

Cyber-Physische Produktionssysteme im Mittelstand: Herausforderungen zu Industrie 4.0 aus Sicht von KMU

Thomas Ludwig, Volkmar Pipek

Universität Siegen, Institut für Wirtschaftsinformatik

thomas.ludwig@uni-siegen.de, volkmar.pipek@uni-siegen.de

Abstract

Das Schlagwort *Industrie 4.0* und die Vision smarter Produktionssysteme erhalten immer stärkeren Einzug in die deutsche Industrielandschaft. Die technologische Ausgestaltung solcher smarten Produktionssysteme ist dabei vor allem unter dem ganzheitlichen Begriff der Cyber-physischen-Produktionssysteme (CPPS) zusammengefasst. CPPS wird dabei verstanden als Konvergenz aus den Bereichen Maschinenbau, Sensorik und IT. Sowohl Industrie 4.0 als auch CPPS sind dabei aktuell stark an den Interessen der Großindustrie orientiert und vernachlässigen bei ihrer praktischen Ausgestaltung den Mittelstand – den größten industriellen Treiber Deutschlands – sowie dessen spezielle Anforderungen. Dieser Artikel führt in das Konzept von CPPS ein und präsentiert auf Basis eines Expertenworkshops, die Herausforderungen hinsichtlich CPPS und Industrie 4.0 aus Sicht von kleiner und mittlerer Unternehmen.

1 Einleitung

Die sogenannte vierte industrielle Revolution („Industrie 4.0“) zeichnet sich vornehmlich durch eine zunehmend komplexere Verbindung von Maschinen, Mitarbeitern, Materialien, Standorten und Unternehmen im Zeichen völlig veränderter Kommunikationsinfrastrukturen und Gewohnheiten aus. Diese Verbindungen werden zweifelsohne weitreichende Konsequenzen für die Produkte, das Verhältnis der Produkte zu Service- und Dienstleistungen, die eingesetzten Produktionsressourcen, Produktionsanlagen und den jeweiligen agierenden Mitarbeiter haben. Gleichzeitig steht die inner- und zwischenbetriebliche Organisation eines Unternehmens auf dem Weg zu einem dynamischen, echtzeitoptimierten und unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsnetzwerk einigen Veränderungen entgegen.

Smarte Produktionssysteme und -anlagen gelten im Rahmen von Industrie 4.0 als (visionärer) Lösungsansatz, um den aktuellen Herausforderungen an die heutige und vor allem zukünftige Produktion entgegenzutreten, in dem die Lücke zwischen daten-, technologie- und prozessorientierten Produktionsgestaltungsformen geschlossen wird und dadurch eine Integration der virtuellen und realen Welt erreicht werden soll. Der Grundgedanke smarter Produktionssysteme ist dabei möglichst „intelligente Produkte“ in den Produktionsprozessen

einzusetzen, um die Abläufe jederzeit nachvollziehbar und damit das zugehörige Produktionssystem effizient und flexibel zu gestalten. Solche intelligenten Produkte besitzen dabei neben ihren eigentlichen Funktionen auch informationstechnische Funktionen, mittels derer sie Daten speichern, kommunizieren und somit wieder bereitstellen können (Birkhahn 2007).

Technologische Treiber der smarten Produktionssysteme sind aktuell vor allem unter dem Begriff der Cyber-Physischen-Produktionssysteme (CPPS) bekannt. CPPS umfassen dabei verteilte, miteinander vernetzte, intelligente Produktionsanlagen, die eingebettete Systeme mit internetbasierten Funktechnologien vernetzen und Sensordaten aufnehmen sowie Aktoren steuern, um mit deren Hilfe die Material-, Güter-, und Informationsflüsse (oftmals autonom) zu regeln (Rajkumar et al. 2010). CPPS als Konvergenz aus den Bereichen Maschinenbau, Sensorik und IT soll dabei eine horizontale und vertikale Integration technischer und wertschöpfender Prozesse ermöglichen, mit dem Ziel, die gesamte übergreifende Produktion zu flexibilisieren.

