



Hans-Jörg Kreowski (MLS)

Autonomie in technischen Systemen

Vortrag auf dem Kolloquium „Emergente Systeme. Information und Gesellschaft“
am 10.12.2015

Veröffentlicht: 16.03.2018

1. Einleitung

In technisch orientierten Wissenschaftsbereichen wie der Künstlichen Intelligenz, Robotik, Logistik und Produktionstechnik wird seit über 20 Jahren mit wachsender Intensität zum Thema Autonomie geforscht und entwickelt. Roboter sollen gebaut werden, die kochen, jonglieren, tanzen oder Kranke und Hilfsbedürftige betreuen können. Selbstfahrende Fahrzeuge sollen demnächst fahrerlos den Straßenverkehr bewältigen. Maschinen sollen unter dem Motto Industrie 4.0 eigenständig und miteinander Produktionsaufgaben planen und ausführen. Im Rahmen der Robocup-Wettkampfserie treten Roboterteams in verschiedenen Disziplinen gegeneinander an. Fernziel ist, den menschlichen Fußballweltmeister zu schlagen. Das ist nur eine kleine Auswahl technischer Systeme, die in der einen oder anderen Form autonom arbeiten. Sie befinden und bewegen sich in einer sich verändernden und nicht vollständig bekannten Umgebung, in der sie ihre Aufgaben einzeln oder in Gemeinschaft erledigen sollen. Sie müssen dafür ihre Umgebung erfassen und interpretieren, Schlüsse ziehen, planen, Entscheidungen treffen und möglichst optimal handeln. Dabei ist häufig vorgesehen, dass sie sich durch Lernen verbessern. Als Vorbilder werden meist Menschen propagiert mit ihren Denk-, Handlungs-, Problemlösungs-, Kommunikations- und Lernfähigkeiten. Eine sehr große Zahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern arbeiten weltweit an der Lösung von Problemen, die mit der Entwicklung autonomer technischer Systeme verbunden sind. Das liegt sicher auch daran, dass es sich um äußerst interessante wissenschaftliche Herausforderungen handelt. Ein weiterer entscheidender Faktor ist aber auch, dass für die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet gigantische staatliche Fördermittel zur Verfügung gestellt werden. Allerdings muss man trotz des hohen Aufwands und vieler beachtlicher Einzelerfolge konstatieren, dass der Stand der Kunst noch recht bescheiden ist. Zum Beispiel können Roboter jonglieren und halbwegs sich so bewegen, dass man von Tanzen sprechen kann. Beim Fußballspielen sind schon so immense Aufgaben zu bewältigen, dass das Spiel der Roboter noch lange nicht die Kreisklasse erreicht. Nicht viel anders sieht es beim Kochen und bei Pflegeaufgaben aus. Das selbstfahrende Auto ist trotz aller Erfolgsmeldungen noch in einem experimentellen Anfangsstadium. Es wird noch viele Entwicklungs Milliarden verschlingen; und es ist keineswegs schon sicher, dass die eingesetzten Steuergelder gut angelegt sind. Das ist nicht verwunderlich, denn der Fortschritt in der Wissenschaft ist eine Schnecke. Ein anderer Grund aber könnte sein, dass Autonomie vielleicht überhaupt gar nicht richtig verstanden und durchschaut ist. In diesem Essay möchte ich deshalb der Frage nachgehen, was es mit der Autonomie in technischen Systemen auf sich hat, wofür es dabei überhaupt geht, wo die Schwierigkeiten liegen, wo die Gefahren dieser Entwicklung lauern und ob technische Autonomie schon richtig verstanden und durchdacht ist.

2. Was ist Autonomie?

In der Kantschen Philosophie als prominentes Beispiel birgt Autonomie die Möglichkeit und Aufgabe des Menschen, sich selbst als freiheits- und vernunftfähiges Wesen zu bestimmen und entsprechend aus Freiheit nach dem kategorischen Imperativ zu handeln: "Handle nur nach derjenigen Maxime, durch die du zugleich wollen kannst, dass sie ein allgemeines Gesetz werde." (Grundlegung zur Metaphysik der Sitten, Akademie-Ausgabe Kant Werke IV, Walter de Gruyter 1968, S. 421). Viele andere

