

Agentenbasierte Simulation  
als Verfeinerung der  
Diskreten-Ereignis-Simulation  
unter besonderer Berücksichtigung des  
Beispiels Fahrerloser Transportsysteme

**Wolf-Ulrich Raffel**

Dissertation am Fachbereich Mathematik und Informatik  
der Freien Universität Berlin

Gutachter:

Prof. Dr. Gerd Wagner

Prof. Dr. Hans-Dieter Burkhard

Datum der Disputation:

17.11.2005

## Zusammenfassung

Möchte man das Verhalten eines zu erforschenden Systems nicht direkt an diesem untersuchen, sondern dies mit Rechnerunterstützung tun, so spricht man von Simulation. In der Simulation hat sich seit langer Zeit in der Forschung das Konzept der Diskreten-Ereignis-Simulation etabliert, bei der sich der Zustand beim Auftreten von Ereignissen sprunghaft ändert, während er im Zeitraum zwischen zwei Ereignissen konstant bleibt. Die Modellierung und Simulation komplexer Systeme, die aus mehreren, ggf. hierarchisch strukturierten Bestandteilen bzw. Subsystemen bestehen, stößt in der Diskreten-Ereignis-Simulation schnell an ihre Grenzen, da es schwierig ist, einzelne Systembestandteile unabhängig voneinander zu modellieren.

Daher hat sich in der jüngsten Vergangenheit die Agentenbasierte Simulation entwickelt, in der komplexe Systeme, die aus mehreren miteinander und mit ihrer Umwelt interagierenden Entitäten bestehen, als Multiagentensysteme aufgefasst und modelliert werden. Die am System beteiligten Agenten können dabei Handlungen ausführen, ihre Umgebung wahrnehmen und verändern, auf Veränderungen der Umwelt reagieren und sie verfügen über einen mentalen Zustand, der aus Wissen, Zielen, Erinnerungen und Verpflichtungen bestehen kann. Die Agentenbasierte Simulation ist somit auch weniger abstrakt und realitätsnäher.

Allerdings werden die Simulationsparadigmen der Diskreten-Ereignis-Simulation, die sich über Jahrzehnte hinweg etabliert hat und der Agentenbasierten Simulation, die strukturierte und realitätsnahe Simulationen erlaubt, als getrennte und voneinander unabhängige Ansätze betrachtet.

In dieser Arbeit wird hingegen gezeigt, wie man durch Differenzierung und Verfeinerung der Grundbegriffe der Diskreten-Ereignis-Simulation und ihrer Ausführungssemantik zu einer Form der Agentenbasierten Simulation gelangt, die man als Agentenbasierte Diskrete-Ereignis-Simulation auffassen kann. Zu diesem Zweck wird zunächst das in der Praxis heterogene Konzept der Diskreten-Ereignis-Simulation mathematisch formalisiert. Auf dieser Formalisierung aufbauend wird dann eine Formalisierung für Agentenbasierte Simulation vorgestellt. Man kann agentenbasierte Simulationsmodelle, die dieser Formalisierung gehorchen, mit einem im Rahmen dieser Arbeit implementierten Simulator ausführen.

In den vorherrschenden Agentenbasierten Simulatoren muss man als Benutzer das konkrete Simulationssystem in einer allgemeinen Programmiersprache oder einer speziellen Simulationssprache formulieren. Man kann das System also nicht deklarativ, sondern nur imperativ spezifizieren. In dieser Arbeit hingegen wird eine grafische High-Level-Spezifikationsprache für die Agentenbasierte Simulation vorgestellt, die die Form eines UML-Profiles hat, so dass man jedes beliebige UML-Tool zur Spezifikation verwenden kann. Ferner wird auch eine Spezifikationsprache in Form eines AORML-Profiles vorgestellt, bei der agentenbasierte Konzepte besser berücksichtigt werden können, die aber mangels Toolunterstützung nicht bei der Implementierung verwendet wurde.

