

Bernd Müller

*Robuste, automatisierte Montage-  
systeme durch adaptive Prozessführung  
und montageübergreifende  
Fehlerprävention am Beispiel  
flächiger Leichtbauteile*



Bernd Müller

*Robuste, automatisierte Montage-  
systeme durch adaptive Prozessführung  
und montageübergreifende  
Fehlerprävention am Beispiel  
flächiger Leichtbauteile*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	31. August 2005
Tag der Promotion:	19. Januar 2006
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

ISBN 3-87525-240-3  
ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2006  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik und Maschinenbau, gilt mein besonderer Dank für seine wohlwollende Förderung und Unterstützung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktions-technik am Institut für Fertigungstechnik und Maschinenbau möchte ich für die aufmerksame Durchsicht der Arbeit und die sich daraus ergebenden Anregungen danken.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls FAPS, stellvertretend bei Herrn Dr.-Ing. Stefan Slama, Herrn Dr.-Ing. Matthias Wenk und Herrn Wilhelm Weller, sowie bei allen mitwirkenden Studenten recht herzlich für Ihre Unterstützung bedanken. Sie haben durch anregende Fachdiskussionen oder ihr tatkräftiges Mitwirken beim Aufbau der Montageanlage und bei den Laboranalysen einen wichtigen Beitrag zum erfolgreichen Gelingen meiner Arbeit geleistet. Den Kollegen im SFB 396 *Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile* wünsche ich weiterhin viel Erfolg bei Ihren Forschungsarbeiten.

Mein besonderer Dank gilt zudem meiner Frau Claudia und meinen beiden Söhnen Pascal und Dominik, die durch ihre stete Motivation und Rücksichtnahme den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit möglich gemacht haben.

Erlangen, März 2006

Bernd Müller



# **Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Defizite.....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	5
<b>2</b>	<b>Montagesysteme für flächige Leichtbauteile, Systemrobustheit und Verfügbarkeitsicherung.....</b>	<b>9</b>
2.1	Charakteristische Merkmale von flächigen Leichtbauteilen und Montagesystemgestaltung .....	9
2.2	Analysemethoden für Störpotentiale in der automatisierten Montage und zur Charakterisierung der Systemrobustheit.....	19
2.2.1	Erweiterte FMEA und Beispielprozesskette PKW-Türmontage .....	23
2.2.2	Einsatz der Statistischen Versuchsplanung und Sensitivitätsanalyse zur Wirkungsanalyse von Füge-teiltoleranzen.....	27
2.2.3	Analyse der Prozessfähigkeit und der Montagesystemfähigkeit.....	30
2.3	Übersicht zur Verfügbarkeitsicherung in der automatisierten Montage .....	35
2.4	Proaktive Verfügbarkeitsicherung .....	37
2.4.1	Analyse montagegerechter Produktgestaltung und Methoden der Toleranzvergabe in der Konstruktion.....	37
2.4.2	Ansätze in der Arbeitsplanung und Fertigungsvorbereitung .....	38
2.4.3	Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung .....	38
2.4.4	Einsatz von Messverfahren und Regelungskonzepten in der Montage .....	40
2.5	Reaktive Verfügbarkeitsicherung .....	45
2.5.1	Reaktionsstrategien bei konstruktionsbedingten Fehlern.....	45
2.5.2	Reaktionsstrategien bei fertigungsbedingten Störungen.....	46
2.5.3	Diagnose von Produktionsstörungen in der Montage .....	46
2.6	Bewertung und Defizite .....	48

<b>3</b>	<b>Holistischer Ansatz zur Schaffung robuster Prozessketten in der automatisierten Montage</b> .....	<b>49</b>
3.1	Begriffsdefinition zu robusten Prozessketten .....	49
3.2	Teilaspekte des hierarchisch adaptiven Steuerungskonzeptes .....	50
3.3	Prozessuntersuchungen zu wärmearmen, mechanischen Fügeverfahren.....	51
3.3.1	Experimentelle Versuchsergebnisse zur Schraubtechnologie .....	55
3.3.2	Experimentelle Versuchsergebnisse zur Stanzniettechnologie und Gestaltungsregeln für Stanznietverbindungen bei Mischbauweise .....	59
3.3.3	Vergleichende Bewertung der Fügetechnologien hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Bauteilfehlern .....	66
<b>4</b>	<b>Adaptive Prozessteuerung und Entstörstrategien in automatisierten Montagesystemen</b> .....	<b>73</b>
4.1	Präventive Verfügbarkeitssicherung durch dynamische Adaption technologischer Prozessparameter .....	79
4.2	Reaktive Verfügbarkeitssicherung mittels mehrstufiger Fehler- reaktionsstrategien .....	82
4.3	Steuerungstechnische Systemkomponenten.....	84
4.3.1	Steuerungshardware Zellenrechner, SPS und Gerätesteuern.....	84
4.3.2	Steuerungssoftware Ablaufsteuerung, OPC-Datenschnittstelle und Kommunikationsinterface <i>Motion</i> .....	87
<b>5</b>	<b>Multilateraler Informationsaustausch in der Prozesskette von der Konstruktion bis zur Montage</b> .....	<b>91</b>
5.1	Montagevorgeschnittene Unternehmensbereiche und deren informationstechnische Verkettung mit der Montage .....	91
5.2	Informationsanforderungen in der Fertigung .....	93
5.3	Informationsanforderungen in der Konstruktion .....	95

---

<b>6 Prototypische Implementierung des hierarchisch-adaptiven Steuerungskonzeptes in eine Roboterzelle .....</b>	<b>97</b>
6.1 Aufbau der roboterbasierten Montageversuchszelle .....	97
6.2 Entwicklung einer adaptiven Montageprozesssteuerung unter Einbeziehung des Informationsaustausches mit der Fertigung .....	103
6.2.1 Funktionalitäten des Kommunikationsinterfaces <i>Motion</i> sowie Anbindung an die Datenbank und die Ablaufsteuerung .....	105
6.2.2 Steuerungstechnische Erweiterung der Stanznietgerätsteuerung zur adaptiven Prozessparameternachführung .....	115
6.3 Erweiterung eines PDM-Systems zur Koordination von Montage und Konstruktion .....	117
<b>7 Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lösungsansatzes unter Einsatz der Simulationstechnik .....</b>	<b>123</b>
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>135</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>137</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>147</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Defizite

Die Ausweitung der Europäischen Union und die starke Globalisierung eröffnet deutschen Unternehmen neue Absatzmärkte. Hiervon gehen positive Mengeneffekte aus, die zu einer Stückkostensenkung und damit zu mehr Wettbewerbsfähigkeit führen. Auf der anderen Seite entstehen durch die Globalisierung auch Absatzrisiken durch Produkte aus Niedriglohnländern wie Osteuropa oder China, die die Nachfrage nach inländischen Produkten reduzieren. Um mit hochpreisigen Produkten dauerhaft am Markt bestehen zu können, müssen diese über Alleinstellungsmerkmale verfügen. Eine häufig angewandte Strategie ist die der *Technologieführerschaft*, kombiniert mit einem vorbildlichen Kundenservice und der werbewirksamen Förderung des Markenbewusstseins der Kunden. Hochwertige Produkte wie Fahrzeuge werden individuell gestaltet, um den Kunden anzusprechen [12]. Ergänzend ist die fortwährende Suche nach kostengünstigeren Produktionsmöglichkeiten in Form effizienterer Produktionstechnologien erforderlich. Allerdings besteht bei einer zu starken Fixierung auf den Kosten-/ Preisaspekt auch die Gefahr, dass wichtige Erfolgsaspekte wie die Lieferzeit oder Qualität vernachlässigt werden [11].

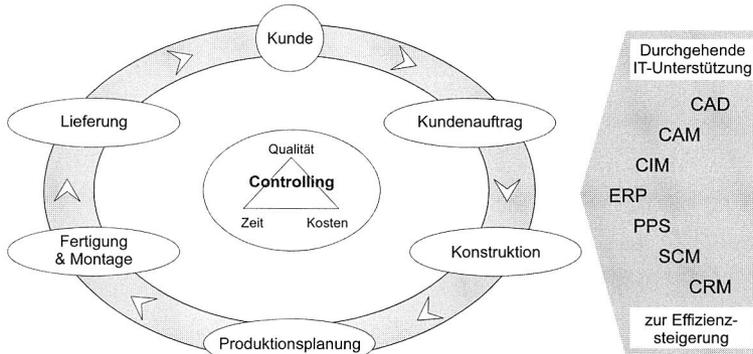


Bild 1: IT-gestützte Prozesskette zur Auftragsabwicklung

Eine zunehmende Produktionsverlagerung in Niedriglohnländer führt zudem zu steigender Arbeitslosigkeit und so zu einem Rückgang der Kaufkraft im Inland. Es ist offensichtlich, dass dies keine dauerhaft tragbare Lösung für die Volkswirtschaft Deutschland sein kann. Daher muss der Fokus verstärkt auf der Entwicklung *innovativer Produkte* sowie dem Einsatz *effizienter Informations- und Produktionstechnologien* liegen, um die Wettbewerbsfähigkeit dauerhaft zu steigern. Die *Effizienz betriebsinterner Abläufe*

muss, vor dem Hintergrund einer steigenden Komplexität der Geschäftsprozesse aufgrund globaler wirtschaftlicher Verflechtungen, erhöht werden. In den letzten Jahren erfolgte der verstärkte Einsatz von IT-Instrumenten des E-Business und des Collaborative Commerce über Rechnernetzwerke, um Rationalisierungseffekte zu erzielen. Zudem wurden für fast alle Arbeitsbereiche in der Prozesskette rechnergestützte Softwaretools wie CAD, CAM, CRM, SCM weiterentwickelt (Bild 1). Bereichs- und unternehmensübergreifend werden ERP-Systeme mit einer gemeinsamen zentralen Datenbasis eingesetzt. Durch diese IT-Unterstützung lassen sich Arbeitsgänge effizienter gestalten. Es ist jedoch zu bedenken, dass der Zugang zu den diesen IT-Lösungen und zu organisatorischen Optimierungsstrategien wie Business Process Reengineering oder Change-Management global allen Unternehmen offen steht. Es lässt sich somit bestenfalls ein kurzfristiger Produktivitätsvorsprung gegenüber Mitbewerbern generieren. Somit reicht der alleinige Einsatz dieser IT-gestützten Optimierungsansätze nicht aus, um mittel- bis langfristig nachhaltige Wettbewerbsvorteile generieren zu können.

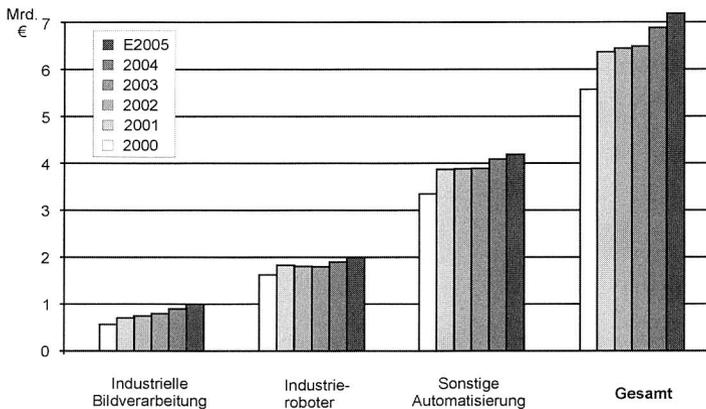


Bild 2: Umsatzentwicklung in der Automatisierungsbranche [76]

Zusätzlich sind innovative Produktideen und produktionstechnische Lösungen erforderlich. Positive Beispiele aus dem Bereich der Automobilindustrie sind innovative Lösungen in der Antriebs- und Motorentechnik sowie neue Leichtbaukonzepte durch den Einsatz von Mischbauweise. Der zunehmende Einsatz von Leichtbauwerkstoffen erfordert innovative Fügeverfahren wie das Laserschweißen oder Stanznieten. Durch diese innovativen technischen Lösungen zur Gewichtsreduzierung der Fahrzeugkarosserie lassen sich umweltfreundliche und damit zukunftsweisende Fahrzeuge entwickeln. Weiterhin besteht im Produktionsbereich die Herausforderung, Rationalisierungspotentiale zu entdecken und zu nutzen. Dies kann durch den Einsatz *automatisierter Produktionssysteme* geschehen. Insbesondere der Montagebereich, der noch immer durch einen hohen

Anteil manueller Tätigkeiten gekennzeichnet ist, bietet ein starkes Rationalisierungspotential. Das Bild 2 zeigt anhand kontinuierlicher Umsatzzuwächse in der Automatisierungsbranche, dass diese Herausforderung erkannt wurde. Die vom VDMA ermittelten Umsatzstatistiken im Bereich der *Automation und Robotik* weisen deutliche Zuwachsraten beim Robotereinsatz in den letzten Jahren auf. Der Bereich Bildverarbeitung legte umsatzmäßig überproportional zu. In 2004 konnte der Umsatz in der Automatisierungsbranche um 5% auf 6,9 Mrd € gesteigert werden und für 2005 wird ein Umsatzwachstum auf 7,2 Mrd € erwartet [7]. Ein wesentlicher Einflussfaktor, der in den letzten Jahren die Montageautomatisierung begünstigte, ist die starke Zunahme der Leistungsfähigkeit von Anlagensteuerungen. Impulse ergaben sich weiterhin durch intelligente Bildverarbeitungssysteme, einheitliche Feldbusstandards, PC-basierte Ablaufsteuerungen (SoftSPS), standardisierte Softwareschnittstellen (OPC) und ethernetbasierte Netzwerkanbindung. Zudem sind die Investitionskosten in Relation zur Anlagenleistung durch den Einsatz kostengünstiger PC-basierter Steuerungshardware rückläufig, was den Einsatz von Automatisierungslösungen begünstigt [15].

Allerdings ist der Einsatz von Automatisierungslösungen nicht unumstritten. Der *CIM-Ansatz* in den 80'er Jahren hat zwar die Machbarkeit hochautomatisierter Produktionssysteme bewiesen, dabei aber auch die technologischen und wirtschaftlichen Grenzen von automatisierten Systemlösungen aufgezeigt [21]. Als Einsatzhemmnisse gelten hohe Investitions- und Betriebskosten beispielsweise für Energie, Service, Sicherheitseinrichtungen, Schulungen sowie die vergleichsweise geringe Flexibilität bei einem Produkt-, Varianten- oder Technologiewechsel. Aus verschiedenen Blickwinkeln wurde Kritik in Richtung Reduzierung des Automatisierungsgrades geäußert. Eine Studie des Fraunhoferinstitutes [52] zeigt, dass viele befragte Unternehmen eine Inflexibilität durch *Overengineering* insbesondere im Montagebereich beklagen. Es stellt sich die Frage wann und inwieweit Montageautomatisierung sinnvoll ist. In [100] wird eine Automatisierungspotentialanalyse zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses beschrieben. Die kontroverse Diskussion zur Wirtschaftlichkeit von Automatisierungslösungen zeigt zudem, dass weiterer Entwicklungsbedarf hin zu hochflexiblen, automatisierten Produktionssystemen vorhanden ist.

Ein ungelöstes *Problemfeld* in der automatisierten Montage ist die große Anzahl unterschiedlicher Fügeteile und -operationen, die zu hoher *Komplexität* der organisatorischen und technischen Prozesse führt [104]. Insbesondere flächige Leichtbauteile, wie sie im Automobil- und Flugzeugbau eingesetzt werden, stellen die Montage aufgrund der großen Teileabmessungen und deren geringe Biegesteifigkeit vor große Herausforderungen. Zudem ist die Montage häufig das Sammelbecken für Fehler aus vorgeschalteten Arbeitsbereichen. Ein Defizit besteht in der *unzureichenden Fehlertoleranz* von automatisierten Montageanlagen. Dies führt in komplexen Montagesystemen zu Störungen, die

sich in einer reduzierten Anlagenverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit niederschlagen [121]. Zur Störungsvermeidung werden seitens der Konstruktion häufig enge Toleranzfelder (Angsttoleranzen) vorgegeben. An die Teilefertigung werden damit sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Fertigungsprozesse gestellt. Häufig sind zusätzliche Prüfvorgänge im Montagevorfeld zur Sicherung der Montageprozesse erforderlich, was hohe Fertigungskosten zur Folge hat. Die Vorgabe dieser schmalen Toleranzfelder ist somit nicht unbedingt in den qualitativen Anforderungen an das Endprodukt, sondern teilweise in der unzureichenden Fehlertoleranz der Montagesysteme begründet (Bild 3). Bei einer manuellen Montage verfügen Werker über hohe kognitive, sensorische Fähigkeiten und Erfahrungen im Umgang mit Werkstücktoleranzen. Dies trifft auf automatisierte Montagesysteme i.d.R. nicht in gleichem Maße zu. Zur Steigerung der Systemrobustheit sind spezifische Maßnahmen erforderlich wie beispielsweise eine *dynamische Anpassung von Montageprozessparametern*.

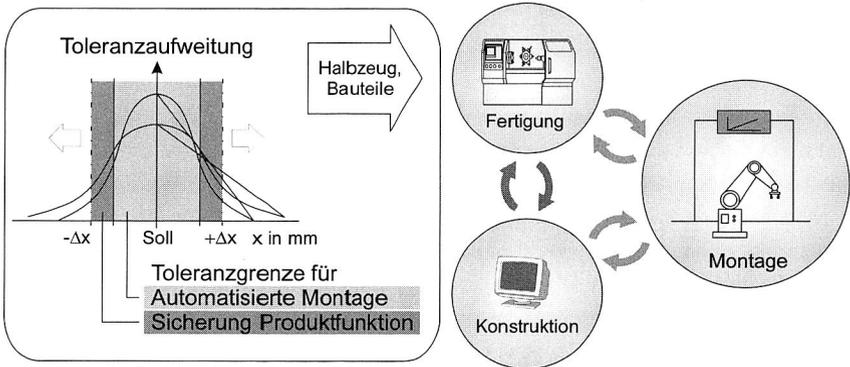


Bild 3: Toleranz- und Störproblematik in der automatisierten Montage

Ein weiteres wichtiges *Optimierungspotential* besteht bezüglich des produktbezogenen Informations- und Datenaustausches zwischen den Unternehmensbereichen Konstruktion, Fertigung und Montage. Die Konstruktionsabteilung ist für die fertigungs- und montagegerechte Auslegung flächiger Leichtbauteile zuständig. Hierzu bedarf es umfangreicher Informationen aus konstruktionsnachgeschalteten Bereichen wie der Montage. Dies dient insbesondere der präventiven Störungsvermeidung und damit der robusten Gestaltung der gesamten Prozesskette. Ein vergleichbares Optimierungspotential besteht für den produktbezogenen Qualitätsdatenaustausch zwischen Fertigung und Montage. Durch eine systemische Optimierung des direkten Datenaustausches zwischen den Bereichen Konstruktion, Fertigung und Montage auf Basis der etablierten IT-Lösungen (Bild 1) lässt sich die Produktqualität und Arbeitseffizienz steigern und so die Wettbewerbsfähigkeit in Unternehmen erhöhen.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf das Instrument der *intelligenten Prozessautomatisierung* in der Produktion am Beispiel der roboterbasierten Montagetechnik. Es wird ein integrierter Ansatz zur informationstechnischen Anbindung der Konstruktion an die Montage sowie die automatische toleranzspezifische Adaption von Prozessfenstern in der Montage dargestellt. Das übergeordnete Ziel ist es, durch die *robuste Gestaltung* von Montageprozessen und -systemen eine Aufweitung von spezifischen Toleranzfenstern in den montagevorgeschaleteten Arbeitsbereichen zu ermöglichen und eine präventive Fehlervermeidung zu erreichen. Durch die *robuste Gestaltung* von Produktionsprozessketten kann eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit *automatisierter Produktionssysteme* erzielt werden. Die positiven Effekte von hochautomatisierten Produktionssystemen in Verbindung mit einer *Aufweitung von zulässigen Toleranzfenstern* liegt so in einer *Reduzierung der Herstellkosten* und in einer hohen reproduzierbaren Produktqualität sowie in einer durchgängigen Dokumentation von Prozessdaten. Der Anspruch einer Null-Fehler-Produktion in allen Fertigungsstufen bleibt erhalten, da lediglich die Definitionsgrenzen für den Begriff Bauteilfehler verändert werden.

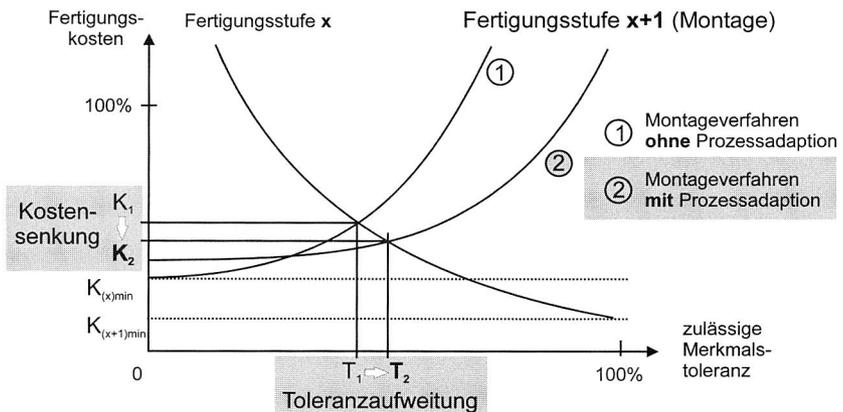


Bild 4: Reduktion der Produktionskosten durch robuste Prozessketten

In Bild 4 sind die Produktionskosten am Beispiel von zwei aufeinander folgenden Produktionsstufen wie Teilefertigung (x) und Endmontage (x+1) in Abhängigkeit der zulässigen Werkstücktoleranzen qualitativ dargestellt. Die *Produktionskosten der Fertigungsstufe x* sinken mit einer Erhöhung der zulässigen Toleranzfenster in den Bauteilmerkmalen bis zu einem Wert  $K_{(x)min}$ . Dieser Wert ergibt sich aus den minimalen variablen Kosten (z.B. Materialkosten, Energiekosten) und den anteiligen Fixkosten (z.B. für die Maschine). Mit zunehmender Einengung der zulässigen Toleranzen steigt der Kosten-

aufwand für Werkzeuge und Maschinen sowie die Qualitätssicherung stark an. So müssen außerhalb der zulässigen Toleranz liegende Bauteile aussortiert werden. Die *Produktionskosten für die nachfolgende Fertigungsstufe (x+1) wie der Montage* hängen zum einen vom eingesetzten Produktionsverfahren, zum anderen aber auch von der Qualität der einlaufenden Werkstücke ab. Der Aufwand für die Montage steigt mit zunehmenden Qualitätsschwankungen in den Fügestellenmerkmalen (z.B. Geometrie, Werkstoffeigenschaften). Je größer die Schwankungen ausfallen, umso wahrscheinlicher sind Prozessstörungen in automatisierten Montagesystemen ohne adaptive Ausgleichsstrategien. Zudem ist eine erhöhte Schwankungsbreite in der Qualität des Endproduktes zu erwarten. Dieser Zusammenhang wird in Kurve ① veranschaulicht.

An diesem Punkt setzt das Konzept der adaptiven Montagesteuerung (Kapitel 4 ff) an. Zur Fehlervermeidung werden Merkmalstoleranzen in den Fügestellen ermittelt und die Prozesskenngrößen proaktiv nachgeführt. Diesen Sachverhalt stellt die Kostenkurve ② dar. Durch die Integration *adaptiver Steuerungsmechanismen* entstehen zusätzliche Investitionskosten, weshalb bei geringen Bauteiltoleranzen zunächst die Kostenkurve ② oberhalb von ① liegt. Bei zunehmenden Bauteilabweichungen von der nominalen Idealgestalt werden die Zusatzkosten jedoch durch geringere Anlagenstöraten und reduzierte Ausschusszahlen überkompensiert, so dass die Produktionskostenkurve unterhalb der Kostenkurve ① verläuft. Im Schnittpunkt der beiden Kostenkurven befindet sich das Kostenminimum und somit das Produktionsoptimum.

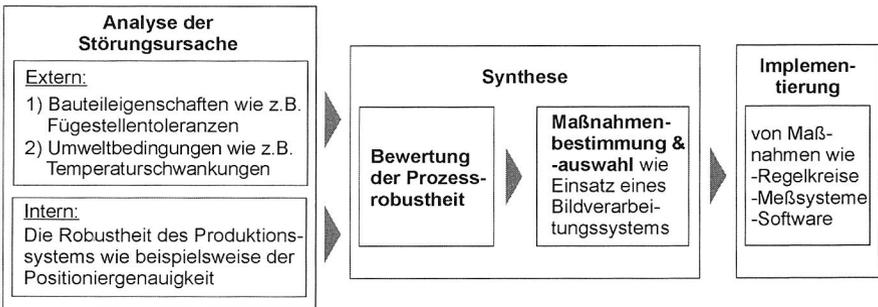
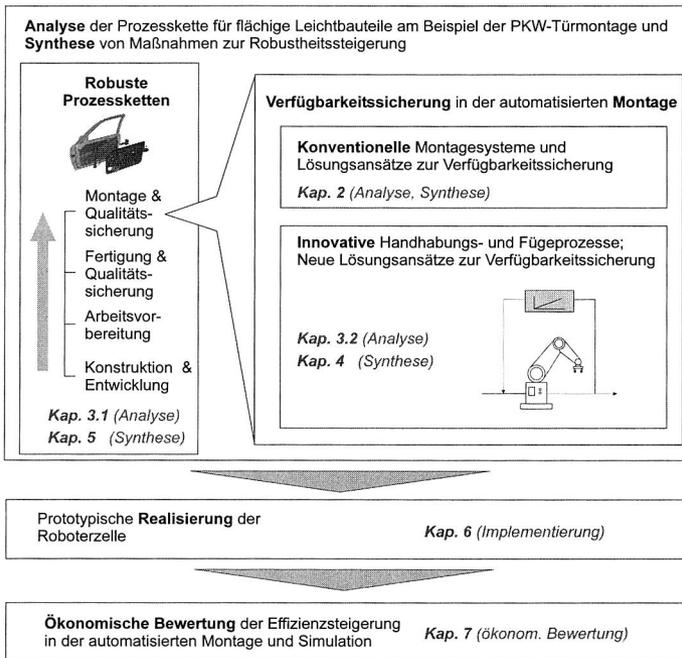


Bild 5: Methodische Vorgehensweise zur robusten Prozessauslegung

Wie bereits dargestellt, lassen sich durch eine *Aufweitung der zulässigen Toleranzfenster* unter Einsatz intelligenter Montagesysteme die Produktionsgesamtkosten reduzieren. Voraussetzung hierfür sind jedoch *robuste Produktionssysteme und Prozessketten*, damit es nicht zu teuren Ausfallzeiten der Maschinen in der Montage kommt und zudem ein hohes Qualitätsniveau im Endprodukt sichergestellt werden kann.

Die angewandte Vorgehensweise zur robusten Gestaltung von Prozessketten gliedert sich in die drei Phasen *Analyse-, Synthese- und die Implementierungsphase* (Bild 5). In Bild 6 ist der *Aufbau der Arbeit* mit Bezug auf die einzelnen Bereiche der Produktionsprozesskette für flächige Leichtbauteile dargestellt. Den Ausgangspunkt der Arbeit bildet die Analysephase. Im ersten Arbeitsschritt (Kap. 2.1) werden die charakteristischen Merkmale von flächigen Leichtbauteilen und die hierfür eingesetzten Montagesysteme erörtert.



