

*Simulation in Produktion und Logistik 2023  
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)  
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023  
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476*

# **Systematische Zuordnung von Interaktionsmustern der Selbstorganisation zu Arten von Entscheidungsproblemen am Beispiel der Produktionsplanung und -steuerung**

## ***Systematic Assignment of Interaction Patterns of Self-organization to Types of Decision-making Problems Using the Example of Production Planning and Control***

Martin Krockert, Marvin Matthes, Torsten Munkelt  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden (Germany),  
martin.krockert@htw-dresden.de, marvin.matthes@htw-dresden.de,  
torsten.munkelt@htw-dresden.de

**Abstract:** The design of interactions in self-organizing systems remains a challenging task to this day. Nature offers numerous interaction patterns to tackle various decision problems. This paper presents a classification of decision problems, enabling the mapping of interaction patterns in self-organizing systems onto common decision problems in production planning and control. Furthermore, concrete solution proposals for applying the interaction patterns to decision problems in production planning and control are derived and discussed, and their simulated testing is exemplarily designed using an example.

## **1 Motivation zur Nutzung sich selbst organisierender Systeme in der Produktionsplanung und -steuerung**

Die weitreichende Digitalisierung und Entwicklungen des IIoT ermöglichen und erfordern dezentralisierte Entscheidungskonzepte, wie sie in der Natur in sich selbst organisierenden Systemen vorkommen. Die Übertragung von Selbstorganisation in reale Anwendungen ist bis heute eine Herausforderung und folgt keinem einheitlichen Vorgehen. Die Entwicklung eines sich selbst organisierenden Systems (SOS) erfordert eine von Grund auf andere Herangehensweise als die Entwicklung anderer Informationssysteme. Existierende Herangehensweisen zur Konzeption wurden bereits von Steghöfer (2014) evaluiert. Allgemein gilt: Aus Top-Down-Perspektive ist es schwer, geeignete lokale Regeln für das Verhalten der Elemente SOS zu formulieren, und aus Bottom-up-Perspektive ist es oft unklar, wie lokale Regeln zusammenwirken, um ein gewünschtes Verhalten hervorzubringen (Richter 2009).

Für die Ausgestaltung der Interaktionen zwischen den Elementen eines SOSs gibt es bisher kein systematisches Vorgehen. Die Bestimmung der möglichen Interaktionen erfolgt meist auf Grundlage von Einzelexperimenten. Daher klassifiziert dieser Beitrag Entscheidungsprobleme der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) (Domschke 1997) und ordnet nachfolgend jeder Problemklasse ein oder mehrere potenzielle Interaktionsmuster zu. Im Anschluss wird ein systematisches Vorgehen zur simulativen Bewertung der Interaktionsmuster vorgestellt, welches zeigt, wie gut die Interaktionsmuster das Problem lösen, dem sie zugeordnet worden sind.

## 2 Entscheidungsprobleme der Produktionsplanung und -steuerung

Viele Teilaufgaben der PPS stellen Entscheidungsprobleme dar. Sind alle erforderlichen Informationen zur Lösung der Aufgabe vorhanden, das Ziel eindeutig und der Lösungsweg bekannt, ist die Aufgabe nach Brauchlin (1990) wohlstrukturiert und somit kein Entscheidungsproblem. Für entsprechende Aufgaben muss daher keine Kategorisierung vorgenommen werden. Bei schlecht strukturierten Aufgaben liegen Entscheidungsprobleme vor, da entweder der Ausgangszustand unbekannt ist, der Zielzustand mehrere mögliche Lösungen aufweist oder der Weg zur Lösung unklar ist (Schlicksupp 1977, S. 51-66). Entscheidungsprobleme der PPS können wie folgt klassifiziert werden (Domschke 1997, S. 29-31):

**Arbeitsverteilung** findet geeignete Kombinationen von Arbeitsgängen und Ressourcentypen. Das heißt, es geht ausschließlich um die Zuordnung, nicht um die Reihenfolge der Bearbeitung und auch nicht um die Zuweisung zu den ausführenden Ressourcen. Arbeitsverteilung betrifft die Grob- und Kapazitätsplanung, sowie zum Teil die Sequenzplanung der PPS.

