.

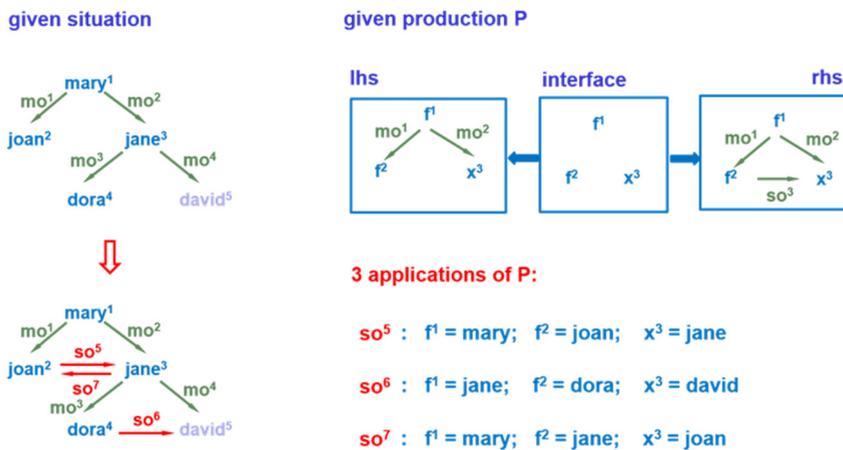


Abb. 2: Beispiel für Graphen-Ersetzung (aus Schneider, 2019)

Das linke Objekt der Produktion muss nicht nur sicherstellen, dass beide Söhne die gleiche Mutter haben, sondern auch, dass die Person an der Quelle der neuen Kante weiblich ist. Wir stellen dies sicher, indem wir w für mary, joan, jane, dora und x für mary, joan, jane, dora, david definieren. Dann haben wir drei Möglichkeiten, diese Produktion auf den gegebenen Graphen (so_5 , so_6 und so_7) anzuwenden, wie in der Abbildung dargestellt.

Es ist zu beachten, dass durch die Spezifikation der Produktion sämtliche semantische Bedingungen automatisch eingehalten werden: passendes Geschlecht der beteiligten Personen, Beziehung zur gemeinsamen Mutter. Darüber hinaus wird bereits an dieser Stelle deutlich, dass das Finden geeigneter Passungen der linken Seite im aktuell gegebenen Graphen eine nicht-triviale Aufgabe darstellen kann.

3.3 Beispiele für eine Anwendung auf Geo-Objekte

Es kann aus Platzgründen das Potenzial dieses Ansatzes für die Beschreibung raumzeitlicher Geo-Objekte nur angedeutet werden. Drei Beispiele sollen wenigstens illustrieren, wie komplexe Zusammenhänge durch geeignete Graphen-Ersetzungsregeln in allgemeiner Form angegeben werden können. Topologisch lassen sich derartige Dynamiken als Wachstumsregeln

für Graphen beschreiben. Abbildung 3 zeigt drei einfache Beispiele:

1. Stößt eine vorbestimmte Flugroute auf ein Hindernis, so soll dieses durch eine lokale Änderung der Route mit einer zusätzlichen Stützstelle umflogen werden.
2. Stellt sich in einem Netzwerk eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung als stark nachgefragt, eine andere als schwach nachgefragt dar, so soll erstens eine Direktverbindung für die stark nachgefragte Strecke eingerichtet werden und zweitens die schwach nachgefragte Strecke gelöscht werden.
3. Im dritten Beispiel können die Objekte sowohl als Polygone als auch als Graphen interpretiert werden. In jedem Fall geht es darum, Wachstumsprozesse zu beschreiben. Eine Form, wie sie links des Pfeiles dargestellt ist, kann sich zu einer Form, wie sie rechts des Pfeiles dargestellt ist, verwandeln. Interpretiert als Polygone könnte auf diese Weise die Entwicklung eines Siedlungsgebietes modelliert werden. Als Graph könnte das Wachstum eines Versorgungsnetzes auf diese Weise beschrieben sein.

