

1 Einleitung

„In einer informationsgeladenen Welt bedeutet der Reichtum an Informationen, dass es an etwas Anderem mangelt: an dem, was auch immer es sei, das Informationen konsumiert. [...] Also gebiert ein Reichtum an Information eine Armut an Aufmerksamkeit und eine Notwendigkeit, diese Aufmerksamkeit angesichts der Überfülle an Informationsquellen effizient zu allokalieren.“ (SIMON 1971, S. 40f.)

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Das heutige Umfeld von Unternehmen ist geprägt von wachsendem Preis- und Wettbewerbsdruck auf globalen Märkten und der zunehmenden Bedeutung der Zielgrößen *Lieferzeit* und *Liefertreue*, bei stetig zunehmender Komplexität der Fertigungsaufträge (NYHUIS ET AL. 2009, S. 239; (SCHUH 2013). Deshalb müssen Unternehmen immer schneller und genauer planen, um sich ihre Wettbewerbsfähigkeit auch in Zukunft zu bewahren (SCHUH 2013, S. 13). Aus der steigenden Komplexität von Produkten, Technologien und Organisationen, aus dem Abbau von Mengen- und Zeitpuffern sowie der zunehmenden Marktdynamik resultiert eine höhere Störanfälligkeit (MEYER 2007, S. 15). Eine effiziente Reaktion auf Störungen oder andere Hemmnisse im Produktionsablauf ist für die Einhaltung von geplanten Terminen unerlässlich (NIEHUES ET AL. 2014, S. 893). So liegt ein wesentlicher Grund für niedrige Liefertreue in mangelnder Verfügbarkeit von Echtzeitinformationen und fehlenden IT-Systemen, die eine adaptive Reaktion auf Störungen und andere Abweichungen vom Planverlauf ermöglichen (NIEHUES ET AL. 2014, S. 893). Je dynamischer sich das Wettbewerbsumfeld gestaltet, desto wichtiger wird eine valide, echtzeit-nahe Abbildung des Ist- Zustands als Entscheidungsgrundlage für den tatsächlich notwendigen Handlungsbedarf (SCHUH ET AL. 2011b, S. 62).

Die Planung und Durchführung der Abwicklung von Kundenaufträgen wird heute nach wie vor im operativen Aspekt der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) fokussiert und ist mit ihren Aufgaben und Prozessen nahezu vollständig in IT-Systemen abgebildet (vgl. SCHUH U. STICH 2012, S. 29; CARR 2004, S. 10FF.; BAUHOFF ET AL. 2011, S. 13). Jedoch mangelt es für die notwendige Beherrschung der dynamischen Einflüsse auf die Prozessabläufe innerhalb der Auftragsabwicklung an der Nutzung entscheidungsrelevanter und dabei insbesondere echtzeitnaher Informationen (vgl. FLEISCH U. CHRIST, O. DIERKES, M. 2005, S. 4; GÜNTNER 2008, S. 389; SCHUH ET AL. 2008, S. 268; SWAFFORD ET AL. 2008, S. 288; WINDT 2008, S. 352; ZHOU 2009, S. 252; MEIER 2013, S. 2; BROSE 2011, S. 2) In der klassischen PPS wird die intrinsische Systemdynamik, die Reaktion auf Marktdynamik mit rollierender Planung und Optimierung, nicht berücksichtigt (vgl. SCHOLZ-REITER ET AL. 2008, S. 110). Die Planung erfolgt derzeit auf Schätzwerten, tatsächlich ermittelte Werte fließen im Rahmen der Steuerung kaum in die Planungsprozesse ein (vgl. MEIER 2013, S. 3). Die Ist-Situation wird nicht ausreichend genau erfasst, was sowohl Informationen zum konkreten Auftragsfortschritt als auch auftretende Störungen umfasst (vgl. FLEISCH U. CHRIST, O. DIERKES, M. 2005, S. 12; KLETTI 2006, S. 86FF.; MEIER 2013, S.

3f). Ursache hierfür ist unter anderem die fehlende oder fehlerhafte, häufig zeitverzögerte und unzureichend verdichtete Rückkopplung entscheidungsrelevanter Informationen an die planenden und steuernden Instanzen (vgl. FLEISCH U. CHRIST, O. DIERKES, M. 2005, S. 4; GÜNTNER 2008, S. 389; WINDT 2008, S. 352; SCHUH ET AL. 2008, S. 268; SWAFFORD ET AL. 2008, S. 288ff.; ZHOU 2009, S. 252ff.; SCHUH ET AL. 2011b, S. 68f.; WIENDAHL 2011, S. 11; SPATH ET AL. 2013, S. 92). So weichen die, mittels der IT-Systeme ermittelten, Planungsergebnisse von der tatsächlichen Prozesssituation ab (vgl. FLEISCH U. CHRIST, O. DIERKES, M. 2005, S. 12; WINDT 2006, S. 282; WILDEMAN 2008, S. 20; MEIER 2013, S. 2; BROSE 2011, S. 2).

Eine automatische, frühzeitige Erkennung von Ereignissen lokal, direkt am Ort der Entstehung, und eine zugehörige Benachrichtigung möglichst in Echtzeit, sind wünschenswert (ZÖLLNER ET AL. 2012, S. 201). Zwar stellen moderne Informationstechnologien wie RFID (Radiofrequenzidentifikation), drahtlose Sensornetze oder Maschinendatenerfassungs- und Betriebsdatenerfassungssysteme echtzeitnahe Informationen zur Verfügung (BROSE 2011, S. 2; ZÖLLNER ET AL. 2012, S. 201), allerdings sind die planenden und steuernden Instanzen nicht in der Lage, diese adäquat zu verarbeiten (vgl. BROSE 2011, S. 2; MEIER 2013, S. 2f; FLEISCH U. CHRIST, O. DIERKES, M. 2005, S. 3ff.; SCHUH 2010; ABELE U. REINHARDT 2011, S. 121f. u. 178; SCHOLZ-REITER ET AL. 2011, S. 17).

Um der Dynamik in der Auftragsabwicklung gerecht zu werden, empfiehlt sich die Überführung der meist statischen Fertigungssteuerung in eine dynamische Produktionsregelung (vgl. NYHUIS ET AL. 2009, S. 239). Neuere wissenschaftliche Ansätze wie u. a. das Internet der Dinge, das High Resolution Production Management oder das Konzept der cyber-physischen Produktionssysteme fokussieren in diesem Zusammenhang die Kombination regelungstechnischer Prinzipien mit Konzepten der Selbststeuerung und Selbstoptimierung (vgl. FLEISCH U. CHRIST, O. DIERKES, M. 2005; MEYER 2007, S. 31; FLEISCH ET AL. 2008; GIERTH 2009; BROSE 2011; WIENDAHL 2011; SCHUH ET AL. 2011a; MEIER 2013). Grundgedanke ist die Installation geschlossener Wirkungswege durch eine weitgehend automatisierte, kontinuierliche Informationsrückkopplung aus den Prozessen der Auftragsabwicklung. Verbunden mit der Dezentralisierung von Entscheidungsautonomie soll eine beschleunigte Reaktion auf Veränderungen der Planungssituation sowie eine höhere Kapazität zur Komplexitätsbewältigung gegenüber klassischen Ansätzen der hierarchischen Sukzessivplanung erreicht werden (GIERTH 2009, S. 32f.). Diesen Ansätzen ist gemein, dass sie durch zeitnahe Rückführung echter Ist-Daten in die Planungs- und Steuerungsebenen Prozesse und Systeme zur teilautomatisierten Regelung befähigen. (BROSE 2011, S. 2) Somit ist es notwendig, sämtliche Informationen echtzeitfähig zu beschaffen, zu verarbeiten und zwischen allen Unternehmensbereichen auszutauschen (SCHUH 2013, S. 13). Diese Entwicklung spiegelt sich im Paradigmenwechsel hin zu Informationsverarbeitung in Echtzeit in Industrie und Forschung wider (ANICIC 2011, S. 5). Das Potenzial frühzeitiger Informationen wird von einem Großteil der Unternehmen als hoch oder sehr hoch eingeschätzt (vgl. SPATH ET AL. 2013, S. 94).

Als allgemeine Anforderungen an Echtzeitsysteme gelten in der Literatur die Rechtzeitigkeit, Gleichzeitigkeit sowie eine spontane Reaktion auf Ereignisse (MEIER 2013, S. 25). In der Vergangenheit blieben Ereignisse entweder unentdeckt oder wurden nicht digital gemeldet. Die Anzahl an digitalen Ereignissen wächst rapide, da die Kosten hierfür sinken und die Verarbeitungsgeschwindigkeit zunimmt. (vgl. CHANDY U. SCHULTE 2010, S. XIV) Allgegenwärtige Rechenleistung wird ergänzt werden durch allgegenwärtige Sensorik (BOTTHOF ET AL. 2011, S. 5). Mittlerweile stehen im Bereich der Produktion leistungsstarke und günstige Sensoren und Aktoren zur Verfügung, wodurch der Einsatz von Echtzeitinformationen ins Blickfeld der Produktion rückt (SPATH ET AL. 2013, S. 22). Durch die sensorgestützte Vernetzung von intelligenten Maschinen und Produkten untereinander und mit übergreifenden Produktionsplanungssystemen lässt sich die Lücke zwischen Informationssystemen und der physischen Situation schließen (GEISBERGER 2012, S. 24; vgl. SPATH ET AL. 2013, S. 22). Die Integration von Sensordaten in verschiedene Anwendungen hat sowohl für Unternehmen als auch Privatpersonen in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Unternehmen aus zahlreichen Anwendungsbranchen sind mehr und mehr gefordert, aktuelle Informationen über den Ort und den Zustand von Waren, Produkten und Ressourcen zu kennen und mitteilen zu können. Neben der meist zentralen Positionsinformation sind heute auch weitere Sensorinformationen wie etwa Temperatur, Beschleunigung oder Luftfeuchtigkeit relevant. (BUSEMANN ET AL. 2013, S. 1)

Diese Sensoren erzeugen große Datenmengen in kurzen Taktzyklen. Die Daten sind sehr feingranular, enthalten nur wenige Informationen und stehen demnach lediglich auf einer sehr niedrigen Abstraktionsebene zur Verfügung. (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 42) Eine wesentliche technologische Herausforderung ist die schnelle Aufbereitung und Analyse der entstehenden Datenmengen, um die Lücke zwischen den Umengen an primitiven Daten und jenen mit hohem fachlichen Informationsgehalt zu schließen (vgl. ZANG ET AL. 2008, S. 543f; SPATH ET AL. 2013, S. 119; KELLNER U. FIEGE 2009, S. 95; CHANDY U. SCHULTE 2010, S. XIV; ECKERT U. BRY 2009, S. 1). Ohne zielorientierte Ableitung der benötigten Datenbasis ist weder die Abfrage noch die Sammlung aller Daten in Echtzeit machbar (vgl. KELLNER U. FIEGE 2009, S. 95; HOLZWART 2012, S. 6).

Diese durch Sensorik erzeugten Daten repräsentieren Ereignisse, welche bspw. in Form von Störungen oder Abweichungen im Prozessablauf auftreten. In dem kontinuierlichen Strom von feingranularen Daten gilt es, Beziehungen und Muster zu erkennen, hieraus höherwertige bzw. betrieblich aussagefähige Ereignisse zu generieren und bei Bedarf geeignete Aktionen einzuleiten (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 42). Einzelne Ereignisse sind isoliert betrachtet häufig wenig aussagekräftig. Entscheidend sind Fragestellungen auf der Ebene der betrieblichen Geschäftsprozesse, deren Antworten direkten Einfluss auf operative Entscheidungen haben (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 7). Die Beantwortung von Fragen mit hohem fachlichem Informationswert setzt ein *Verstehen* der Ereignisse und ihrer Zusammenhänge entlang der Prozesskette voraus. Verstehen bedeutet in diesem Kontext die Bewertung des Einflusses der Ereignisse auf die geschäftlichen Abläufe und strategischen Ziele des

Unternehmens. (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 7f.) Sensorereignisse müssen transformiert, klassifiziert, aggregiert und evaluiert werden (vgl. DUNKEL ET AL. 2010, S. 65).

Behindernd wirkt dabei häufig der Aufbau der betrieblichen Anwendungssystemwelten im Unternehmen, die vielfach durch Insellösungen geprägt und nicht ausreichend zu einem Gesamtsystem integriert sind (SCHUH ET AL. 2011b, S. 66). Die Automatisierungspyramide zeigt bereits, dass sich die industriellen Anwendungsszenarien in der Regel über mehrere Abstraktionsebenen, die jeweils einen eigenen Satz von Systemen, Sprachen und Engineering-Prozessen haben, erstrecken (KELLNER U. FIEGE 2009, S. 93). Konventionellen IT-Anwendungsarchitekturen liegt eine ablauforientierte Sicht auf die Unternehmensanwendungen zugrunde. Sie sind starr und unflexibel und können das Verständnis von Geschäftsereignissen und die zeitnahe Ableitung von fachlichen Reaktionen nicht leisten. (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 8; 24ff.; DUNKEL 2009a, S. 249) Ihr Schwerpunkt liegt in dem Ausführen von vordefinierten, klar strukturierten Prozessen (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 28). Sie besitzen, aufgrund einer starken Kopplung und synchroner Kommunikation, häufig nicht die erforderliche Flexibilität, um die fachliche Agilität entsprechend abzubilden (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 3; (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 24ff.)). Die nahtlose Integration von intelligenten Objekten, also Objekten, die durch Informationstechnologien eine Zusatzfunktion im betrieblichen Kontext umsetzen, erfordert ein neuartiges technisches Rahmenwerk (BEIGL ET AL. 2008, S. 177; vgl. hierzu auch NIEHUES ET AL. 2014, S. 894; DEINDL 2013, S. 17f.). Gesucht ist eine neue Art von Anwendungsarchitektur, die es ermöglicht, die Auswirkungen von Ereignissen auf die Unternehmensziele und -richtlinien sowie Geschäftsprozesse abzubilden (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 8). Bisherige Ansätze sind zumeist daten- und nicht prozessfokussiert (KUNZ ET AL. 2011, S. 194).

Die Ereignisorientierung als Architekturstil besitzt ein weitreichendes fachliches Potenzial (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 32) und eignet sich als informationstechnischer Lösungsansatz (vgl. ZANG ET AL. 2008, S. 544ff). Ereignisorientierte Architekturen (EDA) gewährleisten Echtzeitfähigkeit, hierdurch eine schnelle unternehmerische Reaktionsfähigkeit sowie eine höhere Effizienz der Prozessabläufe durch die wirklichkeitsnahe Modellierung fachlicher Prozesse und die Verarbeitung von kontinuierlich und in großen Mengen einströmenden Ereignissen (vgl. BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 32). Somit werden Unternehmensarchitekturen *agiler*, *reaktionsschneller* und *echtzeitfähig* (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 76). Ereignisorientierten Architekturen liegt eine Asynchronität durch Publish/Subscribe-Interaktionsmuster und eine kontextsensitive, streng typisierte, ereignisbasierte Kommunikationssemantik zugrunde (BEIGL ET AL. 2008, S. 178; BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 31ff.). Die Initiative zum Nachrichtenaustausch geht hierbei von der Ereignisquelle aus (Push-Modus), wobei diese die Ereignissenke nicht kennt (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 37ff.). Des Weiteren liegt eine weitgehend referenzielle Entkopplung zwischen den beteiligten Computersystemen vor (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 31ff.; BEIGL ET AL. 2008, S. 178). Insbesondere die Asynchronität und Entkopplung bzw. äußerst lose Kopplung bilden die Basis für eine hohe Interoperabilität und damit für den Einsatz als Integrationsinfrastruktur. So wird die Flexibilität und Agilität der Anwendungssysteme gewährleistet. (BRUNS U. DUNKEL

2010, S. 31f.) Ereignisorientierten Architekturen liegt ein dynamisches Datenverarbeitungsmodell zugrunde, bei dem die Daten zum Zeitpunkt ihres Auftretens erkannt und verarbeitet werden. Die persistente Speicherung der Ereignisdaten erfolgt erst im Anschluss an die Verarbeitung. Betriebliche Ereignisse werden so dynamisch überwacht, um sie in Echtzeit zu analysieren und in Echtzeit operative Entscheidungen zu treffen. (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 29) CHANDY ET AL. benennen vor diesem Hintergrund cyber-physische Systeme als mögliche Anwendungsszenarien von EDA (CHANDY U. SCHULTE 2010, S. 83). Ereignisorientierte Architekturen sind gut geeignet für Situationen, die eine schnelle Reaktion benötigen. Hierunter fällt auch die Produktionssteuerung. (vgl. KELLNER U. FIEGE 2009, S. 95)

Die Grundlage für den Einsatz von ereignisorientierten Architekturen ist eine exakte Spezifikation der zu verarbeitenden Ereignisse. Nur auf Basis eines formal definierten Ereignisformats ist der Austausch von Ereignissen zwischen Systemkomponenten und die Verarbeitung von Ereignisströmen möglich. (BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 66) Die Konzeption von ereignisorientierten Architekturen gestaltet sich schwierig, da derzeit noch kein etablierter Standard zur formalen Beschreibung von Ereignissen und den darauf aufbauenden Mustern und Regeln existiert (vgl. LUCKHAM 2006 zitiert in DUNKEL ET AL. 2010, S. 69; SCHERP ET AL. 2009, S. 137; AMMON ET AL. 2007, S. 2009; TEYMOURIAN 2010, S. 2). Weiterhin fehlt es an einer Methodik, welche die Identifikation von relevanten, messbaren KPIs (bei PPR: Regelgrößen) und der sich hieraus ergebenden Ereignistypen top-down im Unternehmenskontext unterstützt (KELLNER U. FIEGE 2009, S. 93). So fehlen die Definition von Ereignismodellen oder vordefinierte Referenzereignismodelle sowohl für bestimmte Anwendungsdomänen als auch domänenübergreifend. (vgl. BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 223f.; KUNZ ET AL. 2011, S. 195; PASCHKE ET AL. 2011, S. 135; BRUNS U. DUNKEL 2010, S. 95). Existierende Ereignismodelle folgen hierbei keinem systematischen Entwicklungsansatz (SCHERP ET AL. 2009, S. 137; DUNKEL 2009a, S. 249f.). Ein Ereignismodell ist die unverzichtbare Basis, um die Softwarearchitektur ereignisorientierter Systeme abzuleiten (DUNKEL ET AL. 2010, S. 70ff.). Das Fehlen eines formalen Ereignismodells verhindert die Interoperabilität in verteilten ereignisbasierten Systemen (SCHERP ET AL. 2009, S. 137). Bisherige Ansätze adressieren konkrete Anwendungsfälle (KUNZ ET AL. 2011, S. 195). Allerdings unterscheidet sich die Architektur verschiedener Anwendungsfälle, bspw. im Kontext von Sensorsystemen, weitgehend (vgl. DUNKEL ET AL. 2010, S. 65). Bisherige Systeme fokussieren zudem die Verarbeitung von Low-Level-Ereignissen (TEYMOURIAN 2010, S. 2; SCHERP ET AL. 2009, S. 137).

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Zielsetzung der vorliegenden Dissertation ist, vor der in 1.1 erläuterten Problemstellung, die **Entwicklung eines Ereignismodells als Grundlage der Produktionsregelung auf Basis von Zustandsdaten bei diskreter Fertigung**. Das Ereignismodell ist die Grundlage für den Einsatz ereignisorientierter Architekturen zur Rückmeldung von Zustandsdaten, die durch Sensorik erfasst werden. Es umfasst sowohl die Definition der benötigten Ereignistypen und deren Attribute als auch die Interdependen-