Die deutsche Industrielandschaft ist durch ihre typische Mittelstandstruktur mit überwiegend kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) geprägt. Beispielsweise haben in Nordrhein-Westfalen rund 95 Prozent der über 1.600 Maschinenbaubetriebe weniger als 500 Mitarbeiter und über zwei Drittel sogar weniger als 100 Beschäftigte (LeitmarktAgentur.NRW 2015). Der deutsche Mittelstand ist dabei geprägt durch innovative, maßgeschneiderte Produkte, einer hohen Spezialisierung und den Einsatz von Hochtechnologie – vor allem in den Bereichen Maschinen- und Anlagenbau, Automobil-Zulieferindustrie und Gebäudetechnik.

Scheint die Vision von Industrie 4.0 auf theoretischer und politischer Ebene bereits ausformuliert, ist die praktische Ausgestaltung von Industrie 4.0 und CPPS allerdings noch sehr vage formuliert und stark an den Interessen der Großindustrie orientiert. Betrachtet man Deutschland als mittelstandsgeprägten Produktionsstandort reicht es nicht aus, sich an der Großindustrie zu orientieren, sowie rein Technologie-zentrierte Entwicklungen ohne Betrachtung organisationaler, sozialer und wirtschaftlicher Wechselwirkungen in den Vordergrund zu rücken. Hat Industrie 4.0 bereits in einigen wenigen großen Industriekonzernen Einzug erhalten, gilt dies kaum für KMU (Wischmann et al. 2014). Wie Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel auf der Eröffnung des achten IT-Gipfels in Hamburg erklärte, stehe mittlerweile im Fokus, die gesamtwirtschaftlichen Folgen der Digitalisierung in den Blick zu nehmen, wobei es „besorgniserregend“ sei, dass 70 Prozent der mittelständischen Unternehmen in einer Umfrage zu Industrie 4.0 die Thematik Industrie 4.0 und Digitalisierung der Produktion sowie alle damit zusammenhängenden Potenziale und Risiken als nicht relevant für die Unternehmensstrategie ansehen (Greis 2014).

Aber warum nehmen KMU bei der Thematik Industrie 4.0 eine oftmals pessimistische Sichtweise ein? Der Mittelstand steht im Hinblick auf Konzepte und Technologien von Industrie 4.0 besonderen Herausforderungen gegenüber (Wischmann et al. 2014). So bewegen sich KMU oftmals in Nischenmärkten und produzieren Kleinstserien oder Einzelstücke nach speziellen Kundenanforderungen und mit einem historisch gewachsenen Mitarbeiter-bezogenen Fachwissen, worauf sich technische Konzepte von Industrie 4.0 – wie die von CPPS oder eines intelligenten Werkstücks – nicht ohne Weiteres adaptieren lassen. So ist der manuelle Fertigungsgrad von KMU in der Regel substantiell höher als der von Großunternehmen und das Arbeitsvermögen der Mitarbeiter – deren Wissen über Verfahren der Produktion – garantieren bereits über Jahrzehnte den Erfolg der Unternehmen innerhalb ihrer jeweiligen Nischenmärkte.

Obwohl Koch et al. (2014) vor allem aus technologischer und konzeptioneller Sicht zeigen, dass insbesondere für den Mittelstand Industrie 4.0 und die dadurch entstehende Möglichkeit, sich mit

neuen Services zu differenzieren, einige Potenziale bietet, soll innerhalb dieses Artikels eine kritische Perspektive eingenommen werden und es sollen die Herausforderungen des Mittelstandes hinsichtlich Industrie 4.0, sowie deren technologische Ansätze, aufgezeigt werden. Basierend auf der theoretischen Herleitung von CPPS als technisches Resultat einer kombinierten Daten-, Technologie- und Prozess-orientierten Produktionsgestaltung werden erste Ergebnisse in Form von zehn Thesen eines Workshops mit 15 Experten aus mittelständischen Industrieunternehmen hinsichtlich ihrer Bedenken gegenüber CPPS präsentiert. Diese ersten Ergebnisse sollen dazu verwendet werden Wissenschaftler, Unternehmensberatungen, Politiker, aber auch Praktiker in den relevanten Bereichen auf die Herausforderungen des Mittelstandes im Hinblick auf Industrie 4.0 und das mittelstandsspezifische Design von CPPS zu sensibilisieren.

