

## 2 Künstliche Intelligenz und Optimierung

Naturanaloge Metaheuristiken oder Algorithmen als Optimierungsmethoden gehören zu einem Teil in den Bereich der Künstlichen Intelligenz zum anderen auch in den Bereich des *Operation Research* und der *Biomimicry/Schwarmintelligenz* (siehe Abbildung 2.1). Naturanaloge Algorithmen basieren u.a. auf der Verhaltensabbildung von Tieren (Tierschwärmen) und versuchen die Technik der Natur zu nutzen, um Probleme zu lösen. Des Weiteren ist der Bereich des *Operation Research* da, um Optimierungsmethoden bei Problemen in komplexen Szenarien (z.B. der Logistik) zu entwickeln und effizienter zu gestalten. Aber auch in der Verteilten Künstlichen Intelligenz und dem Teilbereich der Agenten finden sich naturanaloge Algorithmen wieder, welche genutzt werden, um Entscheidungen für rationales Verhalten zu finden. Um diese Einordnung zu erläutern ist eine Definition von den genannten Begriffen notwendig.

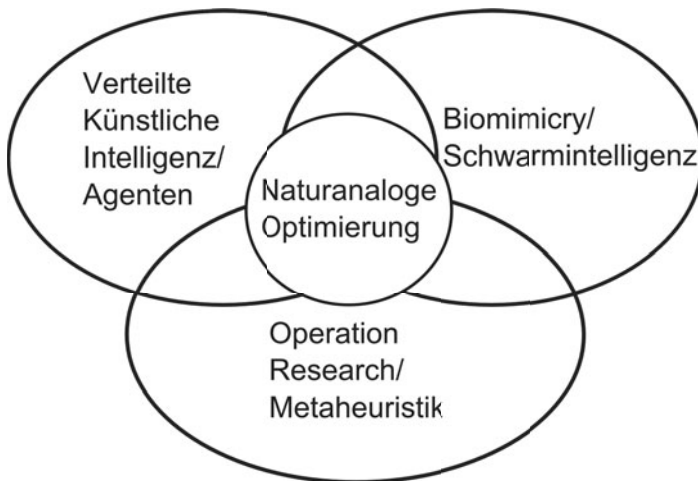


Abbildung 2.1: Einordnung der naturanalogen Optimierung in wissenschaftliche Bereiche.

## 2.1 Künstliche Intelligenz

Eine genaue Definition von Künstlicher Intelligenz zu finden stellt sich als schwierig dar, da dazu eine genaue Definition von Intelligenz voran gestellt sein muss. 1923 hat der Psychologe E.G. Boring folgende Definition von Intelligenz beschrieben, welche in [DPJ10] aufgegriffen wurde: „*Intelligence is what the tests test*“ und beschreibt damit die Grundsätze des heutigen IQ-Tests. Diese Definition ist aber zu einfach, da Intelligenz nicht nur das Lösen von Aufgaben beinhaltet. Das Lösen von Aufgaben basiert zum größten Teil auf Wissen, welches erlernt werden kann und somit den Test verfälscht. Selbst Kombinatorik kann trainiert werden und somit wird eine Person bei einem zweiten Test besser abschneiden. Je nach Zeitpunkt des IQ-Tests kann dieser bei derselben Person anders ausfallen; aber ist die Person dann intelligenter? Eine breitere Definition von Intelligenz wurde von 52 prominenten Intelligenzforschern [Got97] definiert und bildet den Ausgang für die Definition der Künstlichen Intelligenz in dieser Arbeit:

„Intelligence is a very general capability that, among other things, involves the ability to reason, plan, solve problems, think abstractly, comprehend complex ideas, learn quickly and learn from experience. It is not merely book learning, a narrow academic skill, or test taking smarts. Rather, it reflects a broader and deeper capability for comprehending our surroundings—*catching on, making sense* of things, or *figuring out* what to do. Intelligence, so defined, can be measured, and intelligence tests measure it well.“

Diese Definition beschreibt die Fähigkeiten von Personen etwas zu lernen oder Probleme zu lösen. Die Intelligenz von Lebewesen ist aber nicht die Art der Problemlösung, sondern vielmehr die Fähigkeit eine „Art der Problemlösung“ zu finden. Die Definition der Künstlichen Intelligenz ist neben der biologischen und Informations-technischen Seite auch eine philosophische Frage. Ist der Mensch in der Lage eine Intelligenz zu erschaffen, die anders ist als die eigene? Ist es möglich, eine andere Form von Leben zu erschaffen und ist eine Künstliche Intelligenz überhaupt eine Lebensform und welche Rechte gelten bei ihr. Wenn ich ein Programm mit einer Künstlicher Intelligenz beende, töte ich damit eine Lebensform? Diese Fragen werden immer noch diskutiert und es gibt noch keine einstimmige Lösung, jedoch sind es wichtige Fragestellungen, die weiterhin verfolgt werden müssen.

