

Alexander Schönberg

Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter Montagezellen durch Selbstreferenz



Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter Montagezellen durch Selbstreferenz

Increasing the Process Capability of Changed Assembly Cells by Self-reference

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Alexander Schönberg

Berichter:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt
Honorarprofessor Dr.-Ing. Rainer Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 17. September 2017

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Alexander Schönberg

Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter
Montagezellen durch Selbstreferenz

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 4/2018



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alexander Schönberg:

Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter Montagezellen durch Selbstreferenz

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2018

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-606-4

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Diese Arbeit widme ich Alexandre Orth, der meinen wissenschaftlichen Werdegang als Entdecker, Betreuer und Mentor bereitet hat.

Science is not discussing the causes of knowledge, but the coherence of knowledge

Alfred North Whitehead

The Concept of Nature (1919)

Zusammenfassung

Die Dissertation im Fachgebiet Maschinenbau/Produktionstechnik untersucht einen selbstreferenziellen Lösungsansatz für die automatisierte Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter Montagezellen. Wandel wird als Änderung aufgrund unvorhersehbarer und nicht in die Flexibilität einbezogener Einflüsse verstanden. Es wird ein ausführbarer nicht prozessfähiger Montageprozess auf Basis einer idealisierten Planung angenommen. Dieser ist Zielwert der Selbstreferenz bestehend aus Kommunikation, Perzeption und Kompensation.

Das Auflösen des Widerspruchs von Komplexität und Automatisierung der Optimierung roboterbasierter Großbauteilmontage durch Selbstreferenz stellt den innovativen Kern der Arbeit dar. Die Steigerung der Prozessfähigkeit wird durch globale Referenzsysteme (GRS) als Kommunikationsstandard und disziplinär verteilter Ansätze der Theorie von Wahrnehmung (Psychologie), Selbstorganisation (Sozialwissenschaft), Informationstechnik (Informatik) und Messtechnik (Produktionstechnik) entwickelt und validiert.

Die Prozessfähigkeit roboterbasierter Großbauteilmontage wird durch Selbstreferenz gesteigert. Die Wahrnehmung (Perzeption) des eigenen Zustands in einem GRS verschiebt dabei den Fokus des Einsatzes von Messtechnik von der Regelung einzelner Roboter zur Beobachtung des Montageprozesses und dem Abgleich zur Zustandswelt. Die Kompensation von Abweichungen wird selbstreferenziell zwar dezentral ausgeführt, richtet sich aber an dem idealisiert geplanten Montageprozess aus. Durch Selbstreferenz steigt die Grenzpräzision gewandelter Montagezellen und die Inbetriebnahme von Wandel wird automatisiert.

Die technische Validierung implementiert Selbstreferenz für die Perzeption und Kompensation der Diskrepanz von idealisiert geplanten und realen Montageprozessen. GRS werden als Kommunikationsstandard in den parallel zur Arbeit durchgeführten Projekten entwickelt und implementiert. Beim Wandel muss die Grenzpräzision der Montageroboter und Messsysteme innerhalb der Anforderungen der Prozesse liegen. In gewandelten Montagezellen wird abduktiv auf den Einfluss der Grenzpräzision auf die Steigerung der Prozessfähigkeit geschlossen. Mit einer Bewertungssystematik werden Regelmäßigkeiten und Handlungsempfehlungen abgeleitet und eine Forschungslandschaft skizziert.

Schlagwörter: Montage, Automatisierung, Messtechnik, Selbstorganisation

Abstract

The dissertation in Mechanical Engineering / Production Technology examines a self-referential approach for the increase of the process capability of changed assembly cells. Change is understood as an action taken due to unforeseen and therefore not included influences in flexibility. An executable non-capable assembly process based on an idealized planning is assumed. This serves as a target for self-reference consisting of communication, perception and compensation.

Solving the contradiction between complexity and automation of a conversion of robot-based large-scale assembly by self-reference constitutes the innovative core of the work. The increase in the degree of automation in commissioning is developed and validated by using Global Reference Systems (GRS) as a *communication* standard and disciplinary approaches of the theory of perception (psychology), self-organization (social science), information technology (computer science) and measurement technology (production technology).

The process capability of robot-based large component assembly is enhanced by self-reference. The *perception* of one's own state in a GRS displaces the focus of the use of measurement technology from controlling individual robots to optimizing the assembly process as a whole. The reduction of disparities (*compensation*) is executed self-referentially decentralized, but is geared to the idealized planned assembly process. Through self-reference in the form of communication, perception and compensation the robots and measuring systems increase their limit precision for execution and monitoring of assembly processes to raise automation levels for the commissioning of change.

The technical validation implements self-reference for the perception and compensation of the discrepancy of idealized and real assembly processes. GRS are developed as a communication standard for examining the degree of automation during commissioning of change. The limit precision of the robots and measuring systems must meet the requirements of the processes for automated change. In industrial application scenarios, the influence of the limiting precision on the degree of automatically achieved process capability is abductively deduced. An assessment system is used to derive regularities and recommendations for action to serve as a guide for subsequent research.

Tags: assembly, automation, measurement technology, self-organization.

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt und seinem Vorgänger Prof. Dr.-Ing. Tilo Pfeiffer für die Möglichkeit der Promotion am WZL sowie für die Betreuung, die Anregungen und vor allem das mir entgegengebrachte Vertrauen. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller.

Dem Land Nordrhein-Westfalen und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Förderung des Forschungsgrößgeräts „Indoor-GPS basierte Roboterzelle“ als Keimzelle der Forschungsthemen für diese Arbeit. Auch wenn die Komponenten am 4. Februar 2016 bei einem Brand vollständig zerstört wurden, ermöglicht die Roboterzelle die Beantwortung vieler relevanter Forschungsfragen und existiert in veränderter Form bereits wieder. Der DFG danke ich weiterhin für die Förderung der Projekte „Bestimmung der Messunsicherheit kontinuierlich mit Lasertrackern erfasster Bahnkurven für die Kalibrierung dynamischer Bewegungen von Robotern und großen Werkzeugmaschinen“, „Effizientes Einrichten von kooperierenden Montageprozessen mittels iGPS“ und dem Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“. Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung danke ich für die Förderung des Kooperation-International-Projekts „Intelligente, hochpräzise Montage mit Robotern durch Einsatz von Indoor GPS“ und dem Projekt „Produktionssysteme Aktiv Wandeln“. Den Firmen FFT Produktionssysteme, Premium Aerotec, Nikon Metrology, Hexagon Manufacturing Intelligence und Reis Robotics, dem Instituto Tecnológica Aeronautica (ITA) in Sao Jose dos Campos in Brasilien, dem GMSA-Lehrstuhl an der Nelson Mandela Metropolitan University (NMMU) in Port Elizabeth, Südafrika und dem KIT danke ich für den intensiven Austausch bei der Zusammenarbeit in den wissenschaftlichen und industriellen Projekten. Allen Projektpartnern danke ich für die Förderung und zielführende, professionelle Zusammenarbeit.