**Bild 6:** Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2.2 werden *Analysemethoden für Störungsursachen* in Montageanlagen dargestellt. Hierzu zählt die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), die einen Überblick über mögliche Störungspotentiale und deren Folgen gibt. Diese wird um problemadäquate Reaktionsstrategien (E-FMEA) erweitert. Dabei werden insbesondere die zu montierenden *Bauteile und Baugruppen* hinsichtlich ihrer Bauteileigenschaften und auftretenden Toleranzen untersucht. In der Maschinen- und Systemfähigkeitsanalyse steht die Genauigkeit der Montagegeräte im Mittelpunkt der Betrachtungen. Parallel hierzu werden die Statistische Versuchsplanung (DOE) und die Sensitivitätsanalyse erläutert. Diese wird insbesondere in Kapitel 3.3 eingesetzt, wo es darum geht, die Ro-

bustheit von Fügeverfahren gegenüber den erwarteten Schwankungen in den Bauteileigenschaften und Umweltbedingungen zu ermitteln. Die im Automobilbau eingesetzten Füge-technologien wurden in den letzten Jahren stark durch Weiterentwicklungen in Form leichtbauender Werkstoffsysteme in Mischbauweise beeinflusst. So werden konventionelle Technologien wie das Punktschweißen zunehmend durch *wärmearme Fügeverfahren* wie das Clinchen, Stanznieten oder Kleben ersetzt. Wesentliche Vorteile dieses Verfahrens liegen in der hohen Flexibilität beim Fügen unterschiedlicher Werkstoffarten und in der geringeren Wärmeeinbringung in die Füge-teile. In Kapitel 3.3 erfolgt eine ausführliche Betrachtung dieser wärmearmen Verfahren sowie signifikanter Prozesseinflussgrößen.

Daran schließt sich die Synthesephase an. Nach einem Überblick über konventionelle technologische Maßnahmen zur Optimierung der Systemrobustheit in Montageanlagen in Kapitel 2.3, werden anschließend in Kapitel 2.4 proaktive Maßnahmen und in Kapitel 2.5 reaktive Maßnahmen der konventionellen Verfügbarkeitssicherung und ihre Grenzen ausführlich erläutert. Daran anschließend wird im Kapitel 3 ein innovativer, holistischer Ansatz zur Robustheitssteigerung von Prozessketten vorgestellt. Neben der adaptiven Montageanlagensteuerung (Kapitel 4) stellt die bereichsübergreifende informationstechnische Vernetzung für den schnellen Informations- und Datenaustausch zwischen Konstruktion, Fertigung und Montage (Kapitel 3) einen wichtigen Baustein des Gesamtkonzeptes dar. Aus dem vorgestellten Spektrum organisatorischer und technologischer robustheitssteigernder Maßnahmen kann so applikationsspezifisch eine kostenoptimale Lösungskombination für die automatisierte Montage flächiger Leichtbauteile ausgewählt werden, wobei der holistische Ansatz das Framework bildet.

Abschließend erfolgt die Implementierung der Maßnahmen in einer roboterbasieten Versuchszelle. Zur Realisierung und Verifikation des Konzeptes wurde eine Roboterzelle am Lehrstuhl FAPS mit unterschiedlichen Füge-technologien aufgebaut. Eine beispielhafte Implementierung und Erprobung der adaptiven Steuerungskonzepte erfolgte anhand der Stanzniettechnologie und der Schraubtechnik. Daneben wurde auf dem Montagezellenrechner eine Kommunikationsplattform für den Informationsaustausch mit den montagevorgeschaleten Arbeitsbereichen installiert. Es wird die konkrete Umsetzung des Gesamtansatzes sowie Erfahrungsergebnisse beschrieben. In Kapitel 8 wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des erörterten holistischen Ansatzes in der Montage zur Robustheitssteigerung von Prozessketten für flächige Leichtbauteile durchgeführt. Hierzu kann die rechnerbasierte Simulation toleranzbehafteter Fügeprozesse als weiteres Analyseinstrument eingesetzt werden.

## 2 Montagesysteme für flächige Leichtbauteile, Systemrobustheit und Verfügbarkeitsicherung

### 2.1 Charakteristische Merkmale von flächigen Leichtbauteilen und Montagesystemgestaltung

Aufgrund stetig steigender Ölpreise seit der Ölkrise in den 70er Jahren sowie aufgrund des zunehmenden Umweltbewusstseins der Bürger tritt zunehmend der Kraftstoffverbrauch und Abgasreinigung von Automobilen ins öffentliche Interesse. Sowohl bei der Fahrzeugherstellung, als auch in der Nutzungsphase entsteht ein Schadstoffausstoß von CO<sub>2</sub>, Stickoxide, Schwefeldioxid, Kohlenwasserstoffe. In seiner Umweltleitlinien verpflichtet sich unter anderem Daimler-Chrysler [84] Produkte zu entwickeln, die in ihrem jeweiligen Marktsegment besonders umweltverträglich sind. Die Weichenstellung hierfür erfolgt bereits in einer frühen Phase des Produktlebenszyklus durch ein „Design for Environment“.

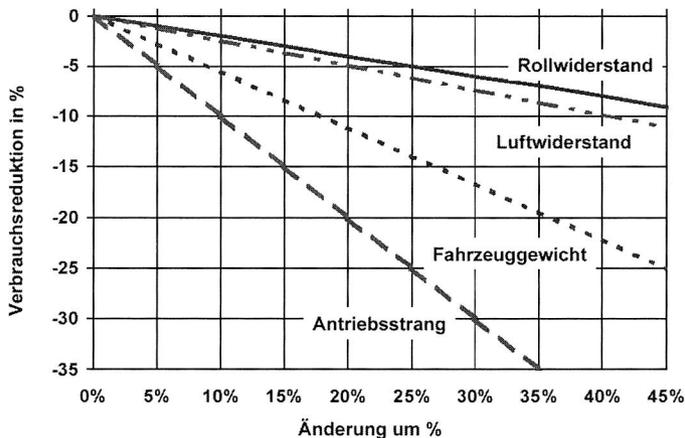


Bild 7: Mögliche Ansatzpunkte zur Verbrauchsreduktion (Quelle: Audi, [83])

Durch die gestiegenen Kundenanforderungen bei Fahrzeugkomfort und -sicherheit hat sich das Fahrzeuggewicht in den letzten Jahrzehnten erhöht, womit eine Zunahme des Kraftstoffverbrauchs verbunden ist. Der Kraftstoffverbrauch lässt sich auf der anderen Seite durch eine Optimierung der Antriebs-, Motoreinheit sowie durch die Reduzierung des Fahrzeuggewichts an anderer Stelle vermindern (Bild 7). Die Entwicklung von *Leichtbaukonzepten und -werkstoffen* für Automobile besitzt somit einen hohen Stel-

lenwert. Der Einsatz innovativer flächiger Leichtbauteile im Fahrzeugbau bietet eine Vielzahl von *Vorteilen* für den Fahrzeugbesitzer, wie beispielsweise

- hohe Steifigkeit und Festigkeit (Energieabsorptionsvermögen im Crashfall) bei
- reduziertem Gewicht eine verbesserte Fahrdynamik und
- geringere Betriebskosten durch reduzierten Kraftstoffverbrauch sowie eine
- Schonung von Umwelt und Ressourcen

Zunächst stellt sich die Frage, welche Komponenten im PKW in welchem Ausmaß zum Gesamtgewicht beitragen. Untenstehende Tabelle zeigt am Beispiel des Peugeot 206 die Hauptbaugruppen und deren Gewichtsverteilung in einem PKW der europäischen Kompaktklasse [82]:

Karosserie	21,2%
Türen/Klappen/Kotflügel:	7,3 %
Fahrwerk	20,3 %
Motor und Getriebe	19,7 %
Innenausstattung	17,7 %
Elektrik	4,2 %
Betriebsflüssigkeiten, Lack, Verglasung etc.	9,6 %

Ausgehend von einem Gesamtgewicht von 980 kg lässt sich so das Absolutgewicht für jede Baugruppe berechnen. Die Karosserie macht somit zusammen mit den Türen und Klappen fast 30% des gesamten Fahrzeuggewichts aus. Großflächige Komponenten werden somit sowohl in tragenden Bauteilen wie der Karosserie, als auch bei Hang-on-Parts wie Klappen und Türen sowie der Innenausstattung verwendet. Durch den Einsatz flächiger Leichtbauteile lässt sich bereits heute eine deutliche Gewichtsreduktion erreichen. Die Beispiele von Mercedes in Bild 9 und Bild 26 zeigen, wie durch einen intelligenten Werkstoffmix im PKW Gewicht gespart werden kann. *Typische Werkstoffe* für flächige Leichtbauteile sind dabei:

1. hochfester Stahl (u.a. ULSAB)
2. Leichtmetalle wie Aluminium oder Magnesium,
3. Kunststoffe und nachwachsende Rohstoffe sowie
4. sowie Kombinationen in Form von *Hybridbauweise*

Zu 1) Beispielsweise bestehen die Karosseriestrukturen der Offroader Cayenne von Porsche und Touareg von VW zu über 60 % aus hoch- und höherfesten Stählen. Davon entfällt etwa die Hälfte auf moderne Mehrphasenstähle, die extreme Festigkeit, gute Umformbarkeit sowie hohes Energieaufnahmevermögen vereinen und wesentliche

Fortschritte bei Strukturverhalten, Fahrzeugsicherheit und Gewichtsreduzierung ermöglichen. Bei der Umsetzung des Werkstoff- und Strukturkonzeptes wurden Erkenntnisse aus den ULSAB (UltraLight Steel Auto Body)–Projekten verwendet [82].

Zu 2) Die Firma Audi hat in den 90'er Jahren die Entwicklung der Aluminiumkarosserie bedeutend vorangetrieben. Für den Karosseriebau mussten hierzu neben der Fertigungstechnik auch neue Verbindungstechnologien entwickelt werden. Als erstes wurde eine Aluminiumkarosserie im Serieneinsatz für den Audi A8 (Gewichtsanteil ca. 350 kg) und einige Jahre später im A2 (Gewichtsanteil ca. 260 kg) eingeführt.

Zu 3) In den letzten Jahrzehnten hat der Anteil an Kunststoffbauteilen und Elastomeren im Automobil stetig zugenommen (siehe Bild 8)

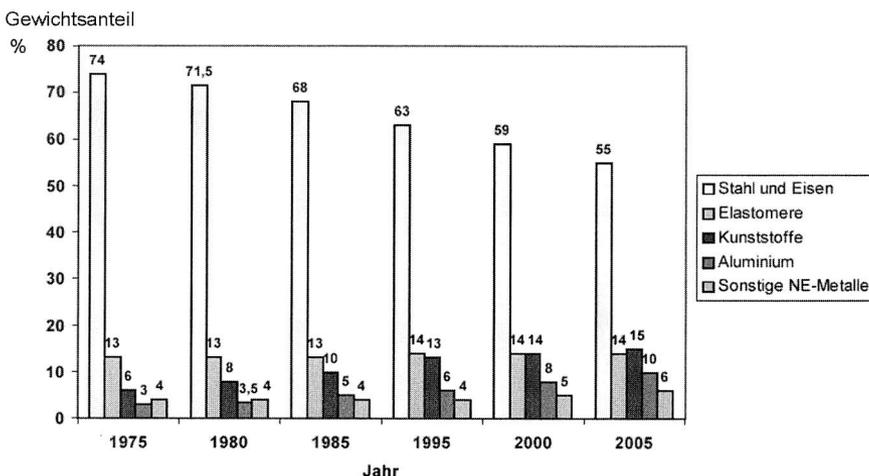


Bild 8: Entwicklung der Werkstoffverteilung im Automobil [83]

Der größte Anwendungsbereich von Kunststoffen im PKW sind heute die Innenteile wie Verkleidungen, Armaturenbrett etc. Zunehmend werden jedoch auch im Außenbereich Kunststoffe eingesetzt. So werden heute neben Stoßstangen auch Kotflügel und Hauben aus Kunststoff gefertigt. Dabei verdrängen Kunststoffbauteile sowie andere Leichtbauwerkstoffe zunehmend den konventionellen Stahl.

Im Fahrzeugbau und damit auch bei Kunststoffbauteilen kommt der Wiederverwertung ein wichtiger Stellenwert zu. Bei der A-Klasse (W169) von Mercedes können beispielsweise 54 Bauteile mit einem Gesamtgewicht von 34 Kilogramm anteilig aus hochwertigen rezyklierten Kunststoffen hergestellt werden (Bild 9); das entspricht 21 Prozent aller eingesetzten Kunststoffbauteile. Damit steigt die Anzahl der freigegebenen Rezyklat-Komponenten gegenüber dem Vorgängermodell um mehr als das Dreifache. Auch der

Anteil an nachwachsenden Rohstoffen nimmt kontinuierlich zu. In der A-Klasse werden 26 Bauteile mit einem Gesamtgewicht von 23 Kilogramm unter Verwendung von Naturmaterialien hergestellt.

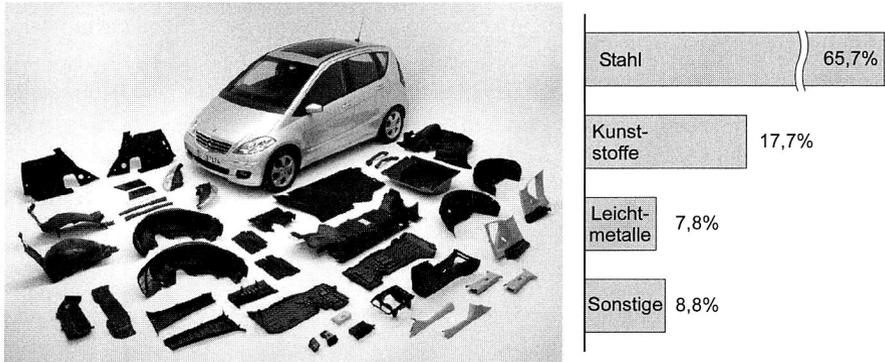


Bild 9: Materialmix im Automobilbau am Beispiel der A-Klasse von Mercedes und Gewichtsverteilung der Werkstoffe [84]

Zu 4) Am Beispiel der neuen A-Klasse (W169) von Mercedes lässt sich der zunehmende Materialmix im Fahrzeugbau erkennen. Die Gewichtsverteilung der eingesetzten Werkstoffe sieht dabei wie folgt aus:

- Stahl- und Eisen-Werkstoffe: 65,7 %
- Bunt- und Leichtmetalle: 7,8 %
- Kunststoffe: 17,7 %
- Sonstige: 8,8 %

Durch Weiterentwicklungen im Bereich hochfester Stähle ist der Stahlanteil auch weiterhin relativ hoch. Damit ist der Stahlanteil insgesamt höher, als in Bild 8 prognostiziert. Aufgrund des großen Werkstoffmixes stellt die *Verwertungsphase* am Ende des Produktlebenszyklus eine besondere Herausforderung dar. Dies ist jedoch bereits in der Konstruktionsphase entsprechend zu berücksichtigen. So besteht beispielsweise die A-Klasse überwiegend aus Werkstoffen, für die Recycling-Verfahren entwickelt und erprobt sind. Die A-Klasse entspricht somit der ab 2006 europaweit vorgeschriebenen Recycling-Quote von 85 Prozent. Um eine Trennung der verschiedenen Materialarten in einzelne Fraktionen zu ermöglichen, muss die Verbindungstechnik recyclinggerecht gestaltet werden.

*Charakteristische Bauteilmerkmale und Anforderungen an die Montagetechnik:*

Die Teileklasse der flächigen Leichtbauteile ist insbesondere durch folgende Bauteileigenschaften charakterisiert:

- Große zu handelnde Teileabmessungen
- Aufgrund der geringen Bauteildicke in Relation zur Länge bzw. Breite
  - > biegeschlaff beim Handling und Aufspannen
  - > erhöhte Verzugsgefahr bei Wärmeeinbringung
- Empfindliche Bauteiloberflächen insbesondere im Sichtbereich, wenn diese lackiert werden
- Unterschiedliche Werkstoffe und physikalische Eigenschaften

Der Einsatz flächiger Leichtbauteile und der Materialmix im Automobilbau stellt somit spezifische Anforderungen an die Produktionstechnik. Im Bereich der *Montagetechnik* betrifft dies insbesondere die:

- Handhabungstechnik
- Teilelagerung und –bereitstellung
- Fügetechnik
- Prüftechnik

Der logistische Aufwand zur Teilebereitstellung und Lagerung sowie das Teilehandling ist aufgrund der spezifischen Teileabmessungen und den hieraus resultierenden Teileeigenschaften wie Biegeschlaffheit anspruchsvoll. Die Handhabung und Montage dieses Bauteilespektrums stellt hohe Anforderungen an die technische Systemgestaltung und Prozesssicherung. So müssen beispielsweise bei empfindlichen Oberflächen die Greif- und Haltekräfte im Bereich der Greifstellen begrenzt werden, um eine Beschädigung der Bauteiloberfläche zu vermeiden. Weiterhin besteht bei großflächigen Bauteilen eine erhöhte Verzugsgefahr, die in der Montage zu Prozessstörungen führen kann. Konventionelle Verbindungstechniken wie das Punktschweißen stoßen bei flächigen Leichtbauteilen aus Aluminium oder bei Hybridbauweise an ihre Grenzen und müssen durch geeignete Verfahren ersetzt werden.

### Grundstrukturen von Montagesystemen für flächige Leichtbauteile

Im Folgenden wird die *Grundstruktur* sowie unterschiedliche *Automatisierungsgrade* von Montagesystemen für flächige Leichtbauteile erläutert. Die *Hauptkomponenten* einer automatisierten Montagezelle sind Handhabungsgeräte, die Teilebereitstellung sowie die Prozesstechnik (Bild 10). Als Handhabungsgeräte können Roboter mit linearer oder rotatorischer Bewegungskinematik zum Einsatz kommen. Die Gerätetechnik beinhaltet zudem die Greifertechnik und Sensorik zur Prozessüberwachung. Während bei den Handhabungsgeräten meist aufgabenneutrale Standardkomponenten zum Einsatz kommen, werden Greifer und Sensorik i.d.R. speziell auf die Montageaufgabe angepasst. Die Teilebereitstellung erfolgt ebenfalls produktspezifisch. Auf ausgewählte Fügeverfahren für flächige Leichtbauteile wird in Kap. 3.3 eingegangen.

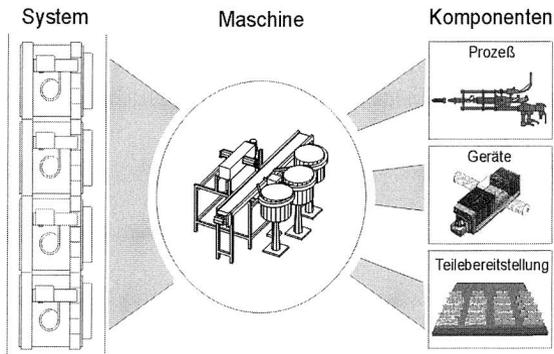


Bild 10: Komponenten von Montagezellen für flächige Leichtbauteile [21]

Montagesysteme lassen sich nach ihrem *Automatisierungsgrad* in *manuelle, teilautomatisierte oder vollautomatisierte Systeme* untergliedern [47]. Die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Systemen sind jedoch fließend. Die Wahl eines geeigneten Automatisierungsgrades hängt wesentlich von Randbedingungen wie erforderlicher Taktzeit/ Stückzahlen und zu erwartenden Stückzahlschwankungen, Typen- und Variantenvielfalt sowie dem Schwierigkeitsgrad der Montageaufgabe ab. Generell sollte die Erzeugung der Produktvarianten in einer möglichst späten Fertigungsstufe erfolgen [119], [118].

#### Manuelle und teilautomatisierte Montagesysteme

Diese Systemlösung zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität, aufgrund der vielseitigen Fingerfertigkeiten und kognitiven Fähigkeiten des Werkers aus. Sie eignet sich insbesondere für die Montage variantenreicher Produkte mit hoher Komplexität der Fügeaufgabe. Es kann sehr schnell auf neue Marktgegebenheiten reagiert werden [13]. In rein manuellen Montagesystemen führt der Werker alle Fertigungsschritte selbst aus. Dabei

stehen ihm eine Vielzahl von Hilfsmitteln, wie Handhabungs- und Fügwerkzeuge, Spannvorrichtungen usw. zur Verfügung. Neben der reinen Montageaufgabe kann der Werker auch Zusatzaufgaben wie beispielsweise die Qualitätskontrolle übernehmen. Die am häufigsten angewandten Organisationsformen sind die Einzelplatzmontage und die Fließmontage, die an mehreren verketteten Montagestationen erfolgt. Die *Einzelplatzmontage* wird in der Regel für Produkte mit geringem Produktionsvolumen eingesetzt. Die Vorteile sind die hohe Varianten- und Mengenflexibilität sowie die Entkopplung von Störungen auf nachfolgende Arbeitsplätze. Die Zuordnung zur Kategorie *manueller oder teilautomatisierter Montagearbeitsplatz* hängt davon ab, ob die Montageoperationen rein manuell durchgeführt werden, oder ob einzelne Teilprozesse automatisiert ausgeführt werden. Im Vorfeld der Montage erfolgt häufig der Einsatz von *Simulationswerkzeugen* zur Optimierung von Arbeitsabläufen oder für die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung. Zur Unterstützung manueller Montagetätigkeiten werden heute bei häufigem Variantenwechsel zunehmend *Werkerinformationssysteme* eingesetzt [22].

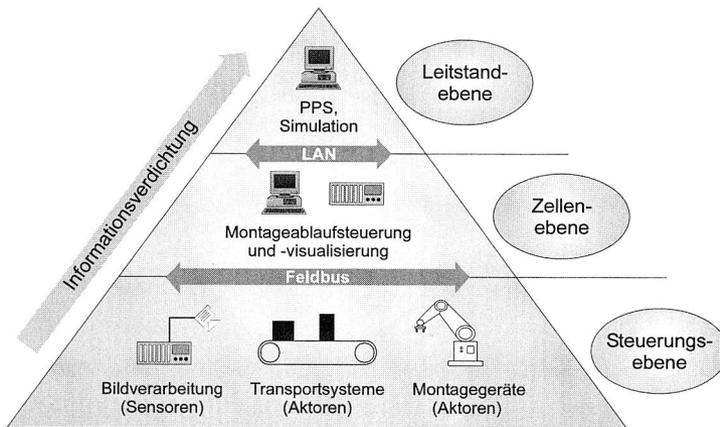


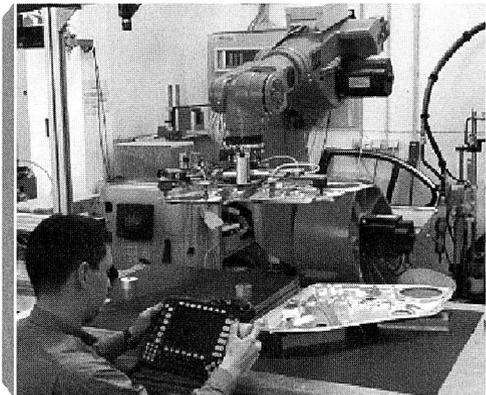
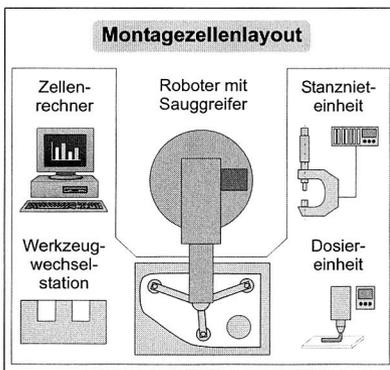
Bild 11: Steuerungskonzept für die flexibel automatisierte Montage

Ein Beispiel für den Einsatz von Werkern zur manuellen und teilautomatisierten Montage im Automobilbau ist die Fertigung von Luxuskarossen wie der Audi A8. Hier erfolgt der Einsatz innovativer Leichtbauwerkstoffe bei vergleichsweise geringer Stückzahl. Dagegen werden in der Serienfertigung von Standardkarosserien wie beim A6 schwere, manuelle Tätigkeiten wie das Punktschweißen weitgehend von Robotern ausgeführt.

#### Automatisierte Montagesysteme

Einfache *Transfer- bzw. Rundtaktautomaten* können für die Großserien- und Massenproduktion mit begrenzter Variantenanzahl eingesetzt werden. Flexible, modular aufgebaute Robotersysteme [110] eignen sich besonders bei hoher Variantenvielfalt und

Montagearbeitsgängen mittlerer Komplexität. Flexible Montagesysteme existieren in Form von Einzelmontagestationen oder in Form von Montagelinien. Montagelinien bestehen aus verketteten Montagestationen mit einer Hauptlinie und häufig mehreren Nebenlinien, auf denen die unterschiedlichen Varianten der einzelnen Baugruppen entstehen. Die steuerungstechnische Vernetzung der einzelnen Stationen mit dem übergeordneten Leitrechner ist Bild 11 zu entnehmen. Die Nebenlinien fließen in die Hauptlinie ein, auf der die einzelnen Baugruppen zu einem Endprodukt montiert werden. Häufig werden in solchen Montagestationen Industrieroboter eingesetzt, um das Ziel einer möglichst hohen Flexibilität bezüglich der Montage unterschiedlicher Produkte und deren verschiedener Varianten zu erreichen. In Abhängigkeit des erforderlichen Arbeitsraums und des Bauteilgewichts können unterschiedliche Roboterkinematiken wie 6-Achs-Knickarmroboter, Scara-Roboter oder Portalroboter zum Einsatz kommen [107]. Maschinelle Handhabungstätigkeiten werden häufig durch Sensorik wie Bildverarbeitung mit Signalverarbeitung im Steuerungsrechner überwacht. Komplexe Systeme mit umfangreicher Sensorelektronik zur Qualitätssicherung unterliegen jedoch auch einer gewissen Störanfälligkeit, die es zu beherrschen gilt.



**Bild 12:** Einsatz eines 6-Achs-Knickarmroboters in einer flexiblen Montagezelle zur PKW-Türmontage [10]

Das Bild 12 zeigt exemplarisch eine Roboterzelle mit Gelenkarmroboter, die am Lehrstuhl FAPS für die PKW-Türmontage realisiert wurde. Zudem erfolgt die Offline-Roboterprogrammierung und die Kinematiksimulation der Montageabläufe.

Die *Basisstruktur* eines Montagesystems wird somit von den wirtschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen, wie Produktionsstückzahlen und -schwankungen, Anzahl sowie Art der Montageoperationen, Bauteilabmessung, vorhandene Produktionsflächen etc. determiniert. Die Art des eingesetzten Bauteilwerkstoffs spielt dabei

eher eine untergeordnete Rolle. Durch die Verwendung kostengünstiger Standardstrukturen und -komponenten lassen sich für die Montage flächiger Leichtbauteile zusätzliche Rationalisierungspotentiale erschließen. Mögliche Alternativen für die räumliche Anordnung einer Montageanlage sind die Linienstruktur und die Karreebauweise. Kennzeichen einer *Linienstruktur* sind ein übersichtlicher Materialfluss, einfache Zugänglichkeit der Stationen (z.B. für Wartung und Umrüstung), einfache Anordnung von Zuführ- und Nebenlinien und der Einsatz vorwiegend für die Massenfertigung. Dem gegenüber steht eine Anordnung in *Karreebauweise*. Kennzeichen sind eine sehr kompakte Anordnung, eine hohe Flexibilität - da Verknüpfungen von gegenüberliegenden Stationen einfach möglich sind -, eine schlechte Zugänglichkeit der Stationen bei Wartung und Umrüstung sowie ihr Einsatz bei kleinen und mittleren Losgrößen.