**Leistungsabstimmung** synchronisiert die von den Ressourcen zu erbringende Leistung zeitlich und mengenmäßig. Leistungsabstimmung betrifft primär Produktionen mit heterogenen Ressourcen, in denen Arbeitsgänge so auf den Ressourcen zu verteilen sind, dass eine möglichst gleichmäßige Produktionsgeschwindigkeit vorherrscht. Leistungsabstimmung betrifft die Kapazitätsplanung der PPS.

**Reihenfolgebestimmung** nimmt unter den vorgegebenen Zielen und Restriktionen eine zeitliche Zuordnung von Arbeitsgängen zu den ausführenden Ressourcen vor, was vornehmlich der Sequenzplanung von PPS entspricht.

**Gruppierung** fasst Ressourcen, Arbeitsgänge und Materialien zusammen. Zu den Gruppierungsproblemen der PPS zählen die Primärbedarfsprognose, die Losgrößenplanung, welche Produktionsaufträge bzw. Arbeitsgänge mit gleichem Rüstaufwand gruppiert, und die Sequenzplanung.

**Transport** gestaltet Bewegungsvorgänge räumlich und zeitlich aus, was die Festlegung von Transportwegen, -mitteln und -losen umfasst. Er betrifft hauptsächlich die Kapazitätsplanung.

**Konstruktion** bezieht sich auf gemeinsame Aspekte von Gruppen- und Raumbeziehungen. Sie umfasst sowohl die strategische Standort- und Layoutplanung als auch die operative Lagerplatzbestimmung und das Vorgehen bei der Montage. Da

bei der Grob-Kapazitätsplanung auch die räumliche Verteilung der Arbeit über Produktionsstätten hinweg eine Rolle spielt, ist sie auch ein Konstruktionsproblem.

Produktionseingriff als letzte Aufgabe betrifft nahezu alle Problemstellungen, da Entscheidungen, die hier getroffen werden, die Ressourcenbelegung, die Reihenfolgen und die Lose beeinflusst. Tabelle 1 ordnet die Aufgaben der PPS den Entscheidungsproblemen zu.

Tabelle 1: Zuordnung von Aufgaben der PPS zu Entscheidungsproblemen

Aufgaben			Probleme					
			Arbeitsverteilung	Reihenfolgeplanung	Leistungsabstimmung	Gruppierung	Transport	Konstruktion
Planung	Primärbedarfsplanung	Primärbedarfsprognose				+		
		Grob-Kapazitätsplanung	+					+
	Sekundärbedarfsplanung	Materialbedarfsplanung	wohlstrukturiert					
		Losgrößenplanung				+		
	Terminierung	Durchlaufterminierung	wohlstrukturiert					
		Kapazitätsplanung	+		+		+	
Steuerung	Auftragsfreigabe	Verfügbarkeitsprüfung	wohlstrukturiert					
		Sequenzplanung	+	+				
	Ausführung	Produktionsüberwachung	wohlstrukturiert					
		Produktionseingriff	+	+	+	+	+	

### 3 Von Interaktionsmustern über Entscheidungsprobleme zur Lösung von Aufgaben der PPS

Die Natur und ihre Individuen bilden selbst ein *System of Systems* und müssen unter Unsicherheit und den Zwängen des jeweils umgebenden Systems bestehen. Die Natur hat eine Vielzahl verschiedener Interaktionsmuster zur Koordination von Individuen hervorgebracht, um der Unsicherheit und den Zwängen durch die Umgebung zu begegnen. Diese meist einfachen Interaktionsmuster führen zum Teil zu komplexen Verhaltensmustern und letztlich zu Selbstorganisation.

**Foraging:** Von der Nahrungssuche der Ameisen abgeleitet, ist die „*Optimal Foraging Theory*“ entstanden, die sich mit Individuen beschäftigt, die auf der Suche nach Nahrung ihre Umgebung stochastisch durchsuchen. Alle Individuen hinterlassen auf Wegen zu und von der Nahrungsquelle Pheromone. Die Spuren können sich überlagern, was zur Intensivierung der Spuren führt und die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass weitere Individuen diesen Spuren folgen (Brabazon 2018, S. 55). Foraging hat effektives Interaktionsmuster zum Auffinden von Ressourcen etabliert und kann somit der Arbeitsverteilung und den Transportproblemen zugeordnet werden. Die beim Foraging hinterlassene Pheromonspur wirkt zudem als Indikator für

die Leistungsabstimmung, da sie indiziert, wie viele Insekten benötigt werden, um die Ressource abzutragen.

