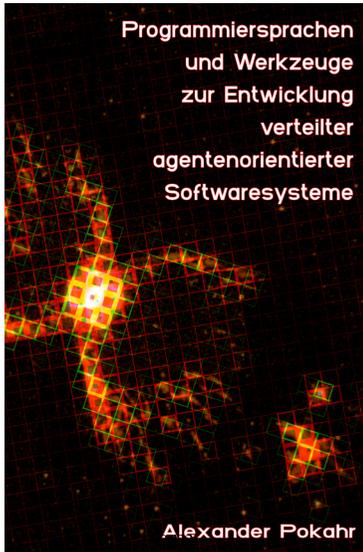


Diese Dissertation ist als Buch erschienen



**Programmiersprachen und  
Werkzeuge zur Entwicklung  
verteilter agentenorientierter  
Softwaresysteme**

Alexander Pokahr  
ISBN 978-3-00-023105-6  
Hardcover, 448 Seiten  
Dezember 2007

Druck und Vertrieb über:  
Lulu Enterprises Inc. 860  
Aviation Parkway  
Suite 300  
Morrisville, NC 27560  
United States of America

**Inhalt des Buches:**

Charakteristische Herausforderungen bei der Entwicklung verteilter Softwaresysteme bestehen u.a. in der Heterogenität der Teilkomponenten, dem Wunsch nach flexibler Interaktion zwischen unabhängigen Teilsystemen und der damit einhergehenden hohen Dynamik der Anwendungsumgebung. Herkömmliche Softwareentwicklungsumgebungen unterstützen die Konstruktion von Anwendungssystemen mit derartigen Eigenschaften bisher nur unzureichend.

In diesem Buch wird ein Entwicklungsansatz beschrieben, der die Entwicklung verteilter Softwaresysteme mit Hilfe agentenbasierter Konzepte und Technologien verbessert. Neben einer umfangreichen Betrachtung bestehender Möglichkeiten der agentenorientierten Programmierung wird in diesem Buch einerseits eine neue agentenorientierte Programmiersprache vorgestellt, die eine intuitive Beschreibung zielorientierter Agenten auf Basis des BDI-Modells ermöglicht. Zum anderen wird eine durchgehende Werkzeugunterstützung eingeführt, die für den vorgeschlagenen agentenorientierten Entwicklungsansatz in allen Phasen des Entwicklungsprozesses adäquate Unterstützungsmechanismen bereitstellt.

Durch Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Softwareentwicklungsprojekten sowohl im universitären Bereich als auch in der Industrie wird der Nutzen der Agententechnologie anschaulich herausgestellt. Die vorgestellte Programmiersprache und die Werkzeugunterstützung sind im generischen Softwareframework Jadex zudem als Open Source verfügbar, so dass der Inhalt des Buches auch praktisch nachvollzogen werden kann.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dissertation Universität Hamburg, 2007

1. Auflage Dezember 2007

Alle Rechte vorbehalten

©Alexander Pokahr

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Alexander Pokahr und Lars Braubach

Druck und Vertrieb: Lulu Enterprises Inc, 860 Aviation Parkway, Suite 300, Morrisville, NC 27560, United States of America