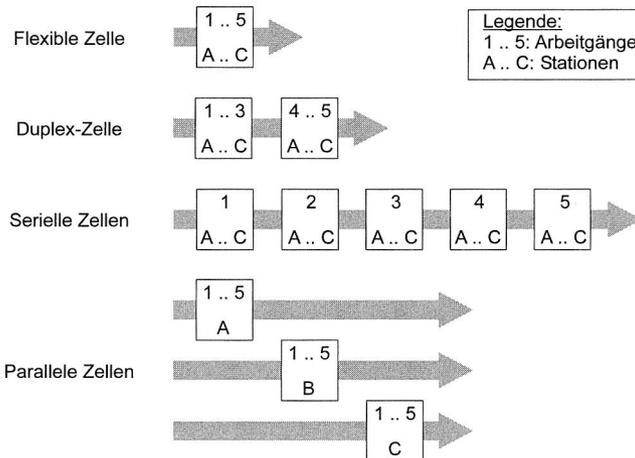


Bild 13: Alternative Zellenstrukturen für Montagesysteme [21]

In Bild 13 sind weiterhin alternative Möglichkeiten der Anordnung von Montagezellen dargestellt. Eine *flexible Zelle* ist in der Lage, alle notwendigen Montageoperationen für ein bestimmtes Variantenspektrum (Varianten: A, B und C) durchzuführen. Sie besitzt alle hierzu erforderlichen Montagehaupt- und Montagenebenfunktionsträger und damit ein hohes Flexibilitätspotential hinsichtlich der Variantenmontage. Die sequentielle Abarbeitung der Montageteilaufgaben führt jedoch zu hohen Prozessnebenzeiten. Flexible Zellen werden daher vorzugsweise im Bereich kleiner und mittlerer Serien eingesetzt. In *Duplex-Zellen* werden die Montagefunktionen auf zwei Fertigungseinheiten verteilt. Jede Zelle führt lediglich einen Teil der Montagefunktionen aus, es erfolgt somit eine Aufgabenteilung. Jede Zelle besitzt jeweils die volle Variantenflexibilität. Im Vergleich zur flexiblen Zelle werden durch die Spezialisierung kürzere Taktzeiten erreicht. *Serielle*

*Zellen* sind nur im Rahmen der Variantenmontage flexibel. Der Funktionsumfang einer einzelnen Zelle ist jedoch beschränkt, d.h. es erfolgt eine starke Spezialisierung. Im Extremfall wird in jeder Zelle jeweils nur eine einzige Montageoperation ausgeführt. Die serielle Anordnung hat zur Folge, dass die Zelle mit der größten Taktzeit die Taktzeit des Gesamtsystems vorgibt. Betrachtet man die räumliche Ausdehnung serieller Strukturen, so erkennt man aufgrund des geringen Integrationsgrades einen höheren Platzbedarf als bei flexiblen Zellen oder Duplex-Zellen. Wird jeweils eine Zelle für die komplette Montage einer Produktvariante eingesetzt, so spricht man von *parallelen Zellen*. Die einzelnen Zellen besitzen ein hohes Maß an Funktionsflexibilität hinsichtlich einer zu montierenden Variante. Die Zellenkomponenten sind dabei variantenspezifisch ausgelegt. Diese Montagestruktur ist beispielsweise dann vorteilhaft, wenn die einzelnen Produktvarianten einen geringen Anteil an Gleichteilen besitzen. Die Füge­teile weisen in diesem Fall unterschiedliche Greifbedingungen und Teilezuführungen auf. Ein Nachteil dieser Struktur besteht jedoch darin, dass Stückzahlschwankungen in den einzelnen Varianten, aufgrund der geringen Variantenflexibilität in den einzelnen Zellen, nicht durch eine Produktionsverlagerung auf andere Zellen abgefangen werden kann.

Im Hinblick auf die Auswahl einer geeigneten Anlagenstruktur für die Montage von flächigen Leichtbauteilen können zusammenfassend folgende Aussagen getroffen werden: *Serielle Montagestrukturen* eignen sich besonders für die Massenfertigung. Sie sind jedoch relativ unflexibel. Auf Stückzahlschwankungen bei einzelnen Produktvarianten kann schlecht reagiert werden, d.h. im Extremfall ist eine Umrüstung oder ein Umbau aller Einzelzellen in einer Linie erforderlich. *Parallele Zellen* sind i.d.R. variantengebunden. Stückzahländerungen führen so zu Über- oder Unterkapazitäten in der jeweiligen Zelle, die ohne Umbaumaßnahmen nicht abgebaut werden können. Bei *flexiblen Zellenstrukturen* bleibt der Auslastungsgrad des Systems auch bei stärkeren Stückzahlschwankung in den einzelnen Varianten nahezu unbeeinflusst. Der Mengenoutput ist im Vergleich zu seriellen oder parallelen Zellen wesentlich geringer. Diese Struktur eignet sich für Produkte, bei denen starke Nachfrageschwankungen oder eine hohe Unsicherheit (z.B. Anlaufphase) in der Produktionsmenge vorliegen.

Bei hohen Produktionsstückzahlen oder körperlich stark beanspruchenden Tätigkeiten werden häufig automatisierte Montagesysteme eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass die *Verfügbarkeit einer automatisierten Montageanlage* mit steigender Anzahl an verketteten Einzelstationen sinkt. Bei einer Verkettung serieller Zellen ohne Puffer werden erhöhte Anforderungen an die Robustheit der einzelnen automatisierten Montagestationen gestellt. Durch spezielle Maßnahmen in der Planungsphase, wie die Aufteilung der Arbeitsvorgänge auf mehrere Zellen mit Zwischenpuffern kann die Gesamtverfügbarkeit erhöht werden.

## 2.2 Analysemethoden für Störpotentiale in der automatisierten Montage und zur Charakterisierung der Systemrobustheit

Anlagenstörungen bedeuten einen Verlust für Fertigungsbetriebe. Während des Anlagenstillstands erfolgt keine Wertschöpfung und damit kein Kapitalmittlerückfluss aus der Investition (RoI). Zur Erreichung eines hohen RoI (Return on Invest) wird versucht, eine möglichst hohe Anlagenauslastung und geringe Stillstandszeiten hochautomatisierter Montageanlagen zu erreichen. In der Arbeitsplanung werden auf der Basis von Arbeitszeitstudien mittels *REFA-Methoden* sowohl Vorgabezeiten für die manuelle Montage als auch Vorgaben zu den Maschinennutzungszeiten von roboterbasierten Montageanlagen erstellt. Nach REFA gliedert sich die Maschinenbelegungszeit (Vorgabezeit) in Rüst- und Bearbeitungszeit. In der Bearbeitungszeit sind Hauptnutzungszeit, die Nebennutzungszeit und die Verteilzeit enthalten. Wichtige Kenngrößen wie die Zuverlässigkeit werden in [48] beschrieben. Die Verfügbarkeit und der Nutzungsgrad werden in der VDI 3423 [79], VDI 4004 [78], VDI 40041[77] erläutert. Das folgende Beispiel soll zeigen, dass Begriffe wie die Nebennutzungszeit in der Praxis jedoch sehr unterschiedlich verwendet und interpretiert werden.

Kapazitätsbestand: 100%

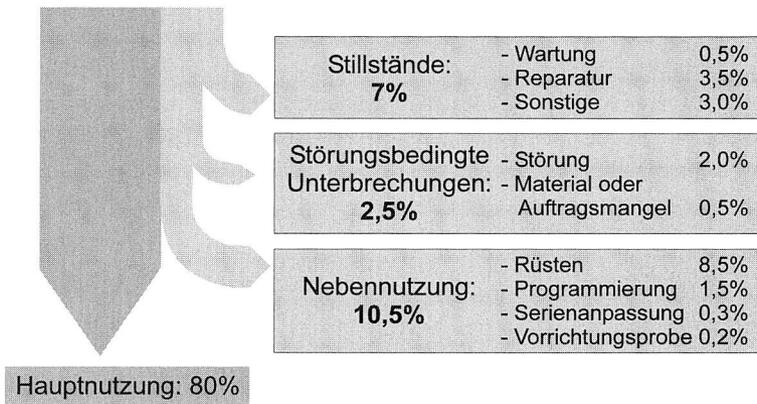


Bild 14: Anlagennutzungszeiten und Störzeiten am Beispiel Schweißroboter [80]

In Bild 14 wird exemplarisch die Anlagennutzung eines Roboterschweißsystems im Karosseriebau dargestellt. Die verfügbare Gesamtkapazität der Roboterzelle teilt sich demnach in Hauptnutzung, Nebennutzung sowie Stillstände und störungsbedingte Unterbrechungen auf. Die Nebennutzungszeit beinhaltet dabei auch das Rüsten der Anlage. Weiterhin werden in der Praxis Reparaturen häufig zu den störungsbedingten Unterbrechungen gezählt. Problematisch an dieser Darstellung ist zudem, dass aus dem

Hauptnutzungsgrad von 80% nicht ersichtlich ist, in welchem Verhältnis Gutteile und Ausschussteile gefertigt wurden. Ausschussteile zählen genauso wie störungsbedingte Unterbrechungen zu den Verlustzeiten, in denen keine Wertschöpfung erfolgt. Aufgrund dieser Unzulänglichkeit wird nachfolgend eine Unterteilung der Maschinenzeiten gemäß DIN 8743 verwendet.

Nach *DIN 8743* gliedert sich die Maschinenarbeitszeit in die Betriebszeit und Nebenzeit [68]. Die *Betriebszeit* beinhaltet wiederum die Qualitätszeit (u.a. Hauptnutzungszeit), in der Gutteile produziert werden und die Verlustzeit, in der es zum Maschinenstillstand oder Ausschussproduktion kommt und somit nur Kosten entstehen. Ein Maschinenstillstand kann durch Leerlauf oder durch einen Maschinenausfall verursacht sein. Addiert man die Verlustzeiten im Beispiel von Bild 14, so sind zu den störungsbedingten Unterbrechungen (2,5%) und den Stillständen (7%) auch noch der Anteil an Ausschussproduktion zu addieren, der im Beispiel jedoch nicht quantifiziert wird. Dies zeigt, welches technische und organisatorische Optimierungspotential zur Wirtschaftlichkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme vorhanden ist. Material- oder Personalmangel lassen sich durch vorbeugende organisatorische Maßnahmen verhindern. Die Instandhaltung sowie Reinigung und Pflegearbeiten an den Anlagen könnte in produktionsfreie Zeiträume wie eine dritte Schicht, Wochenende oder Betriebsurlaub verlegt werden.

Neben der Verlustzeit sind zudem die *Nebenzeiten* zu minimieren. Unter Nebenzeiten werden Arbeiten für das Rüsten, die Vorrichtungsanpassung und die Programmoptimierung etc. zusammengefasst. Nebenzeiten lassen sich dadurch reduzieren, indem Rüstzeiten durch das Bündeln von Aufträgen gesenkt werden. Die Zeiten für die Prozessoptimierung können heute, insbesondere bei Neuanläufen durch leistungsfähige Simulationssysteme minimiert werden. *Typische Ursachen für einen Maschinenstillstand* aufgrund von Verlust- oder Nebenzeit sind:

- Prozessstörungen
- Rüsten
- Prozessoptimierung
- Versuche, Neuanläufe
- Material- oder Personalmangel
- Pausen, Schichtwechsel
- Reinigung, Pflege
- Vorbeugende Instandhaltung

Die Verlustzeiten durch Maschinenstillstand oder Ausschussproduktion sind im Sinne der Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses zu minimieren. Zur Steigerung der Hauptnutzungszeit (Qualitätszeit) und damit der Wirtschaftlichkeit von Montagesysteme-

men sind geeignete Gegenmaßnahmen erforderlich. Insbesondere Prozessstörungen führen in automatisierten Montagesystemen zu unproduktiven Verlustzeiten oder im ungünstigsten Fall zu Ausschuss, d.h. der Vernichtung von Produktionsfaktoren.

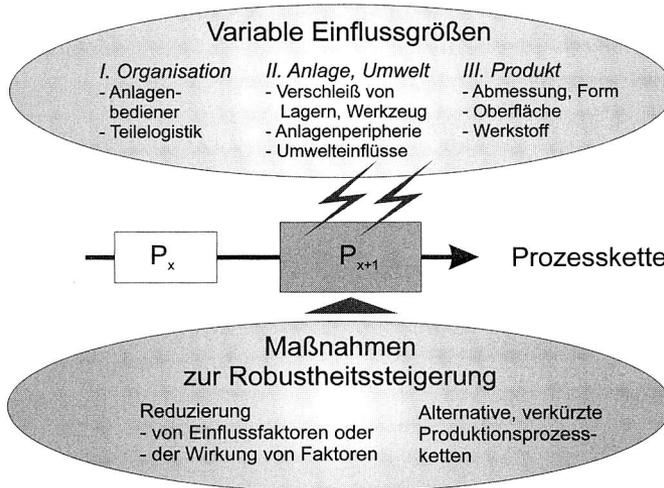


Bild 15: Prozesseinflussgrößen und robustheitssteigernde Maßnahmen

Es stellt sich die Frage nach typischen Ursachen von Montageprozessstörungen. Eine systematische *Einteilung der Ursachen von Prozessstörungen* ergibt (Bild 15):

- I. Organisatorische oder mitarbeiterbedingte Ursachen
  - Logistikfehler (z.B. falsche oder keine Fügeteile)
  - Bedienfehler (z.B. falsche Montageprogramme)
- II. Montagesystembezogene Ursachen
  - Werkzeugverschleiß oder -beschädigung
  - Verschleiß von Lagern oder Führungen in der Montageanlage, die zu Positionsungenauigkeiten führen
  - Fehler in der Anlagenperipherie wie beispielsweise der Teilebereitstellung
  - Umweltbedingte Einflussgrößen (z.B. Temperatur)
- III. Materialbedingte Ursachen
  - Beim Transport beschädigte Fügeteile
  - Zu große Merkmalstoleranzen in den Füge- oder Hilfsfügeteilen durch fehlerhafte Fertigungsprozesse

Für die robuste Auslegung von Montagesystemen existieren somit mehrere Ansatzpunkte (Bild 15). Zielführende *Maßnahmen* zur Steigerung der Robustheit sind:

- *Reduzierung von Einflussfaktoren durch konstant halten bzw. ausschalten*; z.B. Temperaturschwankungen durch klimatisierte Fertigungsumgebung
- *Reduzierung der Einflusswirkung*; z.B. durch Messung der Störgröße und Kompensation des Einflusses durch sensorbasierte Regelkreise
- *Alternative Montagestrategien* für komplexe Teilprozesse, z.B. Einsatz moderner Fügeverfahren wie das Stanznieten anstelle konventioneller Nietverbindungen

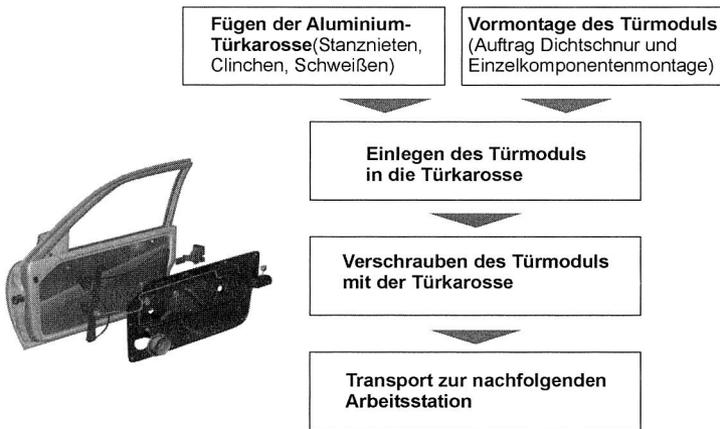
Ziel muss es somit sein, Störeffekte im Sinne einer robusten Prozessgestaltung zu minimieren bzw. ihre Auswirkungen zu kompensieren. *Konkrete Einzelmaßnahmen* bezüglich der drei vorgenannten Hauptstörungsursachen können wie folgt aussehen:

- zu I) *Organisatorische und mitarbeiterbedingte Störungen* lassen sich u.a. durch Qualifizierungsmaßnahmen minimieren.
- zu II) Die Wahrscheinlichkeit *montagesystembedingter Störungen* kann durch regelmäßige *Wartungsarbeiten/ Maintenance* reduziert werden.
- zu III) *Merkmalstoleranzen in den Füge- oder Hilfsfügeteilen sowie Bauteilfehler* können durch systemspezifische Maßnahmen beherrscht werden. Die Vermeidung oder Kompensation dieser Fehler zur Vermeidung von Montageprozessstörungen steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. In Kapitel 2.2 erfolgt zunächst eine Darstellung von wichtigen Analysemethoden für Störpotentiale.

Die Einteilung von Störpotentialen war bislang sehr allgemein gehalten. Nachfolgend werden konventionelle Analysemethoden wie die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (*FMEA*), Sensitivitätsanalyse (*DoE*) und die Maschinen - Systemfähigkeitsanalyse diskutiert, die eine konkrete Festlegung von Störquellen erlauben. Darüber hinaus existieren noch applikationsspezifische Ansätze, wie die der *Simulationstechnik* (Kap. 7) zur Schwachstellenermittlung anhand der Vorgabe einer speziellen Anlagenkonfiguration. Eine weitere Methode zur quantitativen Untersuchung der Montagefehlerhäufigkeit wird in [103] unter der Bezeichnung *Assembly Reliability Evaluation Method (AREM)* beschrieben. Hierin wird die Anzahl der Montagefehler auf die Fügeteile als Störungsursache bezogen. Nachfolgend wird zunächst die *FMEA* ausführlich erörtert, die es schon sehr frühzeitig gestattet, produkt- und prozessbezogene Fehlerpotentiale in der Produktentwicklung zu erkennen. Dies stellt wiederum die Grundlage zur applikationsspezifischen Festlegung von präventiven Vermeidungsmaßnahmen und für Fehlerreaktionsstrategien dar.

### 2.2.1 Erweiterte FMEA und Beispielprozesskette PKW-Türmontage

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ist eine formalisierte Methode, mit der potentielle Fehler aus der Konstruktion, Fertigung und Montage systematisch erfasst, analysiert und behoben werden können. Dabei wird im Wesentlichen zwischen der *Produkt-FMEA*, die bereits in der Konstruktionsphase der Produkte eingesetzt wird, und der *Prozess-FMEA*, die während der Fertigung und Montage zum Einsatz kommt, unterschieden. Am Lehrstuhl FAPS wurden beide FMEAs beispielhaft auf die *Prozesskette automatisierte PKW-Türmontage* angewendet. Das *Bild 16* zeigt den Ablauf der, in der Roboterzelle am FAPS realisierten Montagesequenz.



*Bild 16:* Beispielprozesskette zur automatisierten PKW-Türmontage

Der Prozessablauf beinhaltet das Fügen zweier PKW-Türbaugruppen, die bereits vormontiert an die Montagestation angeliefert werden. Zum einen ist dies die Türkarosse, die aus dem Leichtbauwerkstoff Aluminium besteht und mittels innovativer Verbindungsverfahren wie dem Stanznieten, Clinchen etc vorgefertigt wird. Die zweite Montagebaugruppe bildet das vormontierte Türmodul mit allen Einzelfunktionen wie Fensterheber, Türverriegelung etc. Zur Abdichtung gegen die Türkarosse ist auf dem Trägerblech eine Dichtschnur aufgebracht. In der Montagestation erfolgt das Einlegen und Verschrauben der beiden Montagebaugruppen mit metrischen Schrauben. Die Beispielprozesskette beinhaltet somit das Bauteilhandling, Stanznieten, Dichtmittelauftrag und Verschrauben.

In *Bild 17* sind anhand einer *FMEA* mögliche Folgen von Montageprozess- oder Bauteilfehlern auf das Produkt PKW-Seitentüre dargestellt. Eine *FMEA* besteht dabei aus einem analytischen und einem bewertenden Teil. In der *Analyse* wird beschrieben, wel-

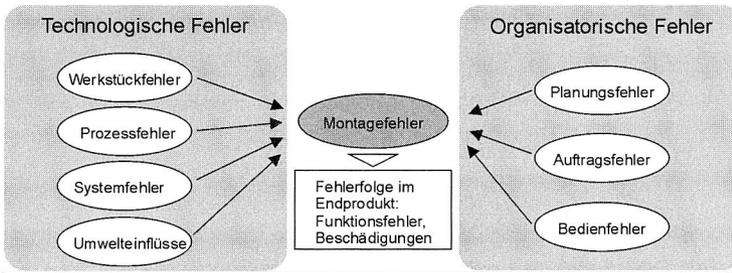
che Fehler hervorgerufen werden können und was die Ursachen sowie Auswirkungen sind. Im *bewertenden Abschnitt* erfolgt die quantitative Beschreibung der Fehler anhand von Zahlenwerten für die Parameter Fehlerschwere, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit. Die Fehlerfolgen werden so nach ihrer Auswirkung auf den Endverbraucher (Faktor B) nach ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit (Faktor A) und ihrer Entdeckungswahrscheinlichkeit (Faktor E) bewertet. Deren multiplikative Verknüpfung ergibt die Risikoprioritätszahl (RPZ), die ein Maß für die Dringlichkeit von Verbesserungsmaßnahmen darstellt. Auf diese Art wird Wissen über das Auftreten von Fehlern, ihre Auswirkungen und Vermeidungsstrategien systematisch erarbeitet. Zur effizienten Anwendung der FMEA werden heute rechnergestützte Werkzeuge eingesetzt. Die FMEA kann so als Basis für eine wissensbasierte Diagnose von Montageanlagenstörungen dienen [25], [125].

Prozess-FMEA zur PKW-Türmontage										Erweiterung		
N r.	Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Reaktion im Störfall		
1	Fahrtgeräusche in der Seitentüre	3	Lärmdämmung zwischen Türkarosse und Türmodul fehlerhaft	Fehlerhafte Sickengeometrie im Blech	Werkzeugkontrolle (Verschleiß)	6	Bauteilkontrolle	8	<b>144</b>	Bauteil ausschleusen		
2				Zu geringer Dichtraupendurchmesser	Überwachung des Dichtstoffauftragsprozess	3	Bauteilkontrolle	10			90	Parameteranpassung
3	Funktionsstörung des Türmoduls	5	Türmodul ist nicht ordnungsgemäß mit der Türkarosse verbunden	Fehlerhafte Sickengeometrie im Blech	Werkzeugkontrolle (Verschleiß)	6	Bauteilkontrolle	8	<b>240</b>	Bauteil ausschleusen		
4				Zu geringer Dichtraupendurchmesser	Überwachung des Dichtstoffauftragsprozess	3	Bauteilkontrolle	10			150	Parameteranpassung
5				Schraubenklemmkraft zu gering	Schraubparameter korrigieren	3	Stichprobenkontrolle	10			150	Parameteranpassung
6	Unebenheit im lackierten Blech	5	Stanzniet steht hervor	Nietsetzkraft zu gering	Stanznietparameter korrigieren	4	Stichprobenkontrolle	8	<b>160</b>	Niet entfernen; Blindniet setzen		
..	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...		

Bild 17: FMEA für die Montage des Modulträgers in den PKW-Türrohling

Die in Bild 17 durchgeführte *Prozess-FMEA* zur PKW-Türe hat ergeben, dass primär eine zu geringe Schraubenklammkraft, eine fehlerhafte Bauteilgeometrie und ein zu geringer Dichtraupendurchmesser als Fehlerursachen auftreten. Es zeigt sich, dass Bauteilgeometriefehlern die jeweils höchsten Risikoprioritätszahlen zugeordnet werden. Dies erklärt sich zum einen aus der hohen Auftretenswahrscheinlichkeit, die sich aus den großen Toleranzschwankungen bei der Fertigung flächiger Leichtbauteile ergibt, und zum anderen aus der geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit, da in der flexibel automatisierten Montage Geometriefehler nur mit einer geeigneten Messtechnik detektiert werden können. Die FMEA bietet somit ein Hilfsmittel zur strukturierten, methodischen Erfassung von möglichen Störpotentialen in der Fertigung und Montage [88]. Riskanten Produkt- und Prozessmerkmalen können risikosenkende Maßnahmen zur Fehlervermeidung zugeordnet werden.

Die Analyse von Störungsquellen und Vermeidungsstrategien sollte zusätzlich um die Festlegung geeigneter *Reaktionsstrategien* im Fehlerfall erweitert werden. Zu den im Rahmen der FMEA festgestellten Fehlermöglichkeiten bzw. deren Ursachen können in einer *erweiterten FMEA* (e-FMEA) Reaktionsstrategien erstellt werden [16].



	Fehler- ursache	Fehler- auswirkungen	Behebungsmöglichkeiten	
			Zellenebene	Leitstand
Werk- stückfehler	Signifikante Abweichungen in Maß, Form, Lage und Toleranz	Prozeßstörungen wie Verkanten, Klemmen etc.; Funktionsfehler Werkstück	aktiver und passiver Toleranzausgleich	neue Bauteilcharge
	Starke Schwankungen in den Materialeigenschaften	Montagestörungen	Werkstück Ausschleusen; Parameteranpassung	neuer Auftrag
Prozess- fehler	Drehmomentfehler	Produktfehler	Wiederholung; Programmänderung	
System- fehler	Funktionsstörung bzw. Totalausfall eines Werkzeugs	eingeschränkte Funktionalität der Zelle	redundantes Werkzeug; Werkzeugtausch	Bereitstellung von Werkzeugen, Umplanung

Bild 18: Ursachen, Auswirkungen und Behebungsmöglichkeiten von Fehlern

Das Bild 18 zeigt in der oberen Bildhälfte zunächst die Klassifizierung der Fehler nach ihrer Ursache, gegliedert in technisch und organisatorisch bedingte Fehler. Die einzelnen Fehler werden anschließend in der FMEA aufgelistet und bewertet. Die erweiterte FMEA beinhaltet neben Strategien zur präventiven Fehlervermeidung auch Fehlerreaktionsstrategien zur Behebung von Maschinenstörungen. In hierarchisch gegliederten Reaktionsstufen können somit vorab Reaktionsmaßnahmen definiert werden. Dabei wird zwischen den beiden störungsbehebenden Instanzen, der Montagezellensteuerung und dem übergeordneten Leitstand differenziert. Beispielsweise können starke Schwankungen in der Fügeteilgeometrie oder den Werkstoffeigenschaften der Materialfestigkeit zu Montageprozessstörungen führen. In diesem Fall werden vorab definierte Prozessfenster, z.B. für den Fügekraftverlauf überschritten. In der erweiterten FMEA können nun automatische Messabläufe und Wiederholungsstrategien mit dynamisch angepassten Prozessparametern und Überwachungsfenster für die Montagezelle definiert werden. Im Falle des Fehlschlagens oder der Nichtdurchführbarkeit von Reaktionsstrategien in der Zelle können auf übergeordneter Leitstandsebene weitere Maßnahmen, beispielsweise zum Ausschleusen von Fügeteilen zu speziellen Reparaturarbeitsplätzen hinterlegt werden. In Bild 17 sind in der äußerst rechten Spalte mögliche Reaktionsstrategien auf Montageprozessstörungen anhand der Fügetechnologien in der Prozesskette zur automatisierten PKW-Türmontage exemplarisch dargestellt.