**Autoaggregation:** Bei der Autoaggregation werden die Individuen von in der Umgebung verfügbaren Ressourcen angezogen (Nwoko 2021). Stehen genügend Ressourcen zur Verfügung, bewegen sich die Individuen auf der Suche selbstständig. Steht nur ein begrenzter Vorrat an Ressourcen zur Verfügung, verströmen die Individuen ein Pheromon. Andere Individuen folgen dem Gradienten des Pheromons und bewegen sich somit aufeinander zu. Die Individuen bilden ein Cluster und begeben sich gemeinsam auf die Suche nach ertragreichen Ressourcen. Wurde eine ertragreiche Ressource gefunden, zerfällt das Cluster wieder. Ähnlich dem Foraging sorgt Autoaggregation dafür, dass genügend Ressourcen am richtigen Ort zur richtigen Zeit zur Verfügung stehen, und wird somit der Arbeitsverteilung zugeordnet.

**Morphogenese:** Bei der Morphogenese sondern die Individuen eine Substanz (Morphogen) ab, die sich gleichmäßig ausbreitet. Individuen können durch Wahrnehmung von Morphogenen ihren Abstand zur Quelle des Morphogens bestimmen und so feststellen, wo sie sich befinden. Dabei kann in dem Morphogen auch die vom Sender aktuell wahrgenommene Funktion kodiert werden. Die Bestimmung der Position kann entweder durch die Absonderung verschiedener Morphogene oder die Bewegung des wahrnehmenden Individuums erfolgen. Je nach Position wissen die Individuen, wo sie sich befinden. Anhand der Konzentration können die Individuen auch bestimmen, ob ausreichend Individuen für die Realisierung einer bestimmten Aufgabe zur Verfügung stehen (Carroll 2008). Morphogenese dient der Orts- und Aufgabenbestimmung im Raum und ist demzufolge der Konstruktion und Arbeitsverteilung zuzuordnen.

**Weben:** Beim Weben verbinden Individuen Punkte mit einer Schleppleine. Initial streifen die am kooperativen Netzbau beteiligten Individuen zufällig durch die Umgebung und weben eine Schleppleine zwischen zwei zufälligen Punkten. Die Individuen werden im weiteren Verlauf von vorhandenen Schleppleinen angezogen und ziehen es vor, auf einer vorhandenen Schleppleine zu laufen. Neue Schleppleinen werden zum Abkürzen des Weges zwischen dem Ausgangspunkt und dem Ziel gezogen. Dieses Vorgehen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Schleppleine dort beginnt, wo eine andere endet, und lässt ein dreidimensionales Netz entstehen (Bourjot 2001), dessen Schleppleinen immer den kürzesten Pfad zwischen zwei Punkten darstellen (Mamei 2006). Weben ist ein Interaktionsmuster zur Konstruktion von Strukturen, welche zugleich effiziente Punkt-zu-Punkt-Verbindungen schaffen, und daher auch dem Transportproblem zugehörig.

**Strukturbau:** Zur Konstruktion komplexer Strukturen erschaffen Individuen kleine Bausteine und reichern diese mit Pheromonen an (Heyde 2021). Mit diesen Bausteinen bewegen sich die Individuen zufällig im Raum, bevorzugen aber die Richtung der stärksten Pheromonkonzentration. Während sie sich durch den Raum bewegen, entscheiden sie zufällig, ob sie den Baustein an ihrer aktuellen Position ablegen. Das abgesonderte Pheromon hat nur eine geringe Reichweite und kann daher nur ein lokales Signal abgeben. Das Vorgehen führt zunächst zu verstreutem Platzieren einzelner Bausteine. Die Bausteine ziehen aber weitere Individuen an. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass an ihrer Stelle weitere Bausteine platziert werden. Die Bausteine werden beim Ablegen immer in der Mitte des Stapels platziert. Durch die Überlagerung der Pheromone sind sie an dieser Position am stärksten, und die

Stapel wachsen eher vertikal als horizontal und bilden säulenartige Strukturen. Strukturbau wird der Konstruktion von Strukturen und dem Transportproblem zugeordnet.