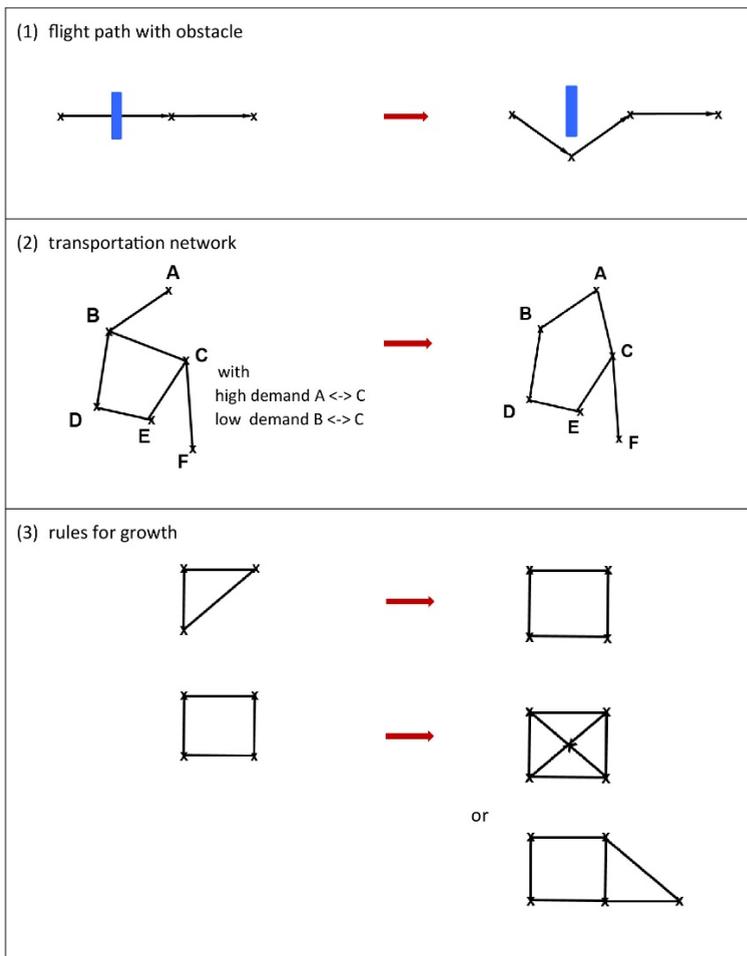


Abb. 3: Beispiele zur Dynamik von Topologien

Die prinzipielle Vorgehensweise lässt sich dabei in vier Schritten sehr einfach beschreiben:

1. Erstelle einen Satz von Produktionen, die die Dynamik der behandelten Objekte wiedergeben.
2. Finde in einem bestehenden Graphen eine Repräsentation der linken Seite einer Produktion und löse diese linke Seite als Teilgraphen heraus.
3. Führe in dem Teilgraphen, der durch die linke Seite gegeben ist, die Veränderung entsprechend der rechten Seite der Produktion aus.
4. Binde den veränderten Teilgraphen wieder in den Kontext des bestehenden Graphen ein.

Allerdings stellen sich bei Detailbetrachtung einige Fragen, die die beschriebene Vorgehensweise verkomplizieren:

1. Wie weit muss die Übereinstimmung beim Vergleich der aktuellen Situation mit der linken Seite der Produktion gehen? Nur topologisch? Mit allen Attributen der beteiligten Knoten? ... Hier handelt es sich im Wesentlichen um ein Spezifikationsproblem, das durch den Formalismus der Graphen-Grammatiken gelöst werden kann. (Im Beispiel durch die Einbeziehung des Geschlechts der Knoten.)
2. Wie findet man alle Passungen im gegebenen Graphen? Dies ist ein Suchproblem, das näherer Betrachtung bedarf, durch die Formalisierung aber algorithmisch gut zu fassen ist.
3. Wie sind die Regeln (Produktionen) zu formulieren, um Konsistenz zu erhalten? Hierbei hilft ebenfalls der Formalismus, indem er Eigenschaften einer Produktionenmenge mathematisch ableitbar macht (analog zu den Eigenschaften der Chomsky-Grammatiken).
4. Wie ist das Zeitverhalten einer derartig spezifizierten Dynamik? Hier schlägt der Autor eine Interpretation gemäß dem Paradigma der diskreten Modelle vor, indem die Ausführung einer Produktion als Effekt eines diskreten Events behandelt wird.

4 Ansätze zur Optimierung der algorithmischen Behandlung der Dynamikspezifikation durch Graphen-Grammatiken

Vielmehr sollen hier zwei Ansatzpunkte zur Optimierung, die sich allein aus dem vorgestellten Simulationskonzept ergeben, als Themen für weitergehende Forschungsarbeiten andiskutiert werden.

Ein wesentlicher Unterschied zur Behandlung der Geo-Primitive im GIS liegt darin, dass sich ein Objekt nicht mit allen seinen bestimmenden Stützstellen gleich bewegen muss, sondern dass die Dynamik differenziert für jede individuelle Stützstelle spezifiziert werden kann. Das führt zu erheblichen Problemen bei Speicherung und Zugriff auf diese Objekte, weil ein effizienter Zugriff auch auf die einzelnen Stützstellen die Kapselung der höheren, zusammengesetzten Objekte (z. B. eines Polygons) verletzt. Hier sind Überlegungen notwendig, wie diese Zugriffe effizient ermöglicht werden können.

Neben diesen Aspekten der effizienten Speicherung soll hier aber besonders das Optimierungspotenzial betrachtet werden, welches durch die Einführung der Graphen-Ersetzung entsteht. Im konzeptuellen Teil wurde zu diesem Schritt zwar die Spezifikation in Form der Ersetzungsregeln angegeben, die Teilschritte, die eine Implementierung umfassen muss und die im Wesentlichen für die Rechenzeiten verantwortlich sind, sind nicht aufgeführt worden. Es handelt sich dabei um die Schritte:

- Suche nach dem durch die linke Seite einer Ersetzungsregel gegebenen Mustern im aktuellen Modellzustand.

- Generieren der Menge mit erlaubten Ersetzungsvarianten.
- Variation der Position neuer Knoten im Raum.

Neben den offensichtlich benötigten Suchstrategien werden Methoden zum effizienten Aufspannen des Suchraums durch die systematische Generierung von Alternativen benötigt. Für beide Methoden müssen effektive und effiziente Datenstrukturen gefunden werden. Für lokal begrenzte Suchen wären geeignete Hashing-Strategien in Betracht zu ziehen. Gefundene Alternativen müssen bewertet und einem Ranking unterzogen werden. Effiziente Zugriffe auf das Bewertungsmodell sind dazu notwendig. Die Bewertung ist durch entsprechende statistische Verfahren abzusichern (Konfidenzintervalle, ...). Dies wiederum legt es nahe, die Simulationsläufe für unterschiedliche Parametrisierungen durch Parallelisierung zu beschleunigen. Da ähnliche Probleme häufig auftreten werden (z. B. das Finden einer optimalen Position für einen neuen Knoten), ist es wahrscheinlich, dass selbstlernende Verfahren diesen Verfahrensschritt erheblich verkürzen können.

Bevor ein Satz von Ersetzungsregeln zum Einsatz kommt, erlauben die Erkenntnisse aus der Theorie der Graphen-Grammatiken syntaktische und semantische Tests auf Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit des Regelsatzes. Es ist denkbar und wünschenswert, diese Tests um Bedingungen zur Sicherstellung der korrekten Topologie und Topographie zu erweitern. Können derartige Aussagen bereits formal aus dem Regelsatz abgeleitet werden, werden topologische und topographische Fehler zur Laufzeit ausgeschlossen und damit die Menge der zu vergleichenden Alternativen von Anfang an reduziert.

5 Zusammenfassung

Ausgangspunkt für die Arbeit war die Beobachtung, dass im interdisziplinären Bereich der Modellierung und Simulation von räumlichen Objekten eine Spezifikationsebene fehlt, die einerseits beschreibend genug ist, um komplexe dynamische Veränderungen auch für die Nicht-Informatik-Experten aus den jeweiligen Anwendungsbereichen darzustellen und andererseits formal genug ist, um einer algorithmischen Behandlung im Sinne eines Simulationsalgorithmus zugänglich zu sein. Eine Analyse bestehender Modellierungsparadigmen und Softwaresysteme zeigt, dass die üblichen Modellierungstechniken wenig Unterstützung bei der Spezifikation der räumlichen Dynamik bieten. Obwohl die objektorientierten, einzelbasierten Ansätze auch zur Modellierung räumlicher Prozesse genutzt werden können, werden die Nutzer bei der Beobachtung räumlicher Konsistenzbedingungen auf die proprietären Lösungen zurückgreifen.

Basierend auf dieser Analyse wird der Formalismus der Graphen-Substitutionssysteme auf die Anwendung im Bereich der räumlichen Modelle übertragen. Der Nutzen, der dem nicht unerheblichen Aufwand durch Formalisierung entgegensteht, besteht vor allem in der sauberen algorithmischen Handhabung und Verarbeitung der Modelldynamik, die von Grafikproduktionen beschrieben wird. Konsistenzbedingungen als Folge des räumlichen Bezugs können auf der Metaebene der Produktionen berücksichtigt werden und vermeiden topologisch sinnlose Dynamik. Darüber hinaus erweist sich der Formalismus als vorteilhaft, wenn es darum geht, die algorithmische Verarbeitung der zahlreichen alternativen Möglichkeiten zur Entwicklung von Objekten im Raum beherrschbar zu machen und die Komplexität und Konsistenz der Lösungen zu optimieren.

Die Integration dieses Ansatzes in ein Simulationslaufzeitsystem wird in einem separaten Beitrag diskutiert. Die Idee ist es, die Ausführung eines von der Produktion vorgegebenen

Ersatzes als diskretes Ereignis im Sinne einer diskreten Ereignissimulation zu behandeln. Darüber hinaus wird die Praktikabilität des Ansatzes und insbesondere die Eignung der vorgeschlagenen Dynamikbeschreibung für die Kommunikation mit Nicht-Informatikern in geeigneten Praxisprojekten aus dem Anwendungsbereich der Umweltinformatik getestet.

Literatur

- Brown, D. G., Riolo, R., Robinson, D. T., North, M., & Rand, W. (2005). Spatial Process and Data Models: Toward Integration of. *Journal of Geographical Systems*, 7(1), 25–47.
- Dransch, D. (1997). *Computer-Animation in der Kartografie: Theorie und Praxis*. Heidelberg: Springer.
- Esri (2018). *ArcGIS API for Python*. Retrieved from <https://developers.arcgis.com/python/>.
- Esri ArcMap (2018). *Esri ArcMap Online-Hilfe: Erstellen von Animationen in ArcGIS*. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/map/animation/about-building-animations-in-arcgis.htm>.
- GAMA (12.03.2019). <https://gama-platform.github.io/>.
- Kimerling, A. J., Buckley, A. R., Muehrcke, P. C., & Muehrcke, J. O. (2016). *Map Use. Chapter 8: Quantitative Thematic Maps*. Redlands, CA: Esri Press.
- MARS (2019). *MARS-Group*. Retrieved from <https://mars-group.org/features/#gis>.
- O’Sullivan, D., Perry, & G. L. W. (2013). *Spatial Simulation – Exploring Pattern and Process*. Chichester: Wiley.
- OGC (2018). *OGC Open Geospatial APIs. White Paper OGC*. Retrieved from <http://docs.opengeospatial.org/wp/16-019r4/16-019r4.html>.
- Ortmann, J. (1999). *Ein allgemeiner individuenorientierter Ansatz zur Modellierung von Populationsdynamiken in Ökosystemen unter Einbeziehung der Mikro- und Makroebene* (Dissertation). Fachbereich Informatik, Universität Rostock.
- Rechenberg, P., & Pomberger, G. (2006). *Informatik Handbuch. Stichwort Architektur von SW-Systemen*. München: Hanser.
- Schneider, H. J. (2016). *Graph Transformations – An Introduction to the Categorical Approach* (Vorlesungsunterlagen). Retrieved from <https://www2.cs.fau.de/staff/schneider/gtbook/index.html>.
- Torrens, P. M., & Benenson, I. (2005). Geographic automata systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(4), 385–412.
- Uhrmacher, A. M. (2001). Dynamic Structures in Modeling and Simulation – A Reflective Approach. *ACM Transactions on Modeling and Simulation*, 11(2), 206–232.
- Wittmann, J. (2000). Simulationsmodell und Geographisches Informationssystem Koppelalternativen am praktischen Beispiel. *Umweltinformatik 2000, 12. Internationales Symposium, Bonn, 2000* (pp. 45–58). Ed. A. B. Cremers & K. Greve. Marburg: Metropolis.
- Wittmann, J. (2017). *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften – Workshop Hamburg 2017*. Aachen: Shaker.
- Wittmann, J., & Thiel-Clemen, T. (2016). *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften – Workshop Hamburg 2016*. Aachen: Shaker.
- Yattaw, N. J. (1999). Conceptualizing Space and Time: A Classification of. *Cartography and Geographic Information Science*, 26(2), 85–98.
- Zeigler, B. P. (1990). *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models*. London: Academic Press.