Zusammenfassend bestehen die Vorteile der erweiterten FMEA in der Darstellung von Reaktionsmöglichkeiten zur Vermeidung und Kompensation von Montageprozessstörungen. Damit wird der Ausgleich von, in vorgelagerten Fertigungsprozessen verursachten Merkmalschwankungen in den Fügstellen mit dem Ziel der Störungsvermeidung in der Montage möglich. Die erweiterte FMEA bildet somit die Grundlage für die Störungsvermeidung mittels Prozessparameteradaption und zum anderen für die Durchsetzung von Störungsbehebungsstrategien im Störfall.

## 2.2.2 Einsatz der Statistischen Versuchsplanung und Sensitivitätsanalyse zur Wirkungsanalyse von Fügepartitoleranzen

Eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung von robusten Prozessen ist die Analyse von Toleranzstrukturen und ihre Auswirkung auf Montageprozessverläufe. Aus diesem Grund sind detaillierte Toleranzuntersuchungen erforderlich. Die Abweichung geometrischer und werkstofflicher Eigenschaften realer Bauteile von ihrer Nominalgestalt (*Konstruktionsvorgaben*) ist gewissen statistischen Schwankungen unterworfen. Die zulässigen Abweichungen werden in Form von Toleranzangaben in den Konstruktionszeichnungen angegeben. Es müssen die zulässigen Abweichungen für die Bauteilgeometrie sowie die Material- und Funktionseigenschaften des Produktes festgelegt werden. Dabei gilt der empirisch ermittelte Zusammenhang, dass je *enger die zulässigen Bauteiltoleranzen gewählt werden, um so höher die Fertigungskosten* sind. Dies liegt zum einen in dem höheren Prüfaufwand und zum anderen in höheren Anforderungen an Maschine und Werkzeug (Präzisionsanlagen). Aus Wirtschaftlichkeitsgründen gilt daher für die Konstruktion die Maxime: *So eng wie nötig und so weit wie möglich zu tolerieren*. In der Konstruktionspraxis werden die zulässigen Toleranzen jedoch tendenziell sehr eng vorgegeben, um Funktionsproblemen im Endprodukt weitgehend vorzubeugen, man spricht auch von sogenannten „Angsttoleranzen“.

Nachfolgend wird zwischen *funktions- und montagebedingten Toleranzen* differenziert. Funktionsbedingte Toleranzen sind unabhängig von den Montageprozessen fest vorgegeben und stets einzuhalten. Bei montagebedingten Toleranzen kann durch eine fehler-tolerante Auslegung der Montagesysteme eine deutliche Aufweitung der zulässigen Toleranzfenster unter Wahrung der Produktfunktion erreicht werden. Dies eröffnet zusätzliche Potentiale zur Senkung der Fertigungskosten in montagevorgelagerten Prozessschritten. Die aus der Fertigung kommenden Bauteile können so aufgrund vielfältiger Stör- und Einflussgrößen die in der Konstruktion definierten Solleigenschaften häufig nur annähernd erreichen. Typische Einflussparameter die die in der Fertigung realisierbaren Toleranzfenster beeinflussen sind:

- Art des Fertigungsverfahrens (z.B. Gefahr des Bauteilverzugs beim Bahnschweißen)
- Fertigungsprozessführung/ -parameter, wie Vorschub oder Schnittgeschwindigkeiten
- Art der Aufspannung
- Einsatzdauer der Werkzeuge und hieraus resultierender Werkzeugverschleiß

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass sich Fertigungs- bzw. Montagefehler über mehrere Prozessschritte aufsummieren können. Hieraus leiten sich die Anforderungen an die Montage ab. In der *Montage* kommt hinzu, dass zusätzlich komplexe Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fügestellen herrschen können, wenn

beispielsweise mehrere Fügepunkte synchron in Deckung bzw. Eingriff zu bringen sind. Hinsichtlich der festgestellten *Wechselwirkungen zwischen Fertigungs- und Montageprozessen* lassen sich folgende grundlegende Optimierungspotentiale erkennen:

1. Bereits in der Fertigungsplanung sollten Optimierungen der Prozessketten erfolgen. So ist es sinnvoll, die Bearbeitung von Funktionsflächen (externe Toleranzen) sowie von Aufnahme- und Befestigungspunkten (interne Toleranzen) erst möglichst spät vor der jeweiligen Montageoperation vorzusehen.
2. Konstrukteure benötigen detaillierte Informationen über die verfahrensimmante Toleranzempfindlichkeit von Fügeverfahren gegenüber Toleranzschwankungen in den Fügeteilen. Zudem sind Informationen über die im Betrieb vorhandenen Montagesysteme und deren Sensorausstattung bereitzustellen. Die Toleranzsensitivität lässt sich systematisch durch experimentelle Untersuchungen an den, im Betrieb vorhandenen Montageanlagen ermitteln.

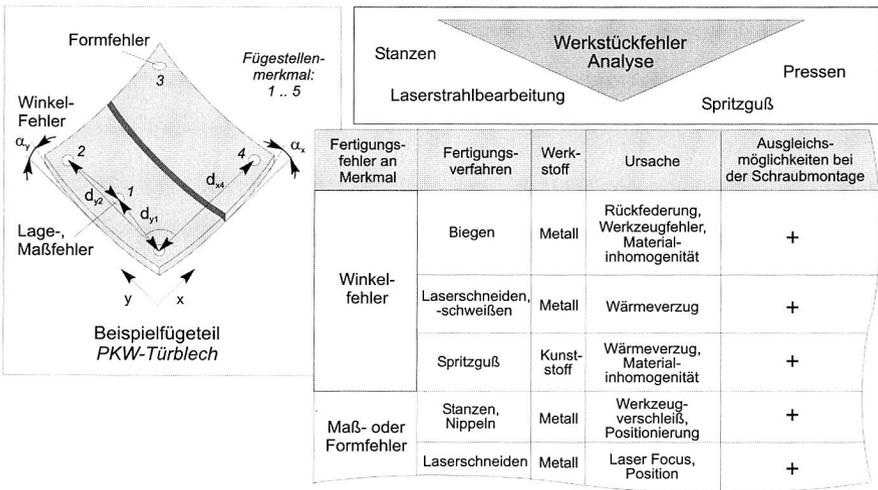


Bild 19: Mögliche Fertigungsfehler und Ausgleichsmöglichkeiten bei der Montage

Das Bild 19 zeigt einen systematischen Ansatz zur Ermittlung der Einflussgrößen und Zielparameter bei der automatisierten Schraubmontage. Zunächst werden potentielle Werkstückfehler, im Bild links, mit den jeweiligen vorgeschalteten Fertigungsprozessen ursächlich in Bezug gesetzt. Die Tabelle enthält die Ursache für den Fertigungsfehler und eine Angabe darüber, ob ein Ausgleich dieses Fehlers durch eine Prozessparameteranpassung im nachgeschalteten Fügeprozess prinzipiell möglich ist. Im nächsten Schritt sind durch experimentelle Parameteruntersuchungen mittels Versuchsplänen die konkreten Steuerparametereinstellungen zu ermitteln.

### *Statistische Versuchsplanung:*

Zur Ermittlung der optimalen Parametereinstellung von Montageprozessen lassen sich Verfahren der Statistischen Versuchsplanung bzw. des Design of Experiments (DOE) einsetzen [87]. Prinzipiell wird zwischen *ein*faktoriellen und *voll*faktoriellen Versuchsplänen unterschieden. Vollfaktorielle Versuchspläne erfordern einen hohen Aufwand an Versuchen, der exponentiell mit der Anzahl der Prozessparameter ansteigt. Die Bildung von teilfaktoriellen Versuchsplänen nach den Verfahren von Taguchi und Shainin dient der Reduzierung dieses Versuchsaufwandes. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche wird durch die Konzentration auf die wesentlichen Einflussgrößen beschränkt. Die vollständige Informationsmenge ist allerdings nicht erreichbar. Zielsetzung bei der Anwendung der statistischen Versuchsplanung ist die Bestimmung von signifikanten Einflussgrößen auf den Montageprozess sowie der optimalen Parametereinstellung. Dies erfolgt exemplarisch für das Direktschrauben und das Stanzen in Kap. 3.3.

### *Sensitivitätsanalyse:*

Auf die Ergebnisse des DOE aufbauend kann im nächsten Schritt die Untersuchung der Robustheit von Montageverfahren erfolgen. Im ersten Schritt wird von idealen Bauteileigenschaften ausgegangen und hierfür die optimalen Prozessparameter ermittelt. Ausgehend von der Optimallösung wird in einem zweiten Schritt eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wird die *Stabilität* der gefundenen Lösung gegenüber Änderungen signifikanter, montagerelevanter Prozesseinflussgrößen untersucht. Die Einschränkung der zu untersuchenden Parameter ist erforderlich, da ansonsten der Versuchsaufwand unvermeidbar hoch sein würde. Zudem interessiert die Fragestellung, wie lange die gefundene Einstellung optimal bleibt, wenn sich eine oder mehrere Bauteileigenschaften ändern. Im günstigsten Fall erweist sich die Parametereinstellung als robust (stabil), d.h. dass größere Schwankungen in den geometrischen oder physikalischen Bauteileigenschaften auftreten können, ohne dass eine Parameteranpassung erfolgen muss. Im ungünstigen Fall muss eine Nachführung von Prozessparametern erfolgen.

Die Information über die Robustheit (Stabilität) des Montage- oder Fügeverfahrens gibt einen ersten Anhaltspunkt über zu erwartende Störpotentiale im laufenden Produktionsprozess. Bei einem geringen Störpotential braucht den analysierten Bauteileigenschaften zukünftig nur noch eine geringe Aufmerksamkeit gewidmet werden. Somit lassen sich Qualitätskosten und Informationskosten (Kosten der Qualitätskontrolle) sparen. Neben der Ermittlung optimaler Prozessparametereinstellungen erfolgt auch die Ermittlung *deterministischer Zusammenhänge* zwischen den Ausgangsdaten und den Prozessparametern. Hierdurch erhöht sich der Versuchsaufwand und die Datenmenge stark. Wichtige Einflussgrößen bezüglich des Aufwands sind die Anzahl der Prozesseinflussgrößen (Ausgangsdaten), deren Interdependenzen und die Anzahl der Prozesspa-

parameter. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann, ausgehend von einer ersten optimalen Punktlösung für die Parametereinstellung, der Variationsraum im Umfeld dieser Lösung analysiert werden. So lassen sich deterministische Zusammenhänge für die Parametereinstellung finden. Diese Informationen bilden die Basis für eine situationspezifische Anpassung der signifikanten Prozessgrößen. Die Sensitivitätsanalyse erfolgt exemplarisch für die Montageverfahren Direktschrauben und Stanznieten in Kapitel 3.3. Anschließend müssen die Versuchsdaten formal aufbereitet und in einer Datenbank dem Montagesystem zugänglich gemacht werden. Neben Fügeiteiltoleranzen spielt insbesondere die Genauigkeit der Handhabungsgeräte [101], durch die Fügewerkzeuge oder Bauteile positioniert werden, eine wichtige Rolle für die Störanfälligkeit von Montageanlagen. Nachfolgend werden wichtige Analysemethoden hierfür vorgestellt.

### 2.2.3 Analyse der Prozessfähigkeit und der Montagesystemfähigkeit

Bei der *Prozessfähigkeitsanalyse* werden die Eigenschaften eines Prozesses mit den gestellten Anforderungen verglichen. In der Montage lassen sich so Fügeprozesse wie das Einpressen, Schrauben, Nieten etc. untersuchen. Die Informationen über die Prozessgüte stammen hierbei aus den Produktmerkmalen oder aus damit korrelierenden Prozessmerkmalen [88].

Qualitätsmerkmale eines Prozesses:

- Produktmerkmale: Anzahl Schlechteile (beispielsweise Kratzer, Unvollständigkeit, Beschädigungen etc.)
- Prozessmerkmale: z.B. Positioniergenauigkeit

Der Nachweis der Prozessfähigkeit einer Anlage wird beispielsweise bei der Erstabnahme einer Maschine vom Hersteller durch den Kunden gefordert. Ist der Nachweis erbracht, so kann davon ausgegangen werden, dass auch im laufenden Betrieb mit einem zufriedenstellend arbeitenden System gefertigt wird. Dabei wird jedoch von zeitlich konstanten Einflussgrößen ausgegangen. Für die Beurteilung der Fähigkeit und die Auswahl der Berechnungsverfahren sind vom Prozess folgende *Voraussetzungen* zwingend zu erfüllen:

- Prozess muss stabil (beherrscht) sein
- Berechnungsverfahren muss auf die Messgrößenverteilung abgestimmt sein

Die Stabilität gibt Auskunft über die zeitliche Abweichung der Mittelwerte einzelner Stichproben. Ist ein Prozess instabil, sind systematische Einflüsse vorhanden, die in jedem Fall vor einer Fähigkeitsuntersuchung abgestellt werden müssen. Ist der Prozess stabil, spricht man von einem beherrschten Prozess. Eine weitere Grundvoraussetzung

zur Anwendung der Berechnungsformel (für  $C_p, C_{pk}$ ) ist die Normalverteilung des Prozesses. Liegen andere Verteilungen zugrunde, müssen alternative Berechnungsverfahren gewählt werden.

Im Rahmen der Fähigkeitsuntersuchung werden folgende *Kenngößen* unterschieden:

- fortdauernde Prozessfähigkeit  $C_p, C_{pk}$
- vorläufige Prozessfähigkeit (Maschinenfähigkeit)  $P_p, P_{pk}$

Die Kenngößen geben den zeitlichen Aspekt der Untersuchung an. So bezeichnet die *Kenngöße C* die *fortdauernde Prozessfähigkeit*. Dazu ist eine Betrachtung der Maschine in ihrem Produktionsumfeld über einen längeren Zeitraum (5 - 20 Arbeitstage) notwendig. Die *Kenngöße P* bezeichnet die *vorläufige Prozessfähigkeit*. Hierbei ist die Entnahme einer Stichprobe mit einem Umfang  $n = 20 - 50$  (Anzahl Messungen) häufig ausreichend. Da man davon ausgeht, dass bei einer kurzen Untersuchung nur Einflüsse des Betriebsmittels wirken und Umgebungseinflüsse unwirksam bleiben, wird diese Kennzahl auch als Maschinenfähigkeit bezeichnet.

Bei der Berechnung des *Prozesspotentials* (Index  $p$ ) wird der vorgegebene Toleranzbereich aus oberem Grenzwert (OGW) und unterem Grenzwert (UGW) mit der tatsächlichen Prozessstreuung verglichen. Sie ist das Maß für die beste Leistung, die der Prozess erbringen könnte. Bei der *Prozessfähigkeit* (Index  $pk$ ) einer Maschine wird sowohl die Lage des produzierten Mittelwerts relativ zum Sollwert, als auch die Prozessstreuung relativ zu den Grenzwerten berücksichtigt. Sie ist damit ein Maß für die tatsächliche Fähigkeit des Prozesses, ein bestimmtes Merkmal in gleich bleibender Weise innerhalb der Spezifikationsgrenzen zu erzeugen. Zur Berechnung der Fähigkeit werden aus den Einzelstichproben (Einzelmessung  $x$ ) die Mittelwerte  $\bar{x}$  und daraus wiederum der Gesamtmittelwert  $\bar{\bar{x}}$  berechnet. Aus dem Gesamtmittelwert sowie der Streuung  $s$  werden gemäß den untenstehenden Formeln die Kennwerte ermittelt. Die untenstehenden Formeln gelten analog für die Berechnung der vorläufigen *Prozessfähigkeit*:

$$C_p = \frac{OGW - UGW}{2 * (3s)}$$

$$C_{pk} = \min \left[ \frac{OGW - \bar{\bar{x}}}{3s}; \frac{\bar{\bar{x}} - UGW}{3s} \right]$$

mit arithmetischem Mittel  $\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i$  und Standardabweichung  $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$

Die unteren Grenzwerte für die vorläufige Prozessfähigkeit liegen beispielsweise nach Ford Q101 bei  $p_{pk} = 1.67$  und für die fortdauernde Prozessfähigkeit bei  $c_{pk} = 1.33$ . Ist die Prozessfähigkeit damit nachgewiesen, kann der Prozess mittels Statistical Process Control (SPC) laufend überwacht und wenn erforderlich korrigiert werden [93].

Bei der *Systemfähigkeitsanalyse* werden die Eigenschaften eines Fertigungs- oder Montagesystems mit den gestellten Anforderungen verglichen. Die Informationen über die Systemgüte stammen hierbei aus den Merkmalen der Montageanlage. Dies können beispielsweise die Mengenleistung oder Verfügbarkeit, aber auch produktbezogene Qualitätsmerkmale sein. Es ist zu beachten, dass die Eigenschaften des Montagesystems einer laufenden Veränderung der Betriebsbedingungen (z.B. Betriebstemperatur) des Systems unterliegen und dadurch streuen. Das Ausmaß der Streuungen ist eine wichtige Qualitätsinformation zur Montageanlage. Die Streuung ist jedoch stets im Zusammenhang mit den vorherrschenden Betriebsbedingungen zu bewerten [74], [45].

Qualitätsmerkmale einer Montageanlage

1. Leistungseigenschaften

- Mengenleistung (M)
- Nutzungsgrad ( $N_T$ )
- *Qualitätsleistung* (Q) anhand von Schlechteilen (vgl. Prozessfähigkeitsanalyse)
- Taktzeit ( $T_t$ ) etc.

2. *Störungseigenschaften*

- Technische Zuverlässigkeit ( $Z_T$ )
- Technische Verfügbarkeit ( $V_T$ )

3. Flexibilitätseigenschaften und Umfeldbeziehungen

- Änderungstauglichkeit ( $T_A$ )
- Integrationstauglichkeit ( $T_I$ )
- Wartungsaufwand

Dabei ist zu beachten, dass mindestens ein quantifizierbares Merkmal zugrunde gelegt werden muss, um die Systemanforderungen eindeutig angeben und überprüfen zu können. Die *Vorgehensweise* zur Bestimmung der Systemfähigkeit ist analog zu der Prozessfähigkeitsanalyse. Die Systemfähigkeit wird für unterschiedliche Merkmale eines Systems bestimmt und kann in Systemfähigkeitsindizes ausgedrückt werden. Diese Kennzahlen sind ein Ausdruck für die Robustheit des Systems, d.h. inwieweit ein Montagesystem in der Lage ist, variable (äußere) Betriebsbedingungen zu kompensieren.

Im Rahmen der Fähigkeitsuntersuchung werden folgende *Kenngößen* unterschieden:

- fortdauernde Systemfähigkeit  $C_s, C_{sk}$
- vorläufige Systemfähigkeit  $P_s, P_{sk}$

Das *Systempotential* (Index  $s$ ) ist ein Maß für die beste Leistung, die das System erbringen könnte. Die *Systemfähigkeit* (Index  $sk$ ) ist ein Maß für die tatsächliche Fähigkeit des Systems, ein bestimmtes Merkmal in gleich bleibender Weise innerhalb der Spezifikationsgrenzen zu erzeugen. Die Formeln zur Bestimmung der Kennwerte entsprechen denen der Berechnung der Prozessfähigkeitsindices. Die Kenngröße zur *fortdauernden Prozess- oder Systemfähigkeit* lässt bereits einen Rückschluss über die Robustheit des Montagesystems zu, da während der Kennwertbestimmung über einen längeren Zeitraum eine Vielzahl von systematischen und zufälligen Störgrößen wirksam sind. Auf dieser Basis lassen sich gezielte Maßnahmen zur robusten Montageprozessgestaltung treffen [91], wie nachfolgendes Beispiel zeigt.

*Beispielhafte Anwendung der Systemfähigkeitsanalyse auf die Prozessschritte Einlegen und Verschrauben des Türmoduls in die PKW-Türkarosse:*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde für die Beispielprozesskette PKW-Türmontage eine *Systemfähigkeitsanalyse* vorgenommen. Dabei wurden die Arbeitsschritte *Greifen und Einlegen* des Türmoduls in die Türkarosse sowie das nachfolgende *Verschrauben* des Moduls mit metrischen Schrauben in die Karosse (*Bild 16*) untersucht. Die Systemanforderung im ersten Arbeitsschritt besteht darin, dass das Türmodul ohne Oberflächenbeschädigung sicher gegriffen werden und mit maximal auf  $\pm 0,2$  mm Lagetoleranz in der Ebene in die Türkarosse positioniert werden muss. Dies ist wiederum die Voraussetzung für ein sicheres Verschrauben im nächsten Arbeitsgang. Die Anforderung an den Schraubprozess besteht darin, dass alle metrischen Schrauben sicher mit einer definierten Vorspannkraft (12 N  $\pm 0,5$ N) angezogen werden. Die Montagesystemgüte wird somit anhand von produktbezogenen Qualitätsmerkmalen bestimmt.

Um die Montagesystemfähigkeit für die beiden Arbeitsschritte beurteilen zu können, müssen die einzelnen Arbeitsabläufe in der Montagezelle detailliert betrachtet werden. Zunächst wird das vormontierte Türmodul auf einem speziellen Werkstückträger über ein *Fahrerloses Transportsystem (FTS)* in der Montagezelle bereitgestellt. Über eine Zentrierstation am Ende des Förderbands erfolgt eine Lagezentrierung des Werkstückträgers in der Roboterzelle. Im nächsten Arbeitsschritt wird das *Türmodul vom Roboter mittels einer pneumatischen Greiferspinne* (*Bild 12*) aufgenommen.

Die aufsummierten Lagetoleranzen aufgrund von Positionsungenauigkeiten

- des Türmoduls auf dem Werkstückträger sowie
- des Werkstückträgers auf dem Transportband sowie die
- des 6-Achs-Gelenkarmroboters (KUKA KR 30) mit der anwendungsspezifischen Greiferspinne

betragen in Summe  $\pm 1,2$  mm in der xy-Ebene. Bauteiltoleranzen spielen in diesem Prozessschritt keine Rolle, da der Sauggreifer keine spezifischen Greifpunkte benötigt. Der pneumatische Greifer am Roboter kann Positionstoleranzen von bis  $\pm 2,5$  mm in der Ebene problemlos ausgleichen, ohne dass die Gefahr besteht, dass das Bauteil ungenügend gehalten wird und beim Transfer verloren geht. Dies bedeutet, dass die Systemfähigkeit für den Handlingsprozess ausreichend ist. Dies gilt für den nächsten Prozessschritt, das exakte *Positionieren und Ablegen des Türmoduls in der Türkarosse*, nicht mehr. Hier können die Lagetoleranzen des Bauteils am Greifer dazu führen, dass das Modul nicht hinreichend exakt positioniert werden kann. Daher wurde die Greiferspinne mit drei pneumatisch betätigten Zentrierdornen ausgerüstet, die in vorhandene Bauteilbohrungen eintauchen. Dies erfolgt, um das Türmodul vor dem Greifen zu zentrieren und so eine exakt definierte Lageposition am Greifer sicherzustellen [34].

Das zweite Fügeiteil, die *Türkarosse*, wird ebenfalls über ein Fahrerloses Transportsystem (FTS) in die Montagezelle gefördert. Hier betragen die aufsummierten Positionstoleranzen des FTS sowie des Werkstückträgers auf dem FTS  $> 2,0$  mm. Damit ist es erforderlich die Türkarosse optisch mit einer *CCD-Kamera* zu vermessen (Bild 12). Die zweidimensionalen Positionsdaten werden in einem PC-basierten Bildverarbeitungsprogramm ausgewertet und mit den Sollpositionen verglichen. Der so ermittelte Korrekturvektor erlaubt dem Roboter die exakte Anpassung der Positionierung des Türmoduls. Zum anderen liefert die CCD-Kamera gleichzeitig die exakten Positionsdaten der Schraubstellen an der Türkarosse. Somit ist eine Anpassung der Positionskordinaten des zweiten Roboters mit Schraubspindel möglich. Damit wird eine mögliche Ursache für Lagetoleranzen ausgeschaltet, so dass sich die Lagetoleranz aus der Positionierungsunsicherheit des Roboters mit  $\pm 0,2$  mm ergibt.

Ein Abgleich dieses Wertes mit den Ergebnissen aus den experimentellen Schraubprozessuntersuchungen sowie der Sensitivitätsanalyse zeigt, dass diese Toleranzmaße unkritisch sind und keine Prozessstörungen zu erwarten sind. Dieses Ergebnis konnte jedoch nur durch robustheitssteigernde Maßnahmen wie eine spezielle Greifergestaltung mit Zentrierhilfen sowie den Einsatz eines industriellen Bildverarbeitungssystems zur Kompensation von Lagetoleranzen erreicht werden.

## 2.3 Übersicht zur Verfügbarkeitssicherung in der automatisierten Montage

Im Falle einer *manuellen oder teilautomatisierten Montage* kann der Werker *Bauteiltoleranzen* erkennen und durch geeignete Maßnahmen kompensieren. Bei einer *hochautomatisierten Montage* mittels Robotern führen zu grobe Toleranzen häufig zu Prozessstörungen und Einbußen in der Produktqualität. Somit sind die Anforderungen automatisierter Montagesysteme an die Qualität der Montageteile höher als im Falle manueller Montage, was wiederum negative Auswirkungen auf die Rentabilität hochautomatisierter Anlagen hat. Nicht nur Fügeiteile, sondern auch *Handhabungsgeräte wie Industrieroboter* weisen Toleranzen in Form von Positionierungenauigkeiten auf. Diese können je nach Gerätepreisklasse bis auf wenige Mikrometer reduziert werden. Zur Steigerung der Positioniergenauigkeit von Robotern existiert, wie in [26] dargestellt, eine breite Palette von technologischen Optimierungsmöglichkeiten.

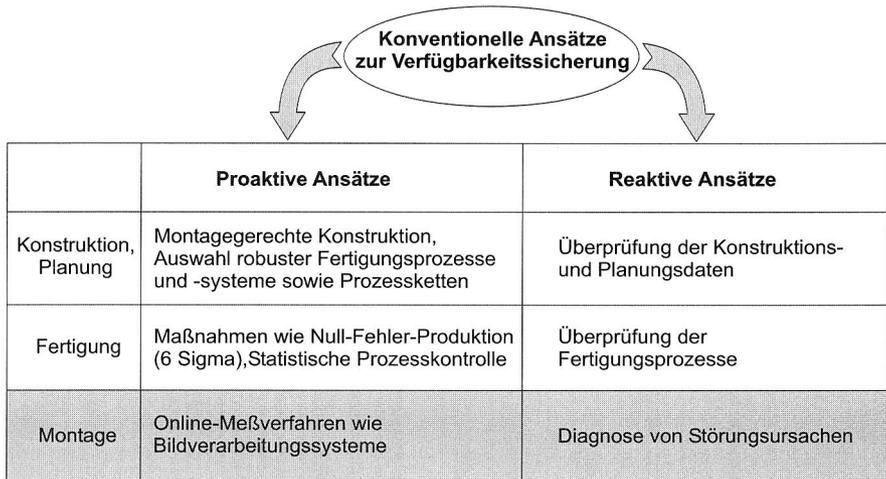


Bild 20: Systematik zur Einteilung der Ansätze zur Verfügbarkeitssicherung

Zur Reduzierung dieser hohen Anforderungen und zur Aufweitung zulässiger Toleranzfelder in den Geräte- und Bauteileigenschaften sind spezifische Maßnahmen hin zu robusten Montagesystemen erforderlich. Aus den bisherigen Analyseergebnissen der Störpotentiale in automatisierten Montagesystemen können nun konkrete Maßnahmen zur Verfügbarkeitssicherung abgeleitet werden. Die Ansätze zur Verfügbarkeitssicherung können in die zwei Gruppen *proaktive und reaktive Maßnahmen* unterteilt und den einzelnen Unternehmensbereichen zugeordnet werden (Bild 20).