**Strömungsverhalten:** Im Englischen als Flocking bezeichnet, beschreibt es, wie ein Schwarm bzw. eine Herde durch Zentrierung, Kollisionsvermeidung und Geschwindigkeitsanpassung entsteht (Reynolds 1987). Flocking kommt zustande, wenn die Individuen versuchen, so nahe wie möglich beieinanderzubleiben (Zentrierung). Durch Kollisionsvermeidung entfernt sich ein Individuum, bevor es zum Zusammenstoß kommt. Dafür wird die eigene Geschwindigkeit stetig an die des Nachbarn angepasst. In Schwärmen übernehmen sogenannte Wächter die Leitfunktion. Sie reagieren sensibler als die anderen Individuen auf Umweltreize und geben die initiale Bewegungsrichtung vor, die von den anderen Individuen imitiert wird (Mamei 2006). Strömungsverhalten dient der Koordination sich bewegender Individuen, wird also dem Transport und der Leistungsabstimmung zugeordnet.

**Muster-Sortierung:** Muster-Sortierung sammelt Objekte anhand ihrer Eigenschaften und platziert gleichartige am gleichen Ort (Franks 1992, S. 120). Ähnlich dem Strukturbau bewegen sich die Individuen zufällig im Raum. Trifft ein Individuum beim Durchstreifen des Raumes auf eine Ansammlung ähnlicher Objekte, von denen eines nicht in das Schema der Ansammlung passt, nimmt das Individuum das nicht passende Objekt mit und legt es an einem Platz ab, an dem bereits viele Objekte liegen, die in das Schema des Objektes passen (Gardelli 2007). Muster-Sortierung eignet sich daher zur Lösung von Gruppierungsproblemen.

**Quorum:** Quorum (Beschlussfähigkeit) beschreibt ein Vorgehen, bei dem Individuen erkennen, wie viele ähnliche Individuen sich in ihrer Nähe befinden, und ihre Aktivität an diesen Individuen ausrichten. Dafür senden die Individuen ein Signal aus, das von anderen Individuen imitiert wird. Überschreitet das imitierte Signal eine bestimmte Stärke, wird eine neue Aktion ausgelöst (Parent 2008). Auf diese Weise werden Mehrheiten bestimmt und Aktivitäten der Individuen synchronisiert. Quorum ermöglicht auch, dass eine Menge von Individuen sich selbst sortiert, indem die Individuen sich auf die Signale zubewegen, die dem eigenen Signal ähnlich sind. Quorum ist ein Interaktionsmuster, das sich zur Synchronisation und zur Gruppenbildung eignet.

**Ausgleichsmodell:** Das Ausgleichsmodell verteilt Aufgaben anhand der Pheromonkonzentration, die ein Individuum wahrnimmt (Blonder 2011). Bei der regulären Abarbeitung ihrer Aufgaben kreuzen Individuen die Pheromonspuren anderer. Die Pheromonspuren kodieren die aktuelle Rolle der Pheromonquelle. Entspricht die wahrgenommene Verteilung der Rollen nicht der intrinsisch vorgegebenen Rollenverteilung, so wechselt das Individuum mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Rolle, die eine zu geringe Intensität aufweist. Das Ausgleichsmodell dient hauptsächlich der Aufgabenverteilung.

**Markt:** Er verteilt die Aufgaben durch einen Auktionsmechanismus. Der Wert einer Aufgabe wird durch den Wert einer gleichartigen, bereits erfüllten Aufgabe bestimmt oder durch erwartete Kosten, die durch die Bearbeitung entstehen. Der Wert der Aufgabe wird bei der Verteilung in ein Angebot gefasst, welches die Gegenseite annimmt oder mit einem Gegenangebot erwidert (Ye 2017). Der Markt ist ein soziales Interaktionsmuster und kann zu fast allem verwendet werden. Der Markt ist durch die



## 4 Konzept zur simulativen Bewertung der Interaktionsmuster

Im Folgenden wird ein Konzept für die Bewertung von Interaktionsmustern hinsichtlich ihrer Eignung vorgestellt, Probleme der PPS zu lösen. Abbildung 1 zeigt auf der linken Seite das Vorgehen zur Bewertung passender Interaktionsmuster. Auf der rechten Seite wird das Vorgehen exemplarisch auf die Losbildung angewandt.