ISBN 978-3-00-023105-6

Printed in Germany

## Zusammenfassung

Im Zuge der zunehmenden Vernetzung von Rechnerinfrastrukturen müssen inzwischen bei der Anwendungsentwicklung in nahezu allen Bereichen Aspekte der Verteilung Berücksichtigung finden. Charakteristische Herausforderungen bei der Entwicklung verteilter Softwaresysteme bestehen dabei u.a. in der Heterogenität der Teilkomponenten, dem Wunsch nach flexibler Interaktion zwischen unabhängigen Teilsystemen und der damit einhergehenden hohen Dynamik der Anwendungsumgebung. Aktuell vorherrschende Softwareentwicklungsansätze wie z.B. die Objektorientierung oder dienstorientierte Architekturen bieten teilweise noch nicht ausreichende Abstraktionskonzepte, um solche Herausforderungen in einem einheitlichen Modell zu adressieren. Im Gegensatz dazu stellt die Agentenorientierung ein Paradigma dar, mit dem verteilte Softwaresysteme in intuitiver Form als Zusammenspiel autonom agierender und interagierender Akteure beschrieben werden können. Aus Gründen wie u.a. dem stark diversifizierten Forschungsgebiet und der damit einhergehenden teilweisen Unausgereiftheit entsprechender Ansätze hat sich das agentenorientierte Paradigma jedoch bisher nur begrenzt in der Praxis etablieren können.

Um diesbezüglich die Entwicklung verteilter Softwaresysteme durch agentenbasierte Konzepte und Technologien besser unterstützen zu können, ist die generelle Zielsetzung dieser Arbeit daher, bestehende agentenorientierte Herangehensweisen an die Softwareentwicklung konzeptionell und technisch weiterzuentwickeln und so für eine breite Klasse verteilter Anwendungen einsetzbar zu machen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird zum einen auf Grundlage der Untersuchung und Bewertung bestehender Möglichkeiten der agentenorientierten Programmierung eine neue agentenorientierte Programmiersprache namens Jadex entworfen, die eine intuitive Beschreibung zielorientierter Agenten auf Basis des BDI-Modells ermöglicht. Zum anderen wird auf der Grundlage einer vorherigen Analyse des Bedarfs an Werkzeugen eine durchgehende Werkzeugunterstützung konzipiert, die für den vorgeschlagenen agentenorientierten Entwicklungsansatz in allen Phasen des Entwicklungsprozesses adäquate Werkzeuge bereitstellt. Die so entworfene agentenorientierte Programmiersprache und die dafür konzipierte Werkzeugunterstützung werden schließlich im Rahmen der Realisierung des generischen Softwareframeworks Jadex auch praktisch umgesetzt und evaluiert.

Durch den Einsatz des Frameworks in verschiedenen realitätsnahen Softwareentwicklungsprojekten wird dabei nachgewiesen, dass die konzeptionellen und technischen Ergebnisse dieser Arbeit wesentlich dazu beitragen können, die konzeptionellen Stärken des Agentenparadigmas auch in der Praxis der alltäglichen Softwareentwicklung für verteilte Anwendungen zu nutzen. Praxistauglichkeit und Einsatzreife der so entwickelten Konzepte und Technologien werden zudem durch den Bericht über im Rahmen der Dissertation durchgeführte Projekte und durch exemplarische Anwendungen sowohl im Bereich der universitären Forschung und Lehre als auch in der Industrie bestätigt.

## Abstract

In the context of an increasingly networked computing infrastructure, application development has to consider aspects of distribution in virtually all domains. Among the characteristic challenges in the development of distributed systems are the heterogeneity of the individual components, the need for flexible interactions among the autonomous subsystems, and, as a result, the high amount of dynamics in the applications environment. Currently established development approaches like object-orientation or service-oriented architectures only partially deliver conceptual abstractions, addressing some of the aforementioned challenges, and therefore lack a uniform model for all aspects of distributed systems. Agent-orientation, on the other hand, represents a paradigm, allowing to describe distributed software systems in a natural way as a collection of autonomously acting and interacting entities. Due to the largely deversified research area and the immaturity of many agent-based approaches, the agent paradigm did not yet establish itself as a successor of current software development approaches.

To facilitate the development of such distributed software systems using agent-based concepts and technologies, the general goal of this work is to conceptually and technically improve agent-oriented approaches to software development, allowing to apply them to a wide range of distributed applications. To reach this goal, two aspects of agent-oriented software development are addressed. On the one hand, based on a survey and evaluation of existing possibilities for agent-oriented programming, a new agent-oriented programming language is designed, allowing an intuitive description of goal-oriented agents, following the BDI model. On the other hand, an analysis of the required tool support is performed and a complete tool suite is conceived, supporting the proposed agent-oriented development approach during all phases of the development process. The newly designed programming language and the conceived tool suite are realized in the context of the generic agent-based software framework *Jadex*, developed in this work.