Die Implementierung des in Java geschriebenen Simulators, die den Charakter eines *proof of concept* hat, wurde dahingehend erweitert, dass die mit Hilfe eines UML-Tools erstellte Spezifikation direkt ausführbar ist. Dies wurde erreicht, indem die Ausgabe des UML-Tools in Form der XML-basierten Sprache XMI mittels XSL-Transformationen zunächst in ein XML-basiertes Zwischenformat und dann direkt in vom Simulator verwendbaren Java-Code transformiert wird.

Ein in dieser Arbeit ausführlich behandeltes Beispiel sind Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Ein FTS besteht dabei aus Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF), die automatisch gesteuert Transportstücke innerhalb einer Verkehrszone von einem Ort zum anderen transportieren. Ein Steuerungssystem ist für die Vergabe von Transportaufträgen, für die Wegplanung und für die Verkehrsregelung zuständig. FTS werden überwiegend für die innerbetriebliche Materialflussabwicklung, zum Beispiel für die Verkettung von Fertigungseinrichtungen und Montageplätzen, eingesetzt. Aufgrund ihrer dezentralen Struktur, die FTS aufgrund ihrer natürlichen Aufteilung in FTF, Fahrkurs und Steuerungssystem haben, eignen sie sich sehr gut zur agentenorientierten Modellierung und Simulation. Außerdem besitzen dezentral gesteuerte FTS eine höhere Robustheit und Flexibilität gegenüber zentral gesteuerten.

In der Einleitung in Kapitel 1 wird zunächst eine Einführung in die Simulation gegeben, die den Stand der Forschung in der Diskreten-Ereignis-Simulation und der Agentenbasierten Simulation mit

einschließt. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse der Arbeit kurz vorgestellt und in den Stand der Forschung eingeordnet. In Kapitel 2 wird ein Basismodell für die Diskrete-Ereignis-Simulation entwickelt und mathematisch formalisiert. Dieses Basismodell wird in Kapitel 3 um einige nützliche, nicht agentenorientierte Erweiterungen angereichert, die dann zur sogenannten Objektbasierten Simulation subsummiert werden. In Kapitel 4 hingegen wird das Modell der Objektbasierten Simulation agentenorientiert erweitert, so dass am Ende ein formales Modell für die Agentenbasierte Simulation steht. Kapitel 5 bietet eine Einführung in Fahrerlose Transportsysteme, die sowohl objekt- als auch agentenorientiert modelliert werden, wobei insbesondere auf den Aspekt der Auftragsvergabe eingegangen wird. In Kapitel 6 werden Fahrerlose Transportsysteme benutzt, um ein Beispiel für Agentenbasierte Simulation darzustellen. Kapitel 7 stellt eine grafische Spezifikationsprache für Agentenbasierte Simulationssysteme in Form eines UML-Profiles und in Form eines AORML-Profiles vor. In Kapitel 8 wird dann das Simulationssystem erläutert, welches es ermöglicht, in UML spezifizierte agentenbasierte Simulationsmodelle automatisch ausführen zu lassen. Kapitel 9 reißt verwandte und weiterführende Themen an, die in dieser Arbeit nicht ausführlich behandelt werden konnten. Dazu gehören eine generische Visualisierung für Simulationssysteme, Verteilte Simulation, Echtzeitsimulation und Interaktive Simulation. In Kapitel 10 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Gründe für Simulation</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Modellbildung</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Diskrete und kontinuierliche Simulation</b> .....	<b>12</b>
<b>1.4 Simulationssysteme</b> .....	<b>14</b>
<b>1.5 Agentenbasierte Simulation</b> .....	<b>14</b>
1.5.1 Agenten.....	15
1.5.2 Grundlagen.....	16
1.5.3 Plattformen für Agentenbasierte Simulation.....	16
1.5.4 RoboCup Simulationsliga.....	18
1.5.5 Trading Agent Competition.....	18
<b>1.6 Ergebnisse dieser Arbeit</b> .....	<b>18</b>
<b>2. Das Basismodell der Diskreten-Ereignis-Simulation</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Formalisierung</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2 Beispiel: Warteschlange im Supermarkt</b> .....	<b>24</b>
2.2.1 Problembeschreibung.....	24
2.2.2 Ereignistypen und Systemzustand.....	24
2.2.3 Ereignisausführung Kunde_kommt_an.....	25
2.2.4 Ereignisausführung Bedienung_beendet.....	26
2.2.5 Ereignisausführung Eingang_wird_geschlossen.....	27
2.2.6 Abschlussbemerkungen.....	27
<b>2.3 Beispiel: Fahrstühle</b> .....	<b>29</b>
2.3.1 Problembeschreibung.....	29
2.3.2 Algorithmische Lösung.....	30
2.3.3 Ereignistypen und Systemzustand.....	31
2.3.4 Ereignisausführung Kommt_an.....	33
2.3.5 Ereignisausführung Wird_angefordert.....	34
2.3.6 Ereignisausführung Will_fahren.....	35