Die Forschung an der Künstlichen Intelligenz startete 1956 und teilt sich in vier Kategorien von Definitionen auf [RN03]. Künstliche Intelligenz ist:

1. Ein System, das wie ein Mensch denkt.
2. Ein System, das wie ein Mensch agiert.
3. Ein System, das rational denkt.
4. Ein System, das rational handelt.

Jeder dieser Punkte beschreibt eine bestimmte Definition von Künstlicher Intelligenz, allerdings müssen, um eine genaue Definition zu entwickeln, wohl alle Punkte zusammengefasst und vereint werden. Menschliches Handeln und Denken basiert zum Teil ebenfalls auf rationalen Entscheidungen, somit ist die Künstliche Intelligenz ein Befolgen von Regeln und logischen Schlüssen kombiniert mit der Wahrscheinlichkeit, die den „menschlichen“ Faktor involviert und somit indeterministisch macht. Wobei dabei diskutiert werden könnte, ob sich Kognition und Rationalität in der Entscheidungsfindung nicht gegenseitig blockieren oder ob sie ein notwendiges Mittel sind [Rou05].

Die entscheidenden Eigenschaften zur Beschreibung einer Künstlichen Intelligenz sind:

- Rationales Handeln
- Logisches Schlussfolgern
- Kognitives Verhalten
- Emergenz
- Entscheidungsfähigkeit.

Nach der Kombination dieser Eigenschaften mit der oben aufgeführten Definition von Intelligenz kann ein Programm als Künstliche Intelligenz bezeichnet werden, wenn es in der Lage ist eigenständig Schlüsse zu ziehen oder Entscheidungen zu treffen, die ein rationales Verhalten zur Folge haben, welches vorher nicht definiert worden ist.

## Agenten

Eine Überleitung von der biologischen Intelligenz zu dem Teilbereich der Agenten bot 1986 Marvin Minsky, indem er komplexe Vorgänge im Gehirn als sogenannte Agenten bezeichnete. Damals warf er folgende Fragen zu diesen Agenten

auf: Wie arbeiten diese Agenten und woraus sind sie gemacht? Wie kommunizieren sie miteinander, woher kommen sie und sind sie alle gleich? Wie können ihre Eigenschaften verbessert werden und wie ist ihr Charakter? Sind sie uns unterstellt oder haben sie ein Selbstempfinden? Verstehen sie alles was sie tun und empfinden etwas dabei? Versuchen sie zusammen zu arbeiten und haben sie einen Überlebenswillen? Diese Fragen sind eher philosophischer Natur und haben wenig mit dem Bereich der Agentenforschung innerhalb der Künstlichen Intelligenz zu tun, sondern stellen nur die Begrifflichkeit der Agenten in direkten Zusammenhang mit der Intelligenz. In dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) haben 1990 Allen Newell und John Laird die erste komplette Beschreibung eines Agenten geliefert. Dieses Softwarekonstrukt besaß Fähigkeiten, die bis zum jetzigen Zeitpunkt maßgeblich die Forschung der KI beeinflusst und die Wissenschaft der Agenten und Multi-Agentensysteme geprägt hat. Agenten sind eng verzweigt mit der Künstlichen Intelligenz, da sie die Grundeigenschaften (u.a. rationales Handeln und Entscheidungsfähigkeit) der Definition für Künstliche Intelligenz anhand ihrer selbstorganisatorischen Fähigkeiten theoretisch besitzen und somit ein Bindeglied zwischen der Informatik und der Psychologie/Philosophie im Bereich der Intelligenzforschung bilden können.

