

## **Virtuelle Inbetriebnahme zur Absicherung flexibler Produktionssysteme**

### ***Virtual Commissioning for Flexible Manufacturing Control Systems***

Inga Thiel, BMW AG, München (Germany), inga.thiel@bmw.de

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, Universität des Saarlandes – Lehrstuhl für  
Konstruktionstechnik, Saarbrücken (Germany), vielhaber@lkt.uni-saarland.de

**Abstract:** Producing industries are forced to adjust processes to changing customer and market requirements. Information technology enables this transformation with enhanced transparency and connectivity. Nevertheless, digitalisation bears severe risks for production stability. Intelligent systems gain new complexity using massive data streams and interconnected networks. Virtual Commissioning contributes to early risk estimation and minimization for production facilities. Thus, inefficient operation states can be avoided or construction can be optimised. An exemplary development environment displays the installation of simulation methods. For evaluating and rating digitalisation approaches, targets must be defined and displayed transparently. Thus, an analytically calculable and for simulation adjustable benefit examination is added to the discussion on Industry 4.0.

## **1 Einleitung**

In der Automobilindustrie führen nicht nur kürzere Produktzyklen und individuelle Produkte zu steigender Volatilität, der Übergang zu neuen Technologien wie Elektromobilität oder autonomes Fahren übersteigt die Wandlungsintensität und -geschwindigkeit zurück liegender Jahrzehnte bei Weitem. Digitalisierung ermöglicht flexible Prozesse durch Transparenz und Vernetzung (acatech 2013), birgt jedoch auch die Gefahr unbeherrschbar komplexer Strukturen, was zu fehlender Akzeptanz und Überlastung des Bedien- und Servicepersonals führt. Unternehmen, die schlechte Erfahrung mit Hochautomation gemacht haben, vermeiden digitale Innovationen fortan (Lay und Schirrmeister 2001). Virtuelle Inbetriebnahme unterstützt die Optimierung von Maschinen und Anlagen. Diese Arbeit beschreibt die Auswertung einer Fertigungseinrichtung zur Einordnung von Produktionsressourcen in die Zielsetzung der Digitalisierung.

## 2 Systembeschreibung

Betrachtet wird eine Produktionslinie der mechanischen Fertigung im Motorenbau. Gussteile der Motorenkomponenten – Kurbelgehäuse, Kurbelwelle, Zylinderkopf und Pleuel – werden über mehrere Prozessschritte bearbeitet. Rohteile werden am Anfang der Linie aufgelegt (1) und Fertigteile am Linienende an die Motormontage übergeben (5). Die Bauteildaten zu einem für die nächste Bearbeitung anstehenden Teil werden aus einem RFID-Chip oder DMC-Code ausgelesen und ein elektronischer Warenbegleitschein dieses Bauteils von einer Datenbank abgerufen (2). Die Daten werden im Weiteren dezentral von der SPS der Fördereinrichtung und der Maschinen verarbeitet. Das Transportsystem ermittelt in einer Art Auktionsverfahren die bestgeeignete Bearbeitungsressource. Hierzu melden die Maschinen ihren aktuellen Zustand, den Bearbeitungsfortschritt von zuvor zu bearbeitenden Bauteile, sowie freigegebene Prozesse und Derivate. Bauteile und die dazugehörigen Daten werden an die Maschine übergeben, in der Beispielgrafik Abbildung 1 wurde Maschine M2 zugewiesen (3). Das Bauteil wird nach Auftragsbestätigung in diese Maschine gefördert, bearbeitet und anschließend an das Transportsystem zurückgegeben, einschließlich der dann aktualisierten Bauteildaten (4). Ergebnis-, Prozess- und ggf. Nacharbeitsdaten werden geschrieben und der Datensatz wird wieder auf die Datenbank zurück übertragen. Der Vorgang wiederholt sich mit allen weiteren Bearbeitungsschritten. Die Taktzeiten in den aufeinander folgenden Zellen teils deutlich im Bereich einiger Minuten. Mit mehreren parallel arbeitenden Maschinen können die verschiedenen Einzeltaktzeiten vergleichmäßig und ein einheitlicher Linientakt von unter einer Minute erreicht werden. Dies erfordert einen Algorithmus zur Zuweisung der Bauteile auf die Fertigungseinrichtungen.