2.3.7	Ereignisausführung Führt_an .....	36
2.3.8	Ereignisausführung Erhält_Erlaubnisanfrage .....	37
2.3.9	Ereignisausführung Erhält_Erlaubnis .....	38
2.3.10	Abschlussbemerkungen.....	39
<b>3.</b>	<b>Erweiterungen des Basismodells der Diskreten-Ereignis-Simulation.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Objektorientierter Systemzustand.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Unterscheidung zwischen exogenen Ereignissen und Folgeereignissen .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>Zustandsbedingung und Zustandseffekt.....</b>	<b>42</b>
3.3.1	Formulierung von Zusicherungen .....	43
3.3.2	Formulierung von mehreren Regeln .....	44
<b>3.4</b>	<b>Objektbasierte Simulation.....</b>	<b>46</b>
3.4.1	Formalisierung .....	47
3.4.2	Abbildung auf die Diskrete-Ereignis-Simulation.....	48
3.4.3	Beispiel: Warteschlange im Supermarkt .....	48
3.4.3.1	Ereignistypen und Systemzustand.....	49
3.4.3.2	Ereignisausführung Kunde_kommt_an.....	49
3.4.3.3	Ereignisausführung Bedienung_beendet.....	50
3.4.4	Beispiel: Fahrstühle.....	51
3.4.4.1	Ereignistypen und Systemzustand.....	51
3.4.4.2	Ereignisausführung Kommt_an.....	53
3.4.4.3	Ereignisausführung Wird_angefordert.....	55
3.4.4.4	Ereignisausführung Will_fahren .....	57
3.4.4.5	Ereignisausführung Führt_an .....	58
3.4.4.6	Ereignisausführung Erhält_Erlaubnisanfrage .....	59
3.4.4.7	Ereignisausführung Erhält_Erlaubnis .....	61
<b>4.</b>	<b>Agentenorientierte Erweiterungen der Objektbasierten Simulation.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>Nachrichten.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2</b>	<b>Externer/interner Agentenzustand und Umgebungssimulator.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Agentenbasierte Simulation .....</b>	<b>64</b>
4.3.1	Formalisierung .....	65
4.3.1.1	Informelle Beschreibung des Ablaufs .....	66
4.3.1.2	Formale Beschreibung des Ablaufs.....	66
4.3.1.3	Zeitaspekte in der Agentenbasierten Simulation.....	69
4.3.2	Reaktionsregeln.....	71

4.3.2.1	Reaktionsregeln für Agenten (A-Regeln) .....	71
4.3.2.2	Reaktionsregeln für den Umgebungssimulator (U-Regeln).....	74
4.3.3	Abbildung auf die Objektbasierte Simulation .....	76
4.3.4	Beispiel: Fahrstühle.....	77
4.3.4.1	Ereignistypen und Systemzustand.....	77
4.3.4.2	Ereignis Kommt_an.....	80
4.3.4.3	Wahrnehmung Kommt_an .....	80
4.3.4.4	Ereignis Wird_angefordert .....	83
4.3.4.5	Wahrnehmung Wird_angefordert.....	83
4.3.4.6	Zeitereignis Will_fahren .....	85
4.3.4.7	Aktion Fährt_an.....	87
4.3.4.8	Nachricht Erlaubnisanfrage.....	87
4.3.4.9	Nachricht Erlaubnis.....	90
<b>5.</b>	<b>Objektorientierte und agentenorientierte Modellierung von Fahrerlosen Transportsystemen.....</b>	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>Modellierung in UML .....</b>	<b>92</b>
5.1.1	Fahrerlose Transportsysteme (FTS).....	92
5.1.2	Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) .....	92
5.1.3	Fahrkurs.....	93
5.1.4	Übergabestation.....	94
5.1.5	Transportauftrag .....	95
5.1.6	Ort.....	96
5.1.7	Auftragsvergabe .....	96
<b>5.2</b>	<b>Agentenorientierte Erweiterungen in AUML.....</b>	<b>99</b>
<b>5.3</b>	<b>Agentenorientierte Erweiterungen in AORML .....</b>	<b>102</b>
<b>5.4</b>	<b>Agentenorientierte Erweiterungen in Gaia.....</b>	<b>105</b>
<b>5.5</b>	<b>Verwandte Arbeiten .....</b>	<b>108</b>
<b>5.6</b>	<b>Abschließende Bemerkungen .....</b>	<b>109</b>
<b>6.</b>	<b>Agentenbasierte Simulation von Fahrerlosen Transportsystemen .....</b>	<b>110</b>
<b>6.1</b>	<b>Szenariobeschreibung .....</b>	<b>110</b>
6.1.1	Erweiterungen .....	110
<b>6.2</b>	<b>Agenten-, Objekt- und Nachrichtentypen.....</b>	<b>111</b>
<b>6.3</b>	<b>Externes Modell (Umgebungssimulator) .....</b>	<b>112</b>
6.3.1	Maschine .....	113

6.3.2	FTF .....	113
<b>6.4</b>	<b>Internes Modell Maschine .....</b>	<b>115</b>
<b>6.5</b>	<b>Internes Modell TA-Manager .....</b>	<b>115</b>
<b>6.6</b>	<b>Internes Modell FTF .....</b>	<b>116</b>
<b>6.7</b>	<b>Internes Modell Verkehrsregler .....</b>	<b>117</b>
<b>7.</b>	<b>Visuelle Spezifikation agentenbasierter Simulationsmodelle.....</b>	<b>119</b>
<b>7.1</b>	<b>Spezifikation mittels UML.....</b>	<b>119</b>
7.1.1	Das externe Modell .....	119
7.1.1.1	Strukturmodell.....	120
7.1.1.2	Verhaltensmodell .....	122
7.1.1.3	Konkrete Instanzen.....	123
7.1.2	Das interne Modell .....	124
7.1.2.1	Strukturmodell.....	124
7.1.2.2	Verhaltensmodell .....	126
7.1.2.3	Konkrete Instanzen.....	127
7.1.3	Verbindungen zwischen externem und internem Modell .....	128
<b>7.2</b>	<b>Spezifikation mittels AORML.....</b>	<b>128</b>
7.2.1	Das externe Modell .....	128
7.2.1.1	Strukturmodell.....	128
7.2.1.2	Verhaltensmodell .....	130
7.2.1.3	Konkrete Instanzen.....	131
7.2.2	Das interne Modell .....	131
7.2.2.1	Strukturmodell.....	131
7.2.2.2	Verhaltensmodell .....	132
7.2.2.3	Konkrete Instanzen.....	133
7.2.3	Verbindungen zwischen externem und internem Modell .....	134
<b>7.3</b>	<b>Vergleich zwischen UML und AORML.....</b>	<b>134</b>
<b>8.</b>	<b>Implementierung eines Simulationssystems .....</b>	<b>135</b>
<b>8.1</b>	<b>Der Kern des Simulators DESim .....</b>	<b>137</b>
<b>8.2</b>	<b>Der Kern des Simulators OBSim.....</b>	<b>137</b>
<b>8.3</b>	<b>Der Kern des Simulators ABSim .....</b>	<b>139</b>
8.3.1	Package absimulation .....	139
8.3.2	Package absimulation.theinterface .....	140

8.3.3	Package absimulation.envsimulator .....	141
8.3.4	Package absimulation.agentsimulator .....	142
<b>8.4</b>	<b>Spezifikation mittels UML.....</b>	<b>143</b>
8.4.1	Anforderungen an die UML-Tools .....	143
8.4.1.1	n-äre Assoziationen .....	143
8.4.1.2	Objekte im Klassendiagramm .....	144
8.4.1.3	Selbstdefinierte Stereotypen.....	144
8.4.1.4	OCL-Unterstützung .....	144
8.4.1.5	Vollständiger XMI-Export .....	144
8.4.2	Untersuchte UML-Tools .....	144
8.4.2.1	Rational Rose .....	144
8.4.2.2	Together .....	144
8.4.2.3	ArgoUML.....	145
8.4.2.4	Microsoft Visio .....	145
8.4.3	Übersicht und Auswahl .....	145
8.4.4	Einschränkungen aufgrund der Auswahl .....	145
8.4.4.1	Instanzen von Agenten und Objekten .....	146
8.4.4.2	Stränge von exogenen Ereignissen und periodischen Zeitereignissen.....	146
8.4.4.3	Reaktionsregeln.....	146
<b>8.5</b>	<b>Das Format ABSimML.....</b>	<b>147</b>
8.5.1	Entitäts- und Ereignistypen .....	147
8.5.2	Initialer Systemzustand .....	148
8.5.3	Regeln.....	149
<b>8.6</b>	<b>Transformation von XMI nach ABSimML .....</b>	<b>150</b>
<b>8.7</b>	<b>Transformation von ABSimML nach Java-Code .....</b>	<b>150</b>
<b>8.8</b>	<b>Simulationsstudie Fahrerloser Transportsysteme .....</b>	<b>152</b>
8.8.1	Beschreibung Grundszenario .....	152
8.8.2	Ergebnisse Grundszenario.....	154
8.8.3	Erweiterungen Grundszenario.....	155
8.8.4	Zusammenfassung.....	157
<b>9.</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>159</b>
<b>9.1</b>	<b>Visualisierung .....</b>	<b>159</b>
9.1.1	Vorhandene Visualisierung .....	159
9.1.2	Generische Visualisierung.....	161
9.1.3	Statistik.....	161



<b>9.2</b>	<b>Verteilte Simulation .....</b>	<b>162</b>
<b>9.3</b>	<b>Echtzeitsimulation .....</b>	<b>164</b>
<b>9.4</b>	<b>Interaktive Simulation .....</b>	<b>165</b>
9.4.1	Einleitung .....	165
9.4.2	Gründe Interaktiver Simulation.....	165
9.4.3	Formen Interaktiver Simulation .....	166
9.4.4	Interaktive Simulationssysteme.....	166
9.4.5	Interaktive Agentenbasierte Simulation .....	167
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>169</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>171</b>
<b>A.</b>	<b>Glossar Fahrerlose Transportsysteme .....</b>	<b>175</b>
<b>B.</b>	<b>Reaktionsregeln Fahrerloser Transportsysteme .....</b>	<b>181</b>
B.1.	U-Regeln Maschinen.....	181
B.2.	U- Regeln FTF .....	182
B.3.	A-Regeln Maschine.....	188
B.4.	Erweiterungen Maschine .....	195
B.5.	A-Regeln TA-Manager .....	195
B.6.	Erweiterungen TA-Manager .....	205
B.7.	A-Regeln FTF .....	206
B.8.	Erweiterungen FTF .....	212
B.9.	A-Regeln Verkehrsregler .....	213
B.10.	Erweiterungen Verkehrsregler .....	214
B.11.	Variante Austausch von Transportaufträgen.....	215
<b>C.</b>	<b>Anhang gemäß Promotionsordnung.....</b>	<b>222</b>