*Proaktive Ansätze* dienen der Vermeidung von Störungen. Es handelt sich somit um präventive Maßnahmen. In den einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses können unterschiedliche Instrumente eingesetzt werden:

- In der *Konstruktion* werden Bauteilgeometrie und –eigenschaften definiert. Zur Vermeidung von Störungen in nachgeschalteten Prozessschritten muss auf eine *fertigungs- und montagegerechte Konstruktion* geachtet werden. Zudem werden hierdurch im Wesentlichen die Herstellkosten festgelegt. Beispielsweise können Einführschrägen an Fügeteilen die Montage erleichtern.
- In der *Arbeitsplanung* werden die *Montageverfahren und -systeme* zur Herstellung der Baugruppen ausgewählt werden. Beispielsweise kann durch den Einsatz von Zentrierhilfen, wie sie am Beispiel der Greifspinne im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, die Störwahrscheinlichkeit gesenkt werden.
- In der *Fertigung* werden Maßnahmen wie beispielsweise statistische Prozesskontrolle (*SPC*), *Null-Fehler-Produktion* und *Six-Sigma* eingesetzt
- In der *Montage* existieren bereits zahlreiche *montagetechnische und informationstechnische Lösungen* zum Ausgleich von Fertigungstoleranzen. Für diskrete Montageoperationen, wie das Greifen oder das exakte Positionieren von Bauteilen mittels Roboter können *2D/3D-Visionssysteme* eingesetzt werden.

*Reaktive Ansätze* kommen im Störfall zur schnellen Störungsbeseitigung und zur künftigen Störungsvermeidung zum Einsatz. Zur Einleitung geeigneter Gegenmaßnahmen ist jedoch die Kenntnis der Störungsursache erforderlich. Diese Analysetätigkeit wird i.d.R. vom Werker vor Ort durchgeführt und durch Diagnosesysteme unterstützt.

Ist die Störungsursache in einem *Konstruktionsfehler* des zu fertigenden Produkts begründet, so ist eine schnelle Kommunikation mit den Konstruktionsverantwortlichen erforderlich. Im Dialog zwischen Montage, Konstruktion und Arbeitsplanung lassen sich Lösungen für eine montagegerechte Konstruktion finden und Fehler künftig vermeiden. Liegt der Fehler in der *Fertigung* begründet, so muss eine zeitnahe Überprüfung der betroffenen Fertigungsprozesse sichergestellt werden. Es ist zu prüfen, ob die Bauteilfehler fertigungs- oder transportbedingt aufgetreten sind. Die Fehlerursachen sind zu beseitigen und fehlerhafte Bauteile gegebenenfalls nachzuarbeiten. Für den Betreiber von *Montageanlagen* sind Ferndiagnosesysteme des Anlagenherstellers wichtige Hilfsmittel, um Störungsursachen schnell erkennen und beheben zu können. Im Folgenden werden die Einzelmaßnahmen detaillierter betrachtet.

## 2.4 Proaktive Verfügbarkeitssicherung

### 2.4.1 Analyse montagegerechter Produktgestaltung und Methoden der Toleranzvergabe in der Konstruktion

Die *montagegerechte Produktgestaltung (DfA)* [5] ist eine wesentliche Grundvoraussetzung für einen störungsfreien oder zumindest störungsarmen automatisierten Produktionsablauf [6]. Neben Konstruktionsgrundkenntnissen [86] und spezifischem Erfahrungswissen bedarf es insbesondere detaillierter Kenntnisse über die eingesetzten Produktionsanlagen. Bei der Festlegung der Fügstellen an flächigen Leichtbauteilen sind beispielsweise folgende allgemeine Konstruktionsgrundsätze zu beachten:

- Minimierung der Fügstellenanzahl und -komplexität
- Vereinfachung der Fügstellengeometrie
- einheitliche Fügerichtung
- einfache Fügewege und ggf. Einführschrägen

Daneben sind verfahrens- und systemspezifische Spezialkenntnisse in der Konstruktion erforderlich. In [49] werden Empfehlungen zum *Robotergerichten Konstruieren im PKW-Fahrzeugbau* gegeben. Wenn elementare Gestaltungsregeln nicht beachtet werden, kann dies zu einem starken Anstieg der Störungswahrscheinlichkeit in automatisierten Montagesystemen führen. Der Konstrukteur muss sich bereits während der Konstruktion mit dem Fertigungs- und Montagekonzept identifizieren, damit die hohen Erwartungen an die automatisierte Montage mit Robotern auch erfüllt werden können.

Bei komplexen Montagebaugruppen ist zudem die Verknüpfung und das Zusammenwirken von Einzeltoleranzen zu *Toleranzketten* zu beachten [105]. Dies beinhaltet Form- wie Lagetoleranzen gleichermaßen. In [94] werden neue Methoden zur Tolerierung von deformierbaren Bauteilen beschrieben und in [95] wird ein innovatives Rechnerwerkzeug (aus SFB 336 [92]) für die Tolerierung vorgestellt. Dabei eröffnet die *statistische Tolerierung* insbesondere bei langen Toleranzketten neue Potentiale zur Senkung der Produktionskosten [42]. Auf der anderen Seite nimmt das Risiko von Montagestörungen aufgrund unzulässiger Toleranzsummen in seltenen Extremfällen zu. Für diese Extremfälle sind geeignete Reaktionsstrategien in der Montageablaufsteuerung vorzusehen. Eine Toleranzsimulation kann hier helfen, Fehlerpotentiale frühzeitig zu erkennen. In [59] wird mit *ToVis* eine Softwarelösung zur Visualisierung von Fügeeteil-toleranzen vorgestellt. In der Konstruktion erfolgt zudem die Festlegung der Füge-technologien. So kann in vielen Fällen durch den Einsatz robuster Fügeverfahren, wie beispielsweise dem Stanznieten anstelle des konventionellen Nietens (Blindnieten), die Störanfälligkeit in der Montage reduziert werden.

## 2.4.2 Ansätze in der Arbeitsplanung und Fertigungsvorbereitung

In der Arbeitsvorbereitung (AV) werden die Arbeitspläne mit den jeweils erforderlichen Montagestationen und –zeiten für die einzelnen Baugruppen festgelegt. Dabei erfolgt die Montageablaufplanung unter der Prämisse, dass die Füge­teile den konstruktiv vorgegebenen, nominalen Abmessungen stets entsprechen. Diese Annahme ist in der Montagepraxis nicht immer erfüllt. Die Beherrschung von Abweichungen der Füge­teil­eigenschaften ist wichtig, da sie die Produktivität und Produktqualität entscheidend beeinflussen. In [38] wird die Notwendigkeit von Toleranzbetrachtungen über mehrere Produktionsstufen hinweg erläutert. In [108], [51] wird eine Methode zur Montageplanung mit *toleranzbehafteten Bauteilen* (Q/PS) vorgestellt, die bei der Auswahl einer robusten Anlagenkonfiguration in der Montage hilft, die unempfindlich gegenüber Toleranzabweichungen von Bauteilen und Werkzeugen ist. So kann durch den *Einsatz von Zentrierhilfen* im Greifwerkzeug von Robotern die Stö­r­wahr­scheinlichkeit beim Bauteil­hand­ling gesenkt werden, wie dies am Beispiel der Gestaltung der Greifspinne für das PKW-Türmodul exemplarisch im Kapitel 2.2.3 beschrieben wurde.

Zur *endmontagenahen Fertigung* wird im Rahmen des *SFB/TR10* [23] eine roboter­ge­führte Kinematiklösung vorgestellt, die eine montagenahe Bearbeitung von *Leichtbau­profilen* ermöglicht und so überzählige Umspann- und Ausrichtevorgänge sowie spe­zi­elle Greifwerkzeuge vermeidet.

## 2.4.3 Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung

Die Füge­teile durchlaufen mehrere Fertigungsarbeitsgänge. Dabei kommen unter­schiedliche spanende und umformende Fertigungsverfahren zum Einsatz, die die geo­metrische Gestalt oder die mechanischen Eigenschaften des Bauteils verändern. Durch Qualitätssicherungsmaßnahmen [109] am Ende der einzelnen Fertigungsstufen ist sicherzustellen, dass die Bauteile die in der Konstruktion vorgegebenen Eigen­schaf­ten auch erfüllen. Dies ist eine Basisvoraussetzung damit der Betriebsablauf in der Montage nicht gestört wird. Ziel ist es somit, fehlerfreie Bauteile der Montage bereitzustellen.

*Null-Fehler-Produktion und Six-Sigma:*

Zunächst wird eine Festlegung getroffen, was unter dem Begriff *Fehler* in Abgrenzung zu *Abweichung* und *Störung* zu verstehen ist. Gemäß [115] lassen sich die Begriffe wie folgt definieren: Eine *Abweichung* ist der Unterschied zwischen einem Merkmalswert und einem Bezugswert (DIN 55350-12). Eine *Störung* ist die fehlende, fehlerhafte oder unvollständige Erfüllung einer geforderten Funktion durch eine Einheit (DIN 40041). Ein *Fehler* ist die Nichterfüllung einer Forderung (DIN 55350-11) bzw. eine unzulässige Abweichung eines Merkmals (DIN 40042).

Fehlerhafte Bauteile stören den normalen Betriebsablauf und führen so zu einem Mehraufwand. Dieser Mehraufwand für Nacharbeit, oder im Falle von Ausschussteilen für die Wiederholung des Prozesses bedeutet Zusatzkosten und Zusatzarbeit für die involvierten Mitarbeiter, um Qualität und Liefertermin halten zu können. Wird der Fehlerbegriff andererseits zu eng gefasst, so nimmt die Fehlerrate zu und es entstehen hohe Zusatzkosten zur Fehlervermeidung (Q-Kosten steigen). Aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen heraus sollten Toleranzgrenzen, die einen Fehler definieren, entsprechend den funktionalen und ästhetisch-optischen Anforderungen des Kunden an das Endprodukt sinnvoll gewählt werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um die Kundenanforderungen erfüllen und dabei kostengünstig produzieren zu können.

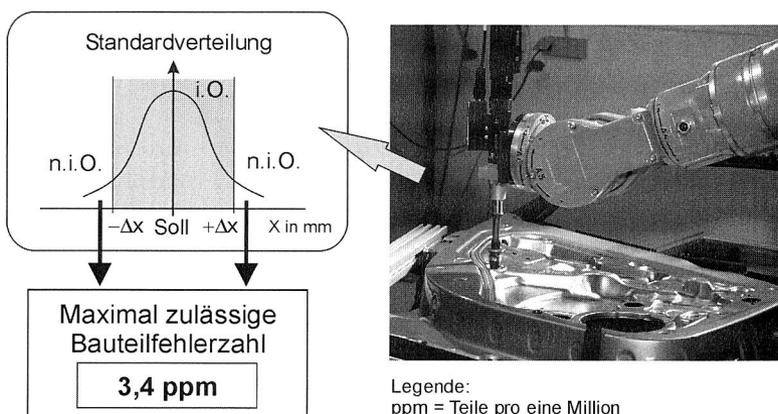


Bild 21: Six-Sigma am Beispiel der Schraubmontage

Synonym zum Begriff Null-Fehler-Produktion wird häufig der Begriff *Six-Sigma* verwendet. Der Begriff wurde Anfang der 80'er Jahre von Motorola während einer Qualitäts-offensive geprägt. Unterliegt ein Prozess der Gaußschen-Normalverteilung, so ist er durch den Mittelwert und die Standardabweichung Sigma eindeutig beschreibbar. Unter bestimmten Rahmenbedingungen befinden sich dann 99,99966% aller Ergebnisse dieses Prozesses in einem Bereich der 6x Sigma umfasst, d.h. bezogen auf 1 Million Ergebnisse entstehen nur 3,4 fehlerhafte Ergebnisse. Man kann dann annähernd von Null-Fehler-Produktion sprechen (Bild 21). Die Fehlervermeidung in der gesamten Prozesskette bis hin zur Inbetriebnahme des Produktes besitzt eine hohe Priorität. Ein wichtiges Hilfsmittel zur Prozessüberwachung in der Fertigung ist SPC.

#### Statistische Prozesskontrolle (SPC):

Schwankungen im Fertigungsprozess müssen frühzeitig erkannt werden, um korrigierend eingreifen zu können. Voraussetzung hierfür ist die fortlaufende Erfassung von

Messdaten über montagerelevante Bauteileigenschaften. Hierfür kann die (SPC) eingesetzt werden. Über Qualitätsregelkarten wird dabei das statistische Verhalten von Fertigungsprozessen beschrieben. Diese Karten geben Hinweise auf Prozessstörungen infolge systematischer Einflüsse und ermöglichen den Aufbau von Qualitätsregelkreisen zur optimalen Prozessführung in der Fertigung. Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung sowie unterschiedliche Regelkartentypen werden u.a. in [88] erläutert.

Auch wenn Eingriffsgrenzen nicht überschritten werden, so kann es für die nachfolgende Montage von großem Interesse sein, festzustellen, in welchem Toleranzbereich die Merkmalswerte der gefertigten Füge­teil­chargen gelegen haben. So besteht die Möglichkeit, dass montagerelevante Werte im Mittel bereits nahe an einer der Eingriffsgrenzen lagen. Hier kann es ratsam sein, im letzten Arbeitsschritt Montageparameter entsprechend anzupassen. Zudem interessiert die Streubreite der montagerelevanten Merkmalswerte innerhalb von Lieferchargen. Daraus lässt sich grob das Störpotential der einzelnen Teilechargen abschätzen, da hohe Schwankungsbreiten Anlagenstörungen prinzipiell begünstigen. Kritische Bauteilchargen sollten beispielsweise nicht in einer mannos­ten dritten Schicht verarbeitet werden. Mit diesen Informationen lassen sich so in der Montage bereits Optimierungen in Bezug auf die Verarbeitungsreihenfolge von Teilechargen durchführen.

Bei der Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Fertigungstoleranzen und Montageprozessen ist die Fragestellung, ob und in welchem Rahmen potentielle Fertigungsfehler durch Adaption der Montageprozesse ausgeglichen werden können, von besonderer Bedeutung. Hierzu können die in Kap. 2.2 erläuterten Verfahren der Statistischen Versuchsplanung eingesetzt werden.

### **2.4.4 Einsatz von Messverfahren und Regelungskonzepten in der Montage**

Die automatisierte Montage flächiger Leichtbauteile stellt hohe Anforderungen an die Positionier- und Maßgenauigkeit der einzelnen Fügeteile und an die Flexibilität des Montagesystems. Grundsätzlich ist das Auftreten von Prozessstörungen in der Montage infolge von Füge­teil­ab­weichungen abhängig von:

- der konstruktiven Auslegung des Bauteils im Bereich der Füge­stellen (z.B. Einführschrägen bei der Bolzen-Loch-Problematik, siehe Kap. 2.4.1),
- der adaptiven Fähigkeit der Systemelemente um selbständig Fehler auszugleichen (z.B. kom­pliante Greiferauslegung) und
- dem Sensoreinsatz im Montagesystem zur Toleranzerkennung und Parameteranpassung (z.B. Bildverarbeitungssysteme, intelligente Schraubsysteme).

Grundvoraussetzung für eine hohe Anlagenverfügbarkeit sind heutzutage geringe fertigungsbedingte Bauteiltoleranzen und ein hoher technischer Aufwand für Spannsysteme in der Montage. Zur Reduzierung dieses Aufwands können Fügehilfen eingesetzt werden. Nachfolgend werden Hilfsmittel für den *geometrischen Toleranzausgleich* mit dem Einsatzschwerpunkt in der *automatisierten Fahrzeugmontage* dargestellt. Diese Lösungen lassen sich online in den Produktionsprozess integrieren.

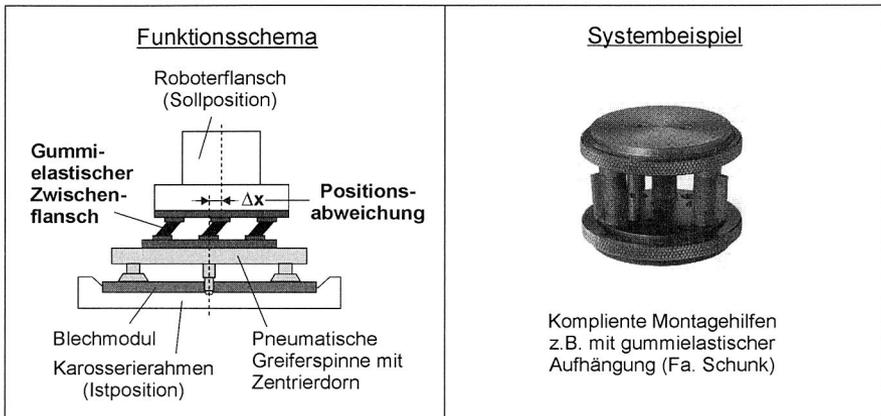


Bild 22: Passive Fügehilfen zur Kompensation von Fügeittoleranzen in der Montage

Zur Steigerung der Systemrobustheit von hochautomatisierten Montageanlagen können *passive Fügehilfen* verwendet werden. Sie stellen eine relativ kostengünstige, mechanische Lösung zum Ausgleich von Positionstoleranzen dar [50]. Die elastische Montagehilfe (Bild 22) wird zwischen dem Roboterflansch und dem Greifer bzw. der Greiferpinne montiert und gleicht einen Positionsversatz  $\Delta x$  zwischen den Fügepartnern Blechmodule und Karosserierahmen aus, indem die gummielastische Aufhängung die Querkräfte aufnimmt und nachgibt. Voraussetzung für eine zuverlässige Funktion sind geeignete Einführschrägen an den Bauteilen. In der rechten Hälfte von Bild 22 ist eine derartige komplette Montagehilfe zum Anschrauben an den Roboterflansch zu sehen.

Daneben existieren zahlreiche *aktive Fügehilfen* in Form von Sensorsystemen zur Vermessung der *Bauteillage* sowie zur Korrektur der Werkzeug- bzw. Greiferpositionierung (Bild 23). Diese elektronischen Regelkreise sind mit einem deutlich höheren Kostenaufwand verbunden als mechanische Lösungen, da sie steuerungstechnisch aufwendiger sind. Mittels Kameras oder Lasersensoren wird die tatsächliche Istposition der Fügestelle vermessen und ein Korrekturwert für die Roboterposition berechnet. Der programmierten Sollposition des Handlingsroboters wird in Echtzeit der Korrekturwert überlagert. Für *Visionssysteme* sind hierfür konstante Beleuchtungsverhältnisse erforderlich.

Kostenintensiver sind *Lasermesssysteme*, mit denen komplexe Bauteile wie Fahrzeugkarossen oder Anbauteile wie Klappen (Türen, Motorhaube) [96] dreidimensional exakt vermessen und montiert werden können. In der rechten, unteren Hälfte von Bild 23 ist exemplarisch ein Messsystem zum roboterbasierten Einkleben der Frontscheibe in eine PKW-Karosserie abgebildet. Die Endmontage der Front- und Heckscheibe des Audi A3 erfolgt hiermit in einer Prozesszeit von nur 88 Sekunden [71].

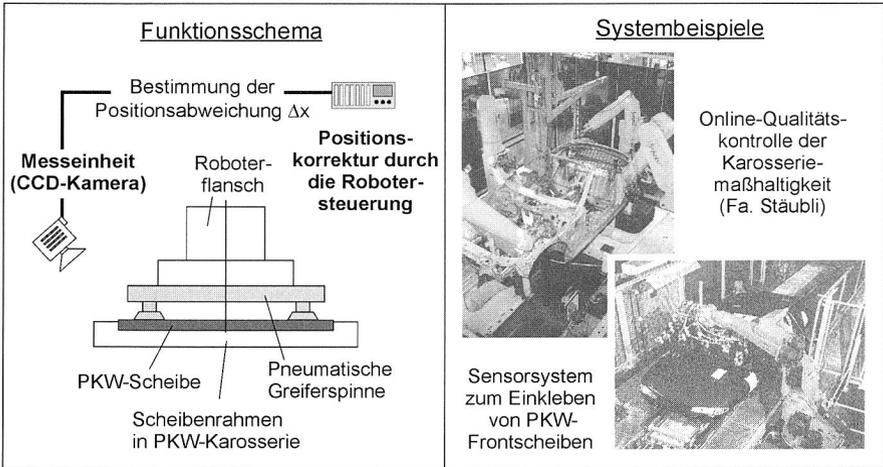


Bild 23: Aktive Fügehilfen zur Kompensation von Fügepartitoleranzen in der Montage

In [40], [4] wird ein verteiltes Multisensorsystem zur Fehlererkennung und –korrektur beschrieben, das in [9] speziell für große Werkstücke ausgelegt ist. In [122] wird eine stationäre, sensorbasierte Lösung zur Formkorrektur und Lageführung von Aktuatoren für die *Großbauteilmontage in der Flugzeugindustrie* vorgestellt, um den Vorrichtungs-aufwand zu reduzieren. Eine weitere Alternative zur Vermessung großer Bauteile besteht darin, direkt am Roboterarm eine „Eye-in-Hand“ Kamera für die Werkstückposi-tionsbestimmung anzubringen. Dies erfolgt in [112] für das roboterbasierte Punktschwei-ßen, wobei von einer geringen Genauigkeitsanforderung (Annahme 1mm) ausgegan-gen wird. Ein wesentlich genaueres System das mittels Streifenprojektor und Bildverar-beitung kontinuierlich ein dreidimensionales Abbild des Bauteils erzeugt, wird in [89] beschrieben. Die räumliche Lage des Fügeteils und die Roboterpositionierung werden über ein neuronales Netzwerk in Bezug gesetzt, was eine hochgenaue Positionierung ermöglicht. In [54] wird ein Lösungsansatz zur gleichzeitigen, optimalen Positionierung mehrerer Fügestellen eines Bauteils erläutert. Zunehmend kommen Standard-Industrieroboter auch im Bereich der montagebegleitenden *Qualitätskontrolle* zum Ein-satz. Messroboter sind dort prädestiniert, wo Standardmessmittel nicht eingesetzt wer-

den können. Einsatzbeispiele für den Inline-Einsatz sind Karosserie- bzw. Bauteilvermessungen mit einem speziellen Sensorkopf [53] sowie die automatisierte Prüfung von Spaltmaßen an Fahrzeugen [123].

Aber nicht nur Handhabungsprozesse, sondern auch die *Fügetechnologien* stellen hohe Anforderungen an die Fügequalität. In [8] wird eine Methode vorgestellt, die eine Versagensdiagnose von Befestigungselementen in der Blechteilmontage ermöglicht. Zur Überwachung von Fügeprozessen kommen zunehmend leistungsfähige, komplexe Sensorsysteme zum Einsatz, die neben Parametern wie Kräfte, Momente, Temperatur, Druck auch Schwingungen oder Schallemissionen während des Prozessablaufs erfassen können. In [27] wird eine Kraftregelung beim roboterbasierten Fügen beschrieben.

Nachfolgend werden exemplarisch der Einsatz eines Bildverarbeitungssystems sowie innovative Entwicklungen auf dem Gebiet der Schraubprozessüberwachung erörtert.

#### *Beispielhafte Realisierung eines 2D-Bildverarbeitungssystems in einer Roboterzelle zum Ausgleich geometrischer Toleranzen bei der PKW-Türmontage*

Die labile Struktur flächiger Leichtbauteile führt sowohl zu Werkstückgeometrieschwankungen durch Fertigungstoleranzen als auch zu Positionierabweichungen in der Montage. Andererseits ergeben sich für flächenhafte Bauteile aufgrund ihrer hohen Elastizität und Verformbarkeit gute Voraussetzungen für einen möglichen automatischen Toleranzausgleich. Es wurden automatische Reaktionsstrategien entwickelt, welche die geometrischen Differenzen in den Fügeteilen fehlertolerant kompensieren.

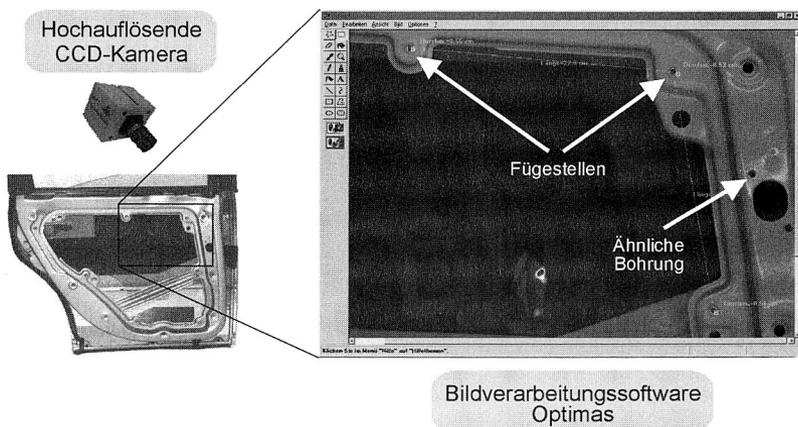


Bild 24: Bildverarbeitungssystem zur Erkennung und Lokalisierung montage-relevanter Fügestellen am Beispiel einer PKW-Türkarosse

Das Sensorsystem (Bild 24) auf Basis von hochauflösenden CCD-Kameras wird zur Detektion von Maß- sowie Lageabweichungen an flächigen Leichtbauteilen eingesetzt. Die Vermessung von Fügestellen und die Unterscheidung von ähnlichen Bohrungen in unmittelbarer Nähe stellt eine besondere Herausforderung an die Systemprogrammierung dar. In Kapitel 6 wird die Implementierung des Meßsystems beschrieben. Eine Erhöhung der Systemrobustheit lässt sich zudem mittels dynamischer Nachführung von Fügeprozessparametern bei signifikanten Änderungen der *mechanischen und geometrischen Füge Teileigenschaften* erzielen. Voraussetzung hierfür sind adaptive Steuerungskonzepte.