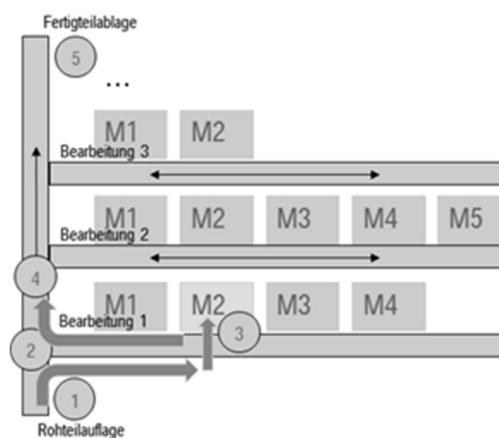
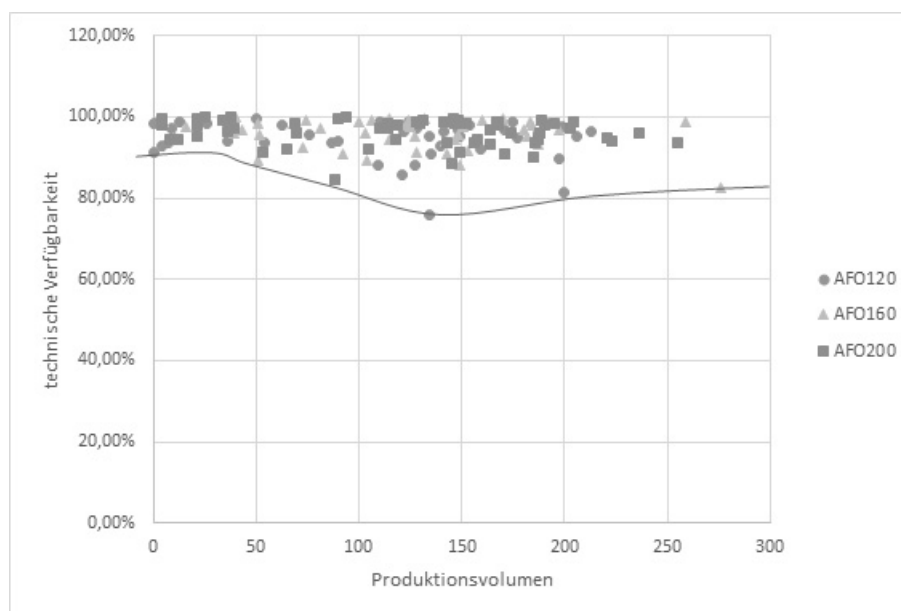


Abbildung 1: Prinzip-Skizze Ressourcenmanagement

## 3 Auswertung

Neben den grundlegenden Projektvereinbarungen zu Kosten, Zeit, Qualität werden an die Digitalisierung ein weiterer Mehrwert erwartet. Ernst & Young (2016) fanden „erstaunliche Einigkeit“ bei den erwarteten Nutzen von Industrie 4.0: höhere

Flexibilität und schnellere Reaktion auf Kunden und Marktanforderungen. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Stückzahl und Produktvarianten sind Voraussetzungen für globale, vernetzte Produktion. Dabei definiert sich Flexibilität als veränderliche Produktionszahlen in vorhersehbarem Rahmen, z. B. Mehr- oder Minderproduktionsvolumen oder zusätzliche Derivate, Wandlungsfähigkeit hingegen bezeichnet Anpassung an unvorhersehbare Änderungen oder über die geplanten Flexibilitätsreserven hinaus (Nyhius 2008). Im beschriebenen Projekt wurden die Produktionszahlen von Maschinen einer komplexen Produktionsanlage in verschiedenen Betriebspunkten verglichen. Die technische Verfügbarkeit muss möglichst unabhängig von Produktionsvolumen und Derivatevariabilität hoch sein. Variantenflexibilität bedeutet, dass vielfältige Typen in beliebiger Reihenfolge gefertigt werden können. In der betrachteten Anlage wurden im betrachteten Zeitraum von einem Monat insgesamt 10 verschiedene Derivate gefertigt. Einige Schichten wurden sortenrein beliefert, andere in einer Typenmischung. Über die Linie verändert sich die Derivatemischung. Die technische Verfügbarkeit verschiedener Zellen der Linie wurde bei einerseits verschiedener Anzahl an Derivatewechseln und andererseits bei variierendem Produktionsvolumen verglichen. Abbildungen 2 bis 5 zeigen Verläufe der technischen Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Produktionsvolumen (Abb. 2 und 3) und Anzahl der Derivatewechsel (Abb. 4 und 5).

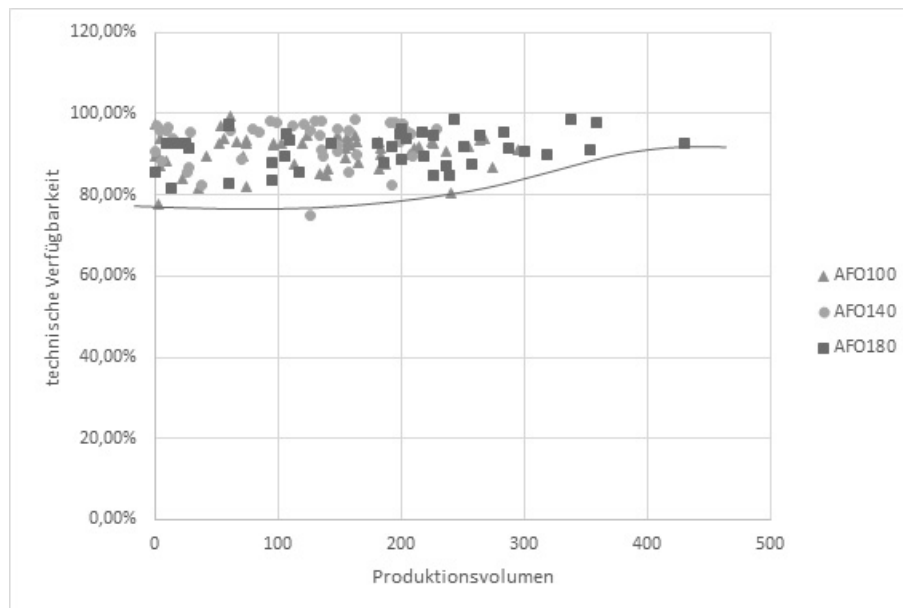


**Abbildung 2:** Zellen mit schlechter technischer Verfügbarkeit bei hohem Produktionsvolumen

Es lassen sich grundsätzlich zwei Ergebnisse grafisch ermitteln: Typ I hat bei geringer Anlagenauslastung eine gute technische Verfügbarkeit, die jedoch bei steigendem Produktionsvolumen auf ein Minimum abfällt und auch bei hoher Auslastung gering bleibt und Typ II mit zunehmender Verfügbarkeit bei steigendem Volumen. Im betrachteten Beispiel zeigen die Zellen AFO120, AFO160 und AFO200 bei geringem

Produktionsvolumen eine hohe technische Verfügbarkeit (Abb. 2). Ab einem gewissen Produktionsvolumen zeigt sich ein Absinken der technischen Verfügbarkeit auf ein Minimum. Die Kurve bleibt bei steigendem Volumen auf niedrigerem Niveau.

Dieses Absinken der technischen Verfügbarkeit weisen AFO100, AFO140 und AFO180 nicht auf. Die technische Verfügbarkeit ist zunächst gering und steigt bei zunehmendem Produktionsvolumen an (Abb. 3).



**Abbildung 3:** Zellen mit guter technischer Verfügbarkeit bei hoher Auslastung

Diese Zellen sind mit ausreichend oder gar überschüssigen Ressourcen ausgestattet oder der Arbeitsumfang ist entspannt. Die Maschinen können ihr Pensum gut abarbeiten und müssen gelegentlich auf die vorausgegangenen oder nachfolgenden langsameren Zellen warten.

Ähnliche Kurvenverläufe sind nicht nur für das Produktionsvolumen, sondern auch für variables Derivatemix ersichtlich (Abb. 4 und 5).

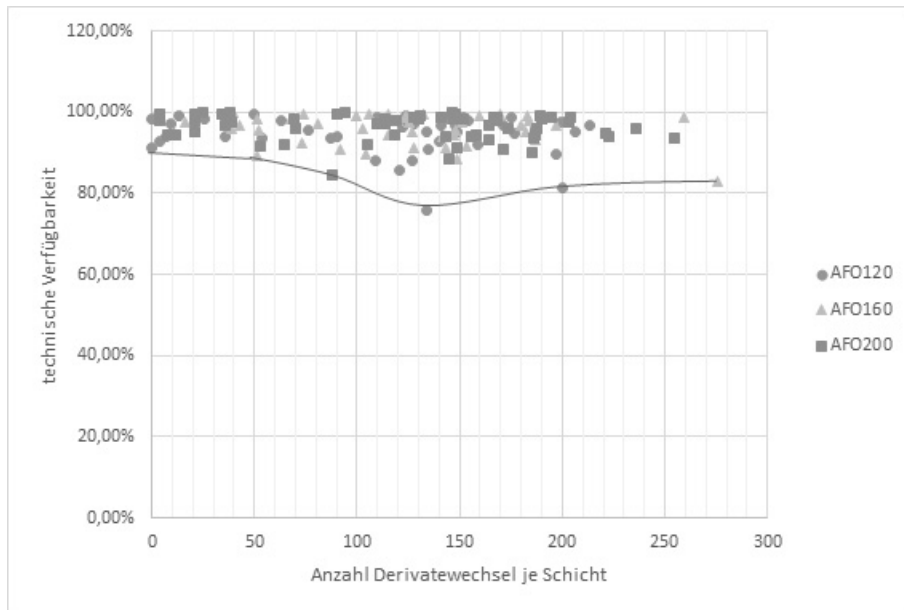


Abbildung 4: Zellen mit offensichtlicher Abhängigkeit von der Variantenflexibilität

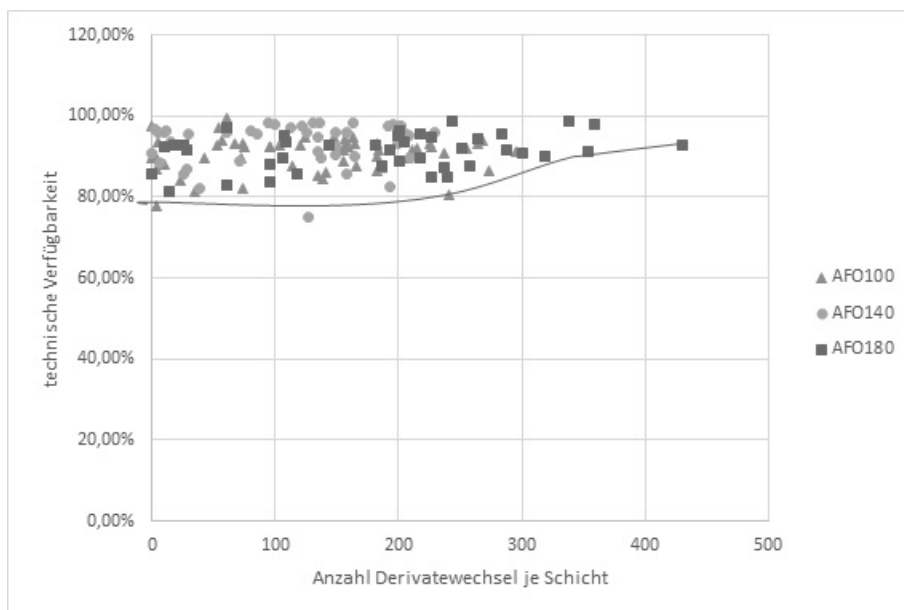


Abbildung 5: Zelle mit ausbalancierter Reaktion auf Variantenflexibilität

Alle ausgewerteten Zellen folgen den beiden beschriebenen Kurvenverlaufstypen. Mit dieser Bewertung lassen sich kritische Betriebszustände erkennen. Im Beispiel sind die Zellen in Abbildung 3 gut verfügbar, die Zellen in Abbildung 2 sind von der

Kapazität zu knapp bemessen und müssen nachgebessert werden. Wenn diese Zahlen und Grafiken schon in der Konstruktionsphase verfügbar sind, können Optimierungen frühzeitig erfolgen.

#### 4 Ausführungsbeispiel

Mit Hilfe eines Simulationsmodells wird die oben beschriebene Methode bereits frühzeitig im Planungsprozess einsetzbar. Wichtig sind insbesondere Prozessfolgen, Logistikabläufe, Datenhandling, Störungen und Fehlersituationen, sowie Kommunikation der Maschinen untereinander und mit weiteren Produktionsressourcen. Logistische Abläufe lassen sich prinzipiell auch mit Ablaufsimulation erfassen, die konkrete Steuerungssoftware wird hierbei jedoch abstrahiert, was keine Aussage auf die Software zulässt. Als Ausgangspunkt wird Virtuelle Inbetriebnahme gewählt, da hiermit das reale Anlagenverhalten steuerungstechnisch gut abgebildet wird und das Modell die Abläufe intuitiv verständlich darstellt. Das Verhaltensmodell wurde mit WinMOD von Mewes und Partner erstellt, die Visualisierung mit RF-Suite von EKS Intec GmbH.

Die Detailtiefe der Simulation lässt sich durch ergänzende Programme erweitern, was ein Abwägen zwischen Genauigkeit und Aufwand erfordert. Um die Informationsverwaltung und –aufbereitung angemessen erfassen zu können, müssen alle von der Digitalisierung betroffenen Automationsebenen in der Simulation erfasst werden. Auf der Sensor-/ Aktorebene sind zunehmend Cyber-Physical-Systems im Einsatz, vernetzte Komponenten, die untereinander und über das Internet kommunizieren. Die Datenmenge und –verfügbarkeit in der Feldebene steigt und es ist eine wachsende Herausforderung, aus den Rohdaten verwertbare Informationen zu gewinnen. Die Feldebene wird durch die Virtuelle Inbetriebnahme bereits adäquat erfasst. Das Beispielmodell wird darüber hinaus um eine Integrationsumgebung für das Manufacturing Execution System MES ergänzt. Eine Testumgebung der übergeordneten Steuerung und Datenbank auf einer virtuellen Maschine mit VM Ware Player bildet Auswerterroutinen des MES-Systems ab. Dies beinhaltet insbesondere die Auftragsverwaltung, Qualitäts-, Ergebnis- und Betriebsdatenerfassung, Verwaltung der Bauteildaten und Anlagen- und Maschinenparametrierung. Das darüber liegende ERP-Programm (Enterprise Resource Planning) wird nicht in die Simulation mit aufgenommen, da diese Informationen überwiegend statisch gepflegt werden und die relevanten Daten auch im MES abgegriffen werden können. Daher reicht für das beschriebene Beispiel ein Modell, das die Spanne von Ein-/ Ausgangssignalebene bis zur MES-Ebene umfasst. Auf die detaillierte Simulation der spanenden Bearbeitung innerhalb der Maschine wird verzichtet, da von diesen Inhalten nur wenig Aussagekraft auf die Automatisierung zu erwarten ist.

Mit einem Stresstest mit schnellen Derivatewechslern und variablem Produktionsvolumen werden die Projektzielwerte bewertet. Damit kann beobachtet werden, in wie weit die Steuerung den gestellten Herausforderungen gerecht wird. Durch die für den Bediener unüberschaubare Datenmenge und Autonomie eigenintelligenter Produktionssysteme, ist eine geschlossen analytische Beschreibung der Prozesse nicht mehr möglich. Stattdessen können Lernsituationen durchfahren und positive Maschinenreaktionen verstärkt werden. Dazu müssen vorgegebene Zielwerte maximiert, minimiert oder auf einen Zielwert hin optimiert werden. In der

Entwicklungsumgebung werden dem Werker die zu optimierenden Werte angezeigt. Durch Kennzahlendarstellung und Farbumschlag werden Tendenzen intuitiv verständlich und können durch Variation der Anlagenkonditionen optimiert werden; in der Beispieldarstellung Abbildung 2 wurden exemplarisch die Zielwerte Ausbringung (Soll-/Ist-Vergleich), Energieverbrauch und technische Verfügbarkeit herausgegriffen. So lässt sich menschliche Kreativität und Erfahrung mit maschineller Zuverlässigkeit und Rechengeschwindigkeit verbinden.

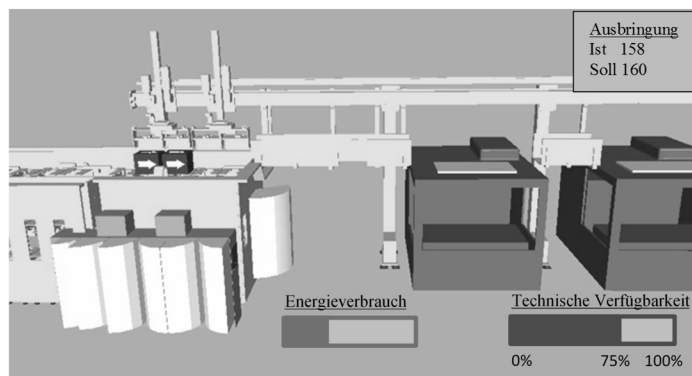


Abbildung 6: Simulationsumgebung

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Erweiterung einer klassischen Virtuellen Inbetriebnahme lassen sich Produktionssysteme auf die Eignung für die Herausforderung der Digitalisierung überprüfen. Das Beispielprojekt zielt auf die Flexibilität des Systems ab. Die Ziele der Automatisierung sind vielfältig (Pfrommer et al. 2014), die beschriebene Methode lässt sich auch auf andere Zieldefinitionen anwenden. Wenn die Auswertungen früh im Planungsprozess eingebunden werden, können Optimierungen bereits in der Konstruktions- und Entwicklungsphase durchgeführt werden. Hierfür eignet sich besonders Virtuelle Inbetriebnahme, da die Steuerungsstruktur gut abgebildet wird, die Darstellung intuitiv verständlich und Virtuelle Inbetriebnahme mittlerweile im Projektablauf weit verbreitet ist. Damit können die Anlagen auf variablen Produktionszuständen geprüft werden. Ungünstige Zustände können durch z. B. durch eine veränderte Verteilung der Prozesse verbessert werden.

Die Modellerstellung ist jedoch recht aufwändig, gerade bei umfangreichen Systemen. CAD Daten sind nicht immer verfügbar, sie liegen nicht in einem nutzbaren Format oder müssen umfangreich formatiert werden. Im beschriebenen Projekt waren das Einlesen und Anpassen der Konstruktionsdaten recht aufwändig, insbesondere die Kinematisierung. Im Weiteren wurden Bibliothekselemente für die wichtigsten Elemente erstellt. Außerdem muss es die Performance zulassen, auch große Anlagen über mehrere SPS sicher abzubilden. Der Hard- und Softwareumfang wird schnell umfangreich und aufwändig. Die Simulationemethode für Komplettsysteme muss weiter stabilisiert werden. Im beschriebenen Beispiel kann der Aufwand bei einer Vielzahl beteiligter Fertigungseinrichtungen reduziert werden, indem parallele,

identische Maschinen durch Verhaltensmodelle ersetzt werden, wodurch jedoch die Detailtiefe der Simulation abstrahiert wird und die Aussagekraft geprüft werden muss.

## Literatur

- Ernst & Young, Bitcom Research (Hrsg.): Industrie 4.0 – das unbekannte Wesen. Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. 2016.
- Forschungsunion und acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft (Hrsg.). Frankfurt/ Main 2013
- Lay, G., Schirrmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion. In: Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung 22 (2001), Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, S. 12.
- Nyhius, P., Reinhart, G., Eberhard, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. TEWISS: Hannover 2008.
- Pfrommer, J., Schleipen, M., Usländer, T., Epple, U., Heidel, R., Urbas, L., Sauer, O., Beyerer, J.: Begrifflichkeiten um Industrie 4.0 – Ordnung im Sprachwirrwarr. In: Jumar, U., Diedrich, C. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme. Institut für Automation und Kommunikation Ifak e.V. Magdeburg 2014, S. 8 – 15.