Philosophen formulieren das ähnlich. Auch die Autonomiebegriffe in Psychologie und Pädagogik sind von dieser Art. In der Politik bezeichnet man Staaten oder Gebiete als autonom, wenn sie eine eigene Gesetzgebung, Exekutive und Rechtsprechung haben. In der Biologie wird neben Menschen auch Tieren vielfach Autonomie zugesprochen, wobei die Mechanismen, die Autonomie bewirken und ausmachen, weitgehend ungeklärt sind. In der Technik erhalten Roboter, Prozesse und Systeme das Attribut autonom, wobei die Mechanismen, auf denen die Autonomie beruht, meist computergestützt sind. Sie werden von Menschen gemacht im Rahmen des algorithmisch Möglichen. Die Autonomiebegriffe in den Geistes- und Sozialwissenschaften werden, wenn ich das richtig sehe, weitgehend ignoriert. Die Autonomie biologischer Systeme wird dagegen gern und oft als Vorbild genannt. Die Analogie ist allerdings eher oberflächlich und vage, weil zwar gewisse Phänomene ähnlich sein mögen, die für Autonomie verantwortlichen Mechanismen von biologischen und technischen Systemen jedoch möglicherweise wenig bis gar nichts miteinander zu tun haben, ihre Beziehung zueinander jedenfalls unverstanden ist.

3. Mehr zum Konzept autonomer technischer Systeme

Ein typisches Beispiel, was unter autonomen technischen Systemen verstanden wird, findet man im Vorwort der Publikation des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie 2013:

„Autonomik – Autonome Systeme und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand ist ein Technologieprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Bei AUTONOMIK geht es um zukunftsweisende Ansätze für die Entwicklung einer neuen Generation von intelligenten Werkzeugen und Systemen, die eigenständig in der Lage sind, sich via Internet zu vernetzen, Situationen zu erkennen, sich wechselnden Einsatzbedingungen anzupassen und mit Nutzern zu interagieren. Insgesamt haben sich 14 Projektverbünde, u. a. zu fahrerlosen Transportsystemen, robotischen Assistenten, autonomen Logistikprozessen und Klinikanwendungen für eine Förderung durch das BMWi qualifiziert. Die Projekte haben eine Laufzeit von durchschnittlich drei Jahren. Rund 100 Unternehmen und wissenschaftliche Einrichtungen wirken an den Vorhaben mit. Das Projektbudget beträgt zusammen ca. 110 Mio. Euro. ...“

Ebenfalls typisch an diesem Beispiel ist, dass Entwicklungen in diesem Bereich in enger Verflechtung von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft vorangetrieben werden.

Ganz ähnliche Betrachtungen werden im Kontext eines anderen Anwendungsfelds angestellt. In der 60-seitigen Einleitung des 320-seitigen NATO-Sammelbands zu autonomen Systemen beschreiben die beiden Herausgeber Williams und Scharre (2015) Herausforderungen und Möglichkeiten autonomer Waffen, wobei sie ausführlich auf die Charakterisierung autonomer Systeme allgemein eingehen. Sie definieren autonome Systeme als Systeme, die auf der Basis integrierter Sensorik, Analytik, Kommunikationsmöglichkeit, Planung und Entscheidung agieren, um vorgegebene Ziele zu erreichen. Spezielles Charakteristikum autonomer Systeme ist, dass sie das in sich ändernde Umfeld mit potentiell nichtdeterministischem Verhalten tun. In jeder gegebenen Situation kann es mehrere Handlungsoptionen geben, aus denen ausgewählt werden muss. Diese informelle Beschreibung ist repräsentativ für die ausufernde Literatur zu Autonomie technischer Systeme (vgl. z.B. Siegwart et al. 2011 und Thrun et al. 2005).

Ein drittes Beispiel mag das abrunden, von dem ich aus eigener Anschauung berichten kann. An der Universität Bremen wurde von 2004 bis 2011 der Sonderforschungsbereich SFB 637 *Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen* mit dem englischen Titel *Autonomous Cooperating Logistic Processes – A Paradigm Shift and its Limitations* durchgeführt (siehe dazu Hülsmann et al. 2011 und Hülsmann und Windt 2007). Das Projekt hatte als Leitgedanken:

„Autonome Kontrolle beschreibt dezentrale Entscheidungsprozesse in heterarchischen Strukturen. Vorausgesetzt werden interagierende Elemente in nichtdeterministischen Systemen mit der Fähigkeit und Möglichkeit, eigene Entscheidungen zu treffen.“

Über die vorige Definition hinaus, aber wie bereits im Zusammenhang mit dem AUTONOMIK-Projektverbund angesprochen, wird hier also darauf hingewiesen, dass eine Form autonomer Kontrolle

erforderlich ist, wenn mehrere Systemeinheiten ohne zentrale Instanz interagieren und dabei Entscheidungen treffen müssen, welche Aktionen jeweils ausgeführt werden sollen.