With the usage of the framework in several different realistic software development projects, it is proven, that the conceptual and technical results of this work contribute to the applicability of the theoretical advantages of the agent-oriented paradigm to real-world software development problems. The practicability and maturity of the developed concepts and technologies is further demonstrated by projects and applications from academic research and teaching as well as projects with industrial background.

## Danksagungen

Wie bei anderen Dissertationen, gibt es auch im Zusammenhang mit diesem Forschungsvorhaben zahlreiche Menschen, die in der einen oder anderen Form diese Arbeit positiv beeinflusst haben. Danken möchte ich daher zuallererst meinem Freund und Kollegen Lars Braubach, der das Unternehmen „Dissertation“ zeitgleich mit mir in Angriff genommen hat, für die steile, fruchtbare und unterhaltsame Zusammenarbeit über mittlerweile mehr als zehn Jahre. Die Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen des mit Lars gemeinsam initiierten und durchgeführten Jadex-Projektes. So waren es auch insbesondere die zahllosen intensiv geführten Jadex-bezogenen Diskussionen, die diese Arbeit von Beginn an bis zum Abschluss mitgeprägt haben. Ebenso gilt mein Dank meinem Betreuer Prof. Dr. Winfried Lamersdorf, der den Anstoß für diese Arbeit gab, ein produktives Arbeitsumfeld ermöglichte und es insbesondere verstand, mir im Verlauf der Arbeit jeweils das benötigte Maß an Unterstützung und Freiraum zukommen zu lassen sowie Dr. Daniel Moldt, der außer mit allgemeinen Ratschlägen auch immer zur Verfügung stand, um bei Bedarf über konkrete Inhalte aus einem anderen Blickwinkel heraus zu diskutieren.

Zudem möchte ich den vielen Forscherkollegen aus dem Bereich der Agententechnologie meinen Dank aussprechen für einen kontinuierlichen anregenden Austausch und eine produktive und kurzweilige Zusammenarbeit. Hier sind vor allen Dingen die Partner im MedPAGE-Projekt, Torsten Paulussen, Anja Zöller, Dr. Franz Rothlauf und Prof. Dr. Armin Heinzl zu nennen sowie die Kollegen und Mitstreiter aus dem DFG-Schwerpunktprogramm „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“, speziell Rainer Herrler und Karl-Heinz Krempels. Bedanken möchte ich mich auch für die allgemeine Herzlichkeit und Offenheit mit der mein Kollege Lars Braubach und ich von der internationalen Forschergemeinde im Bereich der Agententechnologie aufgenommen wurden. Mein spezieller Dank gilt hierbei den Organisatoren des ProMAS-Workshops, insbesondere Dr. Mehdi Dastani, Dr. Rafael Bordini und Dr. Birna van Riemsdijk.