2 Die Entwicklung von Cyber-Physischen Produktionssystemen

Technologische Treiber von Industrie 4.0, welche vor allem Virtualisierung und Vernetzung sämtlicher (produktionsrelevanter) physischen Dinge über das Internet fokussieren, sind so genannte Cyber-Physische Systeme. Auf dem Weg zu Cyber-Physischen (Produktions-)Systemen lassen sich wissenschaftliche Ansätze industrieller Produktionsgestaltung hinsichtlich ihrer Fokussierung in die drei Bereiche daten-, technologie- und prozessorientierte Produktionsgestaltung unterscheiden (Birkhahn 2007).

Frühe datenorientierte Ansätze umfassen vor allem das Computer Integrated Manufacturing (CIM). Ausgehend von anfänglichen digitalen Unterstützungssystemen in der Konstruktion (CAE, CAD), Arbeitsplanung (CAP) und Fertigung (CAM, CAQ), beinhaltet das CIM durch Hinzunahme betriebswirtschaftlicher Produktionsplanung und -steuerungssysteme erstmalig ein integriertes Gesamtkonzept für die Informationsverarbeitung in der Prozess- und Fertigungsbranche. Der Grundgedanke von CIM besteht darin, die Konsistenz, Aktualität und Qualität von Unternehmensdaten mittels computergestützten Netzwerken zu erhöhen, um zu einer Verbesserung der Unternehmensprozesse beizutragen (Birkhahn 2007). Unter dem Schlagwort „digitale Fabrik“ sollen durch die Unterstützung geeigneter Software alle am Planungsprozess beteiligten Akteure auf ein digitales Modell und die hinterlegte Datenbasis zugreifen können.

Rein datenorientierte Ansätze, wie CIM oder darauf aufbauend die Konzeption einer digitalen Fabrik, führten allerdings nicht zu erhofften Erfolgen (Birkhahn 2007). Ziele, wie die Verkürzung der Durchlaufzeiten oder Personaleinsparung im Fertigungs- und Verwaltungsbereich, wurden aufgrund der oftmals Benutzer-unfreundlichen Bedienung und des impliziten Schulungsaufwands (Becker und Rosemann 1993) nicht in zufriedenstellender Weise erreicht (Büring 1997). Die Neu- und Weiterentwicklung von Technologien führte deshalb zu einer Reihe technologieorientierter Konzepte, wie die Smart Factory oder Smart Objects. Smart Objects sind hybride Produkte, die sich aus einer physischen und einer Daten verarbeitenden Komponente zusammensetzen (Fleisch 2001). Die Datenverarbeitung eines „intelligenten Dinges“ verbirgt sich im Hintergrund und wird vom Nutzer nicht offensichtlich wahrgenommen.

Im industriellen Kontext versucht das Konzept der Smart Factory die Lücke zwischen digitaler Planung und Realität (Lucke et al. 2008) zu schließen, wodurch ein transparentes, optimiertes Produktionsressourcen-Management realisiert werden soll, in dem hochdynamische Sensorinformationen in das kontextbezogene Umgebungsmodell integriert werden (Bauer et al. 2004). Rein technologieorientierte Ansätze werden jedoch vor einem historischen Hintergrund der digitalisierten Fertigung aufgrund der einseitigen Fokussierung kritisch betrachtet (Brödner 2015).