4. Modellierung autonomer technischer Systeme

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit technischer Autonomie bleibt nicht bei einer informellen Umschreibung stehen, sondern es wurden in den letzten zwei Jahrzehnten eine Reihe formaler und semiformaler Ansätze für die Modellierung und Realisierung autonomer technischer Prozesse und Systeme entwickelt. Neben diversen Netzvarianten sind Multiagentensysteme (siehe z. B. Wooldridge 2002) und Schwarmintelligenz (siehe z. B. Banobeau et al. 1999, Engelbrecht 2006, Kennedy und Eberhart 2001) prominente Beispiele. Das Angebot bei Multiagentensystemen reicht von Plattformen, die in JAVA programmiert sind und die Kommunikation und Ausführung von sogenannten Agenten für bestimmte Anwendungen unterstützen, bis zu rein logischen Formalisierungen, bei denen abstrakte Agenten in einer abstrakten Umgebung simultan agieren. Ein einzelner Agent kann dabei lokal seine Umgebung erfassen und verändern. Durch eine große Zahl von Axiomen werden das Verhalten und die Interaktion der Agenten eingegrenzt. Bei den verschiedenen Ausformungen von Schwarmintelligenz werden meist Schwärme in der Natur als Vorbild herangezogen wie Ameisenkolonien, Bienenvölker, Fischschulen, Vogelschwärme oder Zellstrukturen. Die Mitglieder eines Schwarms befinden sich in einer gemeinsamen Umgebung oder einem Suchraum, was ein Graph sein kann oder ein euklidischer Raum. Sie agieren simultan in Abhängigkeit von oft quantitativen Informationen in ihrer nahen Umgebung nach bestimmten Regeln. Ist die Umgebung ein euklidischer Raum, dann bewegen sich die Schwarmmitglieder mit gewisser Geschwindigkeit in gewisser Richtung. Ist sie ein Graph, dann bewegen sich die Schwarmmitglieder längs der Kanten oder kommunizieren darüber. Die mathematischen Beschreibungen sind teils lückenhaft und werden erst durch eine Implementierung vervollständigt.

Im Rahmen des oben genannten Sonderforschungsbereichs hat meine Forschungsgruppe einen eigenen Ansatz zur Formalisierung autonomer Prozesse entwickelt (siehe z. B. Dashkovskiy et al. 2010, Hölscher et al. 2009, Kreowski et al. 2011). Den syntaktischen Kern bilden Gemeinschaften autonomer Einheiten. Eine solche Gemeinschaft besteht aus einer initialen Umgebung, einer Menge autonomer Einheiten, einer Kooperationsbedingung und einem Ziel. Eine autonome Einheit verfügt über eine Regelmenge zur lokalen Veränderung der Umgebung und über eine Kontrollbedingung zur Regulierung der Regelanwendungen. Semantisch werden Prozesse definiert, die mit der initialen Umgebung beginnen und in denen jede Einheit ihre Regeln anwendet unter Beachtung der Bedingungen, bis das Ziel erreicht ist. Die Umgebungen sind Graphen, die Regeln transformieren diese Graphen, die Bedingungen und das Ziel sind logische Formeln. Je nach Kooperationsbedingung arbeiten die Einheiten sequentiell, parallel oder nebenläufig. Kooperationsbedingung und die Kontrollbedingungen können darüber hinaus Reihenfolgen, Prioritäten und Kontextvorschriften für die Regelanwendungen vorschreiben. Autonomie bedeutet in diesem Zusammenhang, dass jede Einheit ihre Regeln anwenden kann, wenn sie anwendbar sind, ohne dass die anderen Einheiten darauf direkten Einfluss haben. Ein indirekter Einfluss kann allerdings dadurch entstehen, dass die anderen Einheiten die Umgebung ändern, was die Anwendbarkeit von Regeln beeinflusst.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass autonome technische Systeme oder Prozesse programmiert oder mathematisch, logisch und/oder regelbasiert modelliert sind. Die Programmsysteme unterscheiden sich von traditionellen Programmen allerdings dadurch, dass sie aus mehreren Komponenten bestehen können, die unabhängig voneinander ausgeführt werden und asynchron miteinander kommunizieren. Den mathematischen Modellen ist gemeinsam, dass sich autonome Komponenten in einer Umgebung nach bestimmten vorgegebenen Regeln in Abhängigkeit vom Zustand ihrer nahen Umgebung beziehungsweise dessen Bewertung bewegen oder sie verändern. Manchmal „lernen“ die Komponenten, indem sie ihre Regeln und die Erfassung ihrer Umgebung verändern, wenn das nach vorgegeben Kriterien erfolgversprechender scheint.

