

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2011-1

Ingo Mittrup

**Unterstützung der messtechnischen
Langzeitüberwachung sicherheitsrelevanter
Ingenieurbauwerke basierend auf einem
Multiagentensystemansatz**

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9801-2

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2004 bis 2010 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen an der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen. Während meiner Zeit am Lehrstuhl habe ich das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Forschungsprojekt „Agentenbasierte Überwachung sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke, insbesondere Staubauwerke“ und einen Teilbereich des europäischen Großforschungsprojektes „Tunconstruct – Technology Innovation in Underground Construction“ bearbeitet. Viele der bei der Bearbeitung des DFG-Forschungsprojektes gewonnene Erkenntnisse sind in die vorliegende Arbeit eingeflossen.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Hartmann für die Anregung zu dieser Arbeit, für seine ausgezeichnete wissenschaftliche Betreuung und für die persönliche Unterstützung während meiner Zeit an seinem Lehrstuhl. Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus König danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und sein Interesse an meiner Arbeit. Für seine Tätigkeit als fachfremder Gutachter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes. Dem Ruhrverband danke ich für die freundliche Bereitstellung von Mess- und Überwachungsdaten.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik für ihre stete Hilfsbereitschaft. In diesem Zusammenhang möchte ich besonders meine Kollegen Andrés Wellmann Jelic, Kai Oberste-Ufer, Karlheinz Lehner und Kai Erlemann hervorheben, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt schließlich meiner Ehefrau María del Carmen für ihre Geduld, tatkräftige Unterstützung und ihren Rückhalt während der Fertigstellung dieser Arbeit. Zuletzt danke ich herzlich meinen Eltern, die mich stets in jeder Hinsicht unterstützt und auf diese Weise die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben.

Bochum, im März 2010

Ingo Mittrup

Tag der Einreichung: 05.01.2010

Tag der mündlichen Prüfung: 19.02.2010

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. D. Hartmann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. König

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Listingsverzeichnis	ix
I Grundlagen	1
1 Einleitung	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Aufbau der Arbeit	6
2 Stand der Forschung	9
2.1 Bauwerksüberwachung	9
2.1.1 Inspektion und Prüfung von Bauwerken	10
2.1.2 Zusätzliche Untersuchungen am Bauwerk	11
2.2 Bauwerksmonitoring	13
2.2.1 Definition	13
2.2.2 Konzept	14
2.2.3 Dauer und Frequenz von Messungen	15
2.2.4 Messgrößen	16
2.2.5 Messeinrichtungen	17
2.2.6 Zustandserfassungsstrategie	18
2.2.7 Schadenserkenntungsstrategie	19
2.2.8 Bewertung der Bauwerkssicherheit	20
2.2.9 Beispielanwendungen	21
2.3 Bauwerksmonitoringsysteme	24
2.3.1 Systemarchitektur	24
2.3.2 Datenerfassungssysteme	25
2.3.3 Datenübertragungs- und Datenspeicherungsmechanismen	26
2.3.4 Datenverwaltung und -auswertung	27
3 Multiagentensysteme	29
3.1 Softwareagenten und Multiagentensysteme	29
3.1.1 Definition	29
3.1.2 Sichtweise auf ein Multiagentensystem	30
3.1.3 Agentenbegriff	31
3.2 Agentenarchitekturen	32
3.2.1 Deliberative Architekturen	32
3.2.2 Reaktive Architekturen	33
3.2.3 Hybride Architekturen	34