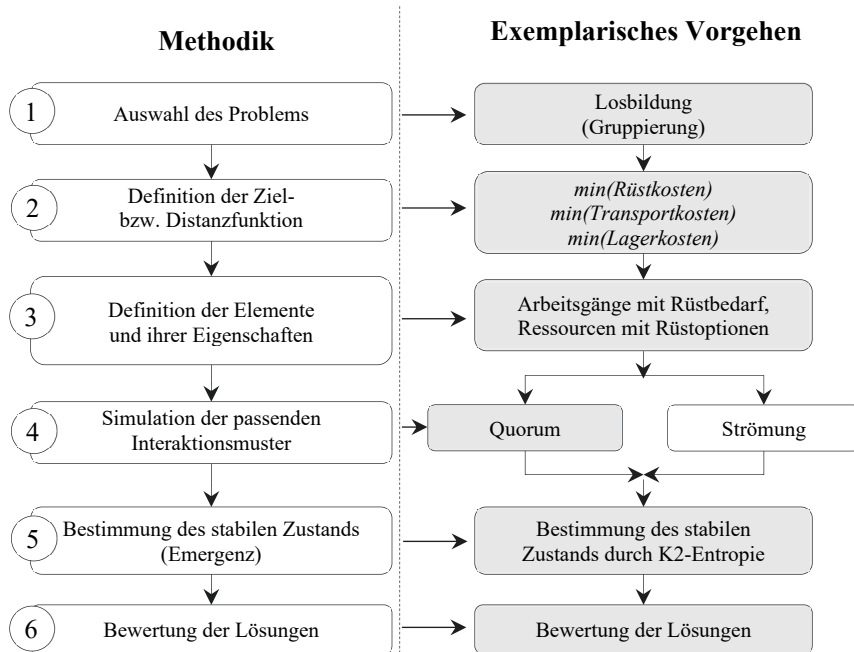


Abbildung 1: Konzept zur simulativen Bewertung geeigneter Interaktionsmuster der Selbstorganisation für dezentrale Koordination

Im ersten Schritt wird für das zu lösende PPS-Problem die passende Problemklasse gewählt (#1). Gemäß Tabelle 3 passt zur Losbildung die Problemklasse Gruppierung. Im zweiten Schritt werden die Zielfunktionen definiert, welche mini- oder maximiert werden sollen (#2). Im dritten Schritt werden die interagierenden Elemente definiert. Für die Losbildung sind das die Arbeitsgänge mit ihren jeweiligen Rüstbedarfen und die Ressourcen mit ihren entsprechenden Rüstoptionen, welche die Arbeitsgänge abarbeiten sollen (#3). Im vierten Schritt werden die passenden Interaktionsmuster simuliert. Für die Simulation wurde eine eigens für diesen Zweck entwickelte Aktorbasierte ereignisdiskrete Simulation „Akka.Hive“ (Krockert 2022) verwendet, welche Agenten bereitstellt, deren Verhalten beliebig austauschbar ist und deren Architektur dem Observer/Controller-Pattern folgt. Abbildung 2 zeigt ein abstraktes Schema der Architektur, das einen Observer und einen Controller enthält und ein darunter liegendes System zeigt, welches als „System under Observation and Control“ (SuOC) bezeichnet wird (Tomforde 2011). Der Observer überwacht alle im SuOC befindlichen Agenten des Systems, bewertet die Situation und berichtet das Ergebnis

an den Controller des Systems. Der Controller besitzt ein Regelwerk für die Parametrisierung der Agenten, dass er kontinuierlich nach den zu der Situation und seinen Zielen passenden Parametern für die Agenten durchsucht. Die passenden Parameter werden dann an wieder an die Agenten weitergeben, und steuert so das Verhalten des Systems in den durch die Parameter vorgegebenen Grenzen.

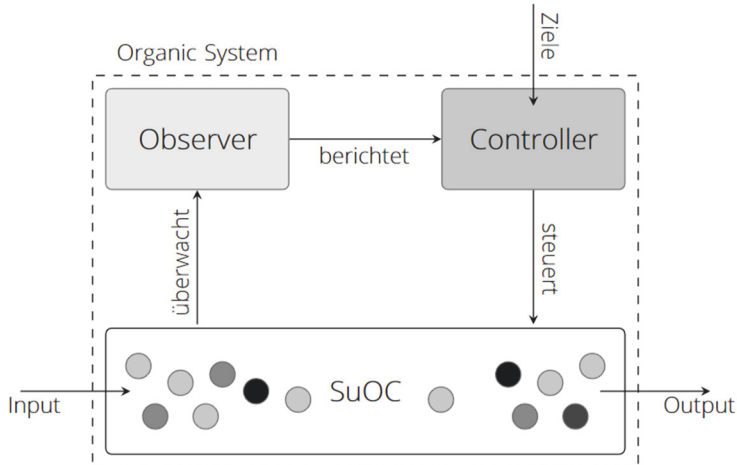


Abbildung 2: Observer/Controller Architektur (vgl. Tomforde 2011)