### *Steuerungstechnische Lösungsansätze für die robuste Gestaltung von Fügeprozessen am Beispiel der Schraubtechnik*

Für das Fügeverfahren *Verschrauben* besteht die Zielgröße im Erreichen einer definierten Vorspannkraft in der Schraubverbindung. Leider lässt sich diese Größe nur sehr schwer direkt messen. Daher kommen heute noch überwiegend drehmomentgesteuerte Schraubspindeln zum Einsatz, die die Vorspannkraft nur indirekt messen. Ein wesentlicher Nachteil besteht darin, dass auch bei der Annahme konstanter Abschalt-drehmomente aufgrund von stark variierenden Reibwerten große Schwankungen in der Zielgröße auftreten können. Intensive Forschungsarbeiten führten zur Entwicklung von klemmkraftgesteuerten Schraubverfahren wie Ultrafast, die Integration von Dehnmessstreifen in die Schraube oder das AMT-Verfahren. Diese konnten bislang leider nicht gleichermaßen ökonomisch und technologisch überzeugen. Einen neueren Ansatz bietet das Sonofast-Schraubverfahren (Firma Weber) [75], [43] das bereits in der Automobilindustrie im Serieneinsatz ist. Der Schrauber ermittelt dabei während des Anziehvorgangs die akustische Emission (AE) des Schraubenwerkstoffs. Das signaltechnisch aufbereitete AE-Signal kann zur Steuerung des Schraubvorgangs verwendet werden, da es mit der Klemmkraft stark korreliert. Hierdurch ist auch bei Streuungen des Reibwertes, des Anziehdrehmomentes oder der Schraubenqualität ein wiederholgenaues Erreichen der Klemmkraft gewährleistet. Für die Konstruktion ergibt sich daraus der Vorteil, daß die Schraube in ihren Materialeigenschaften besser ausgenutzt und die Schraubverbindungen nicht mehr überdimensioniert werden müssen. Dies führt zu einer Kosten- und Bauraumreduzierung von Schraubverbindungen.

Das Beispiel zur Schraubtechnik zeigt, dass bereits durch die Auswahl des Schraubsystems und der darin integrierten Sensorik und Steuerungstechnik ein starker Einfluss auf die robuste Gestaltung von Montage- bzw. Fügeprozessen genommen werden kann. So wirken sich Störgrößen wie Reibwertschwankungen beim klemmkraftgesteuerten Verschrauben (z.B. Sonofast) nicht auf die Zielgröße Vorspannkraft aus, da die Steuer-

größe Anziedrehmoment solange adaptiv nachgeführt wird, bis die Zielgröße erreicht ist. Damit lassen sich beispielsweise kostengünstigere Schrauben mit stärkeren Streuungen in den Reibwerten einsetzen. Dem Anwendungsbereich des klemmkraftgesteuerten Verfahrens *sonofast* sind jedoch verfahrensbedingt Grenzen gesetzt. Die Schraube emittiert erst ab einer bestimmten Dehnung eine steuerungstechnisch verwertbare akustische Emission. Obwohl die Zielgröße auch im elastischen Bereich liegen kann, steigt die Zielwertreproduzierbarkeit mit dem Erreichen des plastischen Bereiches (Lüdersdehnung). Dies bedeutet, dass für dieses Verfahren relativ hohe Vorspannkraften (Anzugsmomente) vorhanden sein müssen, wie sie beispielsweise bei sicherheitsrelevanten, metrischen Achverschraubungen im Automobilbau anzutreffen sind. Für einfache Schraubfälle mit vergleichsweise kleinen metrischen Schrauben und geringen Vorspannkraften konnte sich dieses Verfahren aufgrund oben genannter Gründe bislang nicht durchsetzen. Dies gilt auch für nicht metrische Schrauben wie sie beim Direktverschrauben in Kunststoff- oder Blechbauteile eingesetzt werden.

Die Beispiele zur konventionellen proaktiven Verfügbarkeitssicherung haben gezeigt, dass durch eine intelligente Steuerungstechnik partiell geometrische und technologische Prozessparameter zur Störungsvermeidung adaptiert werden können. Darüber hinaus existieren anlagenübergreifende Lösungsansätze. So treten Montagestörungen insbesondere in der *Anlaufphase* neuer Produkte auf [24], [46]. In [55] wird eine kontinuierliche Diagnosemethode vorgestellt, die auf sog. „Rough Sets“ basiert. Durch selbstlernende Neuronale Netze kann so eine Reduktion von Montagestörungen bei Neuanläufen erreicht werden.

## 2.5 Reaktive Verfügbarkeitssicherung

Reaktive Maßnahmen bei Montageprozessstörungen dienen dem schnellen Wiederanlauf und sollen zugleich künftige Störungen vermeiden helfen. Hierdurch können unproduktive Stillstandszeiten reduziert werden. Zunächst ist durch den Werker an der Montageanlage die Störungsursache und damit Verantwortlichkeit für die Montageunterbrechung zu klären. Entsprechend dem Analyseergebnis sind geeignete Gegenmaßnahmen in der Konstruktion, Vorfertigung oder Montage einzuleiten.

### 2.5.1 Reaktionsstrategien bei konstruktionsbedingten Fehlern

Wird als Fehlerursache ein Konstruktionsfehler des zu fertigenden Produkts oder einer seiner Einzelteile festgestellt, so sind zeitnah Kommunikationsprozesse mit den verantwortlichen Konstrukteuren auszulösen. Diskussionsgrundlage bilden dabei die techni-

schen Zeichnungen und Stücklisten. Typische Fehler in diesem Bereich sind Zeichnungsfehler oder ungeeignete Toleranzvorgaben.

Die Behebung konstruktionsbedingter Bauteilfehler zieht sich mitunter über mehrere Tage oder Wochen hin, da neben den Zeichnungen häufig auch Fertigungsprozesse und Werkzeuge anzupassen sind. Im günstigsten Fall können die bereits produzierten Fügebauteile kurzfristig nachgearbeitet und die Montage fortgesetzt werden.

Diese Gefahr ist verstärkt bei Neukonstruktionen oder Änderungskonstruktionen in der Anlaufphase gegeben. Im Dialog zwischen Montage, Konstruktion und Arbeitsplanung lassen sich Konstruktionsvorgaben im Sinne einer montagegerechten Konstruktion korrigieren und so Fehler zukünftig vermeiden.

### **2.5.2 Reaktionsstrategien bei fertigungsbedingten Störungen**

Den ersten Schritt bildet die Fehlererkennung. Ein fertigungsbedingter *geometrischer Bauteilfehler* lässt sich rasch durch den Abgleich der Maßangaben in Konstruktionszeichnungen mit den realen Bauteilabmessungen erkennen, während *stoffliche Bauteilfehler* oft nur aufwendig durch Laboruntersuchungen zu erkennen sind. Weiterhin ist zu prüfen, ob die Bauteilfehler fertigungs- oder transportbedingt aufgetreten sind. Wird ein eindeutiger Fertigungsfehler festgestellt, so ist unverzüglicher Fertigungsstopp der betroffenen Bauteile und eine zeitnahe Überprüfung der eingesetzten Fertigungsprozesse auszulösen. Die Fehlerursachen wie Werkzeugverschleiß sind zu eliminieren. Zudem ist ggf. eine mögliche Nacharbeit der betroffenen Fügebauteile zu prüfen.

Die Diskussionsgrundlage zur Fehlerlokalisierung und –behebung in diesem Bereich bilden technische Zeichnungen und Messprotokolle. Eine weitere Hilfestellung können Produktionsprozessdaten oder Qualitätsregelkarten zu den gelieferten Fügebauteilchargen bieten. Im Rahmen der Traceability von Fehlern wird zunehmend die Speicherung von Fertigungsprozessdaten durchgeführt, was die Fehlerlokalisierung erleichtert.

### **2.5.3 Diagnose von Produktionsstörungen in der Montage**

Montagefehler lassen sich durch eine *montagesystemintegrierte Qualitätskontrolle*, wie beispielsweise elektronische Kontrollsysteme zur Vollständigkeitsprüfung oder Messsysteme zur Geometrievermessung des Endproduktes erkennen. Eine mögliche Reaktion auf das Prüfergebnis kann die Anpassung der Montageprozessparameter durch den Werker sein. Zudem ist die Fehlerursache zu ermitteln. Liegt nach Prüfung des elektronischen Fehlerspeichers kein offensichtlicher Systemfehler vor, so können Montageprozessstörungen auch durch *Verschleiß* und eine hierdurch bedingte Verschlechterung der Positioniergenauigkeit der Roboterachsen bedingt sein. Hierfür existieren spezielle Messwerkzeuge und -abläufe seitens der Roboterhersteller. Eine weitere Stö-

rungsursache können Veränderungen in den Produktionsrahmenbedingungen, wie starke *Temperaturschwankungen* oder bei Messsystemen mit CCD-Kameras *stark wechselnde Lichtverhältnisse* sein.

Gestaltet sich die Fehlersuche aufwendiger, so bieten heute nahezu alle namhaften Montageanlagenhersteller einen leistungsfähigen *Diagnoseservice* für die schnelle Analyse und Behebung von Montageanlagenstörungen an. Häufig werden rechnerbasierte Telediagnoseinstrumente eingesetzt, die den Anlagenbetreiber bei der Fehlersuche und –behebung unterstützen [37]. Als Informationsbasis für die Fehlersuche dienen umfangreiche Fehler-Datenbanken in denen bekannte Fehlerdaten und –zusammenhänge hinterlegt werden. Auf dieser Basis wurde im Rahmen des *SFB 384* „Verfügbarkeitssicherung reaktionsschneller Produktionssysteme“ ein Konzept zur modellbasierten Verfügbarkeitssicherung von komplexen Montageanlagen entwickelt, das auch das Bedienpersonal einbezieht [81]. Zur weltweiten Störungsdiagnose und -beseitigung bei Kundenanlagen hat sich die Steuerungsanbindung und Ferndiagnose direkt über eine Telefon- oder Internetverbindung durchgesetzt [66]. Zu diesem Zweck wurde u.a. am Lehrstuhl FAPS ein Instrument zur Telediagnose via Internet entwickelt [25]. Voraussetzung hierfür ist ein Modem oder eine Vernetzung der Montageanlage mit dem Internet. So können Roboterhersteller direkt auf die Steuerungsebene zugreifen und Fehlerprotokolle sowie Betriebsdaten abfragen. Zusätzlich besteht fakultativ die Möglichkeit, multimediale Unterstützung in Form von digitalen Bildern oder Videostreams einzusetzen. So lassen sich schnell und kompetent anlagenbedingte Fehlfunktionen erkennen und beheben.

Diskussionsgrundlage zur Klärung anlagenbedingter oder umfeldbedingter Montagefehler bilden Messprotokolle und Produktionsprozessdaten. Fehlerhafte Montageteile können ggf. nachgearbeitet werden. Aus den Diagnoseergebnissen lassen sich neben den Aktionen zur Fehlerbeseitigung auch Maßnahmen zur proaktiven Fehlervermeidung in der Zukunft ableiten (siehe Kap. 2.4).

## 2.6 Bewertung und Defizite

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass in nahezu allen Unternehmensbereichen von der Konstruktion über die Arbeitsvorbereitung/Fertigung bis hin zur Montage/ Qualitätskontrolle eine Vielzahl von partiell wirksamen Ansätzen existieren, um Fehler zu vermeiden und damit eine hohe Verfügbarkeit von Montageanlagen zu erreichen.

In den montagevorgelagerten Bereichen *Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung* basieren die diskutierten konventionellen Ansätze primär auf traditionellen Vorgehensweisen des Informationsaustausches, wie der Face-to-Face Kommunikation zwischen den Beteiligten oder dem Einsatz von Email oder Intranet/ Internet. Die moderne rechnerbasierte Informationstechnologie verfügt heute über weitergehende Möglichkeiten, um Informationen und Wissen in multimedialen Datenbanken und Assistenzsystemen übersichtlich und anschaulich bereitzustellen. Zudem werden Fertigungsprozessinformationen zu Fügeteilchargen nur partiell an nachfolgende Montagestationen weitergegeben. Es fehlt ein umfassendes Framework für den koordinierten netz- und datenbankbasierten Austausch von montagerelevanten Bauteildaten und Prozesswissen von der Konstruktion bis zur automatisierten Montagezelle.

Im *Montagebereich* existiert eine breite Palette von sensorbasierten Regelungssystemen wie beispielsweise Robot-Vision, um Bauteil- und Lagetoleranzen zu messen und Positionskordinaten anzupassen. Den konventionellen technischen Lösungen zum Toleranzausgleich ist gemeinsam, dass die Anpassung *geometrischer* Prozessparameter wie der Werkzeug- oder Werkstückpositionierung im Mittelpunkt steht. Die Nachführung *technologischer* Prozessparameter wie Einpresskräfte oder Anziehungsmoment während des Fügeprozesses in Abhängigkeit von Fügeteileigenschaften ist nicht vorgesehen. Bei den bekannten Lösungen, wie beispielsweise bei der klemmkraftgesteuerten Verschraubung (Kap. 2.4.4), handelt es sich zumeist um problemspezifische Sonderlösungen einzelner Anlagenhersteller, die nicht auf andere Montagesysteme oder Füge-technologien übertragbar sind. Es mangelt somit an universellen Konzepten und Lösungsansätzen für die automatisierte Montagetechnik, die eine adaptive Nachführung von Montageparametern und Prozessfenster an die ermittelten Fügeteileigenschaften ermöglichen. Konventionelle Ablaufsteuerungen (SPSen) sehen keine Möglichkeit zur datentechnischen Anbindung an eine Montagedatenbank mit integriertem Prozesswissen vor. Die übergeordnete Zellensteuerung muss dahingehend erweitert werden, dass prozess- und anlagenspezifisches Erfahrungswissen zur Montageprozessadaption formalisiert hinterlegt werden kann.

### 3 Holistischer Ansatz zur Schaffung robuster Prozessketten in der automatisierten Montage

Aufgrund der im vorherigen Kapitel erläuterten Defizite konventioneller Ansätze zur Verfügbarkeitssicherung in der Montage wird nachfolgend ein Lösungskonzept entwickelt, das eine ganzheitliche Sichtweise auf Basis der rechnerbasierten Verkettung von Konstruktion, Fertigung bis hin zur Montage verfolgt. Ziel ist die Erreichung *robuster Prozessketten*, was am Beispiel der Montage flächiger Leichtbauteile verifiziert wird.

#### 3.1 Begriffsdefinition zu robusten Prozessketten

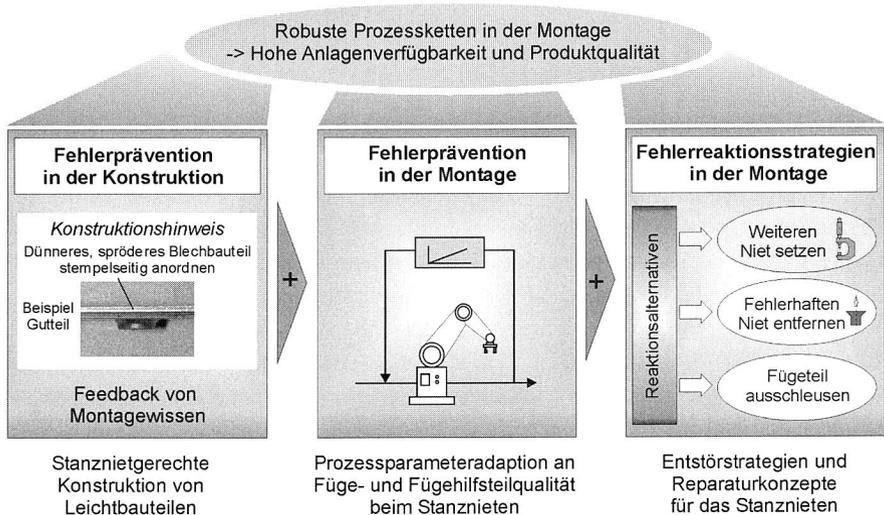
Ein System wird nachfolgend als *robust* bezeichnet, wenn es innerhalb definierter Grenzen *unempfindlich gegenüber Schwankungen in den Prozesseinflussgrößen reagiert*. Robustheit wird somit als Synonym für *Störungsunempfindlichkeit* verwendet. Hierbei werden sowohl umweltbedingte Störgrößen wie Temperaturschwankungen einbezogen, als auch Toleranzen in den Fügeteilmerkmalen (vgl. Kap. 2.2). Ob ein Werkstückfehler vorliegt oder lediglich eine zulässige Abweichung vom Idealwert (Toleranzschwankung), ist stark von den konstruktiven Vorgaben abhängig. Werkstückfehler (vgl. Kap. 2.4.3) sind dabei unzulässige Abweichungen von der konstruktiv vorgegebenen geometrischen und werkstofflichen Bauteilgestalt. Bei der Vorgabe von sehr engen Toleranzfenstern seitens des Konstrukteurs zur Sicherstellung der Produktfunktion steigt zwangsläufig die Fehlergefahr und damit der Fertigungsaufwand bzw. die Prüfkosten.

Anhand des in *Bild 16* vorgestellten *Beispiels des PKW-Türmoduls* kann dieser Sachverhalt exemplarisch verdeutlicht werden. An das Trägerblech des Türmoduls werden aktuell sehr hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit gestellt, da eine Vielzahl von Einzelkomponenten wie Fensterhebermechanismus, Türschloss, Lautsprecher, Türverkleidung zu montieren sind. Während die exakte Position für den Fensterheber funktionsentscheidend ist, gilt dies für den Lautsprecher nicht in gleichem Maße. Durch die Adaption von Schraubparametern bei der Lautsprechermontage können beispielsweise Geometrieschwankungen im Trägerblech ausgeglichen werden.

Zur Kostenreduktion in der gesamten Herstellungsprozesskette müssen die festgelegten Bauteiltoleranzen geprüft, funktionspezifisch neu definiert und so die Toleranzgrenzen systematisch auf ein Maximum aufgeweitet werden. Auf die *Montage* übertragen bedeutet dies, dass Lösungsstrategien zu entwickeln sind, wonach Montagesysteme unempfindlich auf montagerelevante Störgrößen wie Fügeteiltoleranzen reagieren. Unter einer *Robusten Prozesskette* wird nachfolgend eine, auf eine Zielgröße eingestellte Prozesskette verstanden, die unempfindlich gegenüber Störgrößen (z.B. Bauteiltoleranzen) und Schwankungen in den Prozesseinstellgrößen reagiert.

### 3.2 Teilaspekte des hierarchisch adaptiven Steuerungskonzeptes

Das *Bild 25* gibt einen Überblick über die wesentlichen Teilaspekte der entwickelten Maßnahmenkette zur *fehlertoleranten Montage*. Die Begriffe *fehlertolerante*, *robuste* und *adaptive Montage* werden nachfolgend synonym verwendet. Konventionelle Maßnahmen (siehe Kapitel 2) werden dabei um innovative Ansätze erweitert. Nachfolgend werden die neu entwickelten Lösungsansätze dargestellt.



*Bild 25: Maßnahmenkette zur fehlertoleranten Montage*

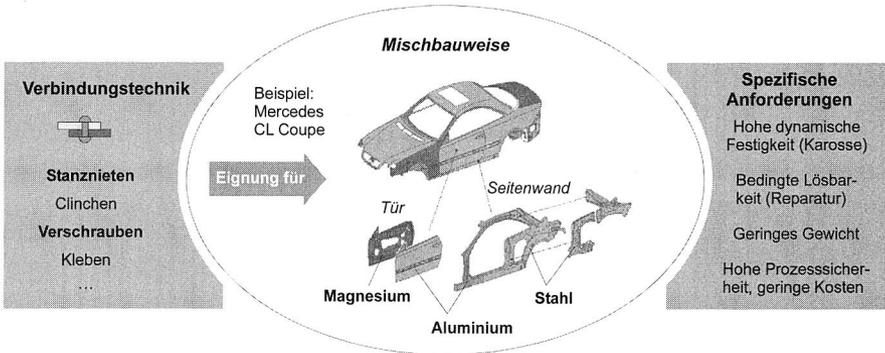
Der holistische Ansatz beinhaltet maschineninterne und montageübergreifende Regelkreise zur Verfügbarkeitssteigerung von automatisierten Montagesystemen sowie zur Aufweitung der Toleranzfenster in den montagevorgelagerten Fertigungsbereichen bei funktionsunkritischen Toleranzvorgaben. Am Fügeprozess Stanznieten wird in *Bild 25* exemplarisch verdeutlicht, wie durch das Zusammenwirken von Maßnahmen der Fehlerprävention in der Konstruktion und in der Montage sowie durch vordefinierte Reaktionsstrategien in roboterbasierten Montagezellen robuste Prozessketten für flächige Leichtbauteile erzielt werden können.

Die *Fehlerprävention in der Konstruktion* umfasst dabei ein rechnerbasiertes Kommunikations- und Wissenstool, das zudem Informationen zur zulässigen Aufweitung von Toleranzen enthält. Die *Fehlerprävention in der Montage* enthält Systemlösungen zur automatischen Adaption technischer Prozessparameter in Abhängigkeit von Bauteilmerkmalswerten. Trotz erweiterter zulässiger Toleranzfenster bei Bauteilmerkmalen wie der Fügestellengeometrie, werden aufgrund der adaptiven Steuerstrategien durch die feh-

lertolerante Auslegung der automatisierten Montageprozesse zuverlässige Montageoperationen gewährleistet. Die Umsetzung erfolgt in Analogie zur manuellen Montage, wo bereits heute eine Anpassung der Fügeparameter wie Positionierung und Einschraubmoment an die Fügequalität durch den Werker erfolgt, der über umfangreiches Erfahrungswissen hierzu verfügt. Durch das Zusammenwirken der systeminternen Steuerungslösungen und der bereichsübergreifenden Informationssysteme wird sowohl die Anlagenverfügbarkeit in der Montage, als auch die gesamte Wertschöpfungskette und die Produktqualität verbessert [18]. Zudem sind Fehlerreaktionsstrategien mit automatischen Entstörstrategien im Anlagenstörfall enthalten. Der Ansatz wurde anhand der Beispielprozesskette PKW-Türmontage (*Bild 16*) verifiziert. Die Datenbasis zur Prozessparameteradaption bilden nachfolgende Untersuchungen.

### 3.3 Prozessuntersuchungen zu wärmearmen, mechanischen Fügeverfahren

Für Kunden spielt neben der Optik und Funktionalität eines PKWs zunehmend dessen Wirtschaftlichkeit im Betrieb und die ökologische Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang gewinnt der Einsatz neuer, leichtbauender Materialien zunehmend an Bedeutung (siehe Kap 2.1).



*Bild 26: Anforderungen an moderne Verbindungstechniken am Beispiel des Mercedes CL (C215)*

Der zunehmende Einsatz der Hybridbauweise stellt neue Anforderungen an die Verbindungstechnik (Bild 26) und führt zu einem zunehmenden Einsatz wärmeärmer, mechanischer Fügeverfahren wie beispielsweise dem Stanznieten, Clinchen, Kleben sowie zu einer Renaissance der Schraubtechnik. Nachfolgend werden als *unlösbare Verbindungen*

ungstechnik das Stanznieten mit Halbhohlriet und als lösbare Verbindungstechnik das automatisierte Direktverschrauben in Blech hinsichtlich ihrer Robustheit analysiert.

### Stanznieten mit Halbhohlriet

Im Karosseriebau mit Leichtbauwerkstoffen wie Aluminiumblech tritt das Stanznieten in Konkurrenz zum Punktschweißen und verdrängt dieses. Beim Stanznieten (Bild 27) wird das Hilfsfügeteil Halbhohlriet mit einem Nietstempel geräuscharm und emissionsfrei in die beiden Fügeteile gedrückt. Die Matrize sorgt dafür, dass sich der Nietfuß aufspreizt und nicht das matrizenseitige Fügeteil durchstanzt. Als Einsatzvoraussetzung für dieses Verfahren gilt eine ausreichende Duktilität des matrizenseitigen Fügeteilwerkstoffs. Aufgrund der Tatsache, dass der Stanzniet selbst die Lochung des oberen Fügeteils vornimmt, entfallen Prozessschritte wie das Vorlochen beim konventionellen Nieten [31]. Infolge der verkürzten Prozesskette werden Störpotentiale eliminiert. Beim Stanznieten entsteht eine form- und kraftschlüssige sowie dichte Verbindung [106]. Die hohe dynamische Scherzugfestigkeit von Stanznietverbindungen wurde bereits in [29], [33] nachgewiesen. Das Stanznieten wird bereits seit mehreren Jahren im Karosseriebau bei der Serienfertigung des *Audi A8 und A2* eingesetzt. So verfügt der Audi A8 (D3) über 2.400 Stanznietpunkte und der A2 (W10) über 1.800 Stanznietpunkte [70]. In einigen Fahrzeugen, wie dem 3L-Lupo von Volkswagen wird partieller Leichtbau betrieben, indem Hang-on-Parts wie Türen aus stanzgenietetem Aluminiumblech gefertigt werden.

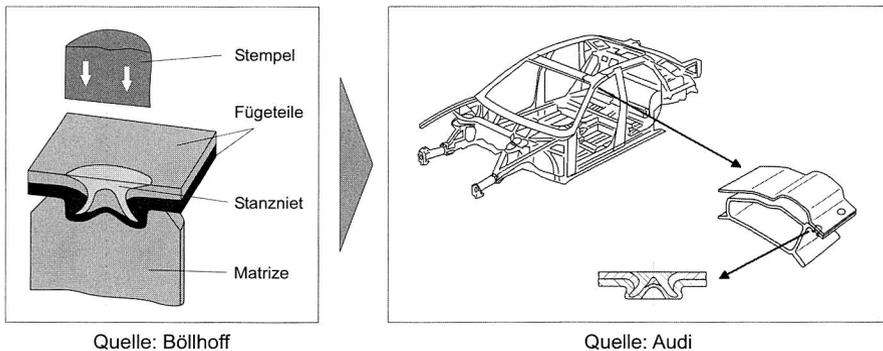


Bild 27: Der Stanznietprozess und Anwendungsbeispiel Karosseriebau

Beim Stanznieten ist als Hilfsfügeteil ein Stanzniet erforderlich, der über ein Grutband bereitgestellt oder über einen Profilschlauch mit Druckluft der Setzeinheit zugeschossen werden kann. Damit bestehen im Vergleich zum Punktschweißen zusätzliche Störpotentiale bei der Nietbereitstellung. Weitere Störungsursachen können sich durch geometrische und werkstoffliche Toleranzen in der Nietbeschaffenheit ergeben. Am Markt

werden hydraulische oder elektrische Stanznietsystem mit oder ohne elektronischer Prozessdatenerfassung angeboten.

#### *Verschrauben metrischer Schrauben und Direktverschrauben*

Für den Automobilbau bietet die *Schraubtechnik* eine breite Palette von unterschiedlichen Verschraubungstypen und Schraubsystemen [72]. Die *Schraubsysteme* unterscheiden sich zum einen hinsichtlich ihres Antriebs in pneumatische, hydraulische und elektrische Schrauber, zum anderen hinsichtlich des Automatisierungsgrades in manuelle Schrauber und automatisierte Schraubspindeln. In der Automobilindustrie muss, insbesondere für sicherheitsrelevante Verschraubungen wie der Lenkung, der Schraubprozessverlauf für jede Verschraubung lückenlos dokumentiert werden. Bei manuell geführten Schraubern stellt die Sorgfalt des Werkers ein Restrisiko bezüglich der Verschraubungsqualität dar [73]. Für die nachfolgenden Schraubversuche kommt eine robotergeführte Elektroschraubspindel zum Einsatz, die eine automatische, elektronische Dokumentation der Schraubverlaufsdaten ermöglicht. Sie eignet sich für die Ausführung der beiden Schraubtypen Metrische Verschraubungen und Direktverschraubung.

