

Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion

Industry 4.0 – Fields of Action of the Digital Factory to Optimize Resource Efficiency in Production Processes

Björn Krückhans, Horst Meier, Ruhr-Universität Bochum, Bochum (Germany),
krueckhans@lps.ruhr-uni-bochum.de, meier@lps.ruhr-uni-bochum.de

Abstract: This paper derives a framework for plants suitable for industry 4.0 to improve interoperable communications between virtual and real components. The need to optimize the automation pyramid is scientifically derived and described. New terms are delineated in the designed framework. Resource efficiency is anchored as an optimization objective in the framework. Different methods are shown to illustrate and describe consumption profiles. The focus of modeling is therefore not purely on the energy consumption, but on the entire consumption of resources. The described concepts will be validated in industry-related research and development project.

1 Einleitung

Das Thema „Industrie 4.0“ ist in aller Munde und wird im Rahmen der 2020 Strategie des BMBF als wesentliches Zukunftsprojekt gesehen. Insbesondere mit dem neuen Begriff „Cyber-Physical System“ (CPS) wird ein erhebliches Optimierungspotenzial zukünftiger ganzheitlicher Produktionsprozesse verknüpft und erwartet. Die eingebetteten Systeme sollen die „Smart Factory“ weiter vorantreiben und Produktionsstätten auf globaler Ebene vernetzen.

CPS umfassen „eingebettete Systeme, Logistik-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken [...]“ (Geisberger und Broy 2012).

Die virtuellen Techniken der Digitalen Fabrik bieten in diesem Umfeld eine optimale Ergänzung, um vernetzte CPS mit zusätzlichen Erkenntnissen zu versorgen. Durch eine Online-Kopplung der verteilten interoperablen Systeme kann die bestehende Idee der Vernetzung der realen und virtuellen Fabrik weiter gedacht werden. Aufgrund des großen Fortschritts im Bereich der industriellen Kommunikation sind die angestrebten Ziele - im Gegensatz zu CIM - greifbar, meint ebenfalls Roland Bent. „CIM ist damals gescheitert, weil wir die Komplexität der Systeme nicht handeln konnten“ (Roland

Bent, Geschäftsführer Phoenix Contact; in Hensel 2012). Bisherige Konzepte der Automatisierungspyramide müssen im Zuge der vierten industriellen Revolution neu durchdacht werden, meint ebenfalls Olaf Sauer. „Die Automatisierungspyramide, wie wir sie bisher kennen, wird sich in absehbarer Zeit auflösen.“ (Olaf Sauer, Fraunhofer IOSB; in Hensel 2012)

Die Digitale Fabrik wird sich als ein wesentlicher Innovationstreiber in diesem Umfeld mit den neuen Möglichkeiten integrieren müssen. Trotzdem stellt sich die Frage, wie der praktische Nutzen einer großen Anzahl an kommunizierenden autonomen Systemen aussieht und welches Einsatzpotenzial erwartet wird? Insbesondere mit dem identifizierten produktionstechnischen Megatrend „Ressourceneffizienz“ (Abele und Reinhart 2011) werden große Erwartungen an die zukünftige Produktion am Standort Deutschland verknüpft.

Der folgende Beitrag leitet, aufgrund des Wandels durch Industrie 4.0, ein neues Framework für die industrielle Kommunikation her, sodass die Digitale Fabrik weiterhin das Bindeglied zwischen realer und virtueller Produktion bleibt.

2 Stand der Technik

2.1 Informationsarchitektur in Produktionsunternehmen

Bestehende Ansätze zeigen, dass es beispielhafte Entwürfe gibt, die Alternativen zur klassischen Automatisierungspyramide bieten. Abbildung 1 grenzt z.B. Planungs- und Steuerungsapplikationen von dem Produktionsprozess, diversen Feldgeräten und Steuerungskomponenten ab. Beide basieren auf einem einheitlichen Informationsmodell (Vogel-Heuser et al. 2009). Die Abgrenzung zwischen virtueller und realer Welt ist somit gegeben. Die Basis bildet ein gemeinsames Informationsmodell. Das im Folgenden vorgestellte Framework soll weitere Möglichkeiten aufzeigen, um das Modell der klassischen Automatisierungspyramide neu zu überdenken und zu bewerten. Der Fokus liegt dabei auf der Bildung eines Frameworks zur Steigerung der Ressourceneffizienz von prozessorientierten Anlagen mithilfe eines neuartigen Simulationsansatzes.

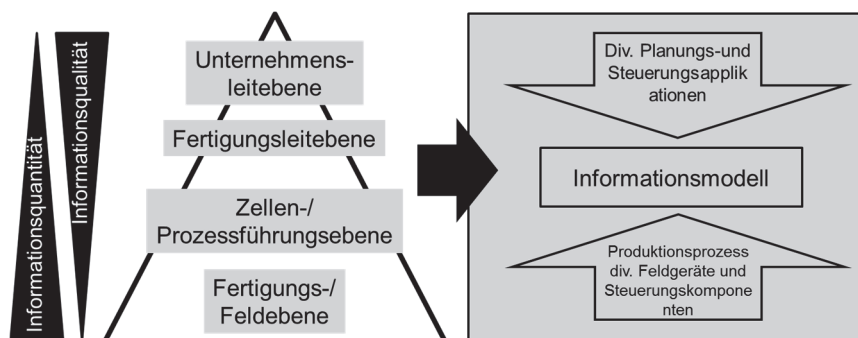


Abbildung 1: Veränderung der Informationsarchitektur in Produktionsunternehmen nach Vogel-Heuser et al. (2009)

2.2 Digitale Fabrik

Nach VDI 4499 wird die Digitale Fabrik als „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u.a. der Simulation und 3D-Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ definiert.

Rechnergestützte Werkzeuge und Methoden ermöglichen es, Produkte und Prozesse virtuell in Modellen abzubilden, um die geplante Produktion numerisch zu optimieren und so einen fehlerfreien Betrieb zu erzeugen, der in die realen Fabrik übernommen werden kann. Hierdurch kann die reale Produktion laufend überwacht und verbessert werden. Die Digitale Fabrik ist ein integriertes, digitales Modell eines Produktionsunternehmens, womit auf Kundenanforderungen und Markteinflüsse schnellstmöglich reagiert werden kann und stellt ein Bindeglied zwischen realer und virtueller Produktion dar. (Hehenberger 2011)

Der Einbezug des Faktors „Energie“ ist mittlerweile in gängigen Materialflusssimulatoren implementiert (z.B. Plant Simulation 11). Dort können der statische Energieverbrauch in unterschiedlichen Betriebszuständen und die nötigen Übergangszeiten mit abgebildet und ausgewertet werden.

3 Handlungsbedarf

Hehenberger bezeichnet die Digitale Fabrik als Bindeglied zwischen realer und virtueller Produktion. Aufgrund der informationstechnischen Änderungen im realen Umfeld durch CPS, muss sich ebenfalls die virtuelle Welt anpassen.

Somit ergeben sich, durch die vierte industrielle Revolution, Chancen und Risiken für die reale und die virtuelle Fabrik.

Das Potenzial der Digitalen Fabrik und ihren Werkzeugen muss deutlich herausgearbeitet werden, sodass erkennbar wird, dass Simulationsanwendungen maßgebliche Werkzeuge zur Umsetzung der innovativen Ideen sind. Die Kommunikation der realen und virtuellen Welt wird auf eine neue interoperable Ebene gehoben werden müssen. Die Kombination von eingebetteten Systeme und der Digitalen Fabrik ermöglicht viele neue Denkansätze zur Überarbeitung der klassischen Automatisierungspyramide. Am Beispiel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts rebas wird das Potenzial des neuartigen Simulationsgedanken theoretisch und praktisch am Beispiel einer prozessorientierten und diskreten Produktion offengelegt. Wesentlicher Schwerpunkt wird hier der produktionstechnische Megatrend „Ressourceneffizienz“ sein, da die alleinige Betrachtung des Themas „Energieeffizienz“ nicht mehr ausreichend ist und alle Stellhebel mit betrachtet werden müssen. Eine klar definierte Schnittstelle zwischen der realen Fabrik und dem digitalen Modell muss geschaffen werden (Abb. 2), die die klassische Verknüpfung von realer und virtueller Welt um den Ressourcenverbrauch erweitert bzw. näher spezifiziert. Dieses erweiterte Konzept muss zusätzlich in ein Framework eingebettet werden, sodass es in einer Industrie 4.0-tauglichen Produktionsumgebung integriert und bestehen kann.

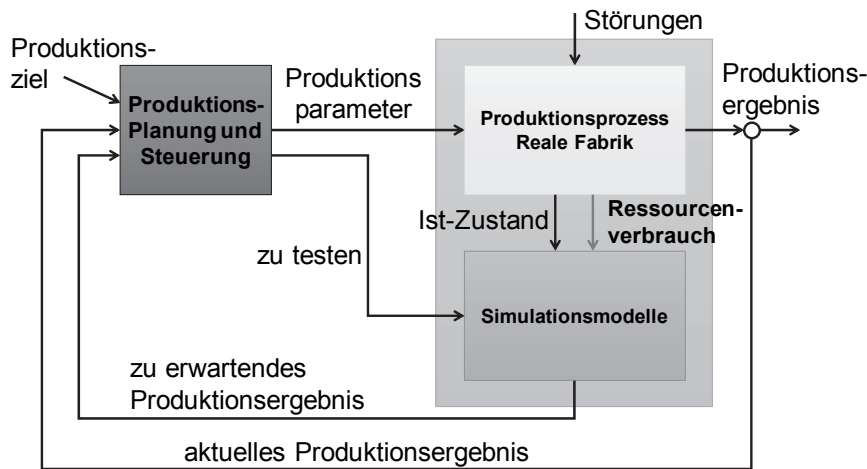


Abbildung 2: Integration der Digitalen Fabrik nach Kühn (2006) mit einer erweiterten Datenbasis „Ressourcenverbrauch“, die den Datenaustausch von Energie- und Materialverbräuchen zwischen der realen Fabrik und dem Simulationsmodell näher spezifiziert.

Das im Folgenden vorgestellte Framework spiegelt ebenfalls die Visionen der Informationstechnik in der Fabrik der Zukunft wieder (Sauer 2013) und tangiert diese Megatrends mit innovativen Ansätzen.

4 Entwicklung eines Frameworks für interoperable Systeme zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion

4.1 Die Digitale Fabrik als Element der vierten industriellen Revolution

Elemente in einem Produktionsnetzwerk führen Stoff- und/ oder Informationsumwandlungen durch. Diese Elemente können virtuell oder real sein. Jeder virtuelle oder reale Netzwerkteilnehmer lässt sich abstrahiert darstellen (Abb. 3). Beide Typen sollen, durch die Bemühungen in der vierten industriellen Revolution, immer besser Zusammenarbeiten und kommunizieren können. Diese neuen Kommunikationsverbünde müssen jedoch geregelt und strukturiert werden, sodass eine belastbare Infrastruktur in einem interoperablen Umfeld entsteht.

Bevor die Produktion sich eigenständig optimieren und steuern kann, brauchen wir eine bessere Kopplung zwischen virtuellen und realen Elementen, bestätigt Dieter Wegener. „Wir brauchen zunächst das Zusammenwachsen der realen und virtuellen Welt – und das über den ganzen Produkt-Lebenszyklus vom Produkt-Design, über das Fabrik- und Anlagendesign, das Automatisierungsdesign, bis hin zur Produktion.“ (Prof. Dieter Wegener, Siemens; in Happacher 2013)

Das vorgestellte Framework (Abb. 3) geht neue Wege auf dem Gebiet der industriellen Kommunikation. Die beschriebenen Elemente im Produktionsnetzwerk

werden vorab, in Abhängigkeit der verfügbaren Umwandlungsfähigkeiten des Elementes, in drei Kategorien strukturiert angeordnet. Unterteilt werden virtuelle, hybride und reale Systeme. Virtuelle Elemente wandeln informationstechnische Signale um, wohingegen reale Elemente sich auf die Wandlung von Stoffen konzentrieren. Hybride Elemente bilden eine Brücke und können sowohl Informations- als auch Stoffumwandlungen durchführen.

Eine besondere Rolle bekommen zusätzlich noch Energieumwandlungsprozesse bei dieser Betrachtung. Diese werden übergeordnet bei allen Elementen betrachtet und mit ausgewertet, sodass das Ziel des ressourceneffizienten und interoperablen Produktionsverbundes gewährleistet werden kann.

Die Schnittstellen, an den Übergängen der Ebenen, werden hier als virtuelle und reale Ankopplung bezeichnet. Durch diese Ankopplung ist es möglich, dass alle Elemente auf eine definierte Weise miteinander verbunden sind und mit unterschiedlichen Zugriffsverfahren Einfluss im Verbund nehmen können.

Die Kommunikationsregeln werden hier durch Domänen vorgegeben. Eine Domäne bezeichnet hier eine Zusammenfassung von mehreren Elementen, die ein Wissens- oder Fachgebiet bündeln (ähnlich einer Abteilung). Standardisierte Kommunikationsregeln zwischen diesen Domänen sollten die Rechtevergabe im Verbund regeln. Als Ausnahme könnten zusätzliche „Domänenkopplungen“ dafür sorgen, dass Domänenübergreifend eine bessere Zusammenarbeit gewährleistet wird.

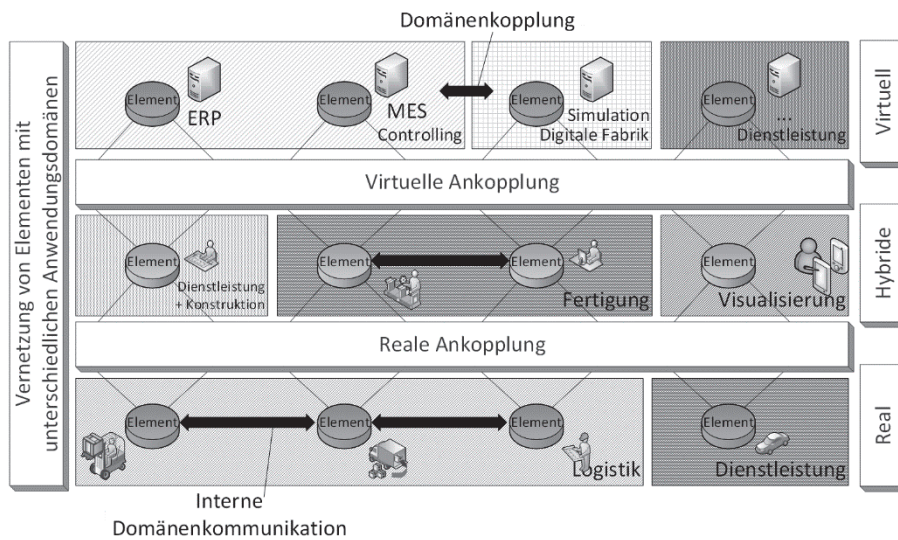


Abbildung 3: Framework „Industrial Communication“ mit dem Schwerpunkt Ressourceneffizienz

In Abbildung 3 ist z.B. eine Kopplung zwischen der Digitalen Fabrik und dem Controlling bzw. dem MES eingetragen. Diese soll signalisieren, dass eine enge informationstechnische Bindung zwischen diesen agentenähnlichen Elementen bestehen soll. Durch diese Maßnahme ist eine autonome, kognitive, kommunikative, proaktive, gesicherte und soziale Kommunikation möglich.

Insbesondere diese Kopplung und die Integration der Digitalen Fabrik als agentenähnliches Element, das im Produktionsverbund definierte Aufgaben autonom übernehmen kann, ist eine große Chance zur Integration verschiedener Simulationslösungen. Im Gegensatz zur bisherigen Integration (Abb. 2) sind die Erkenntnisse aus digitalen Modellen nicht mehr optionale parallel laufende Aktivitäten, sondern feste Bestandteile des Ganzen. Ebenfalls Gerd Hoppe ist der Meinung, dass wir mit Industrie 4.0 „[...] eine Verbindung zwischen den Methoden der virtuellen Welt, der Informationstechnologie und einem physischen System“ (Gerd Hoppe, Beckhoff Automation; in Hensel 2012) schaffen können.

4.2 Integration des Ressourcenverbrauchs realer Anlagen in die Digitale Fabrik

Als Basis wird ein Simulationsmodell für verkettete Anlagen entwickelt, in welchem anschließend die realen Anlagendaten mit den Auslegungsdaten des Herstellers validiert und verglichen werden. Mit Hilfe dieses Modells werden ressourcenoptimierte Regelkreise entworfen, die auf der vorhandenen Anlagentechnik basieren. Wie im Kapitel Handlungsbedarf gekennzeichnet, liegt der Fokus der Modellierung dabei nicht nur auf der Abbildung des Energieverbrauchs, sondern von n vielen Ressourcen.

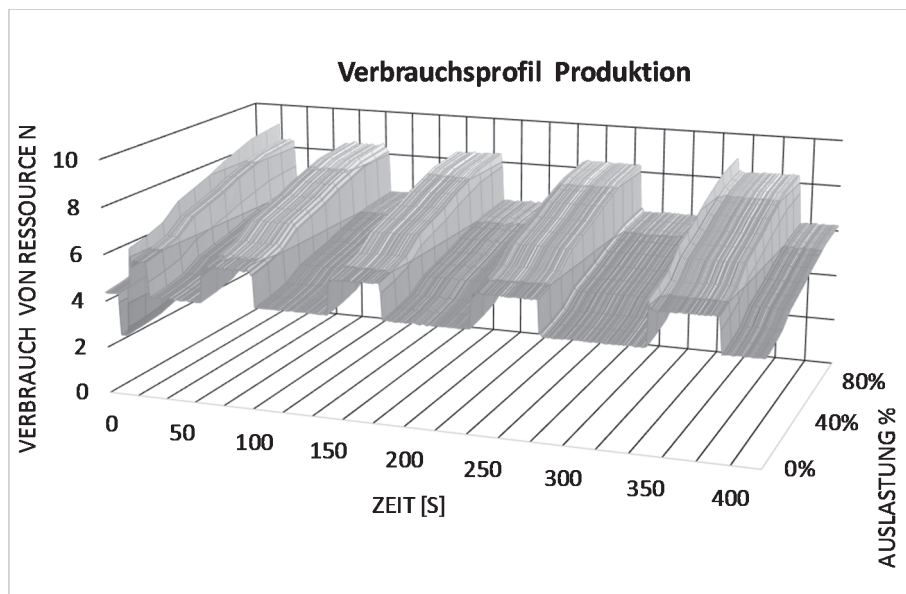


Abbildung 4: Beispielhaftes Verbrauchsprofil einer Bearbeitungsstation im Produktionsnetzwerk. Die Profile werden zyklusbezogen in Abhängigkeit der prozentualen Auslastung, des Betriebszustandes und der betrachteten Ressource erstellt. Die Verknüpfung von unterschiedlichen Betriebszuständen wird über Transitionen realisiert.

Als Grundvoraussetzung dient die zyklusbezogene Messung des Verbrauchsprofils in Abhängigkeit der prozentualen Auslastung, des Betriebszustandes und der betrachteten Ressource (Abb. 4).

Die Aufbereitung der Daten für die Abbildung im Simulationsmodell erfolgt anschließend in unterschiedlichen Granularitäten. Je nach Anlagentyp müssen unterschiedliche Modelle verwendet werden, um eine bedarfsgerechte Auswertung durchführen zu können. Die wesentlichen Faktoren bei der Wahl des Abbildungsmodells sind die Zykluszeit der Bearbeitung und die anlagenspezifische Verkettung je nach Prozesstyp (Einzel- bis Massenfertigung). Die in Abbildung 5 dargestellte dreistufige Gliederung, bildet eine sinnvolle Einteilung, um simulationskonforme Daten zu erhalten.

In Funktion R_1 wird die Messung detailliert über den gesamten Zyklusverlauf eines Bearbeitungsschrittes abgebildet. Bei langen Bearbeitungszyklen hat diese Variante den Vorteil, dass wesentlich genauere Aussagen hinsichtlich der Teilprozesse und Nebenaggregate getroffen werden können. In Abhängigkeit des verwendeten Messsystems wird die Auflösung der Messung verringert, sodass der Verbrauch über ein definiertes Zeitinkrement Δt angegeben wird. Der zeitliche Verlauf des Verbrauchs wird in Funktion R_3 nicht mehr berücksichtigt, sondern konstant über einen definierten Betrachtungszeitraum gemittelt und pro Zeiteinheit angegeben. Eine Aussage über mögliche Lastspitzen geht somit verloren. Der Verbrauch kann durch diese Vorgehensweise taktbezogen ermittelt werden, sodass Bearbeitungsmaschinen mit sehr geringen Zykluszeiten abgebildet werden können.

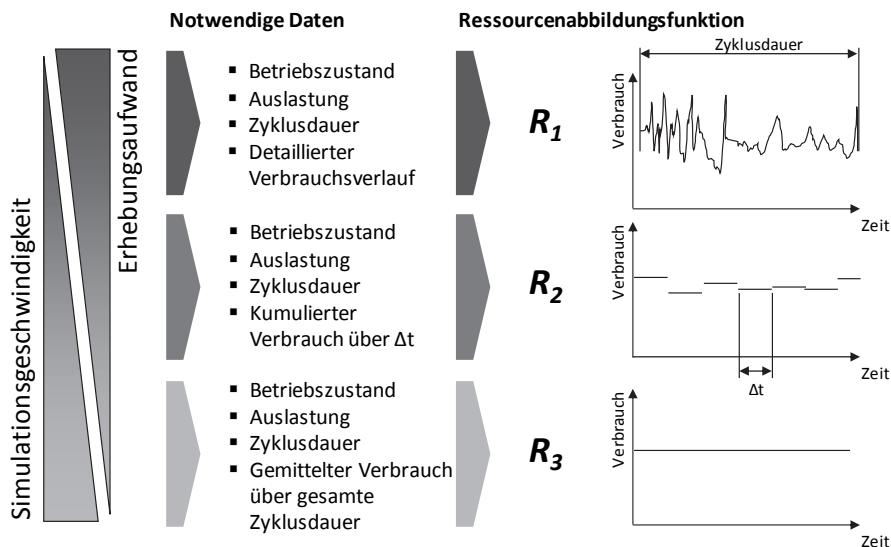


Abbildung 5: Darstellung von notwendigen Daten zur Implementierung von drei verschiedenen Funktionen, zur Abbildung von Ressourcenverbräuchen in diskreten Simulationsmodellen. Simulationsechwindigkeit und Erhebungsaufwand sind gegenläufige Faktoren.

Die Einbindung der Methoden erfolgt, nach Aufbereitung der Daten, über das parametrisierte Verbrauchsprofil anhand von abgeleiteten Funktionen oder Tabellen. Pro Betriebszustand liegt dem Simulanten ein Verbrauchskennfeld zur Abbildung vor.

Der Wechsel von Betriebszuständen erfolgt über Transitionsbeziehungen, sodass ebenfalls die zeitlichen und verbrauchsorientierten Änderungen mit in die Optimierung mit einbezogen werden können. Diese Verknüpfung führt dazu, dass sowohl die manuelle Auswertung des Simulanten oder die automatische Optimierung anhand programmierter Algorithmen erfolgen kann.

5 Aufbau von neuen interoperablen Konzepten zwischen der Digitalen Fabrik und Industrie 4.0

Unter dem Stichwort Retro-Fitting kann das Einsatzpotenzial einer modernen „Industrie 4.0-tauglichen-Anlagentechnik“ in Verbindung mit einer „Industrie 4.0-tauglichen-Digitalen Fabrik“ thematisiert und bewertet werden. Wie bereits als Handlungsbedarf gekennzeichnet, muss sich die digitale Fabrik an das veränderte Umfeld der realen Produktion (Industrie 4.0) anpassen. Industrie 4.0-taugliche Komponenten in der realen Produktion, können nach Integration in das Netzwerk eine vordefinierte Rolle einnehmen („Plug in & Produce“) und automatisch anfangen zu produzieren. Durch diese zukunftsweisende Betrachtung von Maschinen und Anlagen im realen Produktionsumfeld ergeben sich neue Anforderungen an die digitalen Komponenten: Simulationsanwendungen der Digitalen Fabrik sollten somit ebenfalls nach erfolgreicher Integration in ein solches System nach dem Prinzip „Plug in & Simulate“ arbeiten können.

Schnittstellenstandards wie OPC, u.Ä. sowie standardisierte Kommunikationsprotokolle mit Manufacturing Execution Systemen (MES) sind in diesem Zusammenhang wichtige Grundlagen zur Umsetzung der Bestrebungen. Die bisherigen Standards der industriellen Kommunikation müssen dazu vereinheitlicht werden, um definierte Kommunikationskanäle zur Verfügung zu haben. Bei den zukünftigen Standards muss der immer wichtigere Faktor Ressourceneffizienz eine wesentliche Rolle spielen, sodass bereits wesentliche Daten über reservierte Datenbausteine/ Adressbereiche übertragen werden können.

6 Validierung

Im Rahmen des Projekts rebas werden seit 2012 Verfahren zur Senkung des Ressourcenverbrauchs verketteter Abfüllanlagen entwickelt und der erwähnte neuartige Simulationsansatz für neue und bestehende Anlagen industrienah entwickelt. Eine Abfüllanlage besteht aus einer Verkettung von unterschiedlichen Maschinen, die, je nach Alter, unterschiedliche Kommunikationsstrukturen und Protokolle aufweisen. Im Prozess werden die Kreisläufe Paletten-, Kisten- und Flaschentransport unterschieden und ausgewertet.

Als Ressourcen werden neben dem Energieverbrauch alle Stoffe betrachtet, die während des gesamten Prozessablaufes eingesetzt werden, in Form von Verpackungen, Hilfsstoffen und den Anlagenteilen selbst. Hinzu kommen Verluste beim abzufüllenden Medium.

Um das Gesamtziel zu erreichen, werden folgende Schritte im Projekt durchlaufen:

Zur Überwachung der aktuellen Verbräuche erfolgt die Konzeption und Integration geeigneter Messeinrichtungen und Auswertungsverfahren.

Die Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen an den Steuerungen werden so erweitert, dass die ressourcenrelevanten Informationen standardisiert zwischen allen Elementen im Netzwerk kommuniziert werden können. Eine Auswertung kann dezentral vom MES getroffen werden, welches auftragsrelevante Simulationsläufe mit Daten aus vergangenen Produktionen durchführen kann. Eine ressourcenorientierte Planung ist somit auf Basis eines MES möglich und zielführend. Zudem werden Kennzahlen ausgewählt, um Anlagenverhalten und -zustände detailliert abbilden zu können. Aus den konsolidierten Messdaten werden neuartige, ressourcenschonende Betriebspunkte für die Anlage abgeleitet. Dies erfolgt durch die Analyse der Wirkzusammenhänge der Einzelkomponenten sowie durch die Auswertung der Lastzustände und der Verbräuche.

Ergänzende Informationen werden bei dieser Analyse durch dezentrale Simulationsläufe erzeugt. Die Simulationsanwendung ist somit ein zusätzliches dezentrales Element im industriellen Kommunikationsnetzwerk. Anfragen von realen Steuerungen können agentenorientiert automatisch durchgeführt werden und Ergebnisse zurückmelden. Bei der Findung von ressourcenoptimalen Betriebszuständen liefern die virtuellen Modelle, durch ihre Vielzahl an Optimierungsalgorithmen und –möglichkeiten eine zuverlässige und detailliertere Aussage als ein MES. Zur Einordnung dieses Betriebspunktes zwischen den Zielgrößen Kosten, Qualität, Zeit und Ressourceneinsatz (Meier et al. 2012) werden im Simulationsmodell Variationen der Berg'schen Kurve / des V-Graphen erprobt und ausgewertet. Die entstandenen Vorgaben für den Anlagenbetrieb werden durch ein effizientes Anlagenlayout ergänzt, um Ressourcenverbräuche schon in der Entwicklungsphase beeinflussen zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vierte industrielle Revolution ist für den Standort Deutschland ein wichtiger Faktor, um nachhaltig wirtschaftlich produzieren zu können. Viele Betreiber Fragen sich, wie ein Industrie 4.0-konformes Retro-Fit einer bestehenden Anlagen aussieht und ob es sich lohnt? Der Megatrend „Ressourceneffizienz“ muss in diesem neuen Konstrukt ebenfalls integriert werden, sodass durch interoperable Zusammenarbeit auf realer und virtueller Ebene verbrauchsarme Betriebspunkte gemeinsam anvisiert werden können. Das vorgestellte Framework definiert die nötigen automatisierungstechnischen Ebenen und Verknüpfungen. Die beschriebenen Anwendungsdomänen regeln die Rechtevergabe im gesamten Kommunikationsverbund, welcher aus realen und virtuellen Elementen besteht. Als Datenbasis für die virtuellen Elemente wurden unterschiedliche Verfahren vorgestellt, die dazu dienen, den anlagenbezogenen Verbrauch virtuell abzubilden. Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt rebas werden die Konzepte industrienah validiert.

Allerdings ist es nicht für jeden Anwender sinnvoll, die komplette Produktion „Industrie 4.0-tauglich“ aufzurüsten. Ein übergeordnetes Bewertungssystem wird in weiteren Forschungsarbeiten dazu dienen, die Wirtschaftlichkeit einer möglichen Umrüstung zu berechnen. Ein Industrie 4.0-konformes Retro-Fit konventioneller Anlagen erscheint kostspieliger als die Optimierung flexibler hochautomatisierter

Produktionsanlagen. Trotzdem muss das Bewertungssystem anlagenindividuelle Kommunikationsprotokolle und Standards berücksichtigen und Potenziale einschätzen.

Das, in Arbeit befindliche, endgültige Bewertungskonzept ermöglicht es, die neuen Denkansätze zur interoperablen Verbindung von virtuellen und realen „Industrie 4.0-tauglichen“ Komponenten gegenüber zu stellen.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „rebas - Ressourceneffiziente Entwicklung und optimierter Betrieb von Abfüllanlagen in der Lebensmittelindustrie durch den Einsatz einer neuartigen Simulationssoftware“ innerhalb des Ziel2-Calls "Ressource.NRW", das vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz gefördert und von der Effizienz-Agentur NRW betreut wird.

Literatur

- Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.
- Geisberger, E.; Broy, M.: agenda CPS - Integrierte Forschungsagenda - Cyber-Physical Systems. München, Berlin: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2012.
- Happacher, M.: Industrie 4.0 - Wer verdient an der Fabrik der Zukunft. http://www.computer-automation.de/feldebene/vernetzung/fachwissen/article/95430/0/Wer_verdient_a_n_der_Fabrik_der_Zukunft/. VDI-Zukunftskongress 2013.
- Hehenberger, P.: Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- Hensel, R.: Industrie 4.0 revolutioniert die Produktion. Düsseldorf: VDI-Nachrichten 2012.
- Kühn, W.: Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Carl Hanser Verlag 2006.
- Meier, H.; Khalaf, S.; Krückhans, B.: Simulationsprozess für energieeffiziente Produktion. Marburg: IT & Production 2012, S.80-83.
- Sauer, O.: Informationstechnik für die Fabrik der Zukunft. Berlin: Gito mbH Verlag 2013, S.11-14.
- Vogel-Heuser, B.; Kegel, G.; Bender, K.; Wucherer, K: Global information architecture for industrial automation. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH 2009, S.108-115.