Jedes Asset der Produktion wird durch einen Agenten im SuOC repräsentiert und verfolgt seine eigenen Ziele. Beispielsweise minimieren Produktionsagenten, welche die Produktionsaufträge repräsentieren, die Durchlaufzeit, Lageragenten minimieren die Lagerkosten, und Maschinenagenten maximieren ihre Auslastung. Im Falle der Anwendung des Interaktionsmusters Quorums und seiner Verhaltensimplementierung für die einzelnen Agenten für Losbildung geschieht das wie folgt: Die Produktionsagenten signalisieren ihren Rüstbedarf für den nächsten anstehenden Arbeitsgang. Produktionsagenten, die den gleichen Rüstbedarf signalisiert haben, bilden eine Gruppe, wenn die Häufigkeit des Rüstsignals einen Schwellwert überschreitet, welcher ein Teil der Parametrisierung ist, die durch den Controller gesteuert wird. Diese Gruppe mit gleichem Rüstbedarf wird dann von einer Ressource bearbeitet, und es fällt nur einmal Rüstaufwand für diese Bearbeitung an.

Bis sich in einem sich selbst organisierenden Systemen effiziente Verhaltensweisen herausbilden, unterliegt es größeren Schwankungen. Ob bzw. wann sich ein System eingeschungen hat, kann mittels der Shannon- oder Kolmogorov-Entropie ( $K_2$ ) bestimmt werden (#5). Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Losgrößen über der Zeit (links) und die Entwicklung der Losgrößen mittels „Time-Embedding“ (rechts). Es ist gut zu erkennen, wie sich die Losgröße in einem bestimmen Bereich stabilisiert. Die Analyse stammt aus einer Studie zur Eignung von Selbstorganisation zur PPS und umfasst eine Produktion mit 16 Maschinen und 100 Produkten, welche drei Wochen 24/7 simuliert worden ist (Krockert 2021). Im letzten Schritt werden die Interaktionsmuster bezüglich ihres Grades der Zielerreichung miteinander verglichen (#6).



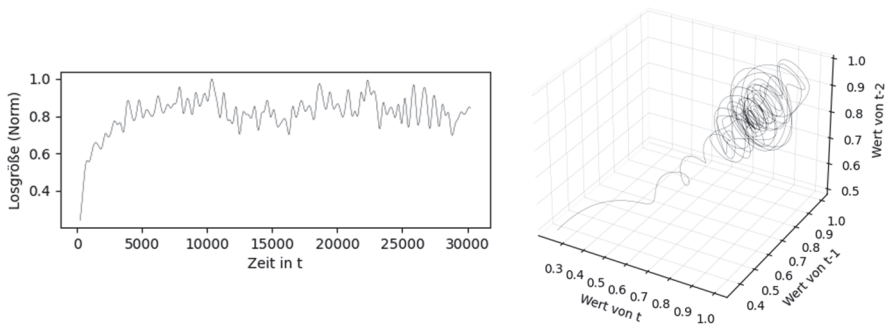


Abbildung 3: Normalisierte Entwicklung der Losgrößen über der Zeit 2D (links) und mittels Time-Delay-Embedding (rechts) nach Taken's Theorem (Takens 1981)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt die Abbildung gängiger Entscheidungsprobleme der PPS auf Interaktionsmuster zur dezentralen Koordination sich selbst organisierender Systeme. Die Kategorisierung der Probleme in Problemklassen und deren Abbildung auf die Interaktionsmuster zeigt, welche Interaktionsmuster der Selbstorganisation zur Lösung welcher PPS-Probleme beitragen. Es wird ein Konzept zur simulativen Bewertung der Interaktionsmuster vorgestellt und exemplarisch auf das Problem der Losbildung angewandt. Zukünftige Schritte umfassen die Ableitung von einfachen Regelwerken für jedes Interaktionsmuster und deren Implementierung. Des Weiteren ist die Schaffung einer einheitlichen Schnittstelle zur Verwendung der Interaktionsmuster notwendig. Darauf aufbauend, kann die Automatisierung des in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehens zur Bewertung erfolgen und so ein Framework zur automatischen Suche und Bewertung geeigneter Interaktionsmuster entstehen. Akka.Hive bietet zudem die Möglichkeit, die Simulationsumgebung durch reale Produktions-Assets zu ersetzen und die simulierten und bereits stabilen Verhaltensweisen auf reale Produktionen anzuwenden.