3.3	Kommunikation und Koordination	34
3.3.1	Sprechakte	34
3.3.2	Kommunikationssprachen	35
3.3.3	Interaktionsprotokolle	37
3.3.4	Koordination	37
3.3.5	Ontologien	39
3.4	Agentenorientierte Software-Entwicklung	41
3.4.1	Entwicklungsmethodologien	42
3.4.2	FIPA-Standards	42
3.4.3	Agentenplattform JADE	44
3.5	Entwicklungsstand von Agentensystemen	45
II	Konzept	49
4	Konzeption	51
4.1	Analyse eines Monitoringablaufs	51
4.1.1	Problembeschreibung	51
4.1.2	Monitoringablauf	53
4.1.3	Formalisierung	56
4.2	Agentenorientierte Analyse	57
4.2.1	Anforderungen	58
4.2.2	Erstidentifikation von Agententypen	60
4.3	Agentenorientierter Entwurf	61
4.3.1	Ergänzung der Agententypen	61
4.3.2	Bekanntschaften und Interaktionen	62
4.3.3	Dienste	64
4.4	Problemlösungskompetenzen	65
4.4.1	Intelligente Steuerung des Datenerfassungsvorgangs	66
4.4.2	Filterung von Messdaten	66
4.4.3	Rechnerbasierte Prognose des Bauwerksverhaltens	67
4.4.4	Automatisierte Bewertung von Messdaten	68
4.4.5	Systemüberwachung und -diagnose	73
4.5	Ressourcen	74
4.5.1	Messeinrichtungen	74
4.5.2	Messdateien	75
4.5.3	Messdatenbanken	76
4.5.4	Statistiksoftware	76
4.6	Informationsmodellierung	77
4.6.1	Datenmodellierung	77
4.6.2	Integration von proprietären Messdatenformaten	79
III	Umsetzung	81
5	Implementierung	83
5.1	Vorbemerkungen	83
5.2	Erfassung von Messdaten	84
5.2.1	Sensorikagent	84
5.2.2	Messdateiagent	86
5.2.3	Kommunikation mit Mess- und Datenerfassungssystemen	87

5.3	Verteilung von Messdaten	89
5.3.1	Datenverteilungsagent	89
5.4	Aufbereitung von Messdaten	91
5.4.1	Datenverarbeitungsagent	91
5.5	Pflege von Messdaten	92
5.5.1	Datenspeicherungsagent	92
5.5.2	Datenbankschema	94
5.6	Nutzung von Messdaten	96
5.6.1	Berichtsagent	96
5.6.2	Filteragent	97
5.6.3	Statistikagent	98
5.6.4	Persönlicher Agent	99
5.7	Selbstdiagnose/Selbstüberwachung	101
5.7.1	Systemüberwachungsagent	101
5.8	Monitoring-Ontologie	101
5.9	Verteilungskonzept für die Praxis	105
6	Validierung	107
6.1	Talsperrenüberwachung	107
6.1.1	Analyse- und Prognosemodelle für Staumauern	107
6.1.2	Talsperrenüberwachung nach DIN 19700	109
6.2	Überwachungsszenario	112
6.2.1	Referenzsystem Ennepetalsperre	112
6.2.2	Messdaten	114
6.2.3	Fiktives Szenario	116
6.3	Plausibilitätskontrolle der Messwerte	116
6.3.1	Erkennung grober Abweichungen und rechnerbasierte Vorbewertung	116
6.3.2	Ansicht der aktuellen Messdaten	117
6.3.3	Kurzfristige Kontrolle der Messwerte	119
6.4	Analyse der Messwerte	121
6.4.1	Auswahl und Ansicht der Messschriebe	121
6.4.2	Regressionsanalyse der radialen Verformungen	123
6.4.3	Klassifizierung der radialen Verformungen	125
6.5	Zusammenfassende Wertung	127
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
7.1	Zusammenfassung	129
7.2	Bewertung der Ergebnisse	130
7.3	Ausblick	131
IV	Anhang	133
A	Datenlogger	135
A.1	Definition	135
A.2	Analyse der Funktionalitäten eines Datenloggers	136
A.2.1	Interne Zeitmessung und -steuerung	136
A.2.2	Anschlussmöglichkeiten für Sensoren	136
A.2.3	Interner Speicher	136
A.2.4	Schnittstelle zum externen Rechner	137
A.3	Datenlogger DataTaker DT600	137