Schließlich danke ich den vielen Studenten, die im Rahmen des Jadex-Projektes Studien- und Diplomarbeiten sowie Hilfskrafttätigkeiten durchgeführt haben, insbesondere für ihren Einsatz und ihre Begeisterungsfähigkeit für das Jadex-Projekt. Im Speziellen gilt mein diesbezüglicher Dank den Studenten und späteren Kollegen Jan Sudeikat und Andrzej Walczak sowie den studentischen Hilfskräften Dirk Bade, Rüdiger Leppin und Manuel Orben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Herausforderungen bei der Entwicklung verteilter Systeme . . . . .	2
1.2	Ansätze zur Entwicklung verteilter Systeme . . . . .	5
1.3	Zielsetzung . . . . .	8
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Agenten und Multiagentensysteme</b>	<b>13</b>
2.1	Was ist ein Agent? . . . . .	14
2.1.1	Der “MuBot”-Agent . . . . .	14
2.1.2	Der “SodaBot”-Agent . . . . .	15
2.1.3	Die AgentLink-Definition . . . . .	15
2.1.4	Zusammenfassung . . . . .	16
2.2	Arten von Softwareagenten . . . . .	18
2.2.1	Taxonomie nach Franklin und Graesser . . . . .	18
2.2.2	Klassifikation nach Aufgaben . . . . .	19
2.2.3	Klassifikation nach internem Aufbau . . . . .	27
2.2.4	Zusammenfassung . . . . .	40
2.3	Multiagentensysteme . . . . .	41
2.3.1	Umgebung . . . . .	42
2.3.2	Interaktion und Kommunikation . . . . .	46
2.3.3	Soziale Strukturen und Koordination . . . . .	49
2.3.4	Zusammenfassung . . . . .	53
2.4	Sichtweisen auf Softwareagenten . . . . .	53
2.4.1	Agenten als eigenständiges Entwurfparadigma . . . . .	54
2.4.2	Agententechnologie als Erweiterung der objektorientierten Praxis . . . . .	54
2.4.3	Sichtweise dieser Arbeit . . . . .	55
2.5	Zusammenfassung . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Konstruktion agentenbasierter Anwendungen</b>	<b>59</b>
3.1	Hilfsmittel und Artefakte zur Konstruktion von Software . . . . .	59
3.2	Anforderungen an Hilfsmittel und Konstruktionsartefakte . . . . .	62
3.3	Programmiersprachen . . . . .	65
3.3.1	Ausgestaltung von Programmiersprachen . . . . .	65
3.3.2	Programmiersprachen für Agenten . . . . .	71

3.3.3	Agent Oriented Programming . . . . .	77
3.3.4	PRS-Sprachen . . . . .	87
3.3.5	3APL . . . . .	102
3.3.6	Soar . . . . .	109
3.3.7	API-basierte Ansätze . . . . .	121
3.3.8	Auswertung . . . . .	136
3.4	Werkzeuge . . . . .	138
3.4.1	Arten von Werkzeugen . . . . .	138
3.4.2	Agentenorientierte Werkzeuge und Software . . . . .	146
3.4.3	Modellierungswerkzeuge . . . . .	150
3.4.4	Prometheus Design Tool . . . . .	154
3.4.5	LS/TS Modeler . . . . .	161
3.4.6	Integrierte Entwicklungsumgebungen . . . . .	167
3.4.7	JACK Development Environment . . . . .	170
3.4.8	LS/TS Development Suite . . . . .	177
3.4.9	Auswertung . . . . .	186
3.5	Zusammenfassung . . . . .	188
<b>4</b>	<b>Konzeption der Jadex-Agentensprache</b>	<b>191</b>
4.1	Anforderungen . . . . .	192
4.1.1	Stärken agentenorientierter Sprachen . . . . .	192
4.1.2	Schwächen agentenorientierter Sprachen . . . . .	193
4.1.3	Adressierung der Anforderungen . . . . .	195
4.2	Mechanismen der Agentenspezifikation . . . . .	197
4.2.1	Agentenspezifikation in bestehenden Ansätzen . . . . .	197
4.2.2	Prozedurale und deskriptive Agentenspezifikation . . . . .	199
4.2.3	Ein hybrider Sprachansatz . . . . .	200
4.2.4	Die Agentenprogrammiersprache Jadex . . . . .	203
4.2.5	Einordnung von Jadex in den generischen hybriden Ansatz	212
4.3	Zielorientierte Programmierung . . . . .	214
4.3.1	Schwächen bestehender Ansätze . . . . .	215
4.3.2	Repräsentation von Zielen in Jadex . . . . .	216
4.3.3	Prozedurale Zielprogrammierung . . . . .	219
4.3.4	Deskriptive Zielprogrammierung . . . . .	223
4.3.5	Ausführungsmodell der Zielbearbeitung . . . . .	230
4.3.6	Zusammenfassung . . . . .	233
4.4	Modularisierung der Agentenspezifikation . . . . .	234
4.4.1	Modularisierung in der Softwareentwicklung . . . . .	235
4.4.2	Modularisierung von BDI-Agenten . . . . .	235
4.4.3	Modularisierungskonzept für den hybriden Sprachansatz .	238
4.4.4	Diskussion . . . . .	244
4.5	Zusammenfassung . . . . .	245