Die Flexibilität, mit denen Unternehmen auf dem globalen Markt reagieren müssen, führte zu prozessorientierten Ansätzen, die sich in frühen Philosophien der „Lean Production“ wiederfinden, bei der das Produktionsprogramm nicht wie bisher kapazitätsoptimiert ausgelegt wird, sondern nur noch das produziert wird, was der Kunde auch tatsächlich abnimmt (Womack et al. 1990). Lean Production bot zwar neue Lösungsansätze, jedoch waren die Veränderungen so weitreichend, dass sie vor allem in europäischen Produktionen einen Paradigmenwechsel bedeuten, da andere Rahmenbedingungen hinsichtlich Entlohnung, Produkthaftung, etc. gelten, als im japanischen Ursprungssystem (Birkhahn 2007). In jüngerer Zeit wurde Lean Production hin zu einem sozio-technischen Systems erweitert, das Unternehmen, Kunden und Zulieferer sowie entsprechende Feedbackschleifen integriert (Shah und Ward 2007).

Smarte Produktionssysteme gelten heutzutage als ein Lösungsansatz, um aktuelle Herausforderungen an die heutige Produktion zu meistern, indem die Vorteile der daten-, technologie- und prozessorientierten Produktionsgestaltung genutzt und kombiniert werden. Der Grundgedanke dabei ist es, sogenannte „wissensinkorporierte Objekte“ in Produktionsprozessen einzusetzen, um die Abläufe jederzeit nachvollziehbar und damit das zugehörige Produktionssystem sicher, effizient und flexibel zu gestalten. Solche Objekte stellen dabei Produktionsobjekte dar, die neben ihrer eigentlichen Funktion auch informationstechnische Funktionen besitzen, mittels derer sie Daten speichern und wieder bereitstellen können (Birkhahn 2007). Sie sind heute vor allem unter dem ganzheitlichen Begriff der Cyber-Physischen-Produktionssysteme bekannt und umfassen dabei verteilte, miteinander vernetzte, intelligente Produktionsmaschinen, die eingebettete Systeme mit Internet-basierten Funktechnologien verbinden und Sensordaten aufnehmen, mit denen sie Material-, Güter-, und Informationsflüsse durch Aktoren regeln (Rajkumar et al. 2010).

3 Herausforderungen des Mittelstandes hinsichtlich CPPS

Die deutsche Industrie steht im internationalen Wettbewerb (vor allem im Low-Cost-Segment) der Marktübernahme insbesondere durch chinesische Hersteller gegenüber (Eisenhut et al. 2011). Für die mittleren und oberen Qualitäts- und Preissegmente bieten CPPS den deutschen Herstellern gute Chancen, um ihren Kunden durch zusätzliche Dienstleistungen einen wettbewerbsrelevanten Mehrwert zu bieten (Geisberger and Broy 2012; Bischoff et al. 2015). Deutsche Unternehmen sind dabei durch Selbstverpflichtungen wie ISO 9000ff oder gesetzliche Haftung für ihre Produkte und Prozesse gezwungen, stets ihre Produktionsprozesse selbst zu kontrollieren, zu dokumentieren und vor allem jederzeit zu beherrschen (Birkhahn 2007). Jedoch stellen die Komplexität entsprechender CPPS, der rasche technische Fortschritt sowie die Verknüpfung von Hard- und Software in dem Bereich der industriellen Produktion die kleinen und mittelständischen Unternehmen vor große Herausforderungen bei der Handhabung solcher komplexen Fertigungstechnologien (Ludwig et al. 2014).

Der aktuelle Stand der Produktionsgestaltung postuliert daher eine sehr an der Großindustrie orientierte und vor allem technokratische Top-Down-Sichtweise auf Industrie 4.0 (Wischmann et al. 2014). CPPS werden durch ein Zusammenwachsen von Informatik, Elektrotechnik und Maschinenbau sowie eine umfassende Ausstattung durch Sensorik bzw. Aktorik und deren Anbindung an Informations- und Kommunikationstechnologie (weiter-)entwickelt, ohne jedoch dabei (a) die individuellen Spezifika des Mittelstandes, (b) passende Organisationsstrukturen, sowie (c) geeignete wirtschaftliche Einführungsstrategien mitzuliefern.

CPPS existieren heute bereits zum großen Teil in Industrieunternehmen mit einem sehr hohen Automatisierungsgrad auf Basis weit entwickelter Automatisierungstechnik für Produktionsanlagen (Stich et al. 2015). Dabei ist die Frage, wie sich die Konzepte von Industrie 4.0 und die CPPS als treibende Technologien so kombinieren und lokal oder global vernetzen lassen, dass sie den Anforderungen *aller* in der Wertschöpfungskette beteiligten Organisationen – auch den KMU – entsprechen und neue, effiziente und wirtschaftlich erfolgreiche Industrieprozesse und -systeme erschaffen. Es sind Konzepte und vor allem praxisorientierte Werkzeuge erforderlich, welche die mittelständischen Anwender in die Lage versetzen, mit der Entwicklung Schritt zu halten und effektiv sowie effizient zu arbeiten.

Es existieren bereits Studien, die auf Basis abgeschlossener oder noch laufender Projekte, retrospektiv die Herausforderungen, vor allem aber die zentralen Potenziale des Mittelstandes thematisieren (Wischmann et al. 2014; Bischoff et al. 2015). Um der ganzen Thematik offener gegenüber zu stehen und vor allem um die möglichen negative Auswirkungen von CPPS auf den Mittelstand zu eruieren, wurde ein Workshop mit 15 Experten, bestehend aus mittelständischen Geschäftsführern und Unternehmensberatern, mit Fokus auf deren Erwartungen und Bedenken an Industrie 4.0 und CPPS, durchgeführt. Dazu fand eingeleitet durch Impulsvorträge, ein Brainstorming und Diskussion aller Beteiligten statt. Die spätere Analyse der empirischen Daten versuchte, alle geäußerten Bedenken zu erheben. Der Workshop fand im Rahmen der *Siegerer Mittelstandstagung* (<http://mittelstandstagung.de>) statt. Im Folgenden sind die zentralen Herausforderungen in zehn Thesen zusammengefasst, die aus kritischer Perspektive Industrie 4.0 und KMU betrachten und die es langfristig zu untersuchen gilt:

1. *Übertragbarkeit*: Es bestehen Bedenken, dass sich die in der Regel auf Großserien fokussierten CPPS nicht ohne weiteres auf KMU adaptieren lassen, da sich viele KMU in Nischenmärkten bewegen und oft Kleinserien oder Einzelstücke nach speziellen Kundenanforderungen herstellen. Gleichzeitig fehlt der erkennbare Grad notwendiger Industrie 4.0-Restrukturierung.
2. *Investitionssicherheit*: Es bestehen Bedenken, dass Investitionen in CPPS nicht nachhaltig am Markt bestehen oder über einen langen Zeitraum hinweg nicht gewartet werden, sowie zum anderen, dass sich CPPS in der eigenen Praxis nicht in einem wirtschaftlich vertretbaren Zeitrahmen amortisieren, da KMU einen weniger hohen Automatisierungsgrad besitzen.
3. *Substituierbarkeit*: Es bestehen Bedenken, inwieweit die Ideen und Konzepte der CPPS die eigene Wertschöpfungsposition als Zulieferer stärkt oder aber substituiert und in komplett automatisierten horizontalen Wertschöpfungsnetzwerken beliebig austauschbar macht.
4. *Mitarbeiterverlust*: Es bestehen Bedenken, dass Profile hochqualifizierter Mitarbeiter, als einer der wesentlichen Wissensgaranten von KMU, durch den Einsatz von CPPS verallgemeinert werden können und diese von Kooperationspartnern abgeworben werden können.
5. *Datensicherheit*: Es bestehen Bedenken, dass durch mangelnde Datensicherheit bei vernetzten CPPS die eigenen Unternehmensprozesse transparent werden und dadurch der Druck von Großkunden zunimmt, sowie Betriebsgeheimnisse an Konkurrenten verloren gehen können.
6. *Zuverlässigkeit des IT-Netzes*: Es bestehen Bedenken, dass die technische Vernetzung als grundlegendes Architekturelement von CPPS nicht zuverlässig funktionieren wird, was einen direkten Einfluss auf Geschäftsprozesse hat. Die Bedenken reichen von Lieferverzögerungen, über die vermehrte Produktion von Ausschuss, bis hin zu einem völligen Produktionsstillstand.
7. *Kontrollierbarkeit*: Es bestehen Bedenken, dass die eigenen Mitarbeiter das Verständnis über die zu einem Großteil autonom funktionierenden CPPS verlieren und bei Störfällen – trotz Selbstverpflichtungen wie beispielsweise ISO 9000ff – nicht mehr Herr ihrer Systeme sind.

8. *Ganzheitliche Betrachtung von CPPS*: Es bestehen Bedenken, dass die heterogene IT-Landschaft von Vertrieb und Lieferant nicht mit den CPPS zusammen funktioniert. Eine Identifikation notwendiger passgenauer Bausteine von CPPS, welche mit der heterogenen Systemlandschaft harmonisieren könnte, fällt schwer.
9. *Strategische Einführung*: Es bestehen Bedenken, dass eine Integration von CPPS und die Migration alter Daten nicht wirtschaftlich vertretbar durchgeführt werden kann. Es fehlen vor allem partielle Strategien, welche eine individualisierte Einführung von CPPS ermöglichen.
10. *CPPS-Zertifikate*: Es bestehen Bedenken, dass ähnlich zu den Normen des Qualitätsmanagements ISO 9001 auch CPPS-Zertifikate etabliert werden, welche KMU aus den Wertschöpfungsketten verdrängen, sollten sie diese nicht erfüllen und dass Großkunden den KMU den Einsatz und die Verwendung von CPPS diktieren werden.

Wie bereits oben genannte Studien aufzeigen, werden sich parallel zu den Herausforderungen auch Potenziale für den Mittelstand durch Industrie 4.0 und den Einsatz von CPPS ergeben (Bischoff et al. 2015). Mit diesem Beitrag wurde vor allem jedoch die kritische Perspektive von CPPS im Hinblick auf KMU fokussiert. Die obigen Thesen zu den Herausforderungen des Mittelstandes zeigen, dass sich die an der Großindustrie ausgerichteten Leitideen von Industrie 4.0 sowie die Konzepte und technologische Ausgestaltung in Form von CPPS nicht ohne weiteres geeignet auf den Mittelstand adaptieren lassen. Die Ergebnisse, wie beispielsweise die Bedenken hinsichtlich der Substituierbarkeit in der Wertschöpfungskette, der Mitarbeiterverlust oder die Befürchtung vor durch große Unternehmen determinierte CPPS-Zertifikate zeigen deutlich das Spannungsfeld auf, in welchem sich KMU bewegen. Soll die Leitvision von CPPS bei KMU daher vorangetrieben werden, besteht ein akuter Bedarf Industrie 4.0 im Kontext von KMU, deren Interessen und Stärken, sowie Bedenken und Risiken konkret in den Blickpunkt zu rücken. Denn speziell kleine und mittelständische Unternehmen stehen bei der Auswahl, Einführung und nachhaltigen Umsetzung von Industrie 4.0 Konzepten vor den Herausforderungen, zum einen geeignete und passende CPPS-Technologien für ihre oftmals sehr individuellen und historisch gewachsenen Problemstellungen herauszufinden, zum anderen die Wechselwirkungen zwischen Technologieauswahl und -einführung mit den bereits etablierten Organisations- und Prozessstrukturen, Mitarbeitern, sowie Unternehmenskulturen zu erfassen und dadurch den gesamten sozio-technischen Einführungs- und Umsetzungsprozess wirtschaftlich anzugehen.

Speziell diese Wechselwirkungen zwischen Technologie und Organisation erfordern kurzfristig einen Dialog über die Relevanz von CPPS im Kontext der KMU, sowie insbesondere über die Herausforderungen, die bezüglich ihres Designs und ihrer Integration in Produktionsprozesse bestehen (Poovendran 2010; Rajkumar et al. 2010). Dabei werden – angesichts der Komplexität und der sozio-technischen Ausrichtung solcher Systeme – Fragestellungen aus der Mensch-Maschine-Interaktion (z.B. Ludwig et al. 2014) sowie geeignete Einführungsstrategien eine immer größer werdende Bedeutung für deutsche KMU einnehmen.

Als nächste Schritte planen wir eine Fokussierung auf die sozio-technischen Spannungsfelder, welche bei der sozio-technischen Ausgestaltung und Einführung von CPPS entstehen werden. Auf Basis der zehn formulierten Thesen zu den aktuellen Bedenken werden wir neben den technischen Aspekten, vor allem auch die Auswirkungen auf den Mitarbeiter aus deren jeweiligen verschiedenen Perspektiven zu erfassen. Dazu soll neben der Unternehmenssicht insbesondere auch die Perspektive der Sozialpartner und Gewerkschaften herangezogen werden, um KMU nicht nur technisch, sondern vor allem sozio-technisch für Industrie 4.0 und CPPS aufzustellen.

4 Literatur

- Bauer M, Jendoubi L, Siemonheit O (2004) Smart Factory - Mobile Computing in Production Environments. In: Proceedings of the MobiSys, Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems. Citeseer, pp 1–3
- Becker J, Rosemann M (1993) CIM und Logistik: Die effiziente Material- und Informationsflussgestaltung im Industrieunternehmen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Birkhahn C (2007) Smart Production Systems - intelligente Konzepte zur Gestaltung von Produktionssystemen.
- Bischoff J, Taphorn C, Wolter D, et al (2015) Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand“. Mülheim an der Ruhr
- Brödner P (2015) Industrie 4.0 und Big Data – wirklich ein neuer Technologieschub? In: Hirsch-Kreinsen H, et al (eds) Digitalisierung industrieller Arbeit. edition sigma 2015, Berlin.
- Büring E (1997) Anspruch und Realität computerintegrierter Produktionssysteme und Fertigungssteuerungskonzepte. Duncker & Humblot
- Eisenhut M, Lässig R, Liedl J (2011) Production Systems 2020.
- Fleisch E (2001) Betriebswirtschaftliche Perspektiven des Ubiquitous Computing. In: Buhl HU, Huther. A, Reitwiesener B (eds) Information Age Economy. Physica-Verlag, Heidelberg,
- Geisberger E, Broy M (2012) agenda CPS - Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems.
- Greis F (2014) Gabriel fordert mehr IT-Begeisterung vom Mittelstand. www.golem.de/news/it-gipfel-2014-gabriel-fordert-mehr-it-begeisterung-vom-mittelstand-1410-109985.html. Accessed 16 Dec 2015
- Koch V, Geissbauer R, Kuge S, Schrauf S (2014) Industrie 4.0: Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution.
- LeitmarktAgentur.NRW (2015) Produktion.NRW.
- Lucke D, Constantinescu C, Westkämper E (2008) Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing. Manuf Syst Technol New Front 115–118.
- Ludwig T, Stickel O, Boden A, Pipek V (2014) Towards Sociable Technologies: An Empirical Study on Designing Appropriation Infrastructures for 3D Printing. In: Designing Interactive Systems. Vancouver, Canada, pp 835–844
- Poovendran R (2010) Cyber-physical systems: Close encounters between two parallel worlds. In: Proceedings of the IEEE. pp 1363–1366
- Rajkumar R, Lee ILI, Sha LSL, Stankovic J (2010) Cyber-physical systems: The next computing revolution.
- Shah R, Ward PT (2007) Defining and developing measures of lean production. J Oper Manag 25:785–805.
- Stich V, Deindl M, Jordan F, et al (2015) Studie - Cyber Physical Systems in der Produktionspraxis.
- Wischmann S, Wangler L, Botthof A (2014) Industrie 4.0 - Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. BMWi, Berlin
- Womack JP, Jones DT, Roos D (1990) The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production.