Autonomie in technischen Systemen ist heute immer von Menschen gemacht und daran wird sich vorläufig nichts ändern. Es handelt sich also nicht um Autonomie im Sinne von Philosophie und Biologie, sondern um Artefakte, um eine Analogiebildung, ähnlich wie künstliche Intelligenz nicht mit menschlicher Intelligenz vergleichbar ist und maschinelles Lernen mit dem Lernen von Lebewesen wenig bis gar nichts zu tun hat. Autonome technische Systeme haben kein Bewusstsein, sind nicht vernunftbegabt, können nicht denken. Das „Kind“ braucht einen Namen. Im technisch-wissenschaftlichen Bereich bedient man dabei gern bekannter Begriffe, wenn ihre eigentliche Bedeutung gewisse Ähnlichkeiten mit dem neu Benannten aufweist. Von technischer, künstlicher, maschineller Autonomie zu sprechen, ist also durchaus nachvollziehbar, aber darf nicht mit dem ursprünglichen Autonomiebegriff verwechselt werden. Wenn dieser Unterschied nicht beachtet oder sogar bewusst vertuscht wird, ist das Irreführung. Leider passiert das im Zusammenhang mit technischer Autonomie häufig – teils unbedacht, teils absichtsvoll.

Aber die Modellierung autonomer technischer Systeme krankt nicht nur hinsichtlich der mangelnden Begriffsschärfe. Sondern auch konzeptionelle Probleme werden oft nicht ausreichend bedacht oder manchmal sogar völlig ignoriert. So sind bekanntermaßen fast alle Planungs- und Optimierungsprobleme (wie Tourenplanung, Zielsuche, Clusterung, Lagerhaltung, Scheduling u. v. a. m.) und damit viele Aufgaben, die ein autonomes System zu erfüllen hat, NP-schwer, d.h. alle heute bekannten exakten Lösungen sind im schlechtesten Fall mindestens exponentiell. Sie funktionieren also nur für kleine Instanzen und brauchen in vielen Fällen mehr Zeit, als verfügbar ist. Da diese Problematik in vielen praktischen Anwendungen informationsverarbeitender Systeme auftritt, werden seit Jahrzehnten Auswege gesucht und beschritten. Drei typische Vorgehensweisen dafür sind:

1. Man hofft, dass der schlechteste Fall nicht oft eintritt (z.B. bei Expertensystemen, SAT-Solver, Model Checker);
2. man bricht die Berechnung ab, wenn es zu lange dauert, und probiert etwas anderes;
3. man setzt sogenannte Heuristiken ein, insbesondere prozedurales Lernen, die schnelle Ausführbarkeit garantieren, aber in der Regel falsche Ergebnisse liefern mit meist unbekannter Abweichung von einer richtigen Lösung.

Das ist alles nicht gangbar, wenn man sich Fehler nicht leisten kann oder will. Autonome technische Systeme, die gemäß ihrer Programmierung eigenständig planen und entscheiden, geraten damit fast unumgänglich in die Falle der NP-Schwierigkeit. Ihr Einsatz in kritischen Anwendungen ist also äußerst gefährlich. Können beispielsweise selbstfahrende Autos, die ja sehr bald eingeführt werden sollen, die Straßenverkehrsordnung kennen und korrekt anwenden? Ist die Straßenverkehrsordnung überhaupt berechenbar? Und wenn JA, ist ihre programmierte Ausführung schnell und zuverlässig genug? Können autonome Vehikel verschmutzte, verdeckte oder verbogene Verkehrszeichen erkennen? Wie reagieren sie in Situationen, in denen menschliche Fahrerinnen und Fahrer intuitiv, spontan und antizipierend handeln? Wer wird verantwortlich gemacht, wenn autonome Fahrzeuge Sach- oder Personenschäden verursachen? Soweit ich das übersehe, sind alle diese Fragen und viele weitere weitgehend ungeklärt.