<b>5</b>	<b>Realisierung des Jadex-Agentenframeworks</b>	<b>247</b>
5.1	Umsetzung der Reasoning Engine . . . . .	247
5.1.1	Anforderungen an die Umsetzung . . . . .	248
5.1.2	Abstrakte Architektur . . . . .	250
5.1.3	Agendabasierter Interpreter . . . . .	252
5.1.4	Technische Aspekte der Umsetzung . . . . .	256
5.1.5	Einbettung der Reasoning Engine in bestehende Ausführungs- umgebungen . . . . .	257
5.1.6	Zusammenfassung . . . . .	263
5.2	Werkzeugunterstützung . . . . .	264
5.2.1	Anforderungen an die Werkzeugunterstützung . . . . .	264
5.2.2	Werkzeuge der Analysephase . . . . .	265
5.2.3	Werkzeuge der Design-Phase . . . . .	272
5.2.4	Werkzeuge der Implementierungsphase . . . . .	282
5.2.5	Werkzeuge der Testphase . . . . .	288
5.2.6	Werkzeuge der Deployment-Phase . . . . .	296
5.2.7	Integrationsaspekte der Werkzeugunterstützung . . . . .	303
5.3	Zusammenfassung . . . . .	305
<b>6</b>	<b>Entwicklung verteilter Anwendungen mit Jadex</b>	<b>307</b>
6.1	Verteiltes agentenbasiertes BlackJack . . . . .	308
6.1.1	Entwurf der Anwendung . . . . .	308
6.1.2	Umsetzung der Anwendung . . . . .	317
6.1.3	Schlussbemerkungen zur Entwicklung . . . . .	329
6.2	Internet Buchversand „Electronic Bookstore“ . . . . .	331
6.2.1	Entwurf des Systems . . . . .	332
6.2.2	Umsetzung des Systems . . . . .	335
6.2.3	Schlussbemerkungen zur Entwicklung . . . . .	338
6.3	MedPAge: Agentenbasierte Krankenhauskoordination . . . . .	340
6.3.1	Entwurf der Prototypen . . . . .	341
6.3.2	Umsetzung der Prototypen . . . . .	344
6.3.3	Systematisches Testen des Systems . . . . .	349
6.3.4	Schlussbemerkungen zum MedPAge-Projekt . . . . .	352
6.4	Weitere mit Jadex realisierte Anwendungen . . . . .	353
6.4.1	Beispielanwendungen . . . . .	353
6.4.2	Durchgeführte Softwareprojekte . . . . .	357
6.4.3	Untersuchte alternative Anwendungsdomänen . . . . .	358
6.4.4	Externer Einsatz in Forschung und Lehre . . . . .	360
6.4.5	Zusammenfassung . . . . .	364
6.5	Bewertung der Komponenten des Framework . . . . .	364
6.5.1	Bewertung anhand der Kriterien . . . . .	365
6.5.2	Vergleich mit bestehenden Agentenprogrammiersprachen . . . . .	372
6.5.3	Vergleich mit bestehender Werkzeugunterstützung . . . . .	373
6.6	Zusammenfassung . . . . .	375

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>377</b>
7.1 Zusammenfassung . . . . .	377
7.2 Ausblick . . . . .	383
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>387</b>