Die Bedeutung von autonomen und selbstorganisierenden Systemen und Agenten hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Die Entwicklung dieser Systeme wird u.a. aus zwei unterschiedlichen Richtungen vorangetrieben: Auf der einen Seite werden in der Künstlichen Intelligenz Systeme untersucht, die über eigene Schlussfolgerungsmechanismen verfügen und durch eine Trennung von Programmcode und Wissensrepräsentation auf identische Eingaben mit unterschiedlichen Aktionen reagieren können. Dieses bezieht sich jedoch nur auf die Betrachtung des externen Zustands und der Eingabesequenz. Bei Einbeziehung des internen Zustands würde das entsprechende Verhalten wieder deterministisch erscheinen. Auf der anderen Seite werden biologische Systeme untersucht, auf deren Basis neue technische Systeme entwickelt werden sollen. Zu diesen Systemen gehören Neuronale Netze und Schwärme. Hier ist das Besondere, dass komplexes Verhalten durch das Zusammenspiel einfacher Verhaltensweisen entsteht. Softwareagenten (weiterhin auch nur als Agenten bezeichnet) werden von Wooldridge als gekapseltes Computersystem definiert, das in einer Umgebung eingegliedert wird und die Fähigkeit besitzt flexible autonome Aktionen auszuführen, die es erlauben, ein definiertes Ziel zu erreichen [Woo09]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein Agent folgende Eigenschaften besitzt:

- *autonom:*  
Es wird kein Eingriff in den Handlungsablauf von außerhalb benötigt, um den Agenten korrekt zu steuern.
- *proaktiv:*  
Der Agent entscheidet selbständig, welche Aktionen er ausführt ohne dabei einen externen Stimulus zu benötigen.
- *reaktiv:*  
Verändert sich die Umwelt, kann der Agent darauf reagieren.
- *robust:*  
Bei äußeren Störeinflüssen ist der Agent trotzdem in der Lage seine Aufgabe auszuführen.
- *adaptiv:*  
Der Agent kann seine eigenen Einstellungen/Ziele anpassen und dadurch weiterhin effizient in der veränderten Umgebung arbeiten, wenn sich sein Umfeld von dem erwarteten Zustand differenziert.
- *kognitiv:*  
Anhand von Beobachtungen und erfolgreichen Aktionen lernt der Agent und verbessert seine Fähigkeiten. Diese beziehen sich jedoch nur auf die Ausführung einer Aktion in identischer Umgebung und lässt die gewählte Aktion effizienter werden.
- *sozial:*  
Der Austausch von Informationen zwischen Agenten wird im Englischen als *social factor* bezeichnet. Dies kann auch mit dem Austausch von Absichten oder von Fähigkeiten gleichgesetzt werden.

Die Kombination dieser Eigenschaften ist ein Softwaresystem, ein kompletter Agent, der nach der vorangegangenen Definition für Künstliche Intelligenz mit Vorbehalt als intelligent bezeichnet werden kann. Verallgemeinert durch Russel und Norvig [RN03] wird ein Agent als ein Softwaresystem dargestellt, das die Umwelt, in der es agiert, sensorisch wahrnimmt und diese auch durch Aktionen verändern kann (siehe Abbildung 2.2). Als Umwelt wird die Umgebung bezeichnet, in welcher das Agentenprogramm ausgeführt wird. Dies ist entweder eine simulierte Umgebung innerhalb eines anderen Programms oder aber auch die echte Umwelt, wie der Mensch sie wahrnimmt. Im letzteren Fall werden Agenten auch mit einem Roboter verglichen. Ein Roboter entspricht vom Aufbau her dem eines

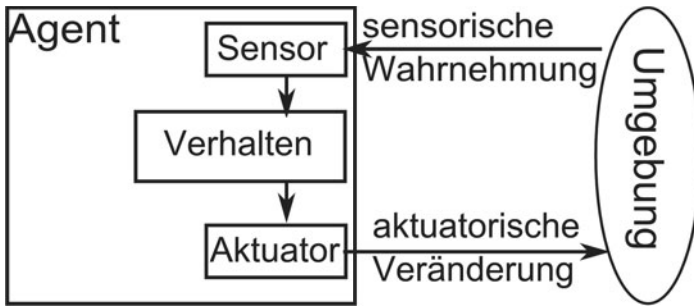


Abbildung 2.2: Einfache Agenten-Struktur mit sensorischen und aktuatorischen Möglichkeiten.

