

Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle Implementation-oriented synthesis of mechatronic reference models

Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 33102 Paderborn, Deutschland, iris.graessler@hni.uni-paderborn.de

Kurzfassung

Technische Systeme des Maschinenbaus haben in den letzten Dekaden branchenübergreifend einen Wandel von ursprünglich kinematisch über hydraulisch, pneumatisch hin zu elektronisch angesteuerten und geregelten Systemen vollzogen. Hieraus resultiert der Bedarf, die disziplinspezifisch und historisch gewachsenen Begriffs- und Denkwelten zueinander in Beziehung zu setzen und zu synthetisieren. Unter dem Anspruch der industriellen Umsetzbarkeit werden in diesem Beitrag zentrale Referenzmodelle der Produktentstehung analysiert und in einem ersten Schritt synthetisiert. Hierfür wird zunächst der Handlungsrahmen Produktentstehung definiert und abgegrenzt. Auf der Grundlage der industriell verbreiteten ganzheitlichen Produktionssysteme wird ein ganzheitliches Produktentstehungssystem (PES) entwickelt. Das Produktentstehungssystem dient als Rahmen für die vergleichende Bewertung und die umsetzungsorientierte Synthese existierender mechatronischer Referenzmodelle. Hiermit wird der gemeinsame Kern identifiziert und die Grundlage zur Entwicklung eines übergeordneten multidisziplinären Referenzmodells geschaffen.

Abstract

Technical systems of mechanical engineering were originally controlled kinematically. Through the decades and across all industries, control of technical systems shifted from kinematics over hydraulics, pneumatics to electronics. This evolution results in the need of relating the discipline-specific and historically developed concepts and schools of thought to each other and synthesizing them. Focusing on industrial applicability, relevant reference models of mechatronic product creation are analyzed and synthesized in a first step in this contribution. For this, the field of action of product creation is first defined and delimited. On basis of the industrially prevalent holistic Production Systems, a holistic Product Creation System (PCS) is developed. The Product Creation System serves as a framework for comparative assessment and implementation-oriented synthesis of existing mechatronic reference models. Thus the common core is identified and the basis for developing a generic multidisciplinary reference model is provided.

1 Einleitung

Erste maschinenbauliche Produkte wurden kinematisch angesteuert, z.B. durch Betätigung von Nocken, Kulissenscheiben oder Schubstangen. In den letzten Dekaden hat sich branchenübergreifend ein rasanter Wandel über hydraulisch, pneumatisch hin zu elektronisch angesteuerten und geregelten technischen Systemen vollzogen. Das Systemverhalten wurde dadurch präziser, echtzeitfähiger und flexibel konfigurierbar. Die wachsende Dynamik von Wirtschaftsprozessen führte gleichzeitig zu einem verschärften Wettbewerb mit steigendem Innovationsdruck und hohen Änderungsraten während der laufenden Produktentwicklung. Technische Gesamtsysteme mussten leistungsfähiger werden und gleichzeitig in Grenzgebiete der Beanspruchbarkeit vordringen. Mit dem technischen Fortschritt wuchs auch die Komplexität der Produkte, Technologien und Anwendungen. Der sich so vollziehende Wandel des klassischen Maschinenbaus hin zu Mechatronik und Cyber-physischen Systemen zieht als Konsequenz den Bedarf nach einer Neustrukturierung der Normenlandschaften nach sich. Insbesondere die bestehenden Referenzmodelle für das Vorgehen in der Produktentstehung müssen geprüft und neu interpretiert werden.

Im Produktentstehungsprozess werden das Innovationsmanagement, die Produktentwicklung und die Produktionsplanung von der strategischen Geschäftsfeldplanung bis zum Markteintritt betrachtet. Die Produktentstehung umfasst somit die Generierung erfolversprechender Produktideen, ihre funktionale und herstellungsbezogene Realisierung (Bild 1).

2 Produktentstehungssystem als Bezugsrahmen für die Synthese

Die in diesem Beitrag dargestellte Analyse und Synthese existierender mechatronischer Referenzmodelle dient als Grundlage für die Entwicklung eines übergeordneten multidisziplinären Referenzmodells. Das übergeordnete Referenzmodell soll dabei dem Anspruch der industriellen Anwendbarkeit genügen. Für Auftragsabwicklungsprozesse in der Produktion haben sich hierfür in Deutschland seit den 1990er Jahren ganzheitliche Produktionssysteme auf Basis des Toyota Produktionssystems [1] bewährt.

Ein ganzheitliches Produktionssystem bildet ein unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Unternehmensprozesse [2]. Somit trägt es wesentlich zur Sicherung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens bei [3]. Es unterstützt den Kulturwandel bei

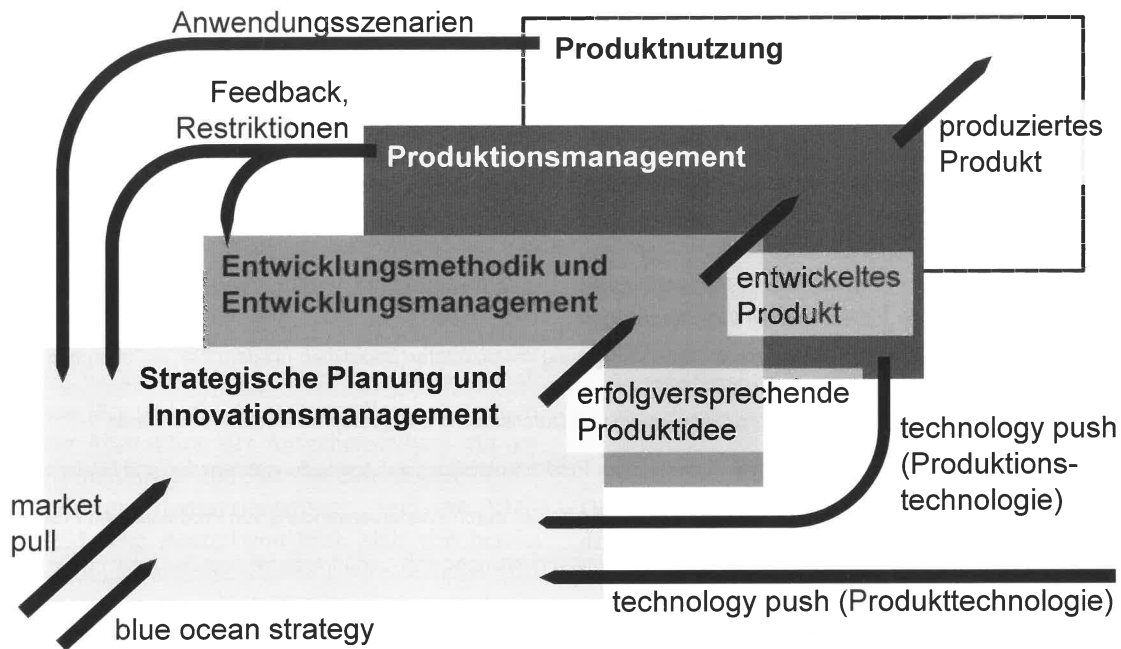


Bild 1 Handlungsfeld Produktentstehung

Mitarbeitern aller Ebenen hin zu einer kontinuierlichen Verbesserungsmentalität [3]. Die frühen Erfahrungen mit der Einführung ganzheitlicher Produktionssysteme zeigten, dass nicht die Art und Anzahl der angewendeten Methoden und Werkzeuge erfolgsentscheidend sind, sondern vielmehr das Verständnis der Wirkzusammenhänge („Kapieren statt Kopieren“), vgl. hierzu auch [3].

Übertragen auf die durch Informationsflüsse bestimmte multidisziplinäre Produktentstehung, ermöglicht solch ein Regelwerk eine nachhaltige Effektivitäts- und Effizienzsteigerung. Durch die Dokumentation von Prinzipien werden Mitarbeiter wie Führungskräfte in die Lage versetzt, ihre Handlungen und Entscheidungen an den Gestaltungsprinzipien (Ordnungssystem) und ihrem Beitrag zu den dahinterliegenden Unternehmenszielen (Wertesystem) zu messen. Die Operationalisierung der Prinzipien erfolgt anhand von standardisierten Bausteinen, d.h. Methoden und Werkzeugen. Diese Bausteine befähigen zur Realisierung der Prinzipien und bilden das Arbeitssystem. Ihre Standardisierung stellt die Voraussetzung zur Beherrschung und ständigen Verbesserung der Produktentstehung dar. Daher wird als Bezugsrahmen für die Analyse und umsetzungsorientierte Synthese existierender Referenzmodelle ein Produktentstehungssystem (PES) entwickelt und zu Grunde gelegt. Die Grobstruktur des konzipierten ganzheitlichen Produktentstehungssystems orientiert sich an den gängigen Produktionssystemen und gliedert sich in die Ebenen Ziele (Wertesystem), Gestaltungsprinzipien (Ordnungssystem) sowie Bausteine: Methoden und Werkzeuge (Arbeitssystem), Bild 2.

Die Feinstruktur des ganzheitlichen Produktentstehungssystems wird spezifisch für die Produktentstehung ausgestaltet. Das Wertesystem untergliedert sich in die folgenden, für die Produktentstehung relevanten Unternehmensziele:

- Exzellenz in der Produktentstehung
- überzeugende Produktfunktionalität
- 0-Fehler-Qualität in Produkt und Prozessen
- Zielkostenerreichung
- kurze Durchlaufzeiten von der strategischen Planung bis zum Markteintritt

Zur Erreichung der Unternehmensziele bilden die in Bild 3 definierten 12 Gestaltungsprinzipien den erforder-

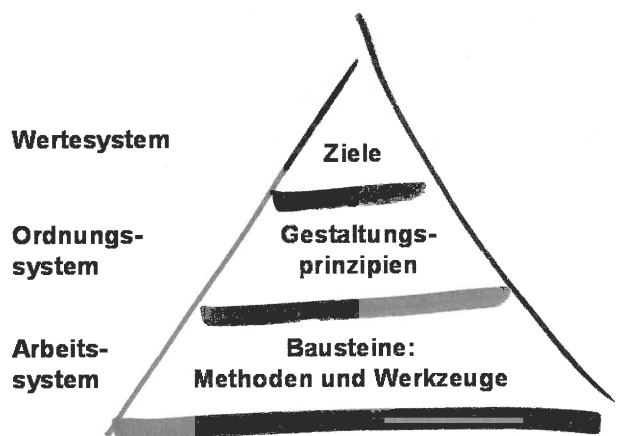


Bild 2 Grobstruktur des ganzheitlichen Produktentstehungssystems (PES), angelehnt an [4]

Gestaltungsprinzipien	Definition
ergebnisorientiert	Orientierung an wirtschaftlichen Ergebnisgrößen, wie Entwicklungsrendite, Zeit- und Kosteneinhaltung
transparent	Leistung, Qualität, Meilensteinstatus, Umsetzungsschwierigkeiten sind stets bekannt
robust	Wiederholbarkeit und Unempfindlichkeit ggü. Störungen
änderungsfreundlich	Beherrschung von Unsicherheiten und Flexibilität ggü. umfeld- bzw. kundenwunschinduzierten Änderungen
schnell	kurze Durchlaufzeiten von der strategischen Geschäftsfeldplanung bis zum Markteintritt
testgetrieben	Verifikation und Validierung des jeweiligen Entwicklungsstands auf Basis von Modellen anhand von Simulationen und Erprobungen
multidisziplinär	informationstechnische Vernetzung der beteiligten Disziplinen mit dem Ziel, ein übergeordnetes Optimum zu generieren
innovationsfördernd	systematische Generierung und Durchsetzung erfolgversprechender Produktideen
anwendungsorientiert	konsequente Ausrichtung der Produktentstehung auf Anwendungsszenarien und Erlebniswelten
standardisiert	Nutzung von Skalen- und Lerneffekten durch Wiederverwendung von Produkten und Prozessen
mitarbeiterzentriert	Berücksichtigung der Mitarbeitervorstellungen und -bedürfnisse mit dem Ziel einer hohen Identifikation
kontinuierlich verbessernd	kontinuierliche Optimierung von Mitarbeiterbindung, Technologie, IT-Tools, Organisation, Prozessen und Methoden

Bild 3 Gestaltungsprinzipien des ganzheitlichen Produktentstehungssystems (PES), aufbauend auf [5, 6]

lichen Handlungs- und Entscheidungsrahmen. Zur Erfassung und Selektion der Gestaltungsprinzipien fanden eigene Vorarbeiten zur Gestaltung und industriellen Umsetzung von Produktentwicklungssystemen Eingang [5, 6]. Diese wurden auf das hier betrachtete Handlungsfeld der Produktentstehung übertragen und um die fehlenden Aspekte ergänzt. Für den engeren Bereich der Produktentwicklung sind bereits erste Umsetzungsbeispiele aus Großunternehmen der Automobil- und Investitionsgüterindustrie bekannt, vgl. hierzu auch [5, 6].

Die Ziele, Gestaltungsprinzipien und Bausteine des vorgestellten Produktentstehungssystems werden unternehmensspezifisch konfiguriert, branchen- und anwendungsorientiert priorisiert. Beispiele für Bausteine sind Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA), Design for Six Sigma (DFSS), Conjoint-Analyse, Anforderungsmanagement, domänenübergreifende Systemmodellierung, Simulation und Erprobung. Bewährte Praxisbeispiele, sog. „Best Practices“, erläutern die industrielle Umsetzung der Bausteine. Da die zentralen mechatronischen Referenzmodelle im Folgenden anhand der Gestaltungsprinzipien analysiert werden, werden die Bausteine an dieser Stelle nicht weiter detailliert. Zur Implementierung des Produktentstehungssystems in der industriellen Praxis ist darüber hinaus ein Rollenmodell erforderlich, in dem die Aufgaben und Verantwortlichkeiten von Baustein-Experten, Prozesseignern und Promotoren definiert werden.

3 Analyse und Synthese mechatronischer Referenzmodelle

Das in Kapitel 2 vorgestellte Produktentstehungssystem dient als Bezugsrahmen für die vergleichende Bewertung und umsetzungsorientierte Synthese existierender mechatronischer Referenzmodelle. Hiermit werden der gemeinsame Kern und die erforderlichen Elemente eines übergeordneten multidisziplinären Referenzmodells identifiziert, das die Begriffs- und Denkwelten der einzelnen Ansätze zueinander in Beziehung setzt und zusammenführt. Die Ausprägungen der nachfolgend analysierten Ansätze und ihrer zugehörigen Referenzmodelle hinsichtlich der Gestaltungsprinzipien des Produktentstehungssystems werden in Bild 4 zusammengefasst.

Ein erster umfassender und in großen Teilen heute noch relevanter Überblick über das Vorgehen zur Identifikation erfolgversprechender Produktideen geht auf BRANKAMP zurück und fand Niederschlag in der VDI-Richtlinie 2220 [7, 8]. Durch die systematische Identifikation von Suchfeldern wird die Erzielung eines hohen Innovationsgrads begünstigt. Damit wird die Produktentstehung konsequent auf zukünftige Kundenwünsche ausgerichtet. Diese bilden die Voraussetzungen für nutzerzentrierte Anwendungsszenarien und Erlebniswelten (Bild 4, 1. Spalte).

Erste Ansätze der klassischen Konstruktionssystematik fokussierten auf mechanische Wirkprinzipien und entstanden mit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhun-

dert durch REDTENBACHER, REULEAUX u.a. [9, 10]. WÖGERBAUER lieferte 1943 eine umfassende Darstellung der „Technik des Konstruierens“ [11]. Erst durch die Entwicklung der Konstruktionssystematiken wurde das auf Begabung, Kreativität und Intuition beruhende Konstruieren mechanischer Systeme lehrbar. Bei mechanischen Systemen wird die Funktionserfüllung maßgeblich durch die Festlegung von Baustrukturen, die Grobgestaltung der maßgebenden Module und die Ausarbeitung der Feingestalt geprägt. Daher bildet die Gestaltung nach wie vor einen Kern der allgemein anerkannten konstruktionsmethodischen Vorgehensweisen wie VDI 2222 oder VDI 2221. Ein hoher Innovationsgrad lässt sich jedoch nur verwirklichen, wenn man sich gerade von diesem gestalterischen Kern löst und die Aufgabenstellung abstrahiert [12-14]. Diese Abstraktion der Aufgabenstellung mit anschließender Funktionsfindung ist charakteristisch für die klassischen Konstruktionssystematiken und die VDI-Richtlinie 2221. Die Abstraktion hilft, sich von bereits bekannten Lösungen und Denkschemata zu befreien, den Lösungsraum zu erweitern und fördert somit hohe Innovationsgrade (Bild 4, Spalten 2 und 3). Aufgrund des Abstraktionsschrittes ist das prinzipielle Vorgehen der Konstruktionssystematiken auf beliebige, sogar nicht-technische Problemstellungen übertragbar. In der industriellen Praxis wird die Abstraktion der Aufgabenstellung über Funktionsfindung und Prinzipiarbeit unter dem typischerweise herrschenden Zeitdruck jedoch oftmals als Umweg empfunden und findet bei Neuentwicklungen noch keine ausreichende Verbreitung [6].

Hier greift das System der Wertanalyse an. Mit der Wertanalyse wurden parallel zu den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 Arbeitsflüsse in der Produktentwicklung festgelegt [15]. Besondere Schwerpunkte der Wertanalyse bilden die Gestaltungsprinzipien Ergebnisorientierung, Anwendungsorientierung, Mitarbeiterzentrierung und kontinuierliche Verbesserung (Bild 4, Spalte 4). Daher hat keine andere Methode der systematischen Produktentwicklung in der Industrie und der Normung einen so nachhaltigen Niederschlag gefunden wie die Wertanalyse [16]. Ursprung der Wertanalyse waren Überlegungen von Lawrence D. Miles, der sich als Ingenieur und Einkaufschef beim amerikanischen Konzern General Electric bereits 1947 fragte: „Wie kaufe ich kosten- und nutzungsgünstig ein?“ [15]. Das Neue daran war, dass anstelle von reinen Preisvergleichen zusätzlich der Funktionsumfang betrachtet wurde. Der Wert definiert somit das Verhältnis zwischen dem bereitgestellten Funktionsumfang einerseits und den hierfür aufzubringenden Kosten andererseits. Übertragen auf den Einkauf eines Bleistifts heißt das z.B.: Weder der teuerste Bleistift, noch der billigste hat den höheren Wert, sondern derjenige mit der längsten Schreibdauer je Geldeinheit [16]. Die Zeit nach dem 2. Weltkrieg war durch starke Nachfrage aber extreme Rohstoffknappheit gekennzeichnet. Miles entwickelte die Methode Wertanalyse, um knappe Ressourcen zu ersetzen. Er bemerkte aber schnell, dass dadurch zugleich unnötige Kos-

ten erkannt und eingespart werden konnten. Diese Grundidee fand schnell großes Interesse in der amerikanischen Industrie sowie in nationalen und internationalen Weiterentwicklungs- und Normungsaktivitäten, z.B. durch die „Society of American Value Engineering (SAVE)“ und das „Zentrum Wertanalyse (VDI-ZWA)“ [16].

Die Weiterentwicklung der Wertanalyse in Form des Value Management bildet die Grundlage für die optimale Gestaltung und Verbesserung von Produkten, Dienstleistungen und Arbeitsabläufen [17, 18]. Der hierfür zugrunde gelegte Wertebegriff wird entsprechend weitreichender gefasst:

$$\text{Wert } \alpha = \frac{\text{Befriedigung von Bedürfnissen}}{\text{Einsatz von Ressourcen}}$$

Das ursprünglich für die Bundeswehr und Bundesbehörden entwickelte V-Modell für die standardisierte und qualitätsgerechte Abwicklung großer IT-Systemerstellungprojekte [19] wurde 2004 in der VDI-Richtlinie 2206 auf mechatronische Systeme übertragen [20]. Hiermit wurde erstmals ein spezifisches entwicklungsmethodisches Vorgehen für mechatronische Systeme disziplinübergreifend harmonisiert und dokumentiert. Die Schwerpunkte des mechatronischen V-Modells liegen auf der engen informationstechnischen Vernetzung der beteiligten Disziplinen (Multidisziplinarität) sowie die Eigenschaftsabsicherung des jeweiligen Entwicklungsstands (Testgetriebenheit, vgl. Bild 4, Spalte 5).

Auf Basis disziplinspezifischer und -übergreifender Modelle werden die jeweiligen Entwicklungsstände simuliert und erprobt. CAD-Modelle sind Beispiele für disziplinspezifische Modelle, während Anforderungsmodelle zur Darstellung von Systemanforderungen und Verhaltensbeschreibungen zur domänenübergreifenden Erfassung und Formulierung der funktionalen Zusammenhänge Beispiele für disziplinübergreifende Modelle darstellen. Disziplinspezifische Modelle werden vorzugsweise über mathematische Algorithmen vernetzt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf den domänenübergreifenden Korrelationen.

Im Rahmen der Eigenschaftsabsicherung werden während des Systementwurfs, des domänenspezifischen Entwurfs und der Systemintegration Lösungsalternativen ausgewählt und deren Eigenschaften anhand von Anforderungslisten bewertet. Eigenschaftsabsicherung umfasst Verifikation und Validierung. Anhand der Verifikation wird überprüft, ob eine Realisierung mit der Spezifikation übereinstimmt (umgangssprachlich: „Wird ein korrektes Produkt entwickelt?“). Im Rahmen der Validierung wird geprüft, ob das Produkt bezogen auf seinen Einsatzzweck geeignet ist (umgangssprachlich: „Wird das richtige Produkt entwickelt?“). Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein [20]. Durch die schrittweise Eigenschaftsabsicherung und Optimierung von Produktfunktionen kann auf Änderungen des Um-

● Kernaspekt ◐ teilweise behandelt ○ Randaspekt - nicht behandelt ■ Element Referenzmodell	Gestaltungsprinzipien	VDI 2220 [8]	Konstruktionssystematiken [9-13]	VDI 2221 [14]	Wertanalyse [15-18]	VDI 2206 [20]	Systems Engineering [21, 22]	Projektmanagement [23]	CMMI [24, 25]	Agile Systementwicklung [26]
ergebnisorientiert	-	-	-	◐	-	●	◐	◐	◐	◐
transparent	-	-	-	-	-	-	○	◐	◐	◐
robust	-	-	-	○	-	○	○	◐	◐	◐
änderungsfreundlich	-	○	○	-	◐	○	-	◐	◐	◐
schnell	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◐
testgetrieben	-	○	○	○	●	●	-	◐	◐	◐
multidisziplinär	-	○	○	○	●	●	-	○	○	○
innovationsfördernd	●	●	●	○	○	-	-	-	-	○
anwendungsorientiert	○	-	-	●	-	○	-	-	-	◐
standardisiert	-	○	○	○	○	○	○	◐	○	○
mitarbeiterzentriert	-	-	-	●	-	○	-	○	○	○
kontinuierlich verbessernd	-	-	-	●	-	-	-	○	◐	◐

Bild 4 Gegenüberstellung existierender Referenzmodelle anhand der Gestaltungsrichtlinien

felds oder der Kundenwünsche flexibel reagiert werden. Dabei werden Makro- und Mikrozyklen iterativ durchlaufen (Änderungsfreundlichkeit).

Unter der Zielsetzung, Zuverlässigkeit und Funktionalität komplexer Gesamtsysteme sicherzustellen, ist in den 50er Jahren in den USA die Systemtheorie auf den Entwicklungsprozess angewendet worden. Das Wettrennen der Weltmächte im Weltraum und das militärische Wett-rüsten hatten zu dem Druck geführt, äußerst komplexe Systeme schnell zum Erfolg zu führen [21]. Systems En-gineering wird in der industriellen Praxis als Sammelbe-griff verwendet. Unter Abgleich existierender Beschrei-bungen und Definitionen, u.a. nach [21] und [22] wird wie folgt der gemeinsame Kern definiert:

„Systems Engineering bezeichnet eine strukturierte multi-disziplinäre Vorgehensweise für die Entwicklung komple-xer technischer Gesamtsysteme zur Erzielung eines dis-ziplinübergreifenden Optimums in einem festgelegten Zeit- und Kostenrahmen. Hierfür werden die Disziplinen modelltechnisch strukturiert und miteinander vernetzt.“

Die Gegenüberstellung des Systems Engineering Ansatzes mit den Gestal-tungsprinzipien des Produktentste-hungssystems liefert zunächst ein ähn-liches Bild wie das der VDI-Richtlinie 2206 (Bild 4, Spalten 5 und 6). Ein markanter Unterschied liegt in der ho-hen Orientierung an wirtschaftlichen Ergebnissen beim Systems Enginee-ring. Die Aspekte der Zeit- und Kosteneinhaltung werden in der VDI-Richtlinie 2206 nicht vertiefend be-handelt. Der Anspruch des Systems Engineering auf Änderungsfreund-lichkeit wird gestellt, aber noch nicht hinreichend mit Methoden und Werk-zeugen hinterlegt.

Die Zeit- und Kosteneinhaltung von Produktentstehungsprojekten ist zwar die Domäne des klassischen Projekt-managements, vgl. z.B. [23]. Der heu-tigen Komplexität technischer Ge-samtsysteme und der Volatilität der Märkte sind klassische Methoden und Werkzeuge des Projektmanagement allerdings nicht mehr gewachsen. Da-her wird der Anspruch der Ergebnis-orientierung vom Projektmanagement nur in Teilen erfüllt (Bild 4, Spalte 7). Das Capability Maturity Model In-tegrated (CMMI) und der Ansatz der agilen Systementwicklung strukturie-ren den Produktentstehungsprozess auf Ebene des Prozess- und Projekt-managements. Zu den Schwerpunkten zählen Änderungsmanagement, situationsspezifische Prio-risierung und Einplanung von Aufgaben sowie Umgang mit Unvorhersehbarkeiten [24-26], (Bild 4, Spalten 8-9).

In Bild 4 werden die betrachteten Ansätze und Referenz-modelle anhand der Gestaltungsrichtlinien des Pro-duktentstehungssystems zusammenfassend dargestellt. Wie aus der farblichen Markierung ersichtlich wird, wer-den durch Synthese der relevanten Ansätze alle geforder-ten Gestaltungsrichtlinien adressiert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wurde ausgehend von einer Definition und Abgrenzung des Handlungsfelds Pro-duktentstehung ein ganzheitliches Produktentstehungssys-tem (PES) als Bezugsrahmen für die Analyse und Synthe-se entwickelt. Das Produktentstehungssystem lehnt sich strukturell an die industriell verbreiteten Produktionssys-teme an und gewährleistet mit seiner durchgängigen Be-schreibung von Werte-, Ordnungs- und Arbeitssystem ei-ne hohe Umsetzungs- und Ertragsorientierung. Der Er-

folgsfaktor liegt dabei in dem Verständnis der Wirkzusammenhänge. Das Ordnungssystem des entwickelten Produktentstehungssystems wird durch zwölf Gestaltungsprinzipien spezifiziert. Anhand dieser Gestaltungsprinzipien wurden relevante Ansätze und Vorgehensmodelle für die Produktentstehung mechatronischer Systeme analysiert. Unter Abgleich mit eigenen Erfahrungen aus der industriellen Umsetzung konstruktionsmethodischer Elemente bei der ROBERT BOSCH GMBH im Umfeld des Bosch Product Engineering Systems wurden die existierenden Referenzmodelle komparativ bewertet und umsetzungsorientiert synthetisiert. Als Ergebnis der Synthese liegen die für ein übergeordnetes multidisziplinäres Referenzmodell der Produktentstehung erforderlichen Modellelemente vor.

Zielsetzung zukünftiger Forschungsarbeiten ist die Entwicklung des generischen multidisziplinären Referenzmodells für die Produktentstehung. Ein solches Referenzmodell kann als Diskussionsgrundlage für die laufenden VDI-Aktivitäten zur Verzahnung der Überarbeitung der VDI-Richtlinien VDI 2221 und VDI 2206 dienen (VDI Fachausschuss 7.02 „Systemhaus“). Als Ergebnis wird eine in sich konsistente Richtlinienlandschaft zur Produktentstehung mechatronischer Systeme angestrebt.

5 Literatur

- [1] Ohno, T.: Toyota Production System. Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, 1988
- [2] Dombrowski, U.; M. Palluck; S. Schmidt: Strukturelle Analyse Ganzheitlicher Produktionssysteme. ZWF 101 (2006) 3, S. 114–118
- [3] VDI-Richtlinie 2870 Blatt 1: Ganzheitliche Produktionssysteme, Grundlagen, Einführung und Bewertung. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2012
- [4] Ankele, A., Staiger, T., Koch, T.: Chefsache Produktionssystem, Pfade zum Erfolg. LOG_X, Stuttgart, 2008
- [5] Graessler, I.: Excellency in Industrial Product Development – A Promising Way to Success. Proceedings of CIRP 2003, 2003 International CIRP Design Seminar, Laboratoire 3S, Grenoble, France, May 12-14, 2003, pdf-file on CD, p. 46
- [6] Graessler, I., Haas, V., Suchowerskyj, W.: Innovation based on applying design methodology. In: Proceedings of TMCE “Tools and Methods of Competitive Engineering” 2012, May 7–11, 2012, Karlsruhe, Germany, Edited by I. Horváth, A. Albers, M. Behrendt and Z. Rusák, pp. 37-43
- [7] Brankamp, K.: Planung und Entwicklung neuer Produkte. Walter de Gruyter & Co, Berlin, 1971
- [8] VDI-Richtlinie 2220: Produktplanung, Ablauf, Begriffe und Organisation. Beuth Verlag, Berlin, Mai 1980
- [9] Redtenbacher, F.: Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaus. Bassermann, Mannheim, 1852
- [10] Reuleaux, F., Moll, C.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Vieweg, Braunschweig, 1854
- [11] Wögerbauer, W.: Die Technik des Konstruierens. 2. Auflage Oldenbourg, München, 1943
- [12] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 7. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007
- [13] VDI-Richtlinie 2222 Blatt1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. VDI-EKV, Düsseldorf, 1996
- [14] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, Mai 1993
- [15] Miles, L.D.: Value Engineering. 3. Auflage, Springer, München, 1964
- [16] Klein, B.: Wertanalyse-Praxis für Konstrukteure, Ein effizientes Werkzeug in der Produktentwicklung. expert Verlag, Renningen, 2010
- [17] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (Hrsg.): Wertanalyse – das Tool im Value Management. 6. Auflage, Springer VDI, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2011
- [18] DIN EN 12973:2000 rev (D): Value Management. Februar 2002
- [19] Bröhl, A.P., Dröschel, W.: Das V-Modell, Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. R. Oldenburg, München, Wien, 1995
- [20] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, Juni 2004
- [21] Weilkiens, T.: Systems Engineering mit SysML/UML, Anforderungen, Analyse, Architektur. dpunkt.verlag GmbH, 3. Auflage, Heidelberg, 2014
- [22] Technical Board INCOSE: Systems Engineering Handbook. Version 2a, Juni 2004
- [23] Burghardt, M.: Projektmanagement, Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 9. Auflage, Publicis Publishing, Erlangen, 2012
- [24] Graessler, I.: How to Put Reorganization into Action – Critical Success Factors using Software Development as an Example. In: Proceedings of ECEC 2001, 8th European Concurrent Engineering Conference: The Path to Electronic Business, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, Spain, April 17-20, 2001, p. 19-21
- [25] Paulk, M.C., Weber, C.V., Curtis, B., Chrissis, M.B.: The Capability Maturity Model, Guidelines for Improving the Software Process. Software Engineering Institute at Carnegie Mellon University, Addison-Wesley, Reading, Harlow, Menlo Park et al., 1995
- [26] Graessler, I.: Principles of Agile Systems Engineering. In: Proceedings of ECEC 2014, 21st European Concurrent Engineering Conference, Bruges, Belgium, April, 28-30, 2014, p. 39-44