Bei allen Mitarbeitern des WZL, des Fraunhofer IPT und der RWTH Aachen, insbesondere bei den Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Fertigungsmesstechnik (heute modellbasierte Systeme), bedanke ich mich für die freundliche Atmosphäre und die herzliche und intensive Unterstützung. Für ihre wichtigen Beiträge als Freunde und Kollegen möchte ich mich bei Felix Bertelsmeier, Alexandre Orth, Christoph Mersmann, Sebastian Pollmanns, Markus Janssen, Reinhard Freudenberg, Sascha Driessen, Björn Dietrich, Philipp Jatzkowski und Walter Kimmelman bedanken.

Nur ein hervorragendes Team konnte die komplexen Ziele dieser Arbeit mit allen technischen und organisatorischen Herausforderungen meistern. Für diesen Erfolg bedanke ich mich ganz herzlich bei denen, die mich während ihres Studiums unterstützt haben, insbesondere bei Felix Bertelsmeier, Manuel Fechter, Philipp Schuhmacher, Alexander Richter, Christoph Lamers, Andrew Norman, Timothy Light, Jan Apetz, Thorsten Kammertöns und Christian

Dornieden für ihre herausragenden studentischen Arbeiten, die meinen Wissenshorizont erweitert und damit maßgeblichen Anteil an dieser Arbeit haben. Des Weiteren bedanke ich mich bei Mike Wehn, Tim Lewerenz, Christian Böttcher, Werner Lotz und Manfred Hahl für das Vertrauen, dass ich die Ergebnisse dieser Arbeit in industriellen Szenarien umsetzen darf.

Für die aufwendige Korrektur dieser Arbeit möchte ich ganz herzlich meinen Freunden Felix Bertelsmeier und Alexander Richter, meiner Frau Patrycja und meinem Vater Hugo danken.

Meiner Frau Patrycja möchte ich mich aus tiefstem Herzen für alle Liebe, Unterstützung und Geduld bedanken, die Arbeit meist parallel zu ihrer eigenen Promotion erstellen zu können. Bei meiner Tochter Romina bedanke ich mich für das Verständnis und die mir überlassene Zeit. Meinen Eltern Hugo und Hannelore, meiner Schwester Stefanie sowie meiner ganzen Familie danke ich für die stetige Ermutigung, Inspiration und dass sie die Bildung immer als erste Priorität behandeln und mir so diesen Weg ermöglicht haben.

Fulda, den 31.12.2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1. Forschungsumfeld und -programm	1
1.1 Selbstreferenz als Lösungsansatz	2
1.2 Forschungseinordnung und -vorgehen	5
1.3 Aufbau der Arbeit	9
1.4 Beiträge der Arbeit	11
2. Prozessfähigkeit gewandelter Großbauteilmontage	13
2.1 Wandlungsfähigkeit und Wandeln	13
2.2 Wandlung roboterbasierter Montagezellen	18
2.2.1 Montagezellen	18
2.2.2 Montageroboter	20
2.2.3 Montageprozesse	22
2.3 Prozessfähiges Fügen von großen Bauteilen	24
2.3.1 Metallstrukturen	25
2.3.2 Faserverbundstrukturen	26
2.4 Anforderungen an selbstreferenzielle Montagezellen	28
3. Kommunikation in globalen Referenzsystemen	31
3.1 Komponenten	32
3.2 Datenübertragung	35
3.3 Geometrische Synchronisierung	38
3.4 Zeitliche Synchronisierung	44
3.5 Datenspeicherung	48
3.6 Informationsaustausch in globalen Referenzsystemen	52
4. Perception von Montageabweichungen	53
4.1 Wahrnehmung durch globale Sensorik	54
4.1.1 Zentralisierte sphärische Systeme	55
4.1.2 Verteilte Systeme mit Längenmessungen (Multilateration)	64
4.1.3 Verteilte Systeme mit Winkelmessungen (Multiangulation)	74
4.2 Wahrnehmung durch lokale Sensorik	92
4.2.1 Kraftsensoren	93
4.2.2 Kamerabasierte Sensoren	94
4.2.3 Projektionsbasierte Sensoren	96
4.3 Beobachtbarkeit selbstreferenzieller Montage	98

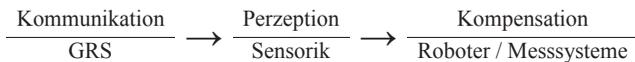
5. Kompensation von Montageabweichungen	99
5.1 Kompensation von Roboterabweichungen.....	99
5.2 Kompensation von Bauteil- und Umgebungsabweichungen	108
5.3 Kompensation von Prozessabweichungen	111
5.4 Kompensation von Messsystemen	113
5.5 Grenzpräzision selbstreferenzieller Montage.....	116
6. Bewertung selbstreferenzieller Montage.....	117
6.1 Organisatorische Kriterien.....	118
6.2 Technische Kriterien	120
6.3 Betriebswirtschaftliche Kriterien.....	122
6.4 Paarweiser Vergleich und Gewichtung	124
7. Anwendungsszenarien.....	127
7.1 Fügen von Strukturen der Fahrzeug- und Anlagentechnik.....	127
7.1.1 Flexibilisierte Anbauteilmontage	127
7.1.2 Vorrichtungloses Schweißen von Schutztüren	133
7.1.3 Fügen von Öltanks mit Kran	140
7.1.4 Fügen von Scheiben unter Fließbandbedingungen.....	145
7.2 Fügen von Strukturen im Flugzeugbau	150
7.2.1 Stringerintegration Pick&Place	151
7.2.2 Spantintegration am verformten Bauteil.....	158
7.2.3 Fügen von Schalen mit Toleranzausgleich.....	163
7.2.4 Fügen vom Rumpf mit wechselnden Messsystemen.....	167
7.3 Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter Montagezellen	172
8. Diskussion.....	177
8.1 Regelmäßigkeiten gesteigerter Prozessfähigkeit durch Selbstreferenz	178
8.2 Handlungsempfehlungen für selbstreferenzielle Montage.....	184
8.3 Fazit der Arbeit.....	189
Literaturverzeichnis.....	191
Bewertung selbstreferenzieller Montage.....	225
Anwendungsszenarien	229
Glossar.....	237
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	241
Abbildungsverzeichnis	243
Tabellenverzeichnis	245
Betreute studentische Arbeiten	247
Eigene Veröffentlichungen	249
Lebenslauf	253
Stichpunktverzeichnis.....	255

1. Forschungsumfeld und -programm

Die Bereitstellung von Messtechnik als integraler Bestandteil einer Produktionsanlage stellt einen Lösungsvorschlag für die wandlungsfähige Produktion dar (Demeester, et al., 2011). Diese Arbeit überträgt diese Erkenntnis auf die Inbetriebnahme roboterbasierter Großbauteilmontage durch die Zusammenarbeit von:

- Roboter mit Prozesswerkzeugen Ausführung der Montageaufgabe
- Large-Volume Sensorik Erkennung von Maschinenabweichungen
- Prozess-Sensorik Erkennung von Bauteilabweichungen

Globale Referenzsysteme (GRS) als Kommunikationsstandard stellen per Definition (Demeester, et al., 2011) Informationen zur Verringerung der Diskrepanz zwischen virtueller Planung und realer Produktion bereit. Durch die Verfügbarkeit der Informationen wird eine Synchronisation der beiden Welten möglich. Diskrepanzen sind als Kern geringer Prozessfähigkeit zu identifizieren. Die Fokussierung auf Montagezellen mit Industrierobotern bietet aufgrund der Programmierbarkeit eine breite Untersuchungsmöglichkeit für Fragestellungen beim Einsatz von GRS. Virtuelle Wandlung wird unter den Begriffen wandlungsfähige und cyber-physische Systeme beschrieben. Die Umsetzung virtueller auf idealisierten Planungsmodellen basierender Methoden zur wandlungsfähigen Montage durch *Selbstreferenz* stellt die zu schließende Forschungslücke dar. Selbstreferenz umfasst:



Im Kern wird ein Lösungskonzept für die Inbetriebnahme roboterbasierter Montage durch selbstreferenzielles Ausführen einer idealisierten Wandlung erarbeitet. Mit einem Bewertungssystem werden die Einflüsse von Selbstreferenz auf die automatisierte Steigerung der Prozessfähigkeit untersucht. Die roboterbasierte Großbauteilmontage erhöht die Sichtbarkeit der Ausprägungen bei der Implementierung von Selbstreferenz. Die Bewertung der Automatisierungsgradsteigerung dient zur Erkennung von Regelmäßigkeiten. Möglich wird *Selbstreferenz* durch die Fähigkeit des Informationsaustauschs (*Kommunikation*), Beobachtung des eigenen Zustands (*Perzeption*) und Steigerung der Präzision (*Kompensation*) beim Ausführen idealisiert geplanter Prozesse. Durch GRS wird der Fokus von den Schnittstellen der Roboter und Messsysteme auf die Einflüsse und Auswirkungen der Selbstreferenz verlagert. Die Forschungsfrage lautet:

*Kann Selbstreferenz die Prozessfähigkeit gewandelter
Großbauteilmontage auf Zellenebene automatisiert steigern?*

1.1 Selbstreferenz als Lösungsansatz

Übergreifendes Hemmnis für prozessfähige wandlungsfähige Montage von großen Bauteilen ist neben Bauteileffekten (Schmitt, et al., 2014b) die Komplexität beim Ersatz von starren Vorrichtungen durch programmierbare Roboter. Diese weisen aufgrund ihrer Bauart nur eine geringe Eigensteifigkeit auf und haben aufgrund höherer Kosten weniger Manipulationspunkte. Bauteile und Roboter beeinflussen sich innerhalb der Prozesse und erhöhen somit deren Komplexität. Die Planbarkeit wird erschwert und Probleme treten bei der stetig wiederholten Inbetriebnahme von Wandlung auf. Die Planbarkeit durch Simulation realer Effekte in der virtuellen Planung zu erhalten ist nicht zielführend. Die Autonomisierung des Produktionsplanungsprozesses unter Berücksichtigung zeitlicher und kausaler Wirkmechanismen des Anlagenverhaltens in mittel- und langfristigen Weiterentwicklungen ist nicht abzusehen. Die Reaktion einer Anlage auf veränderte Umgebungsbedingungen, Verschleißerscheinungen und Toleranzen in Bauteilen zuverlässig im Planungsmodell zu berücksichtigen, birgt aufgrund der Komplexität die Gefahr des Verlusts der Wandlungsfähigkeit in der Planung (Demeester, et al., 2011). Diese allgemein der Produktion zuzuordnenden Erkenntnisse führen in der Montage zu hohen Informationsdichten.

Komplexitätsbeherrschung durch Selbstorganisation

In der Informationstechnik führen höhere Informationsdichten und Querbeeinflussungen zu einem Komplexitäts-Flaschenhals, welcher durch „autonomes Rechnen“ aufzulösen ist. Allerdings reichen kybernetische oder kognitive Ansätze unter Umständen nicht aus, weshalb Ansätze der Selbstorganisation übertragen werden (Heylighen & Gershenson, 2003). In den Wirtschaftswissenschaften überträgt die Idee der „autonomen Kooperation“ (Hülsmann, et al., 2007a) in heterogenen Strukturen die Selbstorganisation insbesondere bei einem dynamischen offenen System. Autonomes, selbstreferenzielles Verhalten wird innerhalb eines selbst definierten Regelsystems ausgeführt. Es entsteht ein adaptives, stabiles System im dynamischen Gleichgewicht mit der Umwelt. Folgende Dimensionen definieren Selbstorganisation (Hülsmann, et al., 2007b):

- Organisatorische Struktur: Komplexität, Dynamik und Offenheit des Systems
- Organisatorisches Verhalten: Indeterminismus, Selbstreferenz und Autonomie
- Organisatorische Fähigkeiten: Emergenz, dynamisches Gleichgewicht und Selbstkontrolle

Durch die Synthese der sozialwissenschaftlich verankerten Strukturierungstheorie und der Synergetik (Selbstorganisation) werden Einflüsse der Mikroebene (Mitarbeiterqualifikation) auf die Makroebene (Konzerne und Unternehmensnetzwerke) abgeleitet (Schallnus, 2005). Folgende Begriffe der Wahrnehmung werden für eine Prognose nutzbar:

- Macht - Fähigkeit zur Fremdgestaltung - über Informationsfluss gestalteter Prozess.
- Unabhängigkeit - Fähigkeit zur Selbstgestaltung - Prozess in Wechselwirkung mit Umwelt
- Erfolg - Maß der Unabhängigkeit - Grad der Beeinflussung von Umweltbedingungen
- Überindividueller Ordnungsparameter - Korrespondenz zu Umweltbedingungen

Spontane Organisation entsteht in isolierten determinierten dynamischen Systemen bei unveränderten Gesetzmäßigkeiten durch die Ausbildung von an die „Umwelt“ angepassten „Organismen“. Diese entwickeln im Wettbewerb ihre „Überlebensfähigkeit“ und „Auffassungsgabe“ unvermeidbar weiter, sind aber nicht unbedingt übertragbar und im Regelfall eigennützig (Ashby, 1962). Um regulierend einzugreifen muss Information in das System eingebracht werden. Begrenzt ist die Regulation auf das Maß der eingebrachten Information. Die Regulation weist verschiedene Ausprägungen auf. Organisation findet aber erst beim Überschreiten von Schwellwerten im Beobachtungszeitraum statt (Perry, 1995). Kybernetische Ansätze durch Einbindung von Dämonen (von Foerster, 2003) beeinflussen die Regulation der Organismen. Zusammenfassend stellt Selbstorganisation eine Eigenschaft eines Systems dar, welche gekapselt von der eigentlichen Aufgabe inhärent vorhanden ist.

Ein mögliches Bewertungskriterium für Selbstorganisation ist die Zeit, in welcher das System autonom arbeitet (Shalizi, 2001). Im Fall der Inbetriebnahme von Montage ist dieses Kriterium mit dem Anteil fähiger Prozesse verbunden und erhöht eine Selbstkontrolle der Anlage durch Einführen prädiktiver Elemente (Shalizi, et al., 2004).

Selbstreferenzielle Montage

Erreichbarkeits- und kollisionsgeprüfte Offline-Programme in Kombination mit einer Beschreibung von Qualitätsmerkmalen stellen bei der Nutzung idealisierter Modelle eine hinreichende Informationsquelle für gewandelte Montageprozesse dar. In den Planungsdaten halten die Montageeinheiten das Wissen über die eigene Aufgabe für die symbolische Zuordnung der Wahrnehmung auf die eigene Gestalt vor (Whitehead, 1919), (Hooper, 1944). Die Änderung und Überprüfung der Anforderungen in einem übergeordneten Planungssystem vereinfacht und rationalisiert die Prozesse, wodurch Kernanforderungen für die Einführung von so genannten smarten Produktionssystemen (Massotte, 1995) erfüllt werden. Die Roboter und Messsysteme agieren als autonome und redundante Einheiten in einem komplexen Umfeld. Sie weisen die selbstreferenziellen Fähigkeiten der *Kommunikation, Perception und Kompensation von Abweichungen* im Sinne der vorgeschlagenen Dämonen selbstorganisierender Systeme (von Foerster, 2003) auf. Die Selbstreferenz erhöht die Übereinstimmung zwischen dem idealisiert geplanten und realen Verhalten einer Montagezelle. Die Informationen aus der Montage lassen sich durch die höhere Übereinstimmung in die Planungsmodelle zurückführen und schaffen interoperable wissensbasierte Systeme in heterogenen Umgebungen (Leitao, 2008). Selbstreferenz reduziert Quereinflüsse mit anderen Systemen und lehnt sich in die übergeordnete virtuell gewandelte

Planung an, sodass die Prozesse automatisiert befähigt werden. Die Effektivität selbstreferenzieller Roboter und Messsysteme weist folgende Faktoren aus:

- Redundante Informationen über den Maschinenzustand im GRS (Beobachtbarkeit)
 - Die Schätzung der Unsicherheit des Montageprozesses mittels Konsistenzanalysen (Wolff, 2010) erfolgt innerhalb der Grenzen der Wahrnehmung.
 - Im Vordergrund stehen die systeminhärente Beobachtung des Montageergebnisses und den Wegfall von nachgelagerten Qualitätsschritten. Diese erhöhen den logistischen und technischen Aufwand, ohne die Qualität zu verbessern.
- Einfluss von Kompensation und Adaption auf automatisiertes Wandeln (Grenzpräzision)
 - Montageroboter nutzen zusätzliche Informationen über ihr Verhalten zur Steigerung der Präzision bei der Inbetriebnahme gewandelter Montageprozesses.
 - Verfügbarkeit, Laufzeiten, Verarbeitung, Dichte und Unsicherheiten von Informationen limitieren die Grenzpräzision selbstreferenzieller Montage.

Die Grenzpräzision ist die durch technologische, physikalische, informationstechnische und wirtschaftliche Einschränkungen erreichbare Präzision von Montagerobotern bzw. die untere Grenze der Unsicherheit von Messsystemen. Die Zusammenhänge technologischer Parameter und deren wirtschaftlicher Auswirkungen werden theoretisch und praktisch abgeschätzt. Im Verhältnis zur Prozesstoleranz ergibt sich der bestimmende Faktor für die Prozessfähigkeit.

Bewertung und Anwendung

Neben der theoretischen Betrachtung der Grenzpräzision von Selbstreferenz beeinflusst diese weitere Dimension roboterbasierter Großbauteilmontage. Wirtschaftliche Planung von Montageprozessen bildet die reale Montagezelle in der Zustandswelt ab. Durch höhere Präzision selbstreferenzieller Montage wird eine Reduktion der Komplexität durch geringere Abweichungen zwischen realer und virtueller Montage erreicht. Prozesssensorik für die Kompensation von Bauteilabweichungen bleibt nötig. Dies ist anzustreben, weil die vollständige Abbildung der Realität heutige Planungsfähigkeiten überfordert, wohingegen diese bei idealisierten Modellen erhalten bleibt. Die Idealisierung führt zur Notwendigkeit von Anpassungen bei der realen Inbetriebnahme. Selbstreferenzielle Roboter liefern einen Lösungsansatz zur Automatisierung dieses Prozesses. Ihre Grenzpräzision muss bei der Ausführung innerhalb der Anforderungen der Montageprozesse liegen. Der Erfüllungsgrad von Vorgaben der Prozesse durch selbstreferenzielle Systeme korreliert mit der Prozessfähigkeit gewandelter Großbauteilmontage. Aufgrund der Zusammenhänge von Präzision und Anforderungen unter gegebenen Randbedingungen ergibt sich der optimale Umsetzungsgrad von Selbstreferenz. Durch die Implementierung von Selbstreferenz in den betrachteten Montagezellen werden Regelmäßigkeiten in den Dimensionen selbstreferenzieller Montage abgeleitet und in Handlungsempfehlungen aufbereitet.

1.2 Forschungseinordnung und -vorgehen

Für die Beantwortung der Forschungsfrage werden interdisziplinär verteilte Forschungsansätze kombiniert und für die Inbetriebnahme gewandelter Montagezellen für Großbauteile angewendet. Der Einsatz von GRS wird für die wandlungsfähige Produktion vorgeschlagen (Demeester, et al., 2011) und in dieser Arbeit anhand der Teilmenge Großbauteilmontage untersucht. Die Fokussierung auf die Montage großer Bauteile und insbesondere das Fügen und die Einschränkung auf die Inbetriebnahme nach Wandlung erhöht die Anzahl von Fallbeispielen aufgrund parallel zur Arbeit implementierter Montagezellen. Die Entwicklung, Implementierung und Bewertung selbstreferenzieller Montage zur Inbetriebnahme industrienaher Szenarien wird durchlaufen. Dabei werden abduktiv die Erkenntnisse auf Regelmäßigkeiten untersucht. Die Implementierungen der dargestellten und eingeordneten Methoden von Selbstreferenz werden dabei innerhalb der betrachteten Montagezellen umgesetzt. Für Details zur technischen Implementierung wird an den entsprechenden Stellen auf die projektbegleitende Dokumentation verwiesen.

Einordnung und Randbedingungen

Eine idealisierte Planung einer Wandlung von roboterbasierter Montage ist ohne die Einbindung von Messtechnik nur durch manuelle Eingriffe prozessfähig. Die Roboterbewegungen und Prozesse müssen angepasst und qualitätssichernde Maßnahmen eingeleitet werden. Die große Komplexität von roboterbasierten Montageanlagen und der Bauteile verhindert die automatisierte Inbetriebnahme aufgrund mangelnder Vorhersehbarkeit. Die Fähigkeit der Anpassung bestehender Prozesse an nicht vorhersehbare technische und wirtschaftliche Randbedingungen wird mit Wandlungsfähigkeit (Nyhuis, et al., 2008) bezeichnet. Dabei geht es nicht um die flexible Auslegung einer Montagezelle und dessen wirtschaftlichen Betrieb. Gemeint ist permanente Anpassung an den wirtschaftlichen Arbeitspunkt unter Berücksichtigung technologischer und wirtschaftlicher Randbedingungen unabhängig von deren bei der Auslegung bestehenden Ausprägung.

Selbstreferenzielle Roboter und Messsysteme stellen einen Lösungsansatz für die automatisiert prozessfähige Inbetriebnahme dar. Selbstreferenz greift in die Planungsprozesse von Wandel nur geringfügig ein. Analog zum manuellen Vorgehen passen sich Roboter eigenständig und damit automatisiert an. Sie organisieren sich selber und verschieben somit technologische und wirtschaftliche Grenzen. Dabei bestimmt der Grad der Umsetzung von Selbstreferenz, inwieweit die Inbetriebnahme automatisiert abläuft. Der Grad der Unterstützung erfolgt von einer reinen Beobachtung für die Ableitung von Vorschlägen für Prozessparameter bis zur Vollautomatisierung in Losgröße 1.

Durch den Einsatz von GRS als Grundlage der Kommunikation in einem Montagesystem, werden interdisziplinäre Lösungsansätze der Wahrnehmungstheorie (Psychologie),

Selbstorganisation (Sozialwissenschaft und Informatik), Informationssystemen (Informatik) und Messtechnik (Produktionstechnik) kombiniert. Dabei wird in der Darstellung der Wahrnehmung nach (Whitehead, 1919) die idealisierte Planung als Wissen über die Montageobjekte angesehen und durch Messtechnik die perzeptiven Fähigkeiten durch objektivierbare Informationen erweitert. Mit der Kenntnis der Abweichung zwischen internem Wahrnehmungsmodell und realem Verhalten passt sich das System durch Einbindung angepasster Dämonen an (von Foerster, 2003). Die Grundlage der Selbstreferenz liegt im *Informationsaustausch* innerhalb der Montageanlage (Kommunikation), der *Beobachtbarkeit* der Prozesse (Perzeption) und der Einbindung von Logik zum Erreichen einer höheren *Präzision* (Kompensation und Adaption). Die Informationen sind Schätzungen zeitlicher und geometrischer Beziehungen, welche formal mit einer zugeordneten Unsicherheit angegeben und verarbeitet werden (JCGM, 2008). Selbstreferenz kombiniert Kommunikation, Perzeption und Kompensation und stellt sie als Eigenschaft der Systeme bereit.

Erkenntnisgewinn durch abduktives Schließen

Die Wirkmechanismen von Selbstorganisation als übergeordneter Rahmen der Selbstreferenz sind emergent (Schallnus, 2005), also nicht auf isolierte Eigenschaften zurückführen. Es existieren als Attraktoren bezeichnete Strukturen, an denen sich im direkten Umfeld andere Strukturen ausrichten. Sie stellen Regeln des betrachteten Systems dar (Hülsmann, et al., 2007a). Deduktive und induktive Schlussverfahren nutzen Begründungsmodelle für die gefundenen Erkenntnisse und müssen unabhängig von ihrem Entdeckungszusammenhang überprüfbar sein (Popper, 1935). Die analytische Herleitung von Attraktoren in einer roboterbasierter Großbauteilmontage ist aufgrund fehlender oder komplexer Beschreibungsmodelle nicht möglich. Im Beispiel von Tab. 1-1 existiert keine Möglichkeit, deduktiv die Grenzpräzision von Robotern oder Messsystemen bei der Ausführung von gewandelten Prozessen aus bekannten Regeln herzuleiten. Ebenso verhindern die vielfältigen und komplexen Auswirkungen in der roboterbasierter Großbauteilmontage den Nachweis von Regeln für einen induktiven Schluss. Im Beispiel von Tab. 1-1 existiert kein signifikantes Beschreibungsmodell für das Verhältnis von Grenzpräzision zur Prozesstoleranz.

Für das Schließen auf Regelmäßigkeiten selbstreferenzieller Montage auf gewandelte Montageprozesse wird auf die Abduktion nach Peirce (Burks, 1946) zurückgegriffen, welche den Begriff der Hypothesenbildung (Peirce, 1878) präzisiert. Die Probleme der Abduktion werden mit der Formalisierung, Abgrenzung, Beschreibung und Begründung (Plutynski, 2011) umschrieben. Handlungsempfehlungen für die deduktive und induktive Überprüfung werden von Peirce als nachfolgende Schritte des Erkenntnisprozesses vorbereitet. Die Abduktion nutzt die Struktur des Betrachtungsgegenstands aus, dass sich im direkten Umfeld eines Attraktors Strukturen abbilden, welche als Regelmäßigkeiten erkennbar sind. Durch Beobachtung und Ableitung der Erkenntnisse in einem kreativen abduktiven Schluss (Schurz, 1995) sind diese zugänglich. Der Beginn eines abduktiven Schlusses betrachtet nach Pierce

ein überraschendes Ereignis, z.B. in Tab. 1-1 die automatisierte Inbetriebnahme von Wandel, obwohl weder Roboter noch Messsysteme allein aufgrund idealisierter Planung Prozessfähigkeit sicherstellen können.

In den Anwendungsszenarien der durchgeführten Projekte werden die Inbetriebnahmen gewandelter Prozesse als überraschende Ereignisse realisiert. Sie existieren unbeachtet ihrer theoretischen Funktionsweise und werden auf ihre Wirkmechanismen untersucht. Die technische Ausprägung kann der jeweiligen Projektbibliographie entnommen werden. Die Überraschung äußert sich in der Tatsache, dass in den Szenarien manuelle Kompensation Voraussetzung für die Inbetriebnahme ist. Durch die Kopplung der Systeme mittels Selbstreferenz wird die Grenzpräzision kleiner als die Anforderungen der gewandelten Prozesse gestaltet. Die automatisierte Inbetriebnahme von Wandel wird möglich. Für die Überprüfung der abgeleiteten Regelmäßigkeiten werden Handlungsempfehlungen für die Schritte zwei und drei des Erkenntnisprozesses nach Pierce (Psillos, 2011) der *Deduktion theoretischer Erklärungsmodelle* und der *induktiven experimentellen Überprüfung* vorbereitet.

Tab. 1-1: Schlussweisen übertragen auf automatisiertes Wandeln

Abduktion		Deduktion		Induktion	
Regel	Selbstreferenz steigert Präzision von Montage	Regel	Selbstreferenz steigert Präzision von Montage	Fall	Grenzpräzision ist kleiner als Prozesstoleranz
Ergebnis	Montageprozess automatisiert gewandelt	Fall	Grenzpräzision kleiner als Prozesstoleranz	Ergebnis	Montageprozess automatisiert gewandelt
Fall	Grenzpräzision ist vielleicht kleiner als Prozesstoleranz	Ergebnis	Montageprozess kann automatisiert gewandelt werden	Regel	Selbstreferenz steigert den Automatisierungsgrad von Wandel
Hypothetischer Schluss vom Einzelnen und einer Regel auf eine Regelmäßigkeit		Schluss vom Allgemeinen auf das Einzelne		Schluss von einer üblichen Regelmäßigkeit auf das Allgemeine	

Durch Implementierung von Montagezellen mit automatisierten Wandel für den abduktiven Schluss sind erkannte Regelmäßigkeiten anhand der konkreten Realisierung überprüfbar. Die Herleitung der Wirkmechanismen wird anhand des Umsetzungsgrades von Selbstreferenz identifiziert und isoliert betrachtet. Im Betrachtungszeitraum der Arbeit werden durchgeführte Projekte zur Ableitung von Regeln für folgende Einflüsse genutzt:

- Anforderungen von Wandel bei der Inbetriebnahme
- Selbstreferenzielle Fähigkeiten
- Bewertung von automatisiertem Wandel

Die durchgeführten Projekte dienen als Arbeitsgrundlage für die Beantwortung der Forschungsfrage. Innerhalb des Betrachtungszeitraumes werden unterschiedliche Umsetzungsgraden von Selbstreferenz implementiert und auf ihren Beitrag untersucht.

Durchgeführte Projekte

Die anwendungsbezogene Grundlage der Implementierung von Selbstreferenz wird durch das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Land Nordrhein-Westfalen geförderte Forschungsgroßgerät (DFG, 2008) „Indoor-GPS basierte Roboterzelle“ bereitgestellt. In Forschungsprojekten von 2010 bis 2013 werden theoretische und praktische Lösungen für Fragestellungen der wandlungsfähigen Montage bearbeitet. Anforderungen werden abgeleitet und selbstreferenzielle Mechanismen implementiert:

- Eignung von iGPS zur Bestimmung von Abweichungen kooperierender Roboter im BMBF Projekt (BMBF, 2008) „Intelligente, hochpräzise Montage mit Robotern durch Einsatz von Indoor GPS Systemen“ (Norman, et al., 2010), (Norman, et al., 2012)
- Messunsicherheit im DFG Projekt (DFG, 2010a) „Bestimmung der Messunsicherheit kontinuierlich mit Lasertrackern erfasste Bahnkurven für die Kalibrierung dynamischer Bewegungen von Robotern und großen Werkzeugmaschinen“ (Kapitel 4.1.2)
- Roboterregelung im DFG Projekt (DFG, 2010b) „Effizientes Einrichten kooperierender Montageroboter mittels Indoor-GPS“ (Schmitt, et al., 2011a), (Schmitt, et al., 2012a)
- Kombination von lokaler und globaler Sensorik im BMBF Projekt (BMBF, 2010) „Produktionssysteme aktiv wandeln“ (Schmitt, et al., 2010a) (Schmitt, et al., 2012b) (Schmitt, et al., 2013b) (Schmitt, et al., 2014d)
- Selbstoptimierungsstrategien für die Großbauteilmontage im DFG Exzellenzcluster (DFG, 2006) „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ (Schmitt, et al., 2011b)

Neben den Forschungsarbeiten werden Anwendungsszenarien in bilateralen Industrie-Projekten, Vorstudien und Kooperationen in den Jahren 2011 bis 2016 umgesetzt. Diese erweitern die Bewertungskriterien bei der industriellen Anwendung von Selbstreferenz:

- Aufbau von Prozessketten für das Integrieren von Stringer in Rumpfschalen mit den Firmen Premium Aerotec und FFT Produktionssysteme im vom Land Niedersachsen geförderten Verbundprojekt (TZN, 2012) „OptiStringEnc“ (Schönberg & Wehn, 2014) mit Aufbau einer Serienanlage (Schönberg & Wehn, 2016) (Schönberg & Wehn, 2015b)
- Fügen von Rumpfschalen zu einer Sektion durch die Betreuung einer Masterarbeit mit der Firma Premium Aerotec (Bertelsmeier, 2013) (Schmitt, et al., 2014b)
- Automatisiertes Fügen von Flugzeugrümpfen (Demeester, et al., 2011) durch die Betreuung einer Diplomarbeit (Apetz, 2011) und automatisiertes Fügen von Großöltanks durch die Betreuung einer Masterarbeit (Fechter, 2014) mit dem Instituto Tecnológica Aeronautica (ITA) in Sao Jose dos Campos, Brasilien
- Montage von Windschutzscheiben unter Fließbedingungen am WZL (Storm, et al., 2017)

1.3 Aufbau der Arbeit

Vor dem Hintergrund der Forschungsfrage wird ein Entwicklungszyklus zum Einsatz von Selbstreferenz für die **Inbetriebnahme von Wandel** roboterbasierter Großbauteilmontage durchlaufen (Abb. 1-1). Ausgehend von einer Analyse der *Anforderungen* werden die Mechanismen von *Selbstreferenz* (Kommunikation, Wahrnehmung und Kompensation) innerhalb der durchgeführten Projekte analysiert. Die bei der Implementierung der Montagezellen erkannten Merkmale von selbstreferenzieller Montage führen durch einen paarweisen Vergleich zu einem *Bewertungsschema*. Dieses wird innerhalb der *Anwendungsszenarien* für die Validierung angewendet. In der *Diskussion* werden die erkannten Regelmäßigkeiten systematisiert und zu Handlungsempfehlungen verdichtet.

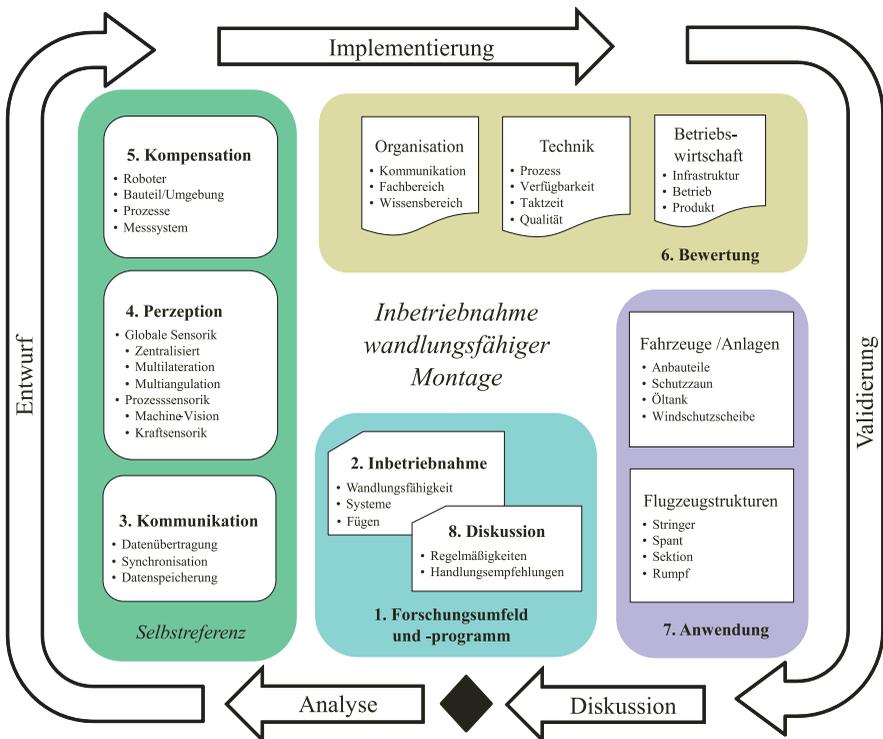


Abb. 1-1: Einordnung der Kapitel (fett) in den methodischen Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden Anforderungen an die Erhöhung des Automatisierungsgrads von der Inbetriebnahme von Wandel analysiert. Nach einer Einführung der Grundlagen von Wandlung von Montageprozessen werden zwei Gruppen von Problemstellungen zum Fügen großer Bauteile mit unterschiedlichen Materialcharakteristiken abgegrenzt. Die Toleranzgrenzen für die Fügeprozesse, die Notwendigkeit der Wandlung und die Hemmnisse stellen die Anforderungen an selbstreferenzielle Montagezellen dar:

- Für plastisch verformbare, isotrope oder quasi-isotrope Metalle in der Fahrzeug- und Anlagentechnik reichen die Dimensionen von Türen über Anbauteile von Fahrzeugen bis hin zu Karosserien und Großtanks.
- Die Prozesskette zum Fügen von Flugzeugstrukturen in weiten Teilen aus plastisch nicht verformbaren anisotropen kohlefaserverstärkten Kunststoffen benötigt Fügeprozesse im elastischen Bereich für folgende Prozesse:
 - Einbringen von Verstärkungselementen in Längsrichtung in Hautfelder
 - Einbringen von Verstärkungselementen in Radialrichtung in Schalenelemente
 - Verbinden der Elemente zu Sektionen
 - Fügen der Sektionen zu einem Flugzeugrumpf.

In Kapitel 3 werden Kommunikationsmechanismen in GRS analysiert. Die Kommunikation zwischen den Komponenten selbstreferenzieller Systeme ermöglicht deren Kooperation. Sie dient ebenfalls den beteiligten Menschen zum Erfassen des Anlagenzustandes für die Absicherung und Optimierung der Anlage. Der Austausch von Daten, deren geometrische/zeitliche Synchronisation und die Speicherung der Informationen stellen die übergeordneten Aspekte der Kommunikation dar. Der Informationsaustausch wird für die Projekte soweit benötigt implementiert und ist Grundlage von Perception und Kompensation.

In Kapitel 4 werden Perzeptionsmechanismen in GRS analysiert. Eine Grundlage von Selbstreferenz ist das Beobachten des eigenen Verhaltens. Im Vordergrund steht die Informationsgewinnung über Abweichungen zwischen virtueller Planung und realer Montage. Die Messverfahren lassen sich in Large-Volume Messtechnik und Prozesssensorik unterscheiden. Die Bestimmung von Abweichungen und deren Bereitstellung im GRS werden auf ihren Beitrag zur Beobachtbarkeit von Montage untersucht.

In Kapitel 5 werden Kompensationsmechanismen in GRS durch Nutzung von Informationen der Perception untersucht. Sowohl die Montageroboter als auch die Messsysteme profitieren von einer höheren Informationsverfügbarkeit in GRS. Kompensationsmechanismen wirken in unterschiedlichen Kategorien wie Montageroboter, Bauteile, Umgebungsbedingungen, Prozesseinflüsse und messtechnischen Aspekten. Die Kompensationsfähigkeit von Robotern und Messsystemen begrenzt die erreichbare Präzision selbstreferenzieller Roboter und die minimale Unsicherheit von Messsystemen. Sie wird als Grenzpräzision definiert. Automatisierter Wandel erfordert eine Grenzpräzision unterhalb der Prozesstoleranz.

In Kapitel 6 werden die Aspekte der Anwendung von Selbstreferenz für die automatisierte Inbetriebnahme von Wandel von Großbauteilmontage kategorisiert und über einen paarweisen Vergleich gewichtet. Das Bewertungsschema wird für die Einflussanalyse beim Wandeln selbstreferenzieller Montage eingesetzt und ermöglicht die Untersuchung der Korrelation vom Implementierungsgrad von Selbstreferenz und Prozessfähigkeit von Wandel.

In Kapitel 7 wird in Anwendungsszenarien das Bewertungsschema zur Bestimmung organisatorischer, technologischer und betriebswirtschaftlicher Beiträge von Selbstreferenz für das automatisierte Wandeln angewendet. Regelmäßigkeiten bei der Implementierung und dessen Einflüsse auf die automatisierte Inbetriebnahme von Wandel werden abgeleitet.

In Kapitel 8 werden die Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfrage zusammengefasst und mit der Zielsetzung verglichen. Die Regelmäßigkeiten werden dargestellt, nach Möglichkeit abgegrenzt und eine mögliche Begründung für den Funktionsmechanismus angegeben. Die gewählte Forschungsmethodik wird hinsichtlich der Zweckmäßigkeit zur Beantwortung der Forschungsfrage überprüft. Die Überprüfung der Regelmäßigkeiten wird anhand von Handlungsempfehlungen vorbereitet und eingeordnet.

1.4 Beiträge der Arbeit

Die Arbeit implementiert Selbstreferenz für die Inbetriebnahme wandlungsfähiger Montagezellen beispielhaft in Anwendungsszenarien, um die Potenziale und Herausforderungen zu erkunden und zu strukturieren. Der abduktive Ansatz identifiziert Regelmäßigkeiten und entwickelt diese zu Handlungsempfehlungen weiter. Die Ergebnisse der Implementierung von Selbstreferenz werden durch ein Bewertungsschema eingeordnet:

- GRS bilden einen Standard für den kooperierenden Informationsaustausch
- Sensorik steigert die Fähigkeit zur Perzeption
- Kompensation von Montagerobotern und Messsystemen
- Automatisierung der Inbetriebnahme von Wandel durch Selbstreferenz

Die Arbeit dient als Übersicht und Arbeitsgrundlage für den Aufbau einer Forschungslandschaft zum Schließen der Prozessfähigkeitslücke zwischen virtueller Planung und realer Produktion (Demeester, et al., 2011) durch Selbstreferenz, wobei die roboterbasierte Großbauteilmontage aufgrund der Eignung für den abduktiven Ansatz fokussiert wird.

2. Prozessfähigkeit gewandelter Großbauteilmontage

Die Grundlage des abduktiven Schlusses stellen roboterbasierte Großbauteilmontageprozesse bei einer wirtschaftlichen oder technischen Wandlung dar. Die Montageobjekte (Whitney, 2004) weisen bei einer Reduktion auf den Kernprozess „Fügen großer Bauteile“ einen abgegrenzten Betrachtungsraum für die Bewertung der Automatisierbarkeit der Inbetriebnahme des Wandelns auf. Über eine Analyse der Forschungsagenda zur Wandlungsfähigkeit werden die Hemmnisse automatisierter Inbetriebnahme hergeleitet und auf die Notwendigkeit manueller Eingriffe untersucht. Für die Bewertung der Einflüsse selbstreferenzieller Systeme in GRS (Demeester, et al., 2011) wird der relative Beitrag zur Steigerung des Automatisierungsgrads der Inbetriebnahme von Wandlung hergeleitet.

Das Kapitel stellt den Forschungskontext der *Wandlungsfähigkeit (Kapitel 2.1)* dar, um darauf aufbauend die Anforderungen an Wandlung von *Montagezellen (Kapitel 2.2)* und insbesondere *Fügen von Großbauteilen von Metall- und Faserbundstrukturen (Kapitel 2.3)* herzuleiten. Die Anforderungen von gewandelten Prozessen bestimmen über das Verhältnis zur erreichbaren Präzision von Robotern und Messsystemen die Prozessfähigkeit. Die *Anforderungen an selbstreferenzielle Montage (Kapitel 2.4)* dienen damit als Grundlage für die Ableitung von Lösungsansätzen zur Gestaltung der automatisierten Wandlung und deren Bewertung.

2.1 Wandlungsfähigkeit und Wandeln

Die zunehmende Globalisierung bietet den Hochlohnländern Europas eine Chance, die Wertschöpfungsketten auch im Bereich der Produktion an heimischen Standorten zu stärken. Auf jedes vierte Unternehmen mit einer Verlagerung von Produktion in den Jahren vor 2012 kommt ein Unternehmen mit einer Rückverlagerung an den heimischen Standort (Schulze, 2012). Hauptgründe für eine Rückverlagerung betragen in der überwiegenden Anzahl die Aspekte Flexibilität und Qualität (Kinkel & Maloca, 2009). Der Anteil an Verlagerungen in andere Länder erreichte in den Jahren vor 2012 im verarbeitenden Gewerbe (VG) mit 8 % einen Tiefstand. Er wurde mit Personalkosten und Nähe zu Märkten, Kunden, bereits verlagelter Produktion und Rohstoffen begründet (Braun & Kinkel, 2012). Flexibilität, Qualität und Nähe spielen demnach eine zentrale Rolle bei der Entscheidung für oder gegen eine Verlagerung. Personalkosten stellen zwar weiterhin einen Hauptgrund für eine Verlagerung dar, allerdings ist aufgrund des geringen Anteils und Lohnsteigerungen in so genannten Niedriglohnländern ein vernachlässigbarer Faktor (Schulze, 2012).

Die Gründe für die stärkere Position der heimischen Produktion in Hochlohnländern sind vielschichtig und nicht allgemein zu benennen. Einen maßgeblichen Trend der letzten Jahre stellt die Dynamisierung des Marktumfeldes durch neue Technologien, Wettbewerber und immer stärkere Vernetzung dar (Berkholz, 2008). In den Wettbewerbsstrukturen volatiler

Märkte liegt der Schlüssel zum Erfolg in der Reaktionsfähigkeit auf nicht vorhersehbare Anforderungen. Dabei muss der weitergehende Anspruch der Wandlungsfähigkeit gegenüber der Flexibilität beachtet werden. Flexibilität zielt auf die Einbeziehung geplanter Erwartungen ab und weist in turbulenten Marktbedingungen wirtschaftliche Risiken auf (Berkholz, 2008).

Wandlungsfähige und cyber-physische Produktionssysteme

Im Themenfeld „Wandlungsfähige Produktionssysteme“ arbeiten im Zeitraum von 2009 bis 2013 zwölf Verbundprojekte als Gewinner eines Ideenwettbewerbs vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) betreut durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA, 2011). Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen schafft im Projekt „Produktionssysteme Aktiv Wandeln“ (ProAktiW) ein wandlungsfähiges Produktionssystem durch integrierte Betrachtung von Technologie, Organisation und Information für den klassischen Stahlbau. Ein wandlungsfähiger Demonstrator aus kooperierenden Robotern zum vorrichtunglosen Schweißen fertigt Komponenten von Schutztüren (Kampker, et al., 2014).

Aufbauend auf den Erkenntnissen beim Schaffen wandlungsfähiger Produktionssysteme wird in den nachfolgenden Ideenwettbewerben zur Stärkung des Produktionsstandortes Deutschland die Idee des „Internet der Dinge“ mit den weiteren Begriffen „Industrie 4.0“ und „Cyber Physical (Production) Systems“ (CPPS) in den Fokus der Forschung in Deutschland gerückt (Kagermann, et al., 2012). Ob die cyber-physischen Systeme (CPS) die vierte industrielle Revolution auslösen, oder nur ein evolutionärer Zwischenschritt sind, ist aufgrund fehlender Schnittstellen und Reaktionsstrategien nicht abzuschätzen: *„Die 4. industrielle Revolution wurde zwar ausgerufen, sie hat aber noch nicht stattgefunden: Die proklamierten cyber- physischen Systeme (CPS) sind meist zu teuer, nicht zuverlässig genug und häufig überdimensioniert.“* (Produktion, 2012). Möglicherweise befähigen CPS aber die Maschinen einer Produktionsanlage zum autonomen Handeln (BMW, 2014). Der soziotechnische Fokus der Rolle des Menschen revolutioniert sich vom ausführenden zum anleitenden Element, wodurch die Forderung der Nachvollziehbarkeit automatisierter Funktionen entsteht. Der Rollenwechsel spiegelt den sozialen Charakter der vergangenen industriellen Revolutionen wider, welche jeweils einen Komplexitätssprung hervorgerufen haben.

Die Idee von CPS verfolgt u. a. die Erweiterung der Kommunikationsfähigkeiten zur Autonomisierung der Produktion (Spath, et al., 2013). Anstelle zentraler Planungssysteme sollen die Produkte und Maschinen eines Produktionssystems dezentral koordiniert arbeiten. Dabei erhöht die Fokussierung auf die Kommunikationsschnittstellen und Modularisierung die Komplexität an der Schnittstelle zwischen Planung und Produktion. In der theoretischen (virtuellen) Betrachtungsebene lassen sich modulare Systeme konzipieren und validieren. Die Produktion findet aber in einer realen Produktionsumgebung statt und ist nicht ausreichend in Planungsmodellen abzubilden (Demeester, et al., 2011). Die entstehenden Abweichungen behindern die Prozessfähigkeit eines Produktionssystems und müssen verringert werden