

Der Komplexitätswürfel

Ein Instrumentarium zur Charakterisierung komplexer Produktionssysteme

Felix Böse,
Thorsten Philipp und
Katja Windt, Bremen

Die Selbststeuerung logistischer Prozesse stellt einen innovativen Ansatz zum flexiblen und adaptiven Umgang mit der zunehmenden Komplexität heutiger Logistiksysteme dar. Zur Validierung dieser Aussage ist ein Evaluierungssystem notwendig, das eine Bestimmung des logistischen Zielerreichungsgrads in Abhängigkeit vom Selbststeuerungsgrad und der Komplexität eines Produktionssystems erlaubt. Im Rahmen dieses Beitrags wird dafür ein Komplexitätswürfel vorgestellt, welcher die Produktionssysteme hinsichtlich verschiedener Komplexitätskategorien durch Vektoren charakterisiert.*

Einleitung

In den letzten Jahren konnte ein stetiger Anstieg der Komplexität von Produktionssystemen beobachtet werden. Dieser beruht auf einer Reihe von Veränderungen, wie z.B. kurze Produktlebenszyklen, kleiner werdende Losgrößen mit gleichzeitig steigender Anzahl von Produktvarianten und eine zunehmende Produktkomplexität. Auf Grund dieser Entwicklung ist es notwendig, Planungs- und Steuerungsmethoden für Produktionssysteme zu entwickeln, die diesen neuen Anforderungen gerecht werden. Einen innovativen Ansatz zum flexiblen und adaptiven Umgang mit der zunehmenden Komplexität stellen dezentrale Planungs- und Steuerungsmethoden auf Basis intelligenter logistischer Objekte in selbststeuernden Produktionssystemen dar. Die Idee selbststeuernder logistischer Prozesse basiert auf dem Ansatz, Entscheidungsfunktionen von einer zentralen Instanz direkt auf logistische Objekte zu verlagern [1]. Selbststeuernde logistische Objekte werden dadurch in die Lage versetzt, auf Veränderungen in der sie umgebenden dynamischen Systemumwelt autonom und flexibel zu reagieren [2]. Die Komplexität der einzelnen

Entscheidungsfunktionen kann dabei durch die Zerlegung und Verteilung der Entscheidungsaufgabe auf die einzelnen logistischen Objekte reduziert werden.

Zur Überprüfung der These, dass bei zunehmender Komplexität heutiger Logistiksysteme die Implementierung selbststeuernder logistischer Prozesse eine bessere Zielerreichung logistischer Zielgrößen als konventionell fremdgesteuerte Logistikprozesse ermöglicht, ist ein geeignetes Evaluierungssystem erforderlich. Ein derartiges Evaluierungssystem stellt den Grad der logistischen Zielerreichung, den Grad der Selbststeuerung und die Komplexität des betrachteten Produktionssystems einander gegenüber. Dadurch können Aussagen darüber getroffen werden, in welchen Anwen-

dungsfällen der Einsatz der Selbststeuerung sinnvoll ist und wo die Grenzen der Selbststeuerung liegen (Bild 1).

Um die Grenzen der Selbststeuerung bestimmen zu können, müssen die Achsen aus Bild 1 operationalisiert werden. Der Fokus dieses Beitrags liegt dabei auf der Operationalisierung und der Charakterisierung der Komplexität in Produktionssystemen.

Zunächst werden in diesem Beitrag bestehende Ansätze zur Bestimmung der Komplexität in Systemen untersucht. Darauf aufbauend wird ein Komplexitätswürfel entwickelt, der unterschiedliche Kategorien der Komplexität in sich vereint und damit eine umfassende Charakterisierung der Komplexität von Produktionssystemen ermöglicht. Die einzelnen