B Analyseverfahren	139
B.1 Kenngrößen und Testverfahren	139
B.1.1 Regressionsanalyse	139
B.1.2 Korrelation	139
B.1.3 k-means-Clusteranalyse	140
B.1.4 Mann-Kendall-Test	140
B.1.5 Mann-Whitney-Test	141
B.1.6 Chow-Test	142
C Artefakte und Modelle	143
C.1 Anwendungsfälle	144
C.1.1 Anwendungsfall AF1: Bauwerksphänomene erfassen	144
C.1.2 Anwendungsfall AF2: Messdaten ansehen	145
C.1.3 Anwendungsfall AF3: Messdaten importieren	146
C.1.4 Anwendungsfall AF4: Messdaten archivieren	147
C.1.5 Anwendungsfall AF5: Messdaten verwalten	148
C.1.6 Anwendungsfall AF6: Messdaten grafisch aufbereiten	149
C.1.7 Anwendungsfall AF7: Messdaten auswerten	150
C.1.8 Anwendungsfall AF8: Messdaten extrahieren	151
C.1.9 Anwendungsfall AF9: Rohdatenformate verarbeiten	152
C.2 Verantwortlichkeiten	153
C.3 Bekanntschaften	155
C.4 Interaktionstabellen	156
C.4.1 Sensorikagent	156
C.4.2 Messdateiagent	156
C.4.3 Datenverteilungsagent	157
C.4.4 Datenverarbeitungsagent	157
C.4.5 Datenspeicherungsagent	158
C.4.6 Berichtsagent	158
C.4.7 Filteragent	159
C.4.8 Statistikagent	159
C.4.9 Persönlicher Agent	160
C.4.10 Observer-Agent	161
C.5 Dienstbeschreibungen	162
C.5.1 Sensorikagent	162
C.5.2 Messdateiagent	162
C.5.3 Datenverteilungsagent	162
C.5.4 Datenverarbeitungsagent	163
C.5.5 Statistikagent	163
C.5.6 Datenspeicherungsagent	163
C.5.7 Persönlicher Agent	164

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich der zeitlichen Abfolge von Inspektionen	4
1.2	Kollaps der Interstate 35 W in Minneapolis	5
2.1	Degradation der Bauwerkstragfähigkeit	10
2.2	Anwendung von SHM in intelligenten Materialien	14
2.3	Inhalte für ein Monitoringkonzept	15
2.4	Messstrategien für das Langzeitmonitoring	16
2.5	Messgrößen	17
2.6	Bewertungsverfahren	21
2.7	Verteilte dezentrale Datenerfassungsarchitektur	25
2.8	Datenerfassungssysteme	26
3.1	Sicht auf ein Multiagentensystem nach Jennings	30
3.2	Aufbau eines Agenten mit BDI-Architektur	33
3.3	Subsumptionsarchitektur nach Brooks	34
3.4	FIPA-Request-Interaktionsprotokoll	38
3.5	Phasen des Contract Net-Interaktionsprotokolls	39
3.6	RDF-Tripel	40
3.7	Inhalts-Referenzmodell der Agentenplattform JADE	41
3.8	Einzelschritte der JADE-Entwicklungsmethode	43
3.9	Grafische Benutzungsschnittstelle von JADE	44
3.10	Drei-Ebenen-Modell aus [Bilek 06]	46
4.1	Angestrebtes verteiltes Monitoringsystem mit integrierten Mess- und Datenerfassungssystemen (Sytemskizze)	52
4.2	Beispielhaft betrachteter Monitoringablauf	55
4.3	Monitoringprozess	56
4.4	Anwendungsfälle Bauwerksmonitoringsystem	59
4.5	Dienste des Sensorikagenten	65
4.6	Agentenbasierte Steuerung des Datenerfassungsvorganges	66
4.7	Prognosemodell für die Ennepestaumauer	68
4.8	Agentenlebenszyklus	73
4.9	Kommunikation mit Messeinrichtungen	75
4.10	Zugriff auf Messdateien	76
4.11	Domänenmodell für das Bauwerksmonitoring	78
4.12	SensorML-Datenmodell zur Abbildung von Sensoren und Messprozessen	79
5.1	Grobarchitektur des Bauwerksmonitoringsystems RAMON	84
5.2	Verhaltensbausteine des Sensorikagenten	85
5.3	Paket <code>de.rub.bi.inf.monitoring.sensors</code> (UML-Klassendiagramm)	86

5.4	Verhaltensbausteine des Messdateiagenten	87
5.5	Zugriff des Sensorikagenten auf Mess- und Datenerfassungsgeräte	88
5.6	Verhaltensbausteine des Datenverteilungsagenten	89
5.7	Paket <code>de.rub.bi.inf.monitoring.daq</code>	90
5.8	Verhaltensbausteine des Datenverarbeitungsagenten	91
5.9	Einzelschritte zur Datenverarbeitung (UML-Aktivitätsdiagramm)	92
5.10	Verhaltensbausteine des Datenspeicherungsagenten	92
5.11	Datenbankschema zur persistenten Speicherung der Messdaten	95
5.12	Verhaltensbausteine des Berichtsagenten	96
5.13	Einzelschritte zur Berichtserstellung (UML-Aktivitätsdiagramm)	97
5.14	Verhaltensbausteine des Filteragenten	97
5.15	Verhaltensbausteine des Statistikagenten	98
5.16	Verhaltensbausteine des persönlichen Agenten	99
5.17	Grafische Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten	100
5.18	Verhaltensbausteine des Systemüberwachungsagenten	101
5.19	Entwickelte Bauwerksmonitoring-Ontologie	104
5.20	Detailarchitektur und Verteilung des Bauwerksmonitoringsystems	106
6.1	Anordnung von Mess- und Kontrolleinrichtungen	111
6.2	Staumauer der Ennepetalsperre	112
6.3	Messquerschnitte der Ennepetalsperre und Lage der Messeinrichtungen	113
6.4	Zugrundegelegte Messwerte	115
6.5	Unterfenster zur Visualisierung der automatisiert durchgeführten Vorbewer- tung der Messwerte für die Ennepetalsperre	117
6.6	Zugriff auf aktuelle Messwerte („Online-Daten“)	118
6.7	Unterfenster zur Visualisierung der Online-Daten	118
6.8	Automatisch generierter Messbericht	120
6.9	Zugriff auf gespeicherte Messwerte über die grafische Benutzungsschnittstelle	122
6.10	Unterfenster zur Visualisierung der Messwerte als Zeitreihe	122
6.11	Darstellung der Zeitreihen	123
6.12	Unterfenster mit Konsole zur Durchführung statistischer Analysen	124
6.13	Radiale Verformungen und angepasstes Regressionsmodell	125
6.14	Automatische Gruppierung der Messwerte	126
C.1	Bekanntschaften	155
C.2	Dienstbeschreibung des Sensorikagenten	162
C.3	Dienstbeschreibung des Messdateiagenten	162
C.4	Dienstbeschreibung des Datenverteilungsagenten	162
C.5	Dienstbeschreibung des Datenverarbeitungsagenten	163
C.6	Dienstbeschreibung des Statistikagenten	163
C.7	Dienstbeschreibung des Datenspeicherungsagenten	163
C.8	Dienstbeschreibung des persönlichen Agenten	164

Listings

3.1	KQML-Beispielnachricht	35
5.1	Instanziierung einer seriellen Schnittstelle mittels des Comm API	88
5.2	Repräsentation eines Messwertes in FIPA-SL	93
5.3	Methode zur Kommunikation mit der Statistiksoftware R	98
5.4	Interaktion mit dem AMS mittels des vorgefertigen Verhaltensbausteins AMS-Subscriber	101
6.1	Zusammenfassung des berechneten Regressionsmodells	124