Softwareagenten mit der Erweiterung, das er einen physischen Körper besitzt und somit nicht als reiner Softwareagent fungieren<sup>1</sup> kann. Die Umgebung wird dann durch reale Sensoren wahrgenommen. Für die interne Repräsentation des Agenten macht dies allerdings keine Unterschiede<sup>2</sup>. Eine mögliche Umsetzung eines autonomen Agenten, welcher in der Lage ist, Probleme zu lösen und dabei keine weiteren Hilfestellungen bei der Lösung des Problems benötigt, ist durch eine *Belief-Desire-Intention*-Struktur (BDI) umgesetzt. Unter BDI wird ein Zyklus beschrieben, den das Agentenprogramm immer wieder durchläuft und mit dessen Hilfe der Agent seine nächsten Schritte berechnet. Es ist den menschlichen mentalen Verhalten nachempfunden [Bra87] und wurde von Rao und Georgeff dann an die Informatik angepasst [RG95]. Wooldrige [Woo09] beschreibt den groben Agentenzyklus als *perceive-next-do*-Zyklus, in dem die BDI-Struktur innerhalb des *next*-Schrittes eingegliedert ist. Dieser Agentenzyklus wurde von Scholz et. al intensiver ausgearbeitet [STH06] und kann wie folgt beschrieben werden. Unter *perceive* wird die sensorische Wahrnehmung der Umgebung verstanden, während der *do*-Schritt die Ausführung und die Interaktion mit der Umwelt durch die Aktuatoren ist. *Next* beschreibt dabei den Übergang von der Wahrnehmung hin zur Ausführung des nächsten Schrittes und ist damit die „Künstliche Intelligenz“ innerhalb des Agenten. Der Agent verarbeitet dabei die Wahrnehmung und die Umgebung und versucht, abhängig von der Intention und seines aktuellen Ziels, die rational beste Aktion für den nächsten Schritt zu berechnen.

<sup>1</sup>Technisch ist dies aber möglich.

<sup>2</sup>Es muss allerdings beachtet werden, dass die reale Umwelt viel komplexer wahrzunehmen und nicht endlich und gekapselt ist, wie es in simulierten endlichen oder abstrahierten Umgebungen der Fall ist.

Rao und Georgeff [RG95] beschreiben erstmals BDI dadurch, dass jeder Agent einen gewissen Aufgabenbereich, wofür er programmiert und eingesetzt wird, besitzt. In diesem Bereich verfolgt er ein Ziel, welches er anhand seiner Fähigkeiten möglichst effizient erreicht. Die BDI-Struktur hilft dabei dieses Ziel zu erreichen, indem sie dem Agenten die Fähigkeit verleiht, den Weg systematisch zu durchdenken. Dabei wird BDI wie folgt definiert:

- *Belief* (internes Weltbild):  
In diesem Bereich wird die Wahrnehmung verarbeitet und als Wissen über die Umwelt gespeichert. Auch der interne Zustand des Agenten wird in einer Wissensbasis abgelegt und somit zur weiteren Verwendung aufbereitet.
- *Desire* (Ziele):  
Jeder Agent verfolgt ein übergeordnetes großes Ziel, welches in eine Reihe von Teilzielen zerlegt werden kann. Alle Ziele werden in diesem Bereich abgelegt und der Agent kann, basierend auf der Wahrnehmung, entscheiden, welches Ziel in den nächsten Schritten verfolgt wird.
- *Intention* (Absicht):  
Die Absicht ist der konkrete Übergang vom aktuellen Zustand zum Ziel. Hier hat der Agent mögliche Aktionsfolgen oder Pläne<sup>3</sup> vorberechnet/ vorliegen, die bestimmte Aktionen enthalten mit denen er die Umwelt soweit verändern kann, dass aus dem aktuellen Weltzustand, das aktuell verfolgte Ziel erreicht wird. Aus diesen Aktionsfolgen wird dann die Aktion ausgewählt und ausgeführt, welche dem Agenten den effizientesten Schritt zum Ziel näher bringt.

Agenten treten häufig (z.B. in simulierten Auktionshäusern wie eBay) nicht alleine auf. Agieren mehrere Agenten innerhalb eines Systems zusammen und agieren sie erweiternd noch untereinander, wird von einem *Multi-Agentensystem* gesprochen. Dieses wird in den Forschungsbereich Verteilte Künstliche Intelligenz (VKI) eingegliedert, da ein Agent als „intelligent“ bezeichnet wird, wobei dies im Bezug zur voran beschriebenen Diskussion über Künstliche Intelligenz weiterhin kritisch betrachtet werden sollte.

---

<sup>3</sup> Als Plan wird eine Folge von Aktionen verstanden, wobei jede Aktion einen aktuellen Zustand der Welt in einen nächsten Zustand überführt. Dabei wird die Aktion häufig durch eine Interaktion mit der Umwelt vom Agenten ausgeführt.

## 2.2 Verteilte Künstliche Intelligenz

Die Verteilte Künstliche Intelligenz (VKI) beschreibt einen Wissensbereich der Informatik, in dem versucht wird, komplexe Mechanismen zu entwickeln, welche verteilte Systeme kooperativ und konkurrierend zusammenarbeiten lässt. Dabei kann jedes System intelligent sein (Agent), die Intelligenz kann aber auch erst durch Zusammenarbeit der einzelnen Systeme entstehen. Ersteres wird durch ein Multi-Agentensystem umgesetzt, in dem mehrere Agenten zusammen an der Lösung eines Problems arbeiten. Durch ihre soziale Eigenschaft sind Agentensysteme in der Lage untereinander zu kommunizieren und sich zu unterstützen aber auch zu konkurrieren. Dabei kann z.B. gemeinsam ein Problem gelöst werden, indem zwei Agenten ihre Fähigkeiten in ergänzender Weise nutzen (z.B. löst ein Multiplikationsagent die Formel mit der Multiplikation, während ein Additionsagent die Addition in einer Additionsaufgabe auflöst) oder um eine Ware in konkurrierender Weise verhandelt werden. Zusammenfassend spiegelt ein Multi-Agentensystem ein selbstorganisierendes System wider, welches tendenzielle emergente Eigenschaften besitzt.

Entsteht das intelligente Verhalten erst durch die Zusammenarbeit der Systeme, kann von kollektiver Intelligenz gesprochen werden. Diese wird in dem Bereich der Schwarmintelligenz aufgefangen, welche als Vorbild die naturanalogen Algorithmen besitzt. Die Schwarmintelligenz zeichnet sich durch ihr emergentes Verhalten aus, allerdings ist auch die Selbstorganisation innerhalb des Schwarms nicht geringfügig, da ein Schwarm aus mehr als einer Einheit besteht.

### 2.2.1 Selbstorganisation und Emergenz

Als selbstorganisierende Systeme werden häufig Systeme bezeichnet, die aus vielen Einheiten mit zumeist einfachem Verhalten bestehen und dennoch auf kollektiver Ebene komplexe Problemlösungen realisieren. Giovanna di Marzo Serugendo et al. definieren zwei Arten von selbstorganisierenden Systemen [DMSGK05]:

1. Starke selbstorganisierende Systeme
2. Schwache selbstorganisierende Systeme.

Erstere sind Systeme, die keine explizite zentrale interne oder externe Kontrolle besitzen und letztere beschreiben Systeme, die mit Hilfe einer zentralen Instanz sich reorganisieren können. Als ein Beispiel aus der Schwarmintelligenz seien hier die Termiten genannt, die selbstorganisiert arbeiten, jedoch durch die Königin, die



einen groben Plan erstellt, reorganisiert werden können.

Die beiden wesentlichen Eigenschaften, die sowohl den intelligenten Agenten, der Schwarmintelligenz und den selbstorganisierenden Systemen zugeschrieben werden, sind Autonomie und Emergenz. Hierbei bezeichnet Autonomie „Entscheidungsfreiheit“ auf lokaler und Emergenz das resultierende Verhalten auf globaler Ebene. Agenten und selbstorganisierende Systeme werden insbesondere in solchen Anwendungen eingesetzt, in denen die Komplexität der Aufgabe und die Dynamik der Umgebung einer vorprogrammierten Verhaltensweise nicht adäquat sind. Die Form der Entscheidungsfindung unterscheidet sich dabei signifikant zwischen „konventionellen“ selbstorganisierenden Systemen und Agenten. Selbstorganisierende Systeme erreichen ihr autonomes Verhalten durch die Verfolgung einfacher Verhaltensweisen wie Instinkte, Reaktion die bei Reizen ausgeführt werden o.ä. Bei Agenten hingegen wird vorausgesetzt, dass diese über Ziele verfügen (vgl. [KJ99]).

Die Autonomie und die Intelligenz wird im Bereich der VKI breit diskutiert. In Anlehnung an die o.a. Definition von Michael Wooldridge [Woo09], können intelligente Software-Systeme durch drei Eigenschaften definiert werden: Pro-Aktivität, Interaktion und Emergenz [Tim06]. Dabei ist zu beachten, dass simple Reflexbasierte Agenten oder die Schwarmintelligenz dabei nicht zwingend alle diese drei Eigenschaften besitzen müssen, dennoch aber als intelligent bezeichnet werden.

Pro-Aktivität ist wie o.a. die Fähigkeit eines Akteurs bzw. Subsystems, nicht nur auf der Basis von Eingaben reagieren zu können, sondern auch selbstständig ein Verhalten zu initiieren. Die einzelnen Subsysteme sollten in der Lage sein, sich zu koordinieren, was nach Ferber [Fer98] voraussetzt, dass es in der Interaktion von Akteuren einen gewissen „Spielraum“ gibt; dieses ist auf Systemebene die vergleichbare Eigenschaft zu der Autonomie auf Akteursebene.

Das Besondere der Schwarmintelligenz ist, dass ihr wie selbstorganisierenden Systemen oder Multi-Agentensystemen die Eigenschaft Emergenz zugesprochen werden kann. Hierunter wird verstanden, dass das System auf seiner Makro-Ebene Eigenschaften aufweist, die nicht Teile des individuellen Profils der Agenten darstellen. Einfach gesagt: Das gesamte System ist mehr als die Summe seiner Teile, d.h. durch die lokale Interaktion der Subsysteme erfolgt auf der Makro-Ebene des Systems ein Verhalten, welches im Vorfeld nicht determiniert ist, aber als vorteilhaft erscheint, was im Idealfall auch nachgewiesen werden kann. Der Begriff der positiven Emergenz wird in vielen Forschungsarbeiten von den Autoren metapho-

risch benutzt. Im Bereich der VKI werden im Wesentlichen drei Varianten von Emergenz unterschieden (vgl.[TKTG07]):

- Als *Emergent Properties* definiert z.B. Axelrod [Axe97] Emergenz als das Erscheinen von Eigenschaften, die als globale Effekte von lokal interagierenden Agenten auftreten („Emergent properties are often surprising because it can be hard to anticipate the full consequences of even simple forms of interaction“ [Axe97].
- Ferber [Fer98] fokussiert auf die Auswirkungen in der internen Organisation von Agentensystemen und definiert *Emergent Organization* als eine dynamische Organisation, die durch lokale Interaktion dynamisch realisiert wird.
- Weiterführend ist die Formulierung von Wooldridge[Woo09], die das Auftreten von intelligenten Verhalten durch Interaktion von zahlreichen einfachen Verhalten diskutiert (*Emergent Intelligence*).

Die hier angeführten Definitionen von Emergenz sind für ihre softwaretechnische Realisation auf eine effiziente, adaptive Kommunikation von lokalen, autonomen Entscheidungssystemen angewiesen. In Forschungsarbeiten werden unterschiedliche Grade der Autonomie von Softwareagenten betrachtet (vgl. u.a. [RW05][MP99][Mül96]). Castelfranchi et al. [CCC92] diskutieren insbesondere in ihren frühen Arbeiten einen sehr hohen Grad der Autonomie von Softwareagenten, durch den der Einfluss von vorgegebenen Normen, Verhaltensweisen und Prozeduren als irrelevant für die Aktionsauswahl festgelegt wird.

Nickles et al. [NRW04] nähern sich dem Begriff der Autonomie durch die Differenzierung einer externen von einer internen Sicht sowie durch die Identifikation unterschiedlicher Verhaltensperspektiven innerhalb der beiden Sichten. Eine andere Herangehensweise an die strukturierte Differenzierung von Autonomie folgt der Betrachtung der Umgebung, in der ein System eingesetzt wird bzw. werden soll. Hierbei werden unterschiedliche Ebenen der Entscheidungsfindung in Analogie zu Ansätzen in den Wirtschaftswissenschaften und der Systemtheorie mit den Begriffen Operation, Taktik und Strategie differenziert (vgl. [HBK93], [Küp95]). Werden diese Ansätze zusammengeführt, ergeben sich für die Klassifizierung von Autonomie vier Ebenen (*levels of autonomy* - LoA), die von streng regulierten über operativ autonomen, taktisch autonomen bis strategisch autonomen Systemen reichen [Tim06]. Die Zusicherung von Eigenschaften, die durch Emergenz oder Autonomie bezeichnet werden, ist eine Herausforderung in dem Software-Engineering von selbstorganisierenden Systemen oder intelligenten Agenten [TS08], da diese

Agentenbasierte Schwarmintelligenz

Bogon, T.

2013, VIII, 173 S. 54 Abb., 16 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-02291-4