Wichtige *Verschraubungstypen* im Automobilbau sind metrische Verschraubungen und Direktverschraubungen (Bild 28). *Metrische Schraubverbindungen* werden häufig dort eingesetzt, wo Verbindungen häufig lösbar ausgeführt sein müssen. Weiterhin besitzen sie den Vorteil einer hohen Verbindungsfestigkeit um hohe Kräfte zu übertragen. Ein typischer Einsatzfall sind Achsverraubungen und die Befestigung von Sitzen an der Fahrzeugkarosserie. In der Beispielprozesskette erfolgt die Befestigung des Türmoduls in der Türkarosse mittels metrischer Schrauben. Nachteilig ist, dass mehrere Arbeitsgänge zur Einbringung von Einstanzmuttern bzw. Schweißmuttern ins Blech oder zur Gewindefertigung im Füge teil erforderlich sind. Diese zusätzlichen zeitaufwendigen Prozessschritte sowie die Herstellung des Fügehilfselements *Schraube* verursachen zum einen hohe Fertigungskosten und zum anderen stellen sie ein Störpotential dar. Neben dem Aufwand zur Fertigung qualitativ hochwertiger Gewinde und Schrauben ist zudem die exakte Positionierung der Schraubwerkzeuge sicherzustellen.

Zunehmend finden daher alternative Schraubtechniken wie das *Direktverschrauben* mittels gewindeschneidenden, gewindefurchenden Schrauben oder Flow-Drill-Schrauben [2] in der Automobilindustrie ihren Einsatz. Im Falle von gewindeschneidenden und gewindefurchenden Schrauben ist lediglich eine Vorlochung der Füge teile bzw. das Vorsehen von speziellen Schraubaugen in Gussteilen erforderlich. Bei *Flow-Drill-Schrauben* (FDS) kann auch dieser Prozessschritt entfallen. Ein typischer Einsatzfall sind Direktverschraubungen in Kunststoffbauteile, -gehäuse. FDS werden im Fahrzeug- und Karosseriebau zur Fixierung von gering belasteten Befestigungselementen beispielsweise für Bremsleitungen an der Karosserie eingesetzt [35]. Zudem sind weiter-

führende Untersuchungen bekannt, bei denen FDS in Verbindung mit dem Innenhochdruckumformen (IHU) von Blechteilen erfolgreich getestet wurden [36]. Die vergleichsweise geringe statische und dynamische Belastbarkeit von Direktschraubverbindungen in herkömmlichen Blechwerkstoffen ist einer stärkeren Verbreitung im Karosseriebau bislang hinderlich. Auch an Direktschraubverbindungen werden dedizierte werkstoffliche oder geometrische Toleranzanforderungen an die Fügeiteile gestellt.

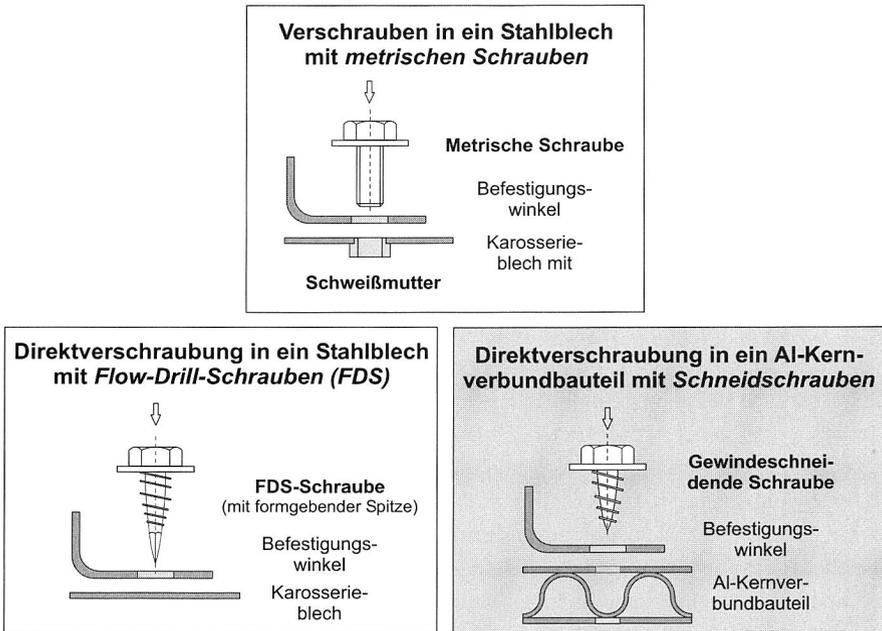


Bild 28: Beispiele metrischer Schraubverbindungen und Direktverschraubungen für den Automobilbau

Seit geraumer Zeit werden neue Konstruktionswerkstoffe wie *Sandwichbauteile* und *Schäume* (siehe Bild 30) für den Karosseriebau diskutiert, die sich durch ein hohes Energieabsorptionsvermögen und eine hohe Steifigkeit auszeichnen. Sie bieten neue Einsatzmöglichkeiten für das Direktverschrauben und lassen aufgrund der größeren Materialstärke eine bessere Verankerung der Schraube erwarten. Zur Qualifizierung sind Schraubversuche und Analysen hinsichtlich der werkstofflichen oder geometrischen Toleranzanforderungen an die Fügeiteile erforderlich.

Die an der Beispielprozesskette durchgeführte FMEA (Kap. 2.2.1) zeigt ebenfalls, dass Merkmalstoleranzen in den Füge- oder Hilfsfügeiteilen eine hohe Risikoprioritätszahl

besitzen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden nachfolgend bauteilbezogene Merkmalstoleranzen zur Umsetzung einer adaptiven Montage untersucht.

### 3.3.1 Experimentelle Versuchsergebnisse zur Schraubtechnologie

Direktverschraubungen bieten gegenüber konventionellen metrischen Schraubverbindungen den Vorteil, dass eine aufwendige Handhabung und Befestigung von Fügehilfselementen wie Muttern entfallen kann und damit eine Verkürzung der Prozesskette möglich ist. Zunächst wird unter Einsatz der statistischen Versuchsmethodik ein Versuchsplan mit den Zielgrößen sowie den variablen und konstanten Einflussgrößen erstellt [87], [90].

Versuche zum Direktschrauben in *konventionellen Blechbauteilen*

Im Sinne einer *Sensitivitätsanalyse* werden Abhängigkeiten zwischen geometrischen Fügepartitoleranzen (variable Einflussgröße) und den Schraubprozessparametern als Zielgröße experimentell ermittelt. Ein typischer Fehler von flächigen Blechbauteilen ist der *Bauteilverzug*. Dieser entsteht durch Eigenspannungen im Bauteil, welcher unterschiedliche thermische oder mechanische Ursachen haben kann. Exemplarisch wird die Auswirkung eines *eindimensionalen Verzuges* (Verzug  $h$  bzw. Winkel  $\alpha$ ) auf die Schraubspindelpositionierung und schließlich auf die Vorspannkraft in der Verbindungsstelle untersucht. In Bild 29 sind Versuchsaufbau und -parameter dargestellt.

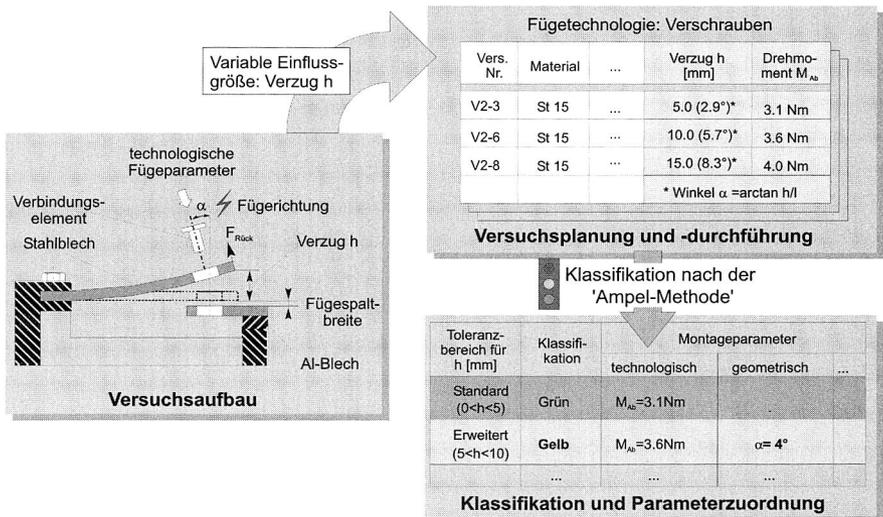


Bild 29: Vorgehensweise zur experimentellen Bestimmung der Korrelation zwischen Bauteilmerkmalen und optimalen Fügeparametern

Die Ermittlung von geeigneten Kompensationsmaßnahmen bei Bauteilfehlern bilden die Basis für die Realisierung fehlertoleranter Montagesysteme. Die Klassifikation der Reaktionsstrategie erfolgt anhand der „Ampel-Methode“, die vorgibt bis zu welchem Bauteilfehler eine Prozessparameteranpassung zulässig ist. Nach dem Ampelprinzip wurden Bereiche ermittelt, innerhalb derer jeweils eine einheitliche Strategie verfolgt werden kann. Im *grünen Bereich* kann der Schraubprozess mit Standardparametern für die Schrauberpositionierung und das Anzugsmoment gefahren werden. Im *gelben Bereich* ist eine Anpassung der Schrauberpositionierung um einen Korrekturwinkel  $\alpha$  nötig, da es nicht mehr möglich ist, die Schraube normal zur Oberfläche zu positionieren. Zudem führt ein Bauteilverzug zu einer erhöhten Auflagereibung zwischen Schraubkopf und oberem Füge­teil. Um eine definierte Vorspannkraft sicherzustellen, ist daher ein erhöhter Abschalt­drehmoment im Vergleich zu verzugsfreien Bauteilen erforderlich. Im *roten Bereich* ist eine Anpassung der Schraubparameter nicht mehr zulässig und das Füge­teil muss zur Nacharbeit ausgeschleust werden.

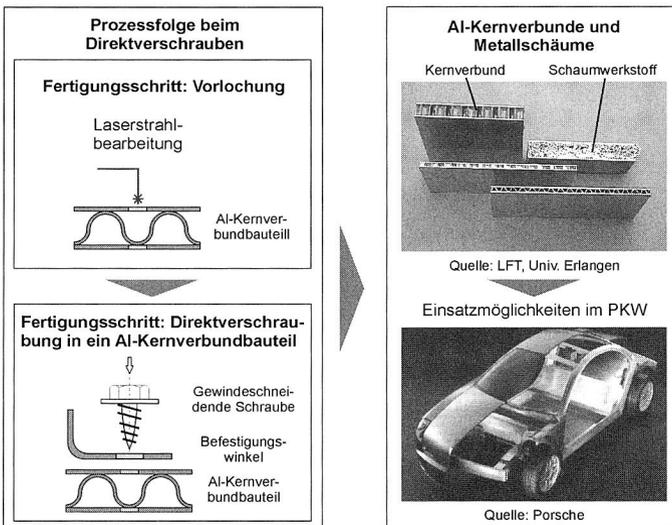


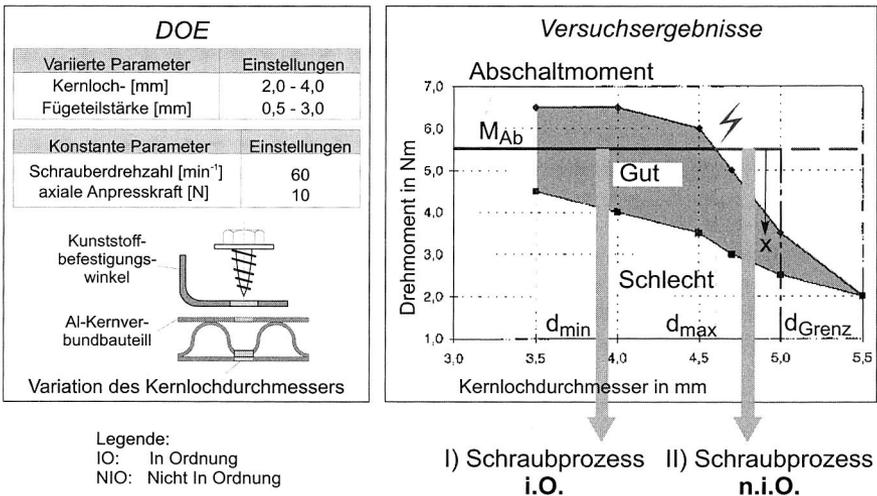
Bild 30: Direktverschraubung in Al-Kernverbundbauteile mit Vorlochung

#### Versuche zum Direktschrauben in Kernverbunden

Kernverbundbauteile und Metallschaumwerkstoffe sind von hohem Interesse für den Automobilbau und für den Flugzeugbau. Sie eignen sich aufgrund ihrer hohen Steifigkeit insbesondere als Trägerbauteile z. B. für den Türmodulträger und sie verfügen über ein hohes Energieabsorptionsvermögen im Crashfall. Voraussetzung für das Direktverschrauben mit gewindeschneidenden oder gewindefurchenden Schrauben ist eine Vor-

lochung der Fügeiteile, beispielsweise durch Laserstrahlschneiden (Bild 30). Die Vorversuche zum Verschrauben in diese Aluminiumkernverbunde haben gezeigt, dass aufgrund der hohen Materialstärke (zwei Deckbleche und ein metallischer Kern) eine gute Schraubenverankerung im Bauteil und damit eine hohe Klemmkraft in der Schraubverbindung erzielt werden kann.

Die experimentellen Untersuchungen zum Direktverschrauben ergeben, dass nicht alle bauteilseitigen Merkmalstoleranzen in gleicher Intensität auf das Fügeergebnis einwirken. Verfahrensbedingt sind beim Direktverschrauben Fertigungsschritte, wie das Vorlochen mittels Bohren oder Laserstrahlschneiden erforderlich. Insbesondere beim Laserstrahlschneiden kann durch die Wärmeeinbringung die Klebeschicht im Umkreis der Vorlochung beschädigt werden. Durch das Vorlochen bestehen somit zusätzliche Fehlereinflussmöglichkeiten wie beispielsweise Toleranzen im Lochdurchmesser  $d$ . Anhand der Schraubkurvenverläufe erfolgt der Rückschluss auf die Verbindungsqualität. Dabei wird der Drehmomentenverlauf über die Zeit oder den Drehwinkel aufgezeichnet. Aus der Auswertung des Momentenverlaufs kann eine fehlerhafte Verschraubung anhand signifikanter Kurvenverläufe ermittelt werden [98], [102].

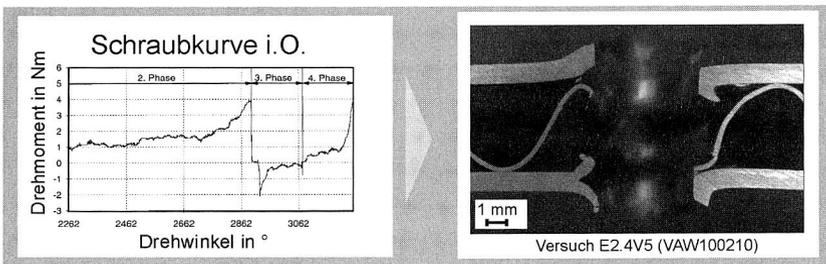


**Bild 31:** Anpassung des Anzugdrehmomentes in Abhängigkeit des Kernlochdurchmessers beim Direktverschrauben in Kernverbundwerkstoffen (Teil 1)

Bei der Variation der Lochdurchmesser lassen sich wiederum drei Arbeitsbereiche nach der *Ampel*methode definieren, innerhalb derer mit konstanten Prozessparametern gearbeitet werden kann (Bild 31). Im grünen Bereich kann zwischen  $d_{min}$  und  $d_{max}$  mit dem

Standardabschaltdrehmoment gearbeitet werden. Steigt der Lochdurchmesser über  $d_{max}$ , so wird in den gelben Bereich gewechselt. Hier ist eine Korrektur des Abschalt-drehmomentes (Absenkung) erforderlich, da ansonsten eine Zerstörung des Kernverbund-Fügeteils an der Fügestelle durch überdrehen der Schraube erfolgen würde (siehe Schraubkurve n.i.O, Bild 32). Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die applikations-spezifisch geforderte Klemmkraft in der Schraubverbindung dennoch erreicht wird. Mit dem adaptierten Steuerparameter kann bis zum Wert  $d_{Grenz}$  gearbeitet werden, danach beginnt der rote Bereich. Theoretisch ist eine weitere Absenkung des Abschalt-drehmomentes zwar möglich, allerdings besteht dann die Gefahr, dass die erforderliche Verbindungsfestigkeit durch eine zu niedrige Schraubenvorspannkraft nicht mehr zuverlässig gewährleistet ist.

### I) Schraubprozessverlauf in Ordnung (i.O.)



### II) Schraubprozess nicht in Ordnung (n.i.O.)

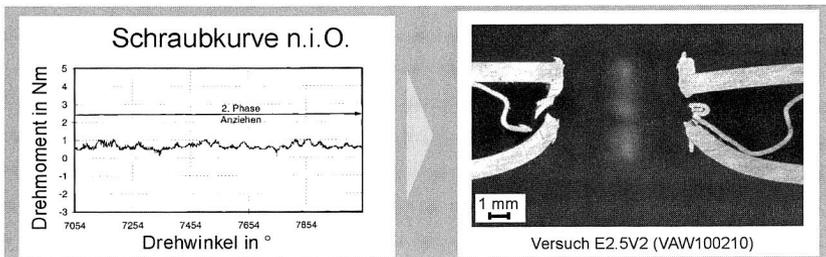


Bild 32: Anpassung des Anzugdrehmomentes in Abhängigkeit des Kernlochdurchmessers beim Direktverschrauben in Kernverbundwerkstoffen (Teil 2)

### 3.3.2 Experimentelle Versuchsergebnisse zur Stanzniettechnologie und Gestaltungsregeln für Stanznietverbindungen bei Mischbauweise

Eine systematische Analyse der prozessrelevanten Einflussgrößen beim Stanznieten führte zu der in Bild 33 dargestellten Tabelle der Prozesseinflussgrößen.

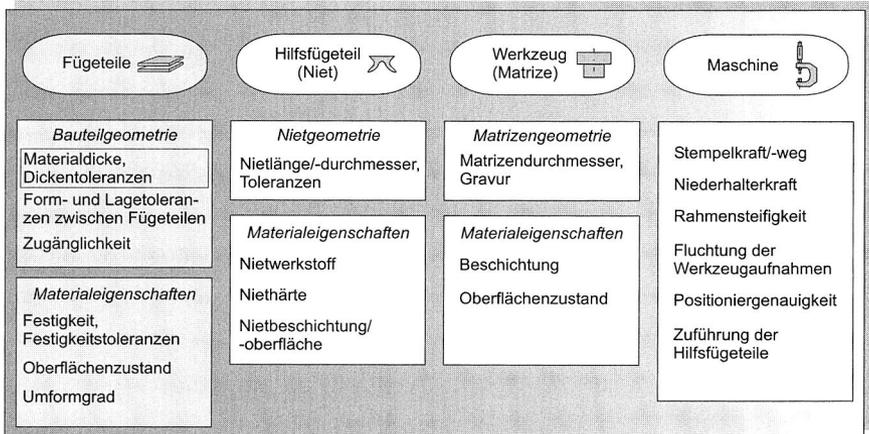


Bild 33: Einflussgrößen auf die Verbindungsqualität beim Stanznieten

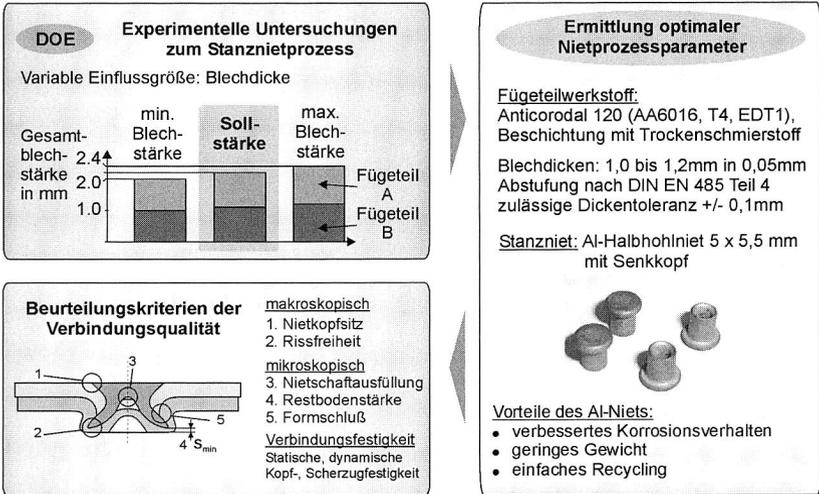
Die bauteilseitigen Einflussgrößen können zudem in geometrische, mechanische und sonstige Merkmalstoleranzen unterteilt werden. Screeningversuche zeigten, dass bei der Fügeteilgeometrie die Schwankungen in der Materialdicke von besonderem Interesse sind. Der Einfluss von Blechdickentoleranzen auf die Fügestellenausprägung beim Nieten wurde für höherfeste Stahlbleche bereits in [106] herausgestellt.

Versuche zum Stanznieten von Aluminiumblech mit Aluminium-Halbhohlniet:

Unter Einsatz der statistischen Versuchsmethodik [87],[90] wurde ein Versuchsplan mit den Zielgrößen sowie den variablen und konstanten Einflussgrößen erstellt (Bild 34). Als Aluminiumblech für den Karosseriebau wird im Automobilbau Anticorodal 120 (AA6016, T4, EDT1) und Anticorodal (108), AA6181A, T4, EDT1 eingesetzt. Die Probekörper wurden nach DIN 50 124 mechanisch aus den Aluminiumtafeln geschnitten. Für die Bleche sind nach DIN EN 485 Teil 4 *Blechdickentoleranzen von  $\pm 0,1\text{mm}$*  zulässig [69]. Anhand des Nietens von zwei Al-Blechen der Materialstärke 1,1mm (Sollstärke) mit Senkkopfniet wurden zunächst die optimalen Prozessparameter für den Niederhalter- und Setzdruck ermittelt. Es folgte eine Variation der Blechdicke um  $\pm 10\%$ , wie es in der Produktionspraxis festzustellen ist, und eine erneute Bestimmung der optimalen Prozessparameter. Für die Versuche wurden *Aluminiumstanzniete* (Al-Niete 5,3 x

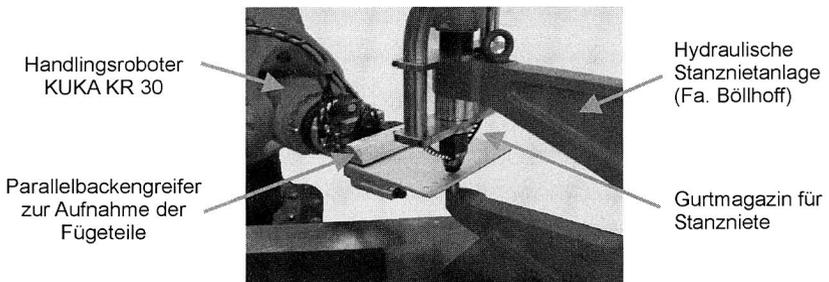
5,5mm) eingesetzt. Die verwendeten *Al-Niete* weisen in Verbindung mit Al-Bleche im Vergleich zu Stahl-Niete folgende *Vorteile* auf:

- verbesserte Korrosionseigenschaften
- reduziertes Gewicht
- bessere Recyclingfähigkeit



*Bild 34: Prozessuntersuchungen zum Einfluss von Blechdickentoleranzen auf das Stanznieten mit Aluminium-Halbhohlniet*

Al-Niete besitzen so ein hohes Einsatzpotential im Fahrzeugbau. Das Bild 34 zeigt den Versuchsablauf. In der linken Bildhälfte unten sind die Prüfverfahren und Beurteilungskriterien wie Nietkopfsitz, Rissfreiheit etc. zur Bestimmung der Verbindungsqualität aufgeführt. Die Stanznietungen wurden mit einem hydraulischen Stanznietgerät mit integrierter Kraft-Wegüberwachung (Hüllkurve) durchgeführt (Bild 35).



*Bild 35: Stanznietanlage am Lehrstuhl FAPS für Fügeprozessuntersuchungen*

Die mikroskopische Analyse von Schlibfbildern (Bild 36) zeigte, dass bei unverändertem Setzdruck Blechdickenschwankungen einen starken Einfluss auf die Nietkopfendlage und die Nietaufspreizung besitzen. Ohne Setzdruckanpassung ist die Nietverbindung mangelhaft. Durch die Anhebung des Setzdrucks auf 185 bar konnte so trotz der erhöhten Blechdicke ein gutes Nietergebnis erzielt werden.

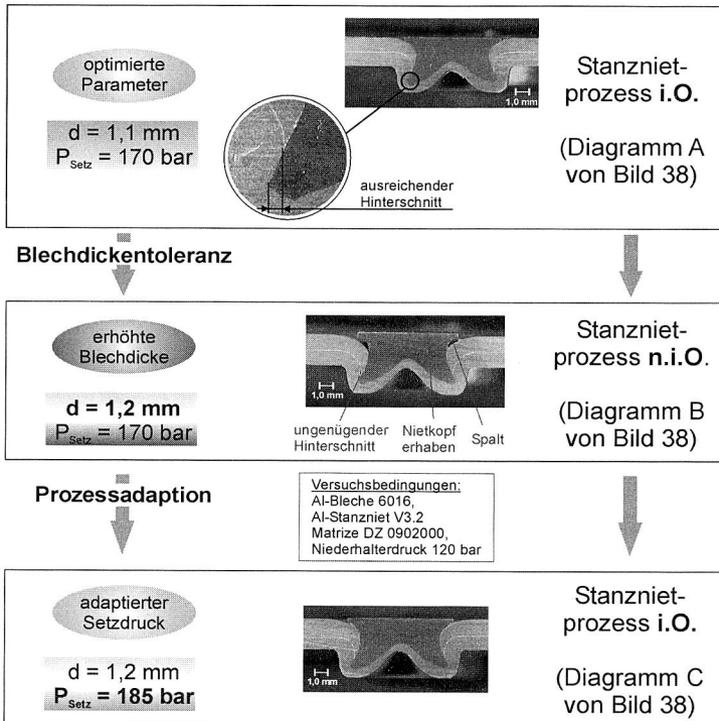


Bild 36: Ergebnisse der Setzkraftadaption bei Blechdickentoleranzen

Ziel ist es, den Niet oberflächenbündig zu setzen und eine hinreichend große Aufspreizung des Nietfußes (Formschluss) zu erzielen, wobei keine Risse im Schließkopf auftreten dürfen [30]. Der Kennwert Nietaufspreizung beinhaltet dabei sowohl den Hinterschnitt, als auch das relative Aufspeizverhalten des Nietendes zum Nietschaftdurchmesser. Das Bild 37 zeigt die detaillierten Versuchsergebnisse. Bei einer Blechdickenerhöhung der beiden Fügeteile von jeweils 1,1 mm auf 1,2 mm ist eine Adaption des Setzdrucks von 170 bar auf 185 bar erforderlich, will man eine optimale Verbindungsqualität erreichen. Durch Anpassung der Stanznietparameter an die Blechdickentoleranzen konnte die qualitative Ausbildung der Nietverbindung hinsichtlich oberflächenbündiger Nietkopfendlage und hinreichender Aufspreizung im Nietfuß erreicht

werden. Parallel wurden für unterschiedliche Blechdickenkombinationen mit Einzelblechstärken 1,0 mm bis 1,25 mm *optimale Einstellwerte für die Steuer- und Überwachungsparameter* ermittelt. Neben den makro- und mikroskopischen Eigenschaften ist die *mechanische Verbindungsfestigkeit* wesentlich. Mit einer Zugprüfmaschine (Zwick Z010) erfolgte die Bestimmung der Verbindungsfestigkeit in statischen Scherzugversuchen nach DIN 50164-P. Das Versagen der Einzelnietverbindung erfolgte erst bei einer Zugkraft zwischen 2,5 und 2,9 kN.

