

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

VERBAND DER
ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK
INFORMATIONSTECHNIK

Agentensysteme in der Automatisierungstechnik
Ausgewählte Muster für die Feldebene
und Energiesysteme
Multi-agent systems in industrial automation
Selected patterns for field level control and
energy systems

VDI/VDE 2653

Blatt 4 / Part 4
Entwurf / Draft

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich. /

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Einsprüche bis 2021-07-31

- *vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchportal <http://www.vdi.de/2653-4>*
- *in Papierform an
VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
Fachbereich Industrielle Informationstechnik
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung	2
1 Anwendungsbereich	4
2 Abkürzungen	5
3 Entwurfsmuster für Agenten und CPPS	5
4 Klassifizierungskriterien von MAS-Entwurfsmustern	7
5 Anwendungen von MAS-Mustern	11
5.1 Multiagentensysteme für die Produktion	11
5.2 Multiagentensysteme für Energiesysteme	21
6 Gemeinsame Funktionalitäten und deren Realisierung als Sub-Agenten	22
7 Muster und Abhängigkeiten auf der Basis von RAMI4.0	26
7.1 Muster für die Verwaltungsschale	28
7.2 Vorschlag für eine agentenbasierte I4.0-Architektur	31
Schrifttum	33

Contents	Page
Preliminary note	2
Introduction	2
1 Scope	4
2 Abbreviations	5
3 Introduction to design patterns for MAS architectures and CPPS	5
4 Classification criteria for MAS design patterns	7
5 MAS architecture patterns' applications	11
5.1 Multi-agent systems for manufacturing	11
5.2 Multi-agent systems for energy systems	21
6 Common functionalities realized as sub-agents	22
7 Patterns and dependences based on the RAMI4.0	26
7.1 Patterns for the asset administration shell	28
7.2 Agent-based I4.0 architecture proposal	31
Bibliography	33

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)

Fachbereich Industrielle Informationstechnik

VDI/VDE-Handbuch Automatisierungstechnik
VDI-Handbuch Informationstechnik, Band 1: Angewandte Informationstechnik

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

An der Erarbeitung dieser Richtlinie waren beteiligt:

Prof. Dr.-Ing. *Hartwig Baumgärtel*, Ulm
 M. Sc. *Luis Alberto Cruz Salazar*, München
 Prof. Dr.-Ing. *Christian Diedrich*, Magdeburg
 Prof. Dr.-Ing. *Alexander Fay*, Hamburg
 M. Sc. *Felix Gehlhoff*, Hamburg
 Dr.-Ing., MBA *Max Hoffmann*, Aachen
 Mr. *Stamatis Karnouskos*, Walldorf
 Prof. Dr.-Ing. *Arnd Lüder*, Magdeburg
 Prof. Dr.-Ing. *Astrid Nieße*, Oldenburg
 Prof. Dr.-Ing. *Thorsten Schöler*, Augsburg
 Dr.-Ing. *Daniel Schütz*, München
 M. Sc. *Matthias Seitz*, München
 M. Sc. *Chris Urban*, Magdeburg
 M. Eng. *Richard Verbeet*, Ulm
 Prof. Dr.-Ing. *Birgit Vogel-Heuser*, München

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2653.

Einleitung

Agenten sind zusammen mit der Dienstleistungs- und Serviceorientierung eines der Paradigmen für die Realisierung flexibler Produktionssysteme im Rahmen von Industrie 4.0 (I4.0), Smart Manufacturing oder cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS). Die Flexibilität zur Herstellung neuer Produkte auf bestehenden Maschinen oder Anlagen [1] trägt zu einer hohen Gesamtanlageneffektivität bei, z.B. zur Sicherung der Verfügbarkeit durch Rekonfiguration, Selbstoptimierung, Selbstheilung oder Neustart nach einem Fehler [2].

Agentenansätze werden bereits seit mehreren Jahrzehnten in der Produktionsautomatisierung und -logistik, der Energietechnik und vielen anderen

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

Contributions to this standard were made by:

Prof. Dr.-Ing. *Hartwig Baumgärtel*, Ulm
 M. Sc. *Luis Alberto Cruz Salazar*, München
 Prof. Dr.-Ing. *Christian Diedrich*, Magdeburg
 Prof. Dr.-Ing. *Alexander Fay*, Hamburg
 M. Sc. *Felix Gehlhoff*, Hamburg
 Dr.-Ing., MBA *Max Hoffmann*, Aachen
 Mr. *Stamatis Karnouskos*, Walldorf
 Prof. Dr.-Ing. *Arnd Lüder*, Magdeburg
 Prof. Dr.-Ing. *Astrid Nieße*, Oldenburg
 Prof. Dr.-Ing. *Thorsten Schöler*, Augsburg
 Dr.-Ing. *Daniel Schütz*, München
 M. Sc. *Matthias Seitz*, München
 M. Sc. *Chris Urban*, Magdeburg
 M. Eng. *Richard Verbeet*, Ulm
 Prof. Dr.-Ing. *Birgit Vogel-Heuser*, München

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as further information, if applicable, can be accessed on the Internet at www.vdi.de/2653.

Introduction

Agents, together with service orientation, are one of the paradigms for the realization of flexible production systems within the context of Industry 4.0 (I4.0), smart manufacturing, or cyber-physical production systems (CPPS). The flexibility to manufacture new products on existing machines or plants [1] contributes to a high overall equipment effectiveness, e.g. assuring of availability through reconfiguration, self-optimization, self-healing, or restart after a fault [2].

Agent approaches have already been used successfully for several decades in production automation and logistics, energy technology, and many other

Bereichen von der Feldebene bis hin zu den Ebenen Fertigungsmanagementsysteme (MES) und Enterprise Resource Planning (ERP) aus der ISA 95 (IEC 62264) erfolgreich eingesetzt. In diesem Fall kann ein Agent auf verschiedenen Ebenen innerhalb der Domänen eingesetzt werden, um verschiedene Aufgaben zu erfüllen, und diese können verschiedenen Ebenen der ISA 95 zugeordnet werden, wie Bild 1 zeigt. Zeitkritische Steuerungen oder Sensoren erfordern keine komplexen Entscheidungsmechanismen, sondern müssen aufgrund technischer oder organisatorischer Einschränkungen auf regelbasierten Algorithmen aufbauen. MES- (Diagnose, Auftragsverfolgung, Produktionssteuerung, Auftragsterminierung) oder ERP-Systeme (Masterplanung, Transportplanung, Lieferantenmanagement) können dagegen wesentlich komplexere Verfahren verwenden [3]. Neben der zielorientierten Prozesssteuerung kann ein Entscheidungsprozess in Lernagenten durch Methoden der künstlichen Intelligenz realisiert werden [4]. Die Zeitsensitivität einer Anwendung kann als strategisch, taktisch und operativ (Echtzeit) spezifiziert werden. Nach [5] lassen sich Echtzeitanwendungen einteilen in:

- hart (Reaktionszeit unterhalb einer Schwelle, Fehler resultiert aus der Überschreitung dieser Schwelle)
- schwach (Reaktionszeit unterhalb des statistischen Kriteriums, Fehler resultiert aus der Überschreitung des Toleranzbereichs)

Ein „System“ im I4.0-Kontext enthält physische Komponenten, Informationsobjekte und andere IT-Systeme, die als Asset einer I4.0-Komponente interpretiert werden können. Über die *Systemintegrationsdimension* von Bild 1 kann ein Agent als eigenständige Anwendung (separat) oder als Zusatz zu einem Asset (ergänzend) implementiert werden oder die Fähigkeiten eines Assets sind vollständig in den Agenten integriert (integriert).

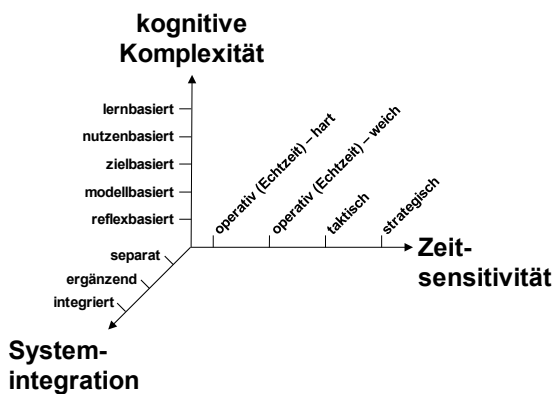


Bild 1. Klassifizierung der Agenten in Anlehnung an [3]

domains from the field level to the manufacturing execution system (MES) and enterprise resource planning (ERP) levels from ISA 95 (IEC 62264). In this case, an agent can be used on different levels within the dimensions to fulfil various tasks, and these tasks may be assigned to different ISA 95 levels, as shown in Figure 1. Time-critical controllers or sensors do not require complex decision-making mechanisms but must build on rule-based algorithms due to technical or organizational limitations. MES (diagnosis, order tracking, production control, order scheduling) or ERP systems (master planning, transport planning, supplier management) can, on the other hand, use much more complex procedures [3]. In addition to goal-oriented process control, a decision-making process in learning agents can be realized by artificial intelligence methods [4]. The time sensitivity of an application can be specified as strategic, tactical, and operational (real-time). According to [5] real-time applications can be divided into:

- hard (response time below a threshold, error results from exceeding this threshold)
- weak (response time below statistical criterion, error results from exceeding tolerance range)

A “system” in the I4.0 context contains physical components, information objects, and other IT systems, which can be interpreted as assets of an I4.0 component. Through the *system integration dimension* of Figure 1, an agent can be implemented as a stand-alone application (separate), an add-on to an asset (additional), or an asset’s capabilities are fully integrated into the agent (integrated).

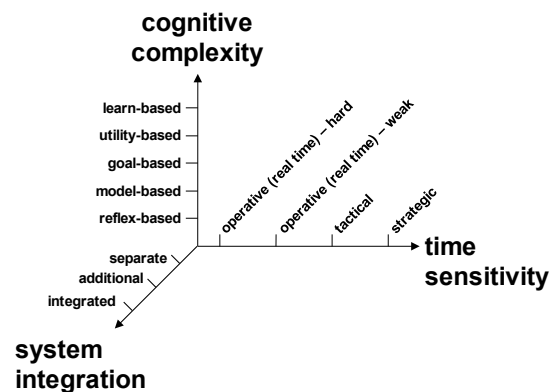


Figure 1. Classification of agents adapted from [3]

Im Rahmen von I4.0 oder CPPS erleben sie derzeit eine Renaissance. Bewährte Muster für Multiagentensysteme (MAS), die für I4.0 oder CPPS verwendet werden, sind daher von höchstem Interesse.

Der Fachausschuss „Multiagentensysteme“ der VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik e.V. konzentriert sich traditionell auf die Steuerung der Feldebene im Produktionsbereich, um betriebssichere, zuverlässige und echtzeitfähige MAS zu liefern. Folgerichtig erhebt dieser Standard nicht den Anspruch, Muster für alle Zwecke und Anforderungen von CPPS- oder I4.0-Systemen zu liefern, sondern verweist auf andere Arbeitsgruppen, wie *IEEE TC IES* und die *WG on Agents des IFAC TC 3.1*.

Im Software-Engineering ist das Verwenden von Entwurfsmustern eine traditionelle Praxis, die genutzt werden, um identifizierte Probleme mit erprobten Lösungsansätzen zu beheben [6]. Angesichts dieser Softwarepraxis wurde die Musterklassifikation für dezentralisierte Automatisierungssysteme um Aspekte der Schlussfolgerungsmechanismen, des Lernens usw. erweitert. Zur Evaluierung der Kriterien wurden mehr als zwanzig existierende MAS aus verschiedenen Anwendungsbereichen analysiert und in die Klassifikation übertragen, um aus den Anwendungsbeispielen wiederkehrende Muster für MAS zu identifizieren. Als problematisch erweisen sich die Unterschiede in der Terminologie, die im nächsten Schritt angepasst werden müssen und die insbesondere für die Muster der einzelnen Akteursebenen gelten.

MAS für harte Echtzeit auf höherer Ebene der Informationspyramide sowie das Internet der Dinge sind hierbei nicht so sehr im Fokus.

Im Folgenden wird der Begriff MAS beschränkt auf das oben eingeführte Verständnis verwendet.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie enthält ausgewählte Architekturen für Multi-Agenten-Systeme (MAS) und ausgewählte Muster für die Steuerung auf Feldebene in automatisierten Produktionssystemen und Energiesystemen, um CPPS- oder Industrie-4.0-Eigenschaften zu ermöglichen. Erste Klassifizierungskriterien von MAS-Architekturen und Agentenmustern auf der Grundlage implementierter und konzeptioneller MAS in Industrie und Forschung werden vorgestellt. Sie können als Blaupausen für den Entwurf und die Realisierung von MAS-Anwendungen verwendet werden.

Within the context of I4.0 or CPPS, they are currently experiencing a renaissance. Proven patterns for multi-agent systems (MAS) that are used for I4.0 or CPPS are therefore of the highest interest.

The technical committee “Multi-agent systems” of the VDI/VDE Society of Measurement and Automatic Control traditionally focusses on field level control in the production domain providing dependable, reliable, and real time MAS. Consequently, this standard does not claim to provide patterns for all purposes and requirements of CPPS or I4.0 systems but refers to other working groups like *IEEE TC IES* and the *WG on Agents of IFAC TC 3.1*.

In software engineering the use of design patterns is a traditional practice, which are used to solve identified problems with proven solutions [6]. Given this software practice, the pattern classification for decentralized automation systems, was extended by aspects of reasoning mechanisms, learning, etc. For the evaluation of the criteria, more than twenty existing MAS from different application areas were analysed and transferred into the classification to identify recurring patterns for MAS from the application examples. The differences in the terminology prove to be problematic. Therefore, they have to be adapted in the next step and must be applied in particular to the patterns of the individual agent levels.

MAS for hard real time at higher levels of the information pyramid and the Internet of things are not being focused here so much.

In the following, the term MAS will be used limited to the understanding introduced above.

1 Scope

This standard provides selected architectures for multi-agent systems (MAS) and selected patterns for field level control in automated production systems and energy systems to enable CPPS or Industry 4.0 characteristics. First classification criteria of MAS architectures and agent patterns based on implemented and conceptual MAS in industry and research are introduced. They might be used as blueprints for the design and realization of MAS applications.