Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz

Johannes Schilp

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ. Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ. Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lueth

Die Dissertation wurde am 16.11.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.12.2010 angenommen.

Johannes Schilp

Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz

Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 244

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2012

ISBN 978-3-8316-4063-8

Printed in EU
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart *Michael Zäh*

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die sehr gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart danke ich für die wohlwollende Förderung und Betreuung bzw. der großzügigen Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lueth, dem Leiter des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sehr herzlich bedanken. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für die Unterstützung und konstruktive Arbeitsatmosphäre, welche durch zahlreiche Diskussionen und vielfältige Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Dirk Jacob, der durch seine Vorarbeiten am Institut meine Begeisterung für das Themenfeld Mikromontage geweckt hat, und Herrn Dr.-Ing. Michael Ehrenstraßer für die enge Zusammenarbeit. Ebenso danke ich den zahlreichen Studierenden und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den Servicecentern des Instituts, welche durch ihre Unterstützung meine Arbeit erst ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und dadurch den Grundstein zu dieser Arbeit gelegt haben.

München, im Dezember 2010 *Johannes Schilp*

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**

Abkürzungsverzeichnis ..... **V**

1 Einleitung **1**

1.1 Trends in der Mikroproduktionstechnik 1

1.2 Mikromontage im Spannungsfeld der Kleinserie 4

1.3 Motivation und Zielsetzung 8

1.4 Vorgehensweise 12

2 Grundlagen und Basistechnologien **15**

2.1 Überblick 15

2.2 Mikromontage – eine Schlüsseltechnologie 15

2.2.1 Definition 15

2.2.2 Wirtschaftliche Herausforderungen 17

2.2.3 Technologische Herausforderungen 20

2.2.4 Analyse der Technologien für die flexible Mikromontage 23

2.3 Systemergonomie 26

2.3.1 Struktur eines Mensch-Maschine-Systems 26

2.3.2 Informationsverarbeitung im Systemelement Mensch 28

2.3.3 Informationsverarbeitung des Systemelements Maschine 31

2.3.4 Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Maschine 33

2.4 Telepräsenz- und Teleaktiontechnologie 36

2.4.1 Definition und Begriffe 36

2.4.2 Anwendungen von Telepräsenzsystemen 39

2.4.3 Nutzen der Telepräsenz in der Produktiontechnik 42

2.4.4 Analyse der Telepräsenztechnologie 45

2.5 Programmierverfahren 46

2.5.1 Überblick und Begrifflichkeiten 46

2.5.2 Analyse von Programmierverfahren 50

2.6 Anforderungsprofil und Bewertungsschema 52

3 Stand der Forschung und Technik 55

3.1 Überblick 55

3.2 Flexible Mikromontagesysteme 55

3.2.1 Manuelle Mikromontagesysteme 55

3.2.2 Teleoperierte Mikromontagesysteme 57

3.2.3 Automatisierte Mikromontagesysteme 62

3.2.4 Adaptive Ansätze 64

3.3 Auswertung des Stands der Technik 66

3.4 Präzisierung der Aufgabenstellung 68

4 Entwurf eines adaptiven Mikromontagesystems 69

4.1 Entwurf einer adaptiven Mikromontagestrategie 69

4.2 Anlagenarchitektur und Teilsysteme 72

5 Baukasten für die Teleoperatorseite 75

5.1 Kinematik und Teleoperatoren 75

5.2 Werkzeugsystem und Endeffektoren 76

5.3 Bauteilträger und Aktionsort 82

5.4 Multisensorsystem 82

5.4.1 Physikalische Sensorkomponenten für die Mikromontage 82

5.4.2 Vorgehensweise für die physikalische Sensorauswahl 85

5.4.3 Sensorentwurf nach dem Prinzip der logischen Sensoren 87

5.4.4 Implementierungsmodell logischer Sensoren 89

5.4.5 Baukasten logischer Sensoren 90

5.5 Steuerungssystem 96

5.5.1 Steuerungsarchitektur 96

5.5.2 Kombination unterschiedlicher Steuerungsfunktionen 99

6 Baukasten für den Operatorarbeitsplatz 101

6.1 Klassifikation von Bedienerschnittstellen 101

6.1.1 Konzeption von Darstellungs- und Wirkraum 103

6.1.2 Konzeption des Programmierraums 105

6.1.3 Grundkonzept eines integrierten Operatorarbeitsplatzes 107

6.2 Steuerungsstrategie 108

6.2.1 Kontinuierlicher Wechsel zwischen den Fertigungsarten 108

6.2.2 Telepräsenzmodus für die Einzelfertigung 110

6.2.3 Telepräsentes Programmieren 111

6.2.4 Automatikmodus für die Mittelserienfertigung 113

7 Aufbau einer Pilotanlage 115

7.1 Teleoperatorseite für die adaptive Mikromontage 115

7.1.1 Kinematiksystem und Mikromontagewerkzeuge 115

7.1.2 Sensorik und Bildverarbeitung 117

7.2 Bedienerschnittstelle 118

7.2.1 Haptische Eingabegeräte 118

7.2.2 Visualisierung und Kontrollfunktionen 119

7.3 Technisch-wirtschaftliche Bewertung 120

7.3.1 Technische Bewertung 120

7.3.2 Wirtschaftliche Bewertung 121

8 Zusammenfassung und Ausblick 125

8.1 Ergebnisse und ihre Bedeutung 125

8.2 Weiterer Handlungsbereiche 126

Abbildungsverzeichnis 129

Literaturverzeichnis 133

Abkürzungsverzeichnis

a	annum (Jahr)
AAA	agile-assembly-architecture
AFM	Atomic-Force-Microscope
Anm.	Anmerkung
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BioMEMS	biological-micro-electro-mechanical systems
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d	day (Tag)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
e.V.	eingetragener Verein
engl.	englisch
et al.	et alii
etc.	et cetera
f	folgende
Fa.	Firma
ff	fortfolgende
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel

ggf.	gegebenfalls
LIGA	Lithographie-Galvanoformung-Abformung
MEMS	micro-electro-mechanical systems
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
MMS	Mensch-Maschine-System
MOEMS	micro-opto-electro-mechanical systems
ms	Millisekunde
MST	Mikrosystemtechnik
NEXUS	The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems
REFA	REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
S.	Seite
sog.	so genannte
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
u. a.	und andere
usw.	und so weiter
v. a.	vor allem
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

z. T. zum Teil

1 Einleitung

1.1 Trends in der Mikroproduktionstechnik

Die Produktionstechnik steht im Bereich der Automatisierungstechnik vor einem Paradigmenwechsel, da sie sich in Zukunft mit dem Einsatz von Mikrosystemen und der sog. „technischen Intelligenz“ verstärkt auf die kognitiven Fähigkeiten des Menschen und dessen Integration in die Produktion stützen muss. Auf diese Weise entstehen intelligente und flexible Automatisierungslösungen, um den allgemeinen Markttrends der Kundenindividualisierung, der Steigerung der Produktkomplexität und der Verkürzung der Produktlebenszyklen entgegenzutreten (WESTKÄMPER 2000, WESTKÄMPER 2005). „People are the most flexible ressource a company may have. … Being the so called process owner people take the responsibility of the production processes to optimize productivity and quality as well as to minimize production cost.” Mit diesem Zitat schlagen BLEY ET AL. (2004) die kognitive Integration der Produktionsmitarbeiter und die intelligente und flexible Kombination von manuellen und automatisierten Tätigkeiten in einer Produktionskette vor, um trotz steigender Variantenvielfalt und sinkender Losgrößen die Reaktionsfähigkeit der Unternehmen auf Marktveränderungen in der Zukunft zu gewährleisten. Diese Rückbesinnung auf den Wert des Mitarbeiters bzw. auf den Wert seiner fachlichen Qualifikation stellt besonders auch in Hochlohnstandorten wie Deutschland einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für das produzierende Gewerbe dar (ZÄH ET AL. 2006A, KINKEL & Lay 2004).

Diesen Paradigmenwechsel weg von vollständig automatisierten und damit starren Produktionskonzepten hin zu intelligenten und flexiblen Automatisierungslösungen unter sinnvoller Einbeziehung des Menschen belegt auch eine empirische Studie (LAY ET AL. 2001A), in der deutsche Unternehmen nach dem Erfolg ihrer in der Vergangenheit getätigten Investitionen zur Erhöhung des Automatisierungsgrads befragt wurden (siehe Abbildung 1 Mitte). Hohe Automatisierungsgrade widersprechen demnach z. B. der durch den Markt geforderten Losgrößenreduktion (65%) und der flexiblen Kapazitätsanpassung (57%).

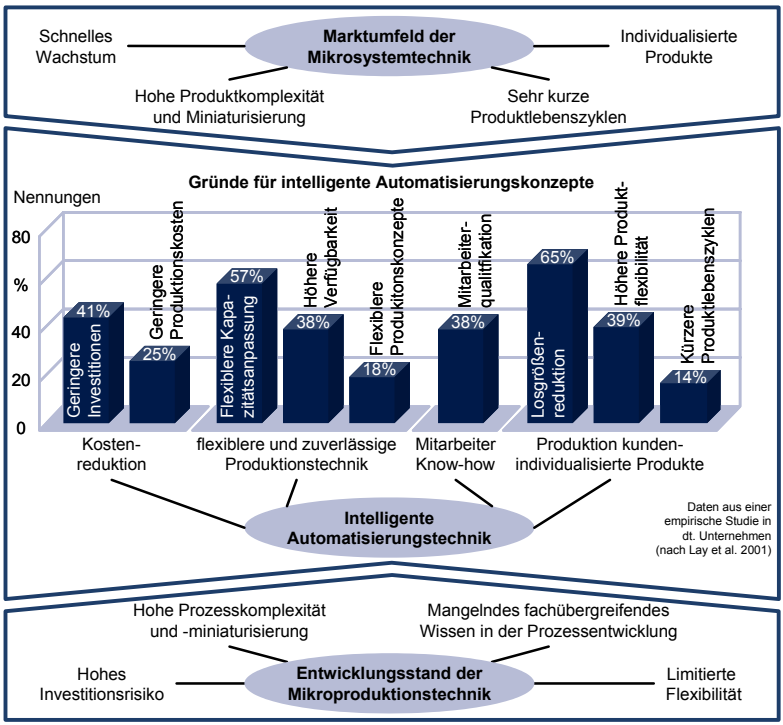

Abbildung 1: Intelligente Automatisierungstechnik (Mitte) als Bindeglied zwischen den Marktumfeld der Mikrosystemtechnik (oben) und dem Entwicklungsstand der Mikroproduktionstechnik (unten)

Das Potenzial dieses Paradigmenwechsels in der Automatisierungstechnik wird auch am Beispiel der Mikrosystemtechnik deutlich, welche als sog. Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts (BÜTTGENBACH 1998) hinsichtlich ihrer Marktentwicklung hoch gelobt wird, jedoch in einigen Bereichen hinter den Marktprognosen zurück bleibt. Für diese Betrachtung lassen sich die in der oben erwähnten Studie aufgeführten und teils vielschichtigen Gründe für intelligente Automatisierungslösungen in folgende vier Aspekte zusammenfassen (siehe Abbildung 1 Mitte):

- Kostenreduzierung bzw. niedriges Investitionsrisiko,
- flexiblere und zuverlässige Produktionstechnik,