5. Autonome Waffen

Ein besonderes Anwendungsfeld, bei dem die Problematik technischer Autonomie besonders deutlich wird, ist die Entwicklung autonomer Waffen. Das Department of Defense der USA (2014) plant, einen erheblichen Teil der Bewaffnung auf unbemannte Vehikel in der Luft, am Boden und zu Wasser umzustellen. Laut der Unmanned Systems Integrated Roadmap, die auf 160 Seiten den Zeitraum von 2013 bis 2038 fortschreibt, ist ein wesentliches Forschungsthema und Entwicklungsziel für die nahe Zukunft mit höchster Priorität die Einführung autonomer Waffen. Als Motiv wird angegeben, die Personalkosten senken zu wollen, weil unbemannte, aber nicht autonome Waffensysteme zwar weniger Kosten verursachen als bemannte Systeme, aber immer noch eine große Zahl betreuender Personen benötigen.

Autonomie bedeutet dabei, dass die Systeme selbst die Signifikanz der gesammelten Informationen erkennen und eigenständig über weitere Aktionen (einschließlich Waffengebrauch und Tötung von Menschen) entscheiden, ohne dass Menschen direkt eingreifen. Die Entscheidung über Leben und Tod wird autonomen Maschinen überlassen. Ist das verantwortbar? Darf das sein? Ist das ethisch vertretbar? Können Maschinen das? Können Maschinen beispielsweise das Kriegsvölkerrecht beachten?

Arkin (2009) argumentiert, dass Maschinenethik nicht nur möglich, sondern wünschenswert sei. Denn Roboter geraten nicht in Panik; sie können Befehle ohne Angst und ohne Rücksicht auf die Reaktionen der Vorgesetzten beurteilen und gegebenenfalls verweigern. Ein künstliches Gewissen ist machbar. Ich setze ein NEIN dagegen. Ein autonomes Waffensystem führt programmierte Entscheidungs- und Planungsalgorithmen aus mit den oben geschilderten und heute noch völlig ungelösten Problemen hinsichtlich Effizienz und Korrektheit. Das „autonome“ Töten wird programmiert, so dass der Eingriff der Menschen nur verschoben ist. Die Entscheidung über Leben und Tod fällt also nicht erst beim Einsatz der Waffen auf dem Schlachtfeld, sondern bei deren Entwicklung. Und neben allen anderen Problemen, die daraus erwachsen, lässt sich konstatieren, dass sich das Kriegsvölkerrecht wohl kaum programmieren lässt. Denn schon unter Juristinnen und Juristen gibt es viele verschiedene Auffassungen, wie einzelne Bestimmungen zu interpretieren sind (siehe dazu die ausführlichen Auseinandersetzungen mit den rechtlichen Rahmenbedingungen in Schmitt 2013 und 2017 sowie Williams und Scharre 2015). Wie sollen da Waffenschmiede berechenbare und korrekte Lösungen in ihre Programme einbauen.

Der Zweifel an der Sinnhaftigkeit autonomer Waffen ist keineswegs nur auf eine kleine Schar von Bedenkenträgerinnen und Bedenkenträger beschränkt. So gibt es ausgehend von der IJCAI-Konferenz im Juli 2015 einen weltweiten Aufruf zum Bann autonomer Waffen: Autonomous Weapons: an Open Letter from AI & Robotics Researchers (siehe <https://futureoflife.org/open-letter-autonomous-weapons/>). Mit Stand von Ende 2017 gibt es mehr als 20000 Unterschriften, davon über 3500 von AI/Robotik-Fachleuten. Erwähnenswert sind auch die Aktivitäten des International Committee for Robot Arms Control (ICRAC, siehe <https://icrac.net>). Schließlich gibt es auch auf hoher politischer Ebene Initiativen zum Verbot oder zumindest zur Regulierung tödlicher autonomer Waffen. So finden im Rahmen der Vereinten Nationen seit 2014 jährliche Treffen von Regierungsfachleuten zu diesem Thema statt.

6. Statt eines Fazits

Autonomes Denken und Handeln gehören zu der breiten Palette geistiger und emotionaler Fähigkeiten, über die Menschen verfügen. Das umfasst Klugheit wie Dummheit, Ideenreichtum wie Planlosigkeit, rationales Entscheidungsvermögen wie Torheit, Lernen wie Vergessen, Mitgefühl wie Abneigung, Toleranz wie Vorurteile, Bescheidenheit wie Hochmut, Liebe wie Hass. Es ist weitgehend unbestritten, dass es sich dabei um Leistungen des Gehirns handelt. Was aber nach meinem Wissen noch ziemlich unklar ist, wie sie im Einzelnen im Gehirn zustande kommen und wie sie zusammenhängen. Es ist klar, dass im Gehirn chemische und physikalische Prozesse ablaufen und dass genetische Veranlagungen eine Rolle spielen. Aber wie ein einzelner Gedanke – ob schlau oder töricht – entsteht, ist vorläufig ein Rätsel. Ich vermute, dass die Wissenschaft noch sehr lange brauchen wird, um es zu entschlüsseln. Daran werden auch die rund 1,2 Milliarden Euro nicht viel ändern, die die Europäische Union über einen Zeitraum von zehn Jahren für das *Human Brain Project* (siehe <https://www.humanbrainproject.eu/en/>) ausgibt. Ziel ist, das Gehirn besser zu verstehen und die Erkenntnisse in Informatik und Medizin anzuwenden. Ganz ähnliche Projekte laufen auch in den USA mit noch mehr Geld und in China.

Was man aber nicht versteht, lässt sich auch nicht nachbauen. Eine technische Realisierung von Autonomie oder anderen intellektuellen und emotionalen Fähigkeiten kann also heutzutage nur ein Artefakt sein, das vielleicht gewisse Ähnlichkeiten mit seinem natürlichen Vorbild hat. Die Technik-

gläubigen argumentieren gern, dass die Natur ja auch diese Fähigkeiten hervorgebracht hat, warum soll es dann nicht auch technisch gehen. Das mag sein, aber deshalb weiß man noch lange wie.

Literatur

- Ron C. Arkin: *Governing Lethal Behavior in Autonomous Systems*. Chapman and Hall, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, 2009.
- Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz: *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, 1999.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Öffentlichkeitsarbeit (Hg.): *Autonomik – Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand: Die Projekte, Band 1*, 2013.
- Sergey Dashkovskiy, Hans-Jörg Kreowski, Sabine Kuske, Andrii Mironchenko, Lars Naujuk, Caroline von Totth: *Production Networks as Communities of Autonomous Units and Their Stability*. *International Electronic Journal of Pure and Applied Mathematics* 2:17-42, 2010.
- Department of Defense: *Unmanned Systems Integrated Roadmap, FY 2013-2038*. Washington, 2014.
- Andries P. Engelbrecht: *Fundamentals of Computational Swarm Intelligence*. John Wiley & Sons, 2006.
- Karsten Hölscher, Hans-Jörg Kreowski, Sabine Kuske: *Autonomous Units to Model Interacting Sequential and Parallel Processes*. *Fundamenta Informaticae* 92:233-257, 2009.
- Michael Hülsmann, Bernd Scholz-Reiter, Katja Windt (Eds.): *Autonomous Cooperation and Control in Logistics, Contributions and Limitations – Theoretical and Practical Perspectives*, Springer, 2011.
- Michael Hülsmann, Katja Windt (Eds.): *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics - The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow*. Springer, 2007.
- James Kennedy, Russell C. Eberhart: *Swarm Intelligence*. Evolutionary Computation Series, Morgan Kaufman, San Francisco, 2001.
- Hans-Jörg Kreowski, Sabine Kuske, Caroline von Totth: *Modeling Production Networks with Discrete Processes by Means of Communities of Autonomous Units*. *Logistics Research* 3:159-175, 2011.
- Michael N. Schmitt (Ed.): *Tallinn Manual 2.0 on the International Law Applicable to Cyber Operations*, Cambridge University Press, 2013 (2nd edition 2017).
- Roland Siegwart, Illah Reza Nourbakhsh, Davide Scaramuzza: *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2. Auflage. The Mit Press, 2011.
- Sebastian Thrun, [Wolfram Burgard](#), [Dieter Fox](#): *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The Mit Press, 2005.
- Andrew P. Williams, Paul D. Scharre (Eds.): *Autonomous systems : Issues for defence policymakers*. North Atlantic Treaty Organization. Headquarters Supreme Allied Commander Transformation. Capability, Engineering and Innovation, Norfolk, VA, 2015.
- Michael Wooldridge: *Introduction to Multi Agent Systems*. John Wiley and Sons, Chichester, 2002.

Adresse des Verfassers: Universität Bremen, Fachbereich Mathematik/Informatik, Bibliothekstr. 5. 28359 Bremen, kreo@informatik.uni-bremen.de