Versuchsbedingungen:  
Al-Halbhohlniet 5,3 x 5,5 mm  
in 2x Al-Blech (Typ 6016),  
Matrize DZ0902000

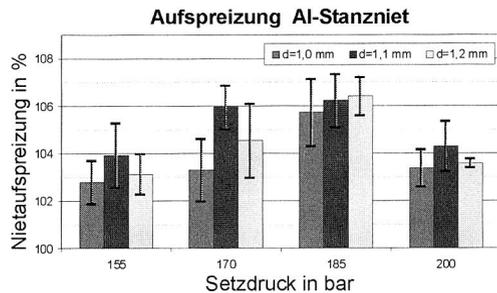
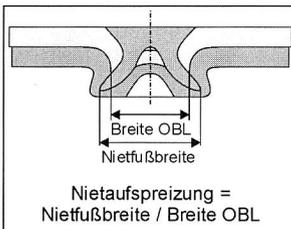
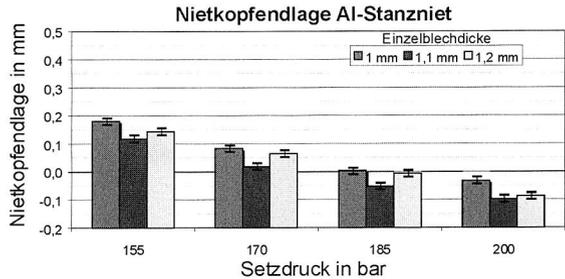
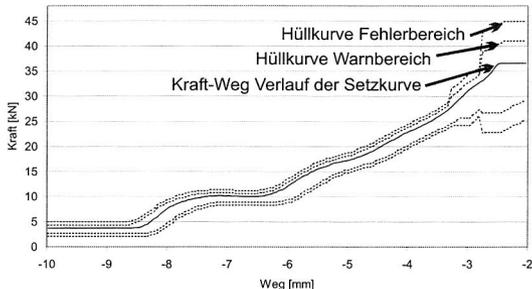


Bild 37: Nietkopfendlage/ -aufspreizung bei Setzdruckvariation

Die Prozessfenster wurden im nächsten Schritt *informationstechnisch aufbereitet*, um sie in die Montagesteuerung eingeben zu können. Es erfolgte die Unterteilung der Prozesseinflussgrößen Blechdicke in einer Stufung von 0,05 mm und die Zuordnung optimaler Prozessparameter für die Setz- und Niederhalterkraft. Neben der Steuerparameteradaption ist eine Korrektur der Überwachungsparameter (Hüllkurve) der Kraft-Wegkurve notwendig, um Prozessstörungen zu vermeiden (Bild 38, Diagramm C). Damit wird es möglich, singuläre Merkmalstoleranzen wie Blechdickenschwankungen durch eine Anpassung der Prozesssteuer- und Überwachungsparameter gezielt auszugleichen. Der Bereich in dem diese Adaption stattfinden darf, muss jeweils fallspezifisch neu ermittelt werden. Entscheidend hierfür sind neben den optischen Eigenschaften insbesondere die geforderten mechanischen Festigkeitskennwerte der Nietverbindung.

Diagramm A

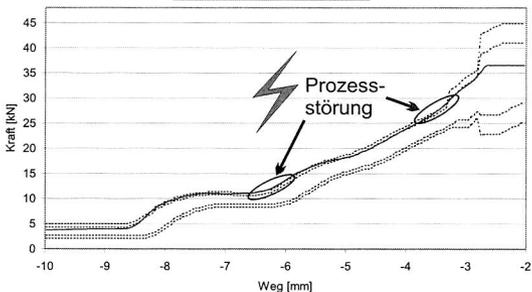
Blechdicke:  $d = 1,1 \text{ mm}$   
 Setzdruck:  $P = 170 \text{ bar}$



Generierung der Hüllkurven, so dass eine effektive Prozessüberwachung möglich ist.

Diagramm B

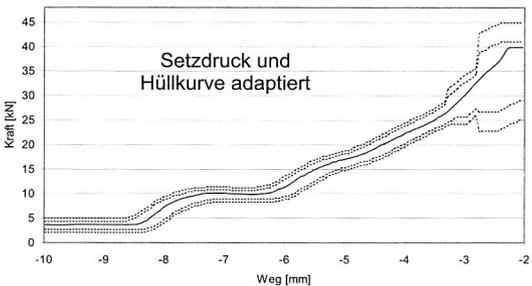
Blechdicke:  $d = 1,2 \text{ mm}$   
 Setzdruck:  $P = 170 \text{ bar}$



Eine erhöhte Blechdicke führt zwangsläufig zu einer Prozessstörung, da die Kraft-Weg-Kurve die Hüllkurve verlässt

Diagramm C

Blechdicke:  $d = 1,2 \text{ mm}$   
 Setzdruck:  $P = 185 \text{ bar}$



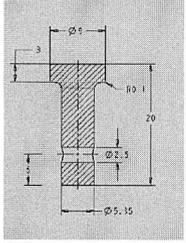
Es erfolgt sowohl eine Adaption des Setzdruckes an die erhöhte Blechdicke, als auch eine Hüllkurvenverschiebung

Bild 38: Translatorische Anpassung der Überwachungsparameter (Hüllkurve)

Versuche zum Stanznieten von *Kunststoff-Metall-Verbunden (Mischbauweise)*:

Neben der Festlegung optimaler Prozessparameter interessiert besonders die *konstruktive Auslegung der Fügstellen* [31]. Zur Vermeidung von Konstruktionsfehlern und Montagestörungen benötigt der Konstrukteur Gestaltungsrichtlinien. Aus diesem Grund wurden Hinweise für die Gestaltung von Stanznietverbindungen, insbesondere im Hinblick auf *Mischbauweise* erarbeitet. Eine wesentliche Fragestellung in diesem Zusammenhang ist, inwieweit kommerziell verfügbare Stanzniete für eine Mischbauweise von Aluminiumblechen und Kunststoffteilen geeignet sind. Aus den Versuchen lassen sich Gestaltungsempfehlungen für Niethersteller sowie Auswahlempfehlungen bezüglich der Nietgeometrie und der Anordnung der Fügepartner für Konstrukteure ableiten.

**Experimentelle Untersuchungen zur optimalen Nietkopfgeometrie bei Kunststoffbauteilen**



Variation des:

- Nietkopfdurchmessers
- Übergangsradius am Nietschaft

**Statische Kopfzugversuche nach DIN 50164**

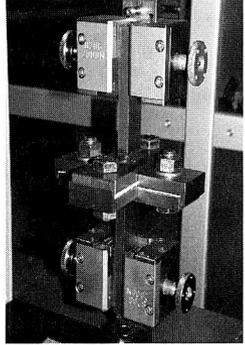
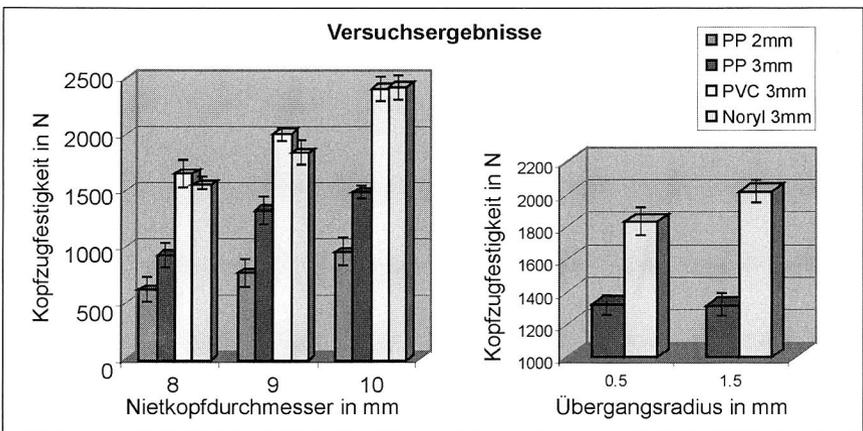



Bild 39: Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Nietkopfgeometrie auf die Kopfzugfestigkeit von Stanznietverbindungen in Kunststoffbauteilen

Damit der Niet bei Kopfzugbelastung nicht aus dem Kunststoffbauteil ausknöpft, ist die Nietkopfgeometrie entscheidend. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass bei einer großen *Kopfauflagefläche* auf das Fügeteil eine höhere Kopfzugkraft übertragbar ist. Weiterhin kann der *Übergangsradius* Schaft zu Nietkopf einen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit und das Ausknöpferhalten besitzen. Hierzu sind bislang keine quantitativen Zusammenhänge zwischen Nietgeometrie und Kopfzugfestigkeit bekannt.

Es wurden experimentelle Untersuchungen zur optimalen Gestaltung des Nietkopfdurchmessers und des Übergangsradius vom Kopf zum Nietschaft durchgeführt (Bild 39). Dabei wurden Statische Kopfzugversuche nach DIN 50164 durchgeführt. Als stempelseitige Fügeteilwerkstoffe kamen die Kunststoffwerkstoffe Xenoy® und Noryl GTX® der Firma General Electric Plastics sowie PP, PVC in Plattenform zum Einsatz. Es handelt sich dabei um Werkstoffe, wie sie auch in der Automobilindustrie beispielsweise für Kotflügel beim VW-Beetle Anwendung finden. Matrizenseitig wurde Al-Blech Anticorodal 120 der Stärke 1,1 mm verwendet.

Die Ergebnisse (Bild 39, unten) zeigen, dass die zur Zeit verfügbaren Stanznieten nicht optimal für die Mischbauweise mit Kunststoffbauteilen ausgelegt sind. Ein um ca. 10% erhöhter Kopfdurchmesser führt zu einer Erhöhung der Kopfzugfestigkeit von mindestens 20%. Der Einfluss des Übergangsradius ist vernachlässigbar gering.

Basierend auf den Versuchsergebnissen wird dem Konstrukteur als *Gestaltungsrichtlinie für das Stanznieten von Kunststoffbauteilen* die Verwendung von Stanznieten mit möglichst großem *Nietkopfdurchmesser* empfohlen. Dahingegen kann bezüglich des optimalen Übergangsradius zwischen Nietkopf und –schaft keine eindeutige Aussage getroffen werden, weshalb sowohl Senkkopfniet (großer Übergangsradius) als auch Flachrundkopfnieten (kleiner Radius) verwendet werden können. Bei Mischbauweise ist die *Anordnung der Fügeteile* so zu wählen, dass das Kunststoffbauteil stempelseitig liegt. Hierdurch kann eine ausreichende Aufspreizung des Nietes im matrizenseitigen Blechwerkstoff erzielt werden. Diese Konstruktionshinweise wurden exemplarisch in das PDM-basierte Informationssystem zum bereichsübergreifenden Informationsaustausch (Kapitel 6.3) übernommen.

### 3.3.3 Vergleichende Bewertung der Füge Technologien hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Bauteilfehlern

Der Konstrukteur entscheidet, welche Verbindungstechniken in einem Produkt zum Einsatz kommen. Bei seiner Entscheidung hat er ein breites Spektrum an unterschiedlichen Produkthanforderungen und Umfeldrestriktionen zu beachten. Die Verfahrensauswahl stellt ein multikriterielles Problem dar, bei dem neben den produktionstechnischen Rahmenbedingungen insbesondere die Nutzungsphase und ggf. die Demontierbarkeit am Ende des Produktlebenszyklus zu beachten sind. Die *Auswahl* eines geeigneten Fügeverfahrens erfolgt anhand der Kriterien

- produktspezifische Anforderungen hinsichtlich der
  - mechanischen Beanspruchung und
  - optischen Eigenschaften,
- Anforderungen hinsichtlich Lösbarkeit (Service, Recycling) und
- Herstellkosten

Im Zusammenhang mit der Abschätzung der Herstellkosten ist eine Bewertung der *Prozessrobustheit* wünschenswert, da Störzeiten einen nicht unerheblichen Kostenfaktor darstellen. Die Ergebnisse der *Sensitivitätsanalyse* können zur Entscheidungsfindung genutzt werden, um zwischen zwei oder mehreren äquivalent einsetzbaren Technologien die optimale Lösung auszuwählen. Falls nur ein Verfahren geeignet ist, kann dieses hinsichtlich der Erfordernis von robustheitssteigernden Maßnahmen überprüft werden. Zur Analyse der Prozessrobustheit sind vergleichende experimentelle Untersuchungen erforderlich (siehe Kap. 3.3.1ff). Die Robustheit eines *Fügeverfahrens* hängt dabei von der Sensitivität gegenüber einzelnen Prozesseinflussgrößen ab. Um eine direkte Vergleichbarkeit unterschiedlicher Verfahren zu gewährleisten, müssen diese Bewertungskriterien für *alle* untersuchten Fügeprozesse gleichermaßen angewendet werden. Dabei sind insbesondere folgende *Rahmenbedingungen* der Versuchsdurchführung zu dokumentieren:

- die Ausstattung der Versuchsanlage mit Fehlerkompensationseinrichtungen wie Sensorik, intelligenter Bildverarbeitung, Ablaufsteuerung mit Reaktionsstrategien
- Ausschluss von Störgrößen wie Temperaturschwankungen (z.B. Klimatisierung)

Anhand von drei ausgewählten Füge Technologien für flächige Bauteile wird nachfolgend ein Robustheitsvergleich durchgeführt.

*Verfahrensvergleich:* Neben den bereits genannten mechanischen Fügeverfahren Direktverschrauben und Stanznieten wurde als dritte Fügeverfahren der Klebe- und Dichtmittelauftragsprozess ausgewählt. Zum einen findet sich im Leichtbau zunehmend die Kombination Mechanische Fügeverfahren und Kleben [32], zum anderen enthält die Beispielprozesskette PKW-Türmontage den Dicht-, Klebmittelauftrag (*Bild 16*). Zur Vertiefung der Thematik Dicht-, Klebmittelauftrag wird auf [99] verwiesen.

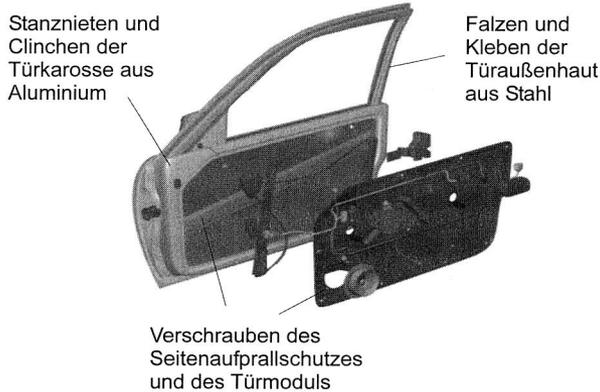


Bild 40: Einsatzbeispiel unterschiedlicher Fügeverfahren in einer PKW-Tür

Den vorgenannten Technologien ist gemeinsam, dass sie im Karosserierohbau zum Fügen konventioneller Bleche, hochfester Stahlbleche sowie Aluminium-Bleche zum Einsatz kommen (Bild 40). Die Ergebnisse des Robustheitsvergleichs für diese drei Fügeverfahren sind in Bild 41 zusammengefasst. Bei Merkmalstoleranzen, die aufgrund der experimentellen *Voruntersuchungen* als nicht signifikant eingestuft werden, steht in der Matrix "entfällt". Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden wesentliche Toleranzeinflüsse ausgewählt und hierfür zulässige Prozessfenster experimentell ermittelt. Es erfolgt zunächst eine Enumeration von potentiellen Werkstückfehlern (G1 bis G4 bzw. M1, S1). In der Matrix sind die analysierten geometrischen Einflussparameter wie Blechdickentoleranzen und Lagetoleranzen von Fügestellen dunkel hinterlegt. Die Auswahl dieser Bewertungskriterien erfolgt anhand der jeweiligen Produktapplikation und den Erfahrungen eines Prozessspezialisten in der Konstruktion oder Arbeitsvorbereitung fallspezifisch. Die Ergebnisse können in einer Matrix anhand unterschiedlich stark ausgefüllter Kreise (Bild 41) visualisiert werden. Der Vergleich der drei ausgewählten, wärmearmen Fügeverfahren zeigt deutlich, dass die Verfahren hinsichtlich ihrer Toleranzsensitivität grundsätzlich als sehr unterschiedlich einzustufen sind.

Die Versuchsergebnisse lassen allgemeine qualitative Aussagen hinsichtlich der Prozessrobustheit zu. Beispielsweise sind beim *Schrauben* bauteilseitig Vorbearbeitungs-

schritte wie das Lochen oder Anbringen von Muttern erforderlich, die zusätzliche Fehlerinflussmöglichkeiten beinhalten. Grundsätzlich ist eine lange Prozesskette hinsichtlich der Robustheit als negativ einzustufen, da sich viele Angriffsmöglichkeiten für Störgrößen ergeben. Zudem verursacht eine lange Prozesskette hohe Prozesskosten und Durchlaufzeiten. Generell muss jedoch die Robustheit der Einzelprozesse berücksichtigt werden, so dass mehrere robuste Teilprozesse in Summe insgesamt einem labilen Alternativprozess überlegen sind. Der Konstruktion kommt eine hohe Verantwortung bei der Auswahl robuster Produktionsprozessketten zu. Die oben stehende Matrix kann für den Auswahlprozess einen ersten Anhaltspunkt zur Unterstützung der Konstruktion zur Verfahrensauswahl und –bewertung bieten.

Werkstückfehler	Fügeverfahren		
	Stanznieten	Direktverschrauben	Klebmittelauftrag
<u>Geometrische Toleranzen</u> G1 - Bauteildicke	● <b>Nietversuche mit Al-Blech/ Al-Niet</b>	◐	○ Entfällt
G2 - Durchmesser der Vorlochung	○ Entfällt	● <b>Schraubversuche in Al-Sandwich</b>	○ Entfällt
G3 - Positionierung x,y	○ Entfällt	● <b>Fehlerausgleich mit Robotvision</b>	◐ <b>Fehlerausgleich mit Robotvision</b>
G4 - Positionierung z	◐	◐	◐
<u>Mechanische Merkmals-toleranzen</u> M1 - Härte	●	◐	○
<u>Sonstige Merkmals-toleranzen</u> S1 - Oberflächengüte	◐	◐	●

**Legende:**

- keiner
- ◐ geringer
- starker Einfluss

Bild 41: Matrix zur qualitativen Bewertung von Füge Technologien

Am Beispiel der Schraubtechnologie zeigt sich, dass technologische Zusatzeinrichtungen wie Robot-Vision existieren, mit denen Toleranzen wie Lageabweichungen in den Füge Stellen erkannt und ausgeglichen werden können. Aber auch in Handhabungsgeräten wie Robotern oder in Spannvorrichtungen für Füge teile treten Positionsungenauigkeiten auf. Durch eine *Prozessfähigkeitsanalyse* kann die Positioniergenauigkeit von Handhabungsgeräten ermittelt und mit den Anforderungen abgeglichen werden. Am Beispiel der exakten Positionierung der *Schraubspindel* über der Schraubstelle („Bolzen-Loch-Problem“) wird jedoch deutlich, dass Lageungenauigkeiten nicht nur durch geometrische Toleranzen im Füge teil sowie durch das Spannen der zu verschraubenden Bauteile bedingt sein können, sondern auch durch die Positioniergenau-

igkeit des Handhabungsgeräts. Alle drei Einflussgrößen überlagern sich. Relative Positionsfehler der Füge Teile zum Fügewerkzeug können somit *zwei verschiedene Ursachen* haben. Zum einen kann die Ursache im Handhabungs- und Montagesystem liegen, zum anderen in fertigungsbedingten Bauteiltoleranzen. Wichtig ist nun, dass beide potentiellen Störungsursachen für diese Fügeaufgabe parallel analysiert und die Ergebnisse additiv überlagert werden. Für die Robustheit der im Produktionsbetrieb eingesetzten Verbindungstechnik ist neben dem Fügeverfahren insbesondere die maschinentechnische Verfahrensumsetzung ausschlaggebend.

Ähnliches gilt für das *Stanznieten*. Es existieren auf dem Markt sowohl elektromechanische als auch hydraulische Stanznietensysteme, die mit unterschiedlicher Sensor- und Steuerungstechnik zur Prozessführung und –überwachung ausgestattet sind. An diesen Beispielen kann man erkennen, dass neben der Füge Technologie selbst, vor allem die konstruktive mechanische Ausführung, die Ausstattung mit Sensorik sowie Steuerungstechnik seitens des Anlagenherstellers maßgebend für die Prozessrobustheit sind. Die Systemrobustheit kann durch konkrete Montageversuche quantifiziert werden. Dabei sind jedoch neben den variierten Einflussgrößen auch konstante Größen als wesentliche Rahmenbedingungen zu nennen. Es ist zu beachten, dass das *Untersuchungsergebnis stets in Bezug auf die vorherrschenden Randbedingungen* der Messungen zu sehen sind. Dies bedeutet, dass unter geänderten Produktionsbedingungen andere Ergebnisse erzielt werden können. So lassen sich unter idealen Produktionsbedingungen wesentlich bessere Werte erzielen, als unter „rauen“ Fertigungsbedingungen.

Es wird nachfolgend eine *Methodik* vorgestellt, mit der sich auf Basis des heutigen Stands der Technik zumindest *qualitative Aussagen zur Systemrobustheit* treffen lassen. Dies bedeutet, dass nicht nur der Fügeprozess sondern auch die systemtechnische Umsetzung bewertet wird. Hierzu wird das Fügeverfahren *Stanznieten* mit direkt konkurrierenden Füge Techniken wie dem *Nieten* und dem *Punktschweißen* verglichen.

Die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs können in einem Netzdiagramm veranschaulicht werden. In Bild 42 ist jeweils ein Netzdiagramm für die Füge Technologien Stanznieten, (Blind-)Nieten und Punktschweißen dargestellt. Hierzu werden in einem Netzdiagramm alle Einflussgrößen auf das System eingetragen und quantitativ bewertet, wobei 100% eine hohe Fehlertoleranz (Robustheit) bedeutet. Grundsätzlich soll die im Diagramm aufgespannte Fläche einen möglichst großen Flächeninhalt für das untersuchte Montagesystem aufweisen. Wesentliche Voraussetzung für eine verlässliche Aussage zur Prozessrobustheit ist, dass eine lückenlose Erfassung und Bewertung möglichst *aller* relevanten Prozesseinflussgrößen gewährleistet ist. Weiterhin sind die Ergebnisse stets vor dem Hintergrund der verwendeten Materialpaarungen (Werkstoffe für Füge- und Hilfsfüge Teile etc.) zu sehen. Einen wesentlichen Einfluss besitzt die konkrete tech-

nische Ausführung der realen Produktionsanlage. Erweiterungen des Montagesystems, wie der Einsatz von Sensorregelkreisen zur Kompensation von Störgrößen bzw. Toleranzen können die Robustheit positiv beeinflussen. Dies bedeutet, dass die Prozessergebnisse eines bestimmten Montagesystems zu analysieren sind. Unterschiede zwischen einzelnen Anlagentypen können sich beispielsweise durch das herstellereinspezifische Funktionsprinzip der Anlage oder zusätzliche Maßnahmen wie Sensorintegration ergeben. Teilweise besteht auch die Möglichkeit, bestehende Systeme mit robustheitssteigernden Maßnahmen zu erweitern bzw. nachzurüsten (siehe Kapitel 2 und Kapitel 4-7). Obwohl hierdurch höhere Anlagenkosten entstehen, können sich diese im laufenden Betrieb durch eine höhere Anlagenverfügbarkeit und Produktqualität rentieren.

Originäre Darstellung von Fügeverfahren für flächige Bauteile

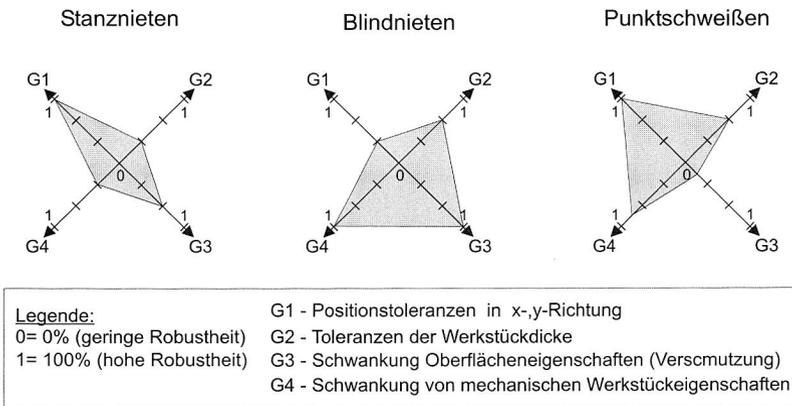


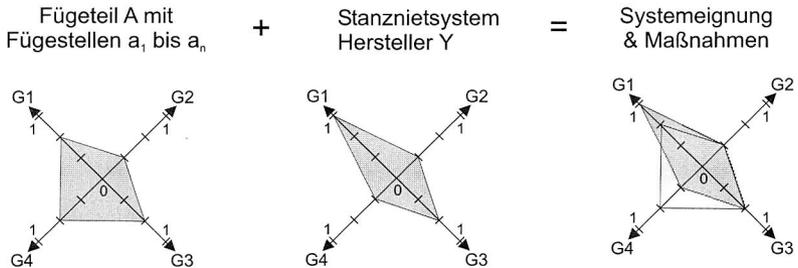
Bild 42: Netzdiagramm zum qualitativen Vergleich alternativer Fügeverfahren

Eine generelle Aussage, in dem Sinne dass ein Verfahren bzw. System A besser ist als ein Verfahren bzw. System B, kann aus dem Netzdiagramm i.d.R. nicht abgeleitet werden. Diese Aussage wäre nur dann zulässig, wenn ein Verfahren A das Verfahren B in *allen* Einflussgrößen dominiert, d.h. in *allen* Punkten eine bessere Bewertung erhält. Dies ist in dem in Bild 42 dargestellten Beispiel nicht der Fall. Zudem ist zu prüfen, ob alle entscheidungsrelevanten Informationen im Diagramm vorhanden sind. Bei Fügeverfahren mit Wärmeeinbringung wie dem MIG-Schweißen besteht beispielsweise die Gefahr eines Bauteilverzuges durch starke Wärmeeinbringung. Wird ein solches Fügeverfahren betrachtet, so ist dieses Kriterium in die Bewertung aufzunehmen. Ein Vergleich der Fügeprozesse in Bild 42 zeigt, dass sich die betrachteten Technologien hinsichtlich ihrer Fehlertoleranz stark unterscheiden. Die Verwendung von Netzdiagrammen für den Systemvergleich zeichnet sich durch eine hohe Anschaulichkeit aus. Dabei können drei

bis sechs Prozesseinflussgrößen gleichzeitig angezeigt werden. Aus dem Netzdiagