

GIS und Simulation: Bestandsaufnahme und Defizite bei der Spezifikation integrierter Modelle in 4D

GIS and Simulation: Survey and Deficits in the Specification of Integrated Models in 4D

Jochen Wittmann

Studiengang Umweltinformatik, HS für Technik und Wirtschaft Berlin · wittmann@htw-berlin.de

Zusammenfassung: Der vorliegende Artikel untersucht die bestehenden Ansätze zur Spezifikation und zur Simulation von Prozessen in Raum und Zeit sowohl aufseiten der Simulationstechnik als auch aufseiten der GIS. Anschließend werden die grundsätzlichen Möglichkeiten einer Integration von Simulationstechnik und der Behandlung von Dynamik in Raum und Zeit in einem geographischen Raum sowohl auf methodologischer als auch auf Softwareebene analysiert. Eine allgemeingültige Empfehlung für ein bestimmtes SW-System gelingt jedoch nicht. Vielmehr stehen am Ende des Artikels drei Anforderungskomplexe, deren Umsetzung eine problembezogene Behandlung von raumbezogenen Simulationssimulationsaufgaben vereinfachen und auch für Personen des Anwendungsfeldes handhabbar machen könnten.

Schlüsselwörter: Dynamische Modelle, 4D, Simulation

Abstract: This article examines the existing approaches to the specification and simulation of processes in space and time both on the side of simulation technology and on the side of GIS. Subsequently, the basic possibilities of an integration of simulation methodology and the treatment of dynamics in space and time in a geographical space are analysed on both methodological and software levels. However, a generally valid recommendation for a certain SW system is not possible. Rather, the article ends with three requirement complexes whose implementation could simplify the problem-related handling of spatial simulation tasks and also make them manageable for persons in the field of application.

Keywords: Dynamic models, simulation, 4D

1 Motivation

Das Potenzial einer Verbindung der Funktionalitäten von Simulationssystemen und Geo-Informationssystemen erscheint groß, gerade, wenn man den Trend beobachtet, dynamische Prozesse mit Raumbezug zu analysieren, zu modellieren und zu simulieren: Routenplanung und -optimierung, Stadtentwicklung, Verbreitungs- und Ausbreitungsmodelle in der Biologie, Habitatmodellierung, usw. In dieser Situation nimmt der Autor einerseits eigene frühere Arbeiten (Wittmann, 2000) wieder auf, andererseits versucht er, die Strukturierung und Klassifikation, die Dransch in (Dransch, 1997) mit Fokus auf die Animation vorlegt, stärker unter dem Aspekt einer Dynamikspezifikation mit dem Ziel der Modellierung und Simulation zu betrachten. Er untersucht mit dem vorliegenden Artikel zweierlei: Einerseits analysiert er, inwieweit entweder raumbezogene Dynamik in Simulationssysteme zu integrieren ist, oder aber GIS-Software den Aspekt der dynamischen Prozess-Modellierung abzubilden erlaubt. Andererseits versucht der Artikel eine Reihe prototypischer Anforderungen im Bereich der raumbezogenen Modellierung zu erarbeiten und damit losgelöst von der Debatte um die am

besten geeignete Software eine problembezogene Diskussion der aktuellen Problemfelder in diesem Bereich zu ermöglichen.

2 Traditionelle Modellierungsansätze für Prozesse in Raum und Zeit

Am Anfang steht zunächst ein Überblick über traditionelle Modellierungsansätze mit dem Fokus darauf, wie es in diesen möglich ist, raumbezogene Phänomene abzubilden.

2.1 Kontinuierliche Modellierungsansätze

In diesem Bereich werden gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen behandelt. Bei den gewöhnlichen Differenzialgleichungsmodellen ist der Raumbezug eingeschränkt. Zwei Alternativen sind üblich: Im ersten Fall repräsentiert der Wert einer Zustandsgröße einen Bestand an einem festen, aber in den Gleichungen nicht näher bezeichneten Ort (z. B. die Bevölkerungszahl für Deutschland). Entweder der Ort wird als punktförmig angenommen und konzentriert den gesamten Bestand dort auf sich, oder aber der Bestand wird als homogen über die Fläche bzw. den Raum der abgebildeten Entität verteilt angenommen. Im zweiten Fall beschreibt die Differenzialgleichung die Bewegung einer (als punktförmig angenommenen) Entität, wobei der umgebende Raum, in dem diese Bewegung stattfindet, beliebige Dimension aufweisen kann. In beiden Fällen muss das Raummodell vom Modellierer spezifiziert werden, das Modellierungsparadigma bietet dabei weder Grenzen noch Unterstützung.

„klassisch“ kontinuierlich	Trajektorie für eine Zustandsgröße Bewegung eines Punktes im Raum	1-D (3-D)	
	Partielle Differential- Gleichungen	3-D	finite element models (Wetter, Grundwasser, Mechanik, ...)
diskret	discrete event simulation	(3-D)	Ereignisse können auch einen Orts- wechsel beinhalten
Spezialfall	Zellulärer Automat mit beliebigen Erweiterungen	2/3-D	
objektorientiert/ individual-based	freie algorithmische Spezifikation des zeitlichen und räumlichen Verhaltens eines Objektes	1/2/3-D	

Abb. 1: Traditionelle Modellierungsansätze und ihre Fähigkeit, Raumbezug abzubilden

2.3 Diskrete Modellierungsansätze

Eine gänzliche andere Sicht auf dynamische Systeme bieten die diskreten Modellierungsparadigmen. Plötzliche Zustandsänderungen, die ohne jeden Zeitverzug zu einem Zeitpunkt zu interpretieren sind und durch eine Auslösebedingung aktiviert werden, stellen den einzigen Mechanismus zur Beschreibung von Systemdynamik dar. Mit einem derartigen Mechanismus lassen sich einerseits Zustandsänderungen für Entitäten mit einer festen Position im wie auch immer spezifizierten Raum abbilden, aber auch „ruckartige“ Bewegungen, wenn die Zustandsänderung, die im Ereignisrumpf beschrieben ist, eine Positionsänderung der Entität abbildet. In beiden Fällen gibt das diskrete Modellierungsparadigma die Spezifikation des Raumes nicht vor, sie steht vollständig im Ermessen des Modellierers. Auch hier bietet der Modellierungsansatz zwar vollständige Freiheit für das verwendete Raummodell, andererseits aber auch keinerlei Unterstützung bei dessen Aufbau und Verwaltung.

2.4 Spezialfall Zellularer Automat

Ganz anders sieht die Situation bei einem Sonderfall der diskreten Modelle aus, den Zellularen Automaten. Hier gibt das Modellierungskonzept ein homogenes Raster (in der Regel quadratisch) zur Beschreibung des Raumes vor, was dem Konzept der Rasterdaten im GIS entspricht. In jedem Rasterelement wird ein Zustand angenommen, der sich getaktet und für sämtliche Rasterzellen nach identischen Regeln in Abhängigkeit von den Zuständen der Nachbarzellen ereignishaft im Sinne der diskreten Simulation ändert.

Wegen seiner Einfachheit und seiner direkten Übertragbarkeit auf eine in der Fläche ablaufende Dynamik hat dieser Ansatz eine weite Verbreitung und die ursprünglich sehr strenge Definition des Zellularen Automaten wird durch zahllose Erweiterungen und Anpassungen an die Gegebenheiten des jeweiligen Untersuchungsgegenstandes angepasst (Waben statt quadratische Zellen, mehrdimensionaler Zustandsvektor für jede Zelle, diverse Nachbarschaftsvarianten, usw.). Grundlage ist jedoch immer eine Kachelung der Ebene mit in Form und Verhalten identischen Zellen. Erweiterung auf den dreidimensionalen Raum mit identischen, würfelförmigen Raumelementen sind denkbar, haben allerdings wohl wegen ihrer Ähnlichkeit zu den Finite-Element-Ansätzen wenig Verbreitung gefunden.

2.5 Objektorientierte und individuenbasierte Ansätze

Anders als bei den vorausgehenden Ansätzen, bietet das objektorientierte oder auch individuenbasierte Modellierungsparadigma (für eine präzise Definition und Unterscheidung sei aus Platzgründen hier nur auf Ortman (Ortman, 1999) verwiesen) sämtliche Ausdrucksmöglichkeiten einer allgemeinen (objektorientierten) Programmiersprache in der Regel in Verbindung mit einem Kernel für das Laufzeitsystem, das die Kommunikation und Synchronisation der Modellentitäten regelt (siehe (Zeigler, 1990), (Uhrmacher, 2001)). Derartige Ansätze sichern die Korrektheit bezüglich des zeitlichen Verhaltens, bezüglich des Raumbezugs, in dem die Modellobjekte agieren, bestehen für den Modellierer jedoch weder Einschränkungen noch Hilfestellungen.

2.6 Bewertung der Ansätze

Wie bereits bei der Charakterisierung der Konzepte angedeutet, besteht die Schwierigkeit darin, dass ein Raumbezug zwar möglich, konzeptuell aber wenig unterstützt wird. Einzig

die partiellen Differenzialgleichungssysteme und die Zellularen Automaten fordern explizit einen Raumbezug, sind aber auch diejenigen Ansätze, die die Freiheit des Modellierers gerade dadurch am weitesten einschränken. Andere Ansätze bieten zwar die Möglichkeit, Raumbezug zu integrieren, allerdings verzichten viele Anwendungen trotzdem auf einen expliziten Raumbezug wohl, so die subjektive Meinung des Autors, wegen der wachsenden Kompliziertheit der entstehenden Modelle. Sicher ist jedenfalls, dass ein echtes geographisches Raumkonzept in keines der Modellierungsparadigma Eingang gefunden hat, obwohl die Arbeit mit Geodaten zunehmend an Bedeutung gewinnt.

3 Die GIS-Sicht auf Prozesse in Raum und Zeit

Im zweiten Abschnitt konzentriert sich die Analyse auf die Sicht der Geo-Informationssysteme und deren Fähigkeiten, Dynamik darzustellen bzw. dynamische Prozesse zu modellieren und zu simulieren.

3.1 Übersicht nach Yattaw

		zeitliches Abstraktionsniveau			
		statisch	dynamisch		
			kontinuierlich (linear, stetig u.a.)	wiederkehrend (periodisch, unberechenbar u.a.)	sprunghaft (epochal, einmalig u.a.)
geometrisches Abstraktionsniveau	Positionen	Baum Denkmal Festpunkt Funkmast	Aufzeichnung von Fahrzeugbewegung (GPS, Radar)	Hot Spot, Austragungsorte (Formel 1 u.a.)	Erklärung zu Schutz- objekten, Verlegung von Amtssitzen
	linear	Straße Eisen- bahn Mauer Flusslauf	Satellitenbahn, Jetstreams (Hurrikan, Tornado)	Zugvögel, Nomaden	Staatsgrenzen, Flussläufe
	flächig	Wald Siedlung Friedhof See	Desertifikation, Anlandung	landwirtschaftliche Nutzung, Klimazonen	Grundeigentumsüber- gang, Umsiedlung, EU-Erweiterung
	räumlich	Hochhaus Geoid	Kontinentaldrift, Meeresströmung	Gezeiten, El Niño	Erdrutsch, Explosionswolke (Vulkan, Tschernobyl)

[nach: Yattaw, Nancy J. 1999]

Abb. 2: Raum- und Zeitbezug von Geobjekten nach (Yattaw, 1999)

Eine umfassende Übersicht über die Klassifikation von Entities in Raum und Zeit bietet die folgende Tabelle nach (Yattaw, 1999). Auf der einen Achse findet man die Grundtypen

Punkt, Linie, Fläche, Volumen, auf der anderen Achse eine Charakterisierung des dynamischen Verhaltens mit den Klassen statisch, kontinuierlich, wiederkehrend und sprunghaft. Analogien zu den beschriebenen Klassen der Modellierungsparadigmen des ersten Kapitels sind offensichtlich, einen neuen Aspekt bieten die periodischen Phänomene. Bei dieser Zu-

sammenstellung ist eine der objektorientierten Modellierung ähnliche Herangehensweise festzustellen, allerdings geht Yattaw nicht über die rein deskriptive Ebene der Klassifikation hinaus und bietet keine Vorschläge, wie die klassifizierten Dynamiktypen im Sinne einer Modellbeschreibung zu spezifizieren sind.

3.2 Visualisierung von Dynamik im GIS

Unabhängig von der Art der Spezifikation von raumbezogener Dynamik ergibt sich bei Anwendungen im GIS-Umfeld sich regelmäßig die Schwierigkeit, die dynamischen Veränderungen der dargestellten Objekte (Features) im Sinne einer Ergebnisdarstellung zu visualisieren. Um zu sehen, ob die dabei verwendeten Methoden auch für die Dynamik-Spezifikation verwendbar sind, sollen sie hier kurz andiskutiert werden. Im Wesentlichen kann man auf drei grundsätzlich verschiedene Verfahren zur Dynamik-Visualisierung zurückgreifen:

- a) Einmal die Darstellung der Dynamik in Form einer Animation (gegebenenfalls mit Überblendtechnik) von Einzelbildern (Karten) mit einem interaktiven Schieberegler für die Zeitachse. (Esri ArcMap, 2018)
- b) Oder aber im Sinne eines statischen Kartenbildes die Darstellung von n Einzelkarten für n ausgewählte Zeitpunkte bzw. -perioden, wie man es z. B. aus einem Geschichtsatlas kennt (Kimerling et al., 2016, p. 206).
- c) Oder die Übertragung der Zeit auf eine geeignete Symbologie der dargestellten Objekte; z. B. unterschiedliche Farben für unterschiedliche Zeitintervalle, in denen das Objekt aktiv ist, oder aber eine farbliche Codierung der Veränderung für einen Attributwert über die Zeit (sog. Change maps (Kimerling et al., 2016, p. 209).

Unabhängig davon, welche Vor- und Nachteile diese Alternativen besitzen soll an dieser Stelle nur festgestellt werden, dass es sich in allen Fällen um eine reine Visualisierung von Ergebnisdaten einer dynamischen Modellierung bzw. eines Simulationslaufes handelt, nicht aber um die Spezifikation der Dynamik selbst. Diese Verfahren helfen folglich bei der Betrachtung im Sinne einer Modellierungssprache für Prozesse in Raum und Zeit nicht weiter.

3.3 Die Perspektive des Modellierers

Im Gegensatz zur klassifizierenden Sicht soll daher nun ein Blick auf ein Geo-Informationssystem aus der Sicht eines Modellierers geworfen werden. Aus einer solchen Perspektive sind im Wesentlichen drei Schichten bzw. Funktionalitäten zu unterscheiden (Abb. 3), eine Systemarchitektur, wie sie im Übrigen auch die klassische Literatur aus dem Bereich der Softwaretechnik für größere Softwaresysteme im Allgemeinen als sogenannte Three-Tier-Architektur (Rechenberg & Pomberger, 2006) vorschlägt: Erstens die Datenhaltung, auf der GIS selbstverständlich eine konsistente und effiziente 3D-Datenhaltung anbietet. Zweitens Die Ebene der Tools oder Methoden, auf der eine Vielzahl etablierter und komfortabler Analysemethoden für raumbezogene Daten angeboten wird. Und drittens die Visualisierung mit präziser und komfortabler Möglichkeit, Kartendarstellungen zu entwickeln.

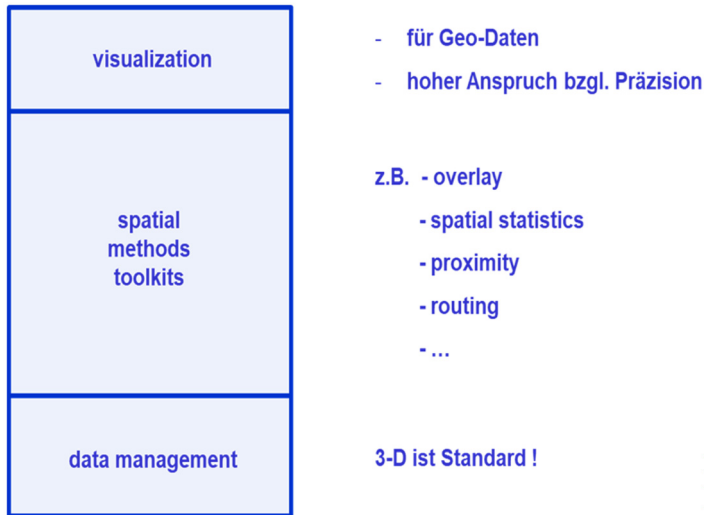


Abb. 3:
Die Sicht des Modellierers als 3-Tier-Architektur

Aus dieser Perspektive müssten in der Methoden-Schicht Verfahren zur Spezifikation von Systemdynamik angesiedelt sein. Der Marktführer ESRI bietet allerdings entsprechende Toolboxes nicht an, es steht lediglich eine vollständig freie Programmierschnittstelle auf Basis der Skriptsprache Python zur Verfügung (ESRI, 2018). Im Bereich der OpenGIS (OGC, 2018) ist die Situation ähnlich.

4 Raum und Zeit: GIS versus Simulation

An dieser Stelle soll nun ein Fazit und eine – zugegeben – subjektive Beurteilung der Lage versucht werden. Im Wesentlichen lassen sich die beiden Herangehensweisen der vorausgegangenen Abschnitte unter den beiden im Folgenden beschriebenen Aspekten zusammenfassen: Beide Systeme stellen sich als hoch spezialisiert für ihren Einsatzzweck dar: GIS konzentrieren sich auf die präzise Abbildung von Raumobjekten in Bezug zur Erdoberfläche und bieten wenig Unterstützung bei der Aufgabe, dynamische Wertänderungen für Attribute von Geo-Objekten zu spezifizieren. Demgegenüber stellen Simulationsparadigmen Konstrukte zur Dynamikbeschreibung zur Verfügung, verfügen aber weder über etablierte Konzepte zur Repräsentation von (geographischem) Raum noch über entsprechende Methoden zur raumbezogenen Analyse. Daraus ergibt sich der Bedarf einer Zusammenfassung bzw. Integration von Simulationstool und GIS, die wiederum auf zwei verschiedenen Ebenen diskutiert und entsprechend umgesetzt werden kann:

Funktionale Aspekte einer Integration: Ziel ist eine Vereinigung der funktionalen Möglichkeiten vom GIS und Simulationstool. Damit kommt man schnell auf zwei prinzipiell unterschiedliche Lösungsalternativen, die in der Literatur auch seit langem schon diskutiert sind, nämlich entweder die Modell-Dynamikbeschreibung ins GIS zu integrieren oder die GIS-Funktionalität ins Simulationsmodell bzw. dessen Spezifikation zu integrieren.

Softwaretechnische Aspekte der Integration: Übertragen auf die Ebene der Softwarearchitektur ergeben sich daraus ebenfalls zwei grundsätzlich unterschiedliche Lösungsansätze:

Nämlich einerseits, sämtliche Funktionalitäten im Rahmen eines universellen, spatio-geographischen Simulationssystems zusammenzufassen, oder andererseits, sich für den Einzelfall eine problembezogene, individuell angepasste Lösung bzw. Architektur zu implementieren, die dann allerdings den Universalitätsanspruch aufgeben muss. Darüber hinaus sind in der Praxis eine Vielzahl von Kopplungslösungen zu finden (siehe z. B. Wittmann, 2000).

Aus Platzgründen kann auf die unterschiedlichen Lösungen an dieser Stelle nicht detaillierter eingegangen werden. Gerade im Bereich der Geocomputation fokussieren die Ansätze meist auf eine Verbindung von Zellularen Automaten (für die Repräsentation des Raumbezuges) und agentenbasierter Modellierung (für die Beschreibung von Dynamik als Interaktion der Agenten). Torrens legt in (Torrens & Benenson, 2005) eine Formalisierung dieser Zusammenführung vor, Brown (Brown, Riolo, Robinson, North, & Rand, 2005) konzentriert sich besonders auf die topologischen Beziehungen bei der Dynamikbeschreibung. O’Sullivan und Perry erweitern in (O’Sullivan, 2013) das Innere einer Zelle des Automaten um eine vollständige Dynamik-Spezifikation, wie sie in dem Kapitel 2 entspricht. Aus dem Bereich der Simulationstechnik erhebt das System MARS (MARS, 2019) den Anspruch der Integration, am weitesten fortgeschritten und in eine etablierte Implementierung umgesetzt findet sich die Kopplung im System GAMA (GAMA, 2019). Allerdings verliert die Idee des Zellularen Automaten bei all diesen Erweiterungen den Vorteil ihrer Einfachheit und die Dynamikbeschreibung ist weniger durch die technisch-physikalische Sicht der Spezifikation durch Differenzialgleichungen, sondern durch die objektorientierte Sicht des Agentenkonzeptes geprägt. In beiden Fällen treten häufig Probleme mit der zeitlichen Synchronisation der parallel agierenden Agenten oder aber mit der Einhaltung der durch den Geobezug definierten Konsistenzregeln (Topologie) auf. Daher soll im folgenden Absatz aus Anwendungssicht untersucht werden, welche Grundaufgaben vorliegen und welche Anforderungen an die Dynamikspezifikation daraus abgeleitet werden können. Diesen Grundaufgaben will sich der folgende Abschnitt widmen. Allerdings fällt auf, dass bei typischen Anwendungen immer wieder Defizite auftreten, die auch mit einer integrierten Lösung nicht anwendergerecht behandelt werden können.

5 Ungelöste, problembezogene Anforderungskomplexe

Die folgenden drei Aufgabenbereiche stellen eine aus eigenen Projekterfahrungen und der langjährigen Mitarbeit in der Fachgruppe Simulation in den Umwelt- und Geowissenschaften (Wittmann, 2017) und die weiteren Bände der Reihe Umweltinformatik) gewachsene, und damit zwar nur eine persönliche Liste des Autors dar, sie sollen aber dennoch Hinweise geben, auf welchen Themengebieten bei der Arbeit mit Modellen mit Raum- und Zeitbezug noch Defizite auftreten und damit auch Hinweise für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bieten.

5.1 Spezifikation einer „typischen“ Trajektorie für eine Entität in Raum und Zeit

Eine immer wiederkehrende Aufgabe für den Modellierer ist es, für ein Objekt, eine Entität, eine „typische“ bzw. repräsentative Trajektorie in Raum und Zeit zu beschreiben. Diese Entität kann einerseits ein Individuum sein (z. B. der „typische“ Tageslauf eines Menschen mit seiner Mobilität), andererseits können aber auch Gruppen betrachtet werden (z. B. der jährli-

che Vogelzug). Eine solche Trajektorie soll entweder aufgrund von punktuell gemessenen (oder aus einer Modellbeschreibung abgeleiteten) Daten durch eine geeignete raumbezogene Interpolation modelliert werden, oder aber sie wird aus einer vorhandenen Verhaltensbeschreibung für die betreffende Entität abgeleitet. Im ersten Fall benötigen die Modellierer Unterstützung durch geeignete Verfahren der raumbezogenen Statistik, im zweiten Fall muss die Ausdrucksfähigkeit der Modellierungs- bzw. Spezifikationsprache entsprechende Konstrukte zur Verfügung stellen. In beiden Fällen ist jedoch eine Einbeziehung raumbezogener Rahmenbedingungen notwendig (z. B. die Lage von Gebirgszügen für den Vogelzug, die Topologie von Verkehrssystemen für den Tagesablauf eines Menschen, ...).

5.2 Spezifikation der dynamischen Veränderung der Form einer Linie oder eines Polygons

Der zweite typische Anwendungsfall bezieht sich auf die Änderung der Form von Geo-Objekten mit der Zeit. Die GIS-Grundtypen für Geo-Objekte sind Punkt, Linie, Polygon. Wie kann man die zeitliche Veränderung eines Linienverlaufes spezifizieren (z. B. den exakten Verlauf eines Flusses in einem Tal über einige hundert Jahre) oder aber die Dynamik eines Polygons? Wobei in beiden Fällen wiederum geographische Nebenbedingungen die Dynamik entscheidend beeinflussen und damit auch bei der Dynamikbeschreibung anwenderfreundlich einbezogen werden sollten.

Beispielsweise kann man die Entwicklung einer Stadt an ihren Rändern entlang von vorgegebenen Siedlungsachsen beschreiben, die wiederum durch topographische Nebenbedingungen (Flüsse, Oberflächenrelief, ...) überlagert sind. Eine Verbindung von Zellularem Automaten und der Layerstruktur des GIS für die topographischen Einflussfaktoren liegt in einem derartigen Fall nahe, allerdings wird auf der Ebene der Umsetzung keine generische Lösung auf einer wie auch immer gearteten Metaebene angeboten, den Anwendern bleibt nur die Alternative einer aufwendigen, individuellen Lösung durch eine proprietäre Implementierung. Ansatz für eine Lösung wären z. B. eine Menge von typischen Mustern, die eine dynamische Veränderung im Sinne eines Vorher-Nachher prototypisch erfassen und beschreiben. Eine gegebene Situation könnte dann zu definierten Zeitpunkten auf Übereinstimmung mit dem Vorher-Muster untersucht und im Falle einer Übereinstimmung eine Transformation gemäß den Vorgaben des Nachher-Musters veranlasst werden, um damit die dynamische Veränderung des Geo-Objektes spezifizieren.

5.3 Spezifikation der dynamischen Veränderung einer Topologie

Der dritte Problembereich erweitert den vorgenannten Punkt um Veränderungen in der zugrunde liegenden Topologie. Wie lässt sich spezifizieren, an welcher Stelle, wann und warum sich eine gegebene Topologie ändert, also neue Punkte, Linien, Flächen entstehen oder bestehende verschwinden. Sämtliche Wachstumsprozesse komplexerer Strukturen führen auf dieses Problemfeld.

Wiederum am Beispiel der Stadtentwicklung: Wann und wo entstehen neue Elemente der Infrastruktur (Geschäfte, Schulen, Straßen, Stadtteile, ...) und wie sind diese mit den bereits bestehenden Elementen der Topologie verbunden.

Im Bereich der Informatik gibt es beispielsweise Arbeiten zu Graphgrammatiken, die eine Ersetzung einer Teilstruktur eines Graphen (also auch einer Topologie) durch eine neue Struktur formal zu beschreiben erlauben (Schneider, 2019). Inwieweit derartige theoretische Ansätze in eine praxisnahe Spezifikation für topologische Strukturveränderungen zu übertragen sind, verdient sicherlich einer intensiveren Untersuchung.

6 Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel bearbeitet das Thema Raumbezug in dynamischen Modellen auf drei unterschiedlichen Ebenen: Erstens das Problem der Integration von GIS- und Simulationstechniken auf der Ebene der Softwaretechnik. Hier sind die beiden extremen Alternativen

- a) ein universelles Softwaresystem für Modelle mit Raum- und Zeitbezug oder aber
- b) eine nicht verallgemeinerbare, heuristische, auf das individuelle Problem zugeschnittene Lösung.

Unabhängig von der softwaretechnischen Seite möchte der Artikel die Aufmerksamkeit allerdings verstärkt auf zwei weitere Problemfelder richten: Das ist einerseits der Bedarf, eine raumbezogene Statistik für die Modellierung aufzubereiten und mit einer anwendungsnahen Bedienoberfläche zur Verfügung zu stellen. Für dieses Problemfeld ist eine Einbeziehung komplexer, raumbezogener Restriktionen und Einflüsse von entscheidender Bedeutung. Andererseits stellt der Artikel das Fehlen eines adäquaten Formalismus zur Spezifikation von Änderungen in Form und Topologie von raumbezogenen Objekten fest und postuliert gerade auch auf diesem Feld Bedarf für künftige Forschungsaktivitäten.

Literaturverzeichnis

- Brown, D., Riolo, R., Robinson, D., 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 June 6, 2018, from <https://developers.arcgis.com/python/>.
- ESRI ArcMap (2018). *Esri ArcMap Online-Hilfe: Erstellen von Animationen in ArcGIS*. Retrieved June 6, 2018, from <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/map/animation/about-building-animations-in-arcgis.htm>.
- GAMA (2019). *GAMA Platform*. Retrieved Mar 3, 2019, from <https://gama-platform.github.io/>.
- Kimerling, A., Buckley, A., Muehrcke, P., & Muehrcke, J. (2016). *Map Use, Chapter 8, Quantitative Thematic Maps. 206*. Redlands California: ESRI Press.
- MARS (2019). *MARS-Group*. Retrieved Mar 3, 2019, from <https://mars-group.org/features/#gis>.
- O’Sullivan, D. P. (2013). *Spatial Simulation – Exploring Pattern and Process*. Chichester: Wiley.

- OGC (2018). *OGC® Open Geospatial APIs – White Paper OGC*. Retrieved June 6, 2018 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). Universität Rostock, Fachbereich Informatik.
- Rechenberg, P., & Pomberger, G. (2006). *Informatik Handbuch, Stichwort Architektur von SW-Systemen*. München: Hanser.
- Schneider, H. (2019). *Graph Transformations – An Introduction to the Categorical Approach (Vorlesungsunterlagen)*. Retrieved Mar 6, 2019, from <https://www2.cs.fau.de/staff/schneider/gtbook/index.html>.
- Torrens, P., & Benenson, I. (2005). Geographic automata systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(4), 385–412.
- Uhrmacher, A. (2001). Dynamic Structures in Modeling and Simulation – A Reflective Approach. *ACM Transactions on Modeling and Simulation*, 11(2), 206–232.
- Wittmann (2000). Simulationsmodell und Geographisches Informationssystem Kopplungsalternativen am praktischen Beispiel. In A. Cremers, & K. Greve (Eds.), *Umweltinformatik 2000 – 12. Internationales Symposium, Bonn, 2000*. (pp. 45–58). 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. (1990). *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models*. London: Academic Press.