## Danksagung

Dieser Beitrag wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Finanziert von der europäischen Union.

## Literatur

- Blonder, B.; Dornhaus, A.: Time-ordered networks reveal limitations to information flow in ant colonies. In: PloS ONE 9(6) 2011.
- Brabazon, A.; McGarraghy, S.: Foraging-Inspired Optimisation Algorithms. Springer International Publishing 2018.
- Brauchlin, E.: Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik. Eine Einführung. 3. Aufl. Bern 1990
- Carroll, S. B.: Evo-devo and an expanding evolutionary synthesis: a genetic theory of morphological evolution. In: Cell 134 (2008), S. 25–36.

- Bourjot, C.; Chevrier, V.: Multi-agent simulation in biology: application to social spiders case. In: Agent Based Simulation. Passau, Germany 2001, S. 18–23.
- Ye, D.; Zhang, M.; Vasilakos, A. V.: A Survey of Self-Organization Mechanisms in Multiagent Systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems 47 (2017), S. 441–461.
- Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Production planning: aspects of industrial engineering (Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte). 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer 1997.
- Franks, N. R.; Sendova-Franks, A. B.: Brood sorting by ants: distributing the workload over the work-surface. In: Behav Ecol Sociobiol 30 (1992).
- Gardelli, L.; Viroli, M.; Omicini, A.: Design Patterns for Self-organising Systems. In: Hans-Dieter Burkhard, Gabriela Lindemann, Rineke Verbrugge und László Zsolt Varga (Hrsg.): Multi-Agent Systems and Applications V, Bd. 4696. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007, S. 123–132.
- Heyde, A.; Guo, L.; Jost, C.; Theraulaz, G.; Mahadevan, L.: Self-organized biotectonics of termite nests. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118 (2021).
- Krockert, M.: Akka.Hive und Manufacturing on Actor Technologie, [www.github.com/krockema/MATE](https://www.github.com/krockema/MATE), letzter Zugriff an 26.06.2023.
- Krockert M.; Matthes M.; Munkelt T.: Suitability of Self-Organization for Different Types of Production. In: Procedia Manufacturing 54 (2021), S. 124ff
- Mamei, M.; Menezes, R.; Tolksdorf, R.; Zambonelli, F.: Case studies for self-organization in computer science. In: Journal of Systems Architecture 52 (2006).
- Nwoko, E. Q. A.; Okeke, Iruka N.: Bacteria autoaggregation: how and why bacteria stick together. In: Biochemical Society transactions 49 (2021), S. 1147ff.
- Parent, M. E.; Snyder, C. E.; Kopp, N. D.; Velegol, D.: Localized quorum sensing in *Vibrio fischeri*. In: Colloids and surfaces. B, Biointerfaces 62 (2008), S. 180ff.
- Reynolds, C. W.: Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In: SIGGRAPH Comput. Graph. 21 (1987), S. 25–34.
- Richter, U. M.: Controlled self-organisation using learning classifier systems. Dissertation, Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB) 2009.
- Schlicksupp, H.: Kreative Ideenfindung in der Unternehmung. Methoden und Modelle. 1. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter 1977.
- Steghöfer, J.; Seebach, H.; Eberhardinger, B.; Reif, W.: PosoMAS: An Extensible, Modular SE Process for Open Self-organising Systems. In: Hoa K. D., Pitt J., Xu Y., Governatori G. und Ito T. (Hrsg.): PRIMA 2014: Principles and Practice of Multi-Agent Systems, Bd. 8861. Springer International Publishing 2014, S. 1–17.
- Takens, F.: Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand D. und Young L.-S. (Hrsg.): Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980, Bd. 898. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1981, S. 366–381.
- Tomforde, S.; Prothmann, H.; Branke, J.; Hähner, J.; Mnif, M.: Observation and Control of Organic Systems. In: Müller-Schloer C., Schmeck H. und Ungerer T. (Hrsg.): Organic Computing A Paradigm Shift for Complex Systems. Basel: Springer Basel AG (Autonomic Systems, 1) 2011, S. 325–338.