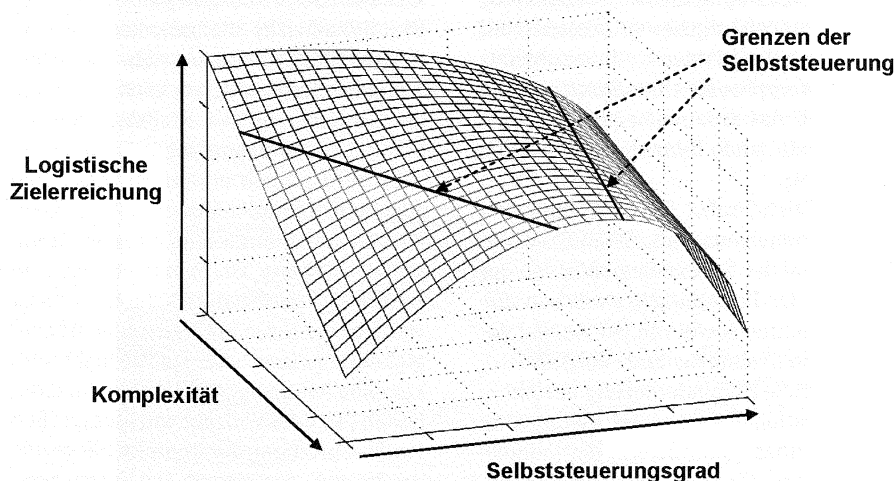


Bild 1. Anwendungspotenziale und Grenzen der Selbststeuerung

* Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

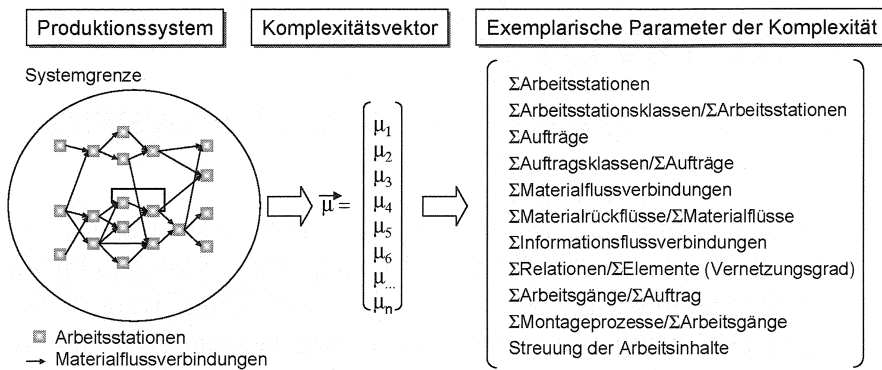


Bild 2. Exemplarischer Komplexitätsvektor für Produktionssysteme

Ausprägungen des Komplexitätswürfels lassen sich dabei in Form von Vektoren beschreiben. Zur Veranschaulichung wird abschließend die Anwendung des Komplexitätswürfels zur Bestimmung der Komplexität eines Produktionssystems am Beispiel einer Werkstattfertigung verdeutlicht.

Komplexität von Produktionssystemen

Bestehende Ansätze

Der Begriff Komplexität wird im Allgemeinen sehr weitläufig verwendet. Komplexität bedeutet jedoch mehr als das, dass Probleme oder Strukturen in ihrem Aufbau kompliziert sind. In der Regel werden Systeme als komplex empfunden, die sich nicht mehr einfach beschreiben lassen. Scherer spricht in diesem Fall von subjektiver Komplexität. Des Weiteren wird in diesem Zusammenhang zwischen strukturbedingter Komplexität, resultierend aus den Eigenschaften der Elemente und ihren Verbindungen, und dynamischer Komplexität durch ein nichtlineares, dynamisches Verhalten der Systeme unterschieden [3]. Die Komplexität eines Systems kann zudem als das Zusammenspiel von Kompliziertheit und Dynamik verstanden werden [4].

Für Ulrich/Probst [5] ist Komplexität eine Systemeigenschaft, deren Grad von der Anzahl der Systemelemente, von der Vielzahl der Beziehungen zwischen diesen Elementen sowie von der Anzahl der möglichen Systemzustände abhängt.

Eine große Herausforderung besteht in der Operationalisierung der Komplexität in Form eines quantifizierbaren Komplexitätsgrades. Einige Ansätze zur Bestimmung der Komplexität verwenden die Messung der Entropie als Grundlage

[6–8]. In thermodynamischen Systemen kann die Entropie als Grad für die Unordnung eines Systems angesehen werden. Shannon und Weaver entwickelten auf Basis der Gleichungen zur Entropiemessung in der Thermodynamik eine Gleichung zur Messung der Information [9]. Diese kann zur Komplexitätsmessung herangezogen werden, da hierdurch die notwendige Menge an Informationen bestimmt wird, welche den Zustand eines Systems zu einem konkreten Zeitpunkt beschreibt. Je komplexer ein System ist, desto mehr Elemente und Relationen sind darin enthalten und folglich sind auch mehr Informationen notwendig, um das System zu beschreiben. Diese Überlegungen übernahmen Frizelle und Woodcock und definierten Gleichungen zur Messung der Komplexität von Produktionssystemen basierend auf der Vielfalt und Unsicherheit von Informationen innerhalb des Systems [7]. Sie definieren die statische bzw. strukturelle Komplexität als erwartete Menge an Informationen, die notwendig ist, um den Zustand eines Systems zu beschreiben. Die dynamische Komplexität wird in diesem Zusammenhang als erwartete Menge an Informationen verstanden, die die Abweichung des Systems vom geplanten Zustand bezeichnet.

Es wird schnell erkennbar, dass eine adäquate Operationalisierung der Komplexität nicht durch eine einzelne Messgröße machbar ist. Vielmehr müssen mehrere Komplexitätsfaktoren erfasst werden, die zwar untereinander Abhängigkeiten zeigen, sich jedoch nicht vollkommen auf andere Faktoren reduzieren lassen [4]. Eine Vielzahl von Messgrößen zur Beschreibung der Komplexität wurde im Bereich der komplexen Netzwerke, z.B. bei der Betrachtung des Internets [10] oder biologischen Systemen [11] ent-

wickelt. In diesem Zusammenhang zeigen Costa et al., dass ein komplexes Netzwerk durch einen Komplexitätsvektor dargestellt werden kann [12]. Dieser Ansatz wird im Folgenden für die Beschreibung der Komplexität von Produktionssystemen aufgegriffen. Die Gesamtkomplexität eines Produktionssystems lässt sich folglich durch einen Komplexitätsvektor darstellen. In Bild 2 sind beispielhaft einige Messgrößen eines Komplexitätsvektors zu sehen.

Innerhalb dieses Vektors sind alle Größen messbar und folglich lässt sich ein solcher Vektor für jedes Produktionssystem aufstellen. Zunächst handelt es sich bei diesem Vektor um einen Ansatz zur Messung der unterschiedlichen Komplexitätsarten in produktionslogistischen Systemen auf einer Ordinalskala, welcher in weiteren Forschungsarbeiten genauer spezifiziert werden muss. Mit Hilfe dieser vektoriellen Herangehensweise ist es zudem möglich, zwei Systeme miteinander zu vergleichen und ein $\Delta\mu$ zu ermitteln, welches den Komplexitätsunterschied der beiden Systeme darstellt. Auf diese Art und Weise besteht die Möglichkeit, die Komplexität von Produktionssystemen zu operationalisieren und folglich die Auswirkungen geänderter Komplexitätsniveaus zu untersuchen.

Herleitung des Komplexitätswürfels

Wie im vorigen Kapitel erläutert, existiert eine große Anzahl von Ansätzen zur Beschreibung und Bestimmung der Komplexität von Systemen. Den beschriebenen Ansätzen ist gemein, dass sie lediglich Teilaspekte der Komplexität berücksichtigen, wie z.B. die Struktur eines betrachteten Systems. Für ein umfassendes Verständnis und eine ganzheitliche Bestimmung der Komplexität eines betrachteten Systems erscheinen diese Ansätze daher nicht hinreichend geeignet zu sein. Für die umfassende Beschreibung der Komplexität eines Produktionssystems ist es erforderlich, unterschiedliche Arten der Komplexität zu strukturieren, in geeigneten Kategorien abzubilden und zueinander in Beziehung zu setzen. Aus Sicht der Autoren lassen sich demzufolge die drei Komplexitätskategorien zeitliche Komplexität, organisationale Komplexität und systemische Komplexität definieren. Die Komplexitätskategorien sowie deren Beziehungen lassen sich in Form eines Komplexitätswürfels abbilden (Bild 3).

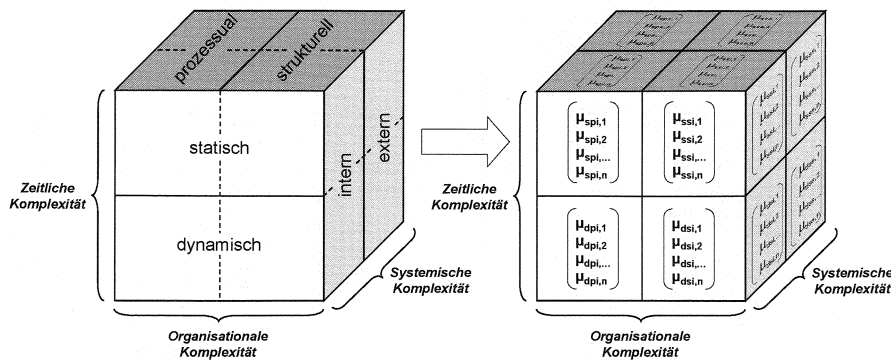


Bild 3. Komplexitätswürfel für Produktionssysteme

- **Organisationale Komplexität**
Die organisationale Komplexität gliedert sich in die prozessuale und strukturelle Komplexität. Die prozessuale Komplexität definiert die Anzahl und Verschiedenheit von Abläufen. Dagegen beschreibt die strukturelle Komplexität die Anzahl und Verschiedenheit der im System befindlichen Elemente, Relationen und Eigenschaften.
- **Zeitliche Komplexität**
Die zeitliche Komplexität umfasst die statische und die dynamische Komplexität. Die dynamische Komplexität beschreibt die Veränderungen bezüglich der Anzahl und Verschiedenheit der Prozessabläufe, der Systemelemente, ihrer Relationen und Eigenschaften im Zeitverlauf. Demgegenüber bezieht sich die statische Komplexität auf einen Systemstatus zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt oder -zeitraum.
- **Systemische Komplexität**
Die systemische Komplexität beinhaltet die interne und externe Komplexität und wird durch die Systemgrenzen bestimmt. Prozessabläufe, Systemelemente, Beziehungen und Eigenschaften, welche innerhalb der Systemgrenze auftreten, werden der internen Komplexität zugeordnet, während Prozessabläufe, Systemelemente, Beziehungen und Eigenschaften außerhalb der Systemgrenze als Systeminput Bestandteil der externen Komplexität sind.

Wie bereits erläutert, kann jede Ausprägung des Komplexitätswürfels mit Hilfe eines Komplexitätsvektors beschrieben werden. Durch Bestimmung aller Ausprägungen des Komplexitätswürfels ist eine Charakterisierung eines Produktionssystems hinsichtlich der Komplexität möglich. Als Beispiel für die Mes-

sung der Komplexität eines Produktionssystems mittels Komplexitätsvektoren wird nachfolgend ein Vektor für die strukturelle statische interne Komplexität beschrieben:

$$\vec{\mu}_{si} = \begin{pmatrix} \sum \text{Mitarbeiter} \\ \sum \text{Arbeitsstationen} \\ \sum \text{Arbeitsstationsklassen} / \sum \text{Arbeitsstationen} \\ \sum \text{Aufträge} \\ \sum \text{Auftragsklassen} / \sum \text{Aufträge} \\ \sum \text{Materialflussverbindungen} \\ \sum \text{Materialflussklassen} / \sum \text{Materialflussverbindungen} \\ \sum \text{Materialrückflüsse} / \sum \text{Materialflüsse} \\ \sum \text{Informationsflussverbindungen} \\ \sum \text{Informationsflussverbindungsklassen} / \sum \text{Informationsflussverbindungen} \end{pmatrix}$$

Alle Parameter dieses exemplarischen Komplexitätsvektors sind dem Produktionssystem zugeordnet (interne Komplexität), werden zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. -raum ermittelt (statische Komplexität) und beziehen sich auf die Anzahl bzw. Verschiedenheit der Systemelemente, der Beziehungen und Eigenschaften (strukturelle Komplexität). Der Faktor Mensch hat einen großen Einfluss auf die Bewältigung der Komplexität in der Produktionslogistik [13]. Im Rahmen des vorgestellten Ansatzes wird er als Ressourcenelement des Gesamtsystems verstanden, wobei das individuelle Verhalten keine Berücksichtigung findet.

Exemplarische Anwendung des Komplexitätswürfels

In diesem Kapitel wird die Anwendung des Komplexitätswürfels zur Bestimmung des Komplexitätsgrades in Produktionssystemen im Hinblick auf organisationale, zeitliche und systemische Komplexität erläutert. Als Anwendungsbeispiel wird dazu ein einfaches produktionslogistisches Szenario einer zweistufigen Werkstattfertigung gewählt (Bild 4).

Das zugrundeliegende ProduktionslogistikszENARIO zeigt die Fertigungs- und Montagestufen eines Produzenten sowie die Beziehungen zu den Kunden und Lieferanten. Die erste Produktionsstufe beinhaltet die Fertigung eines Bauteils auf zwei alternativen Maschinen (F_{ij}). Die für die Fertigung notwendigen Rohstoffe werden von unterschiedlichen Lieferanten geliefert und im Wareneingang (WE) bereitgestellt. In der zweiten Produktionsstufe erfolgt die Montage der Bauteile aus der ersten Produktionsstufe auf zwei alternativen Montagestationen (M_{ij}). Nach der Montage

werden die produzierten Güter im Warenausgang (WA) bereitgestellt und gemäß Kundenauftrag von Transportdienstleistern zum Kunden transportiert.

Entlang des Materialflusses des Produktionslogistikszenarios werden die einzelnen Ausprägungen des Komplexitätswürfels anhand von Beispielen erläutert. Gemäß den Definitionen für die organisationale, zeitliche und systemische Komplexität im vorigen Kapitel ist beispielsweise die Anzahl der Arbeitsstationen ein Beispiel für einen Parameter der internen statischen strukturellen Komplexität. Die Anzahl der Kundenände-

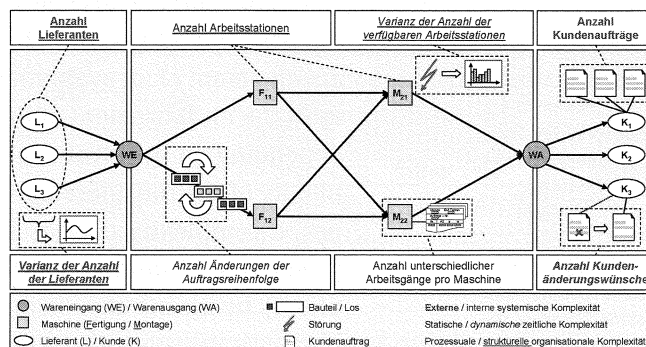


Bild 4. Produktionslogistisches Anwendungsszenario

lungswünsche hingegen ist ein typisches Beispiel für die externe dynamische prozessuale Komplexität.

Bild 5 zeigt die Einordnung der einzelnen Parameter des Anwendungsszenarios in den Komplexitätswürfel. Zur übersichtlicheren Darstellung wird der Komplexitätswürfel für die interne und die externe Komplexität separat in zwei Teilen abgebildet.

Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieses Beitrags wurde ein Komplexitätswürfel zur Charakterisierung von Produktionssystemen hinsichtlich der zeitlichen, organisationalen und der systemischen Komplexität vorgestellt. Diese verschiedenen Kategorien der Komplexität werden in Form der einzelnen Ausprägungen des Komplexitätswürfels durch Vektoren repräsentiert, die eine Operationalisierung der Komplexität ermöglichen. Mithilfe des Komplexitätswürfels können Produktionssysteme hinsichtlich verschiedener Komplexitätsarten miteinander verglichen und der Komplexitätsunterschied bestimmt werden.

Zukünftige Forschungsarbeiten konzentrieren sich im Rahmen von Simulationsstudien auf die Überprüfung der These, dass bei steigender Komplexität der Einsatz der Selbststeuerung zu einer höheren logistischen Zielerreichung führt als die Nutzung der konventionellen Fremdsteuerung. Dazu werden die relevanten Parameter für die unterschiedlichen Komplexitätsvektoren identifiziert und operationalisiert, um eine einheitliche Anwendung des Komplexitätswürfels zu gewährleisten. Des Weiteren soll untersucht werden, für welche Arten bzw. Kategorien der Komplexität selbststeuernde Prozesse besonders geeignet sind.

Literatur

- 1 Windt, K.; Böse, F.; Philipp, T.: Criteria and Application of Autonomous Cooperating Logistic Processes. In: Gao, J. X.; Baxter, D. I.; Sackett, P. J. (eds.): Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Research - Advances in Manufacturing Technology and Management. Cranfield 2005
- 2 Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: Industrie Management 20 (2004) 1, S. 23-27

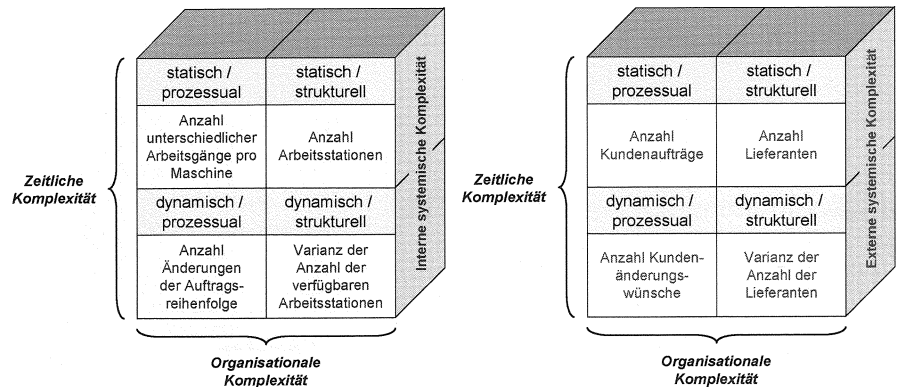


Bild 5. Exemplarische Anwendung des Komplexitätswürfels

- 3 Scherer, E.: The Reality of Shop Floor Control - Approaches to Systems Innovation. In: Scherer, E. (ed.): Shop Floor Control - A Systems Perspective. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1998
- 4 Schuh, G.: Produktkomplexität managen. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2005
- 5 Ulrich, H.; Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Haupt Verlag, Bern, Stuttgart 1988
- 6 Deshmukh, A.; Talavage, J.; Barash, M.: Complexity in Manufacturing Systems. Part 1: Analysis of Static Complexity. Institute of Industrial Engineers United States: IIE transactions 30 (1998) 7, S. 645-656
- 7 Frizelle, G.; Woodcock, E.: Measuring Complexity as an Aid to Develop Operational Strategy. International Journal of Operations and Production Management 15 (1995) 5, S. 26-39
- 8 Karp, A.: Improving Shop Floor Control: An Entropy Model Approach. International Journal of Production Research 30 (1994) 4, S. 923-938
- 9 Shannon, C. E.; Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, IL 1949
- 10 Amara, L.; Ottino J.: Complex Networks Augmenting the Framework for the Study of Complex Systems. European Physical Journal B 38 (2004), S. 147-162
- 11 Barabasi, A.; Oltvai, Z.: Network Biology: Understanding the Cells Functional Organization. Nature Reviews Genetics 5 (2004) 2, S. 101-113
- 12 Costa, L.; Rodrigues, F.; Travieso, G.; Villas Boas, P.: Characterization of Complex Networks: A Survey of Measurements. e-print cond-mat/0505185, 2005
- 13 Wiendahl, H.-H.; v. Cierninski, G.; Wiendahl, H.-P.: Stumbling Blocks of PPC: Towards the Holistic Configuration of PPC Systems. Production Planning & Control 16 (2005) 7, S. 634-651

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Wirtsch.-Inf. Felix Böse, Dipl.-Ing. Thorsten Philipp und Dr.-Ing. Katja Windt arbeiten als Wissenschaftliche Mitarbeiter am Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA) im Bereich Intelligente Produktions- und Logistiksysteme (IPS) an der Universität Bremen.

Summary

Autonomous Control of logistic processes represents an innovative approach to cope with the increasing complexity in today's logistic systems. In order to verify this thesis, the development of an evaluation system is necessary which allows the measurement of the logistic objective achievement depending on the level of autonomous control and the complexity of the considered production system. Within this paper, a complexity cube is introduced, which characterises production systems regarding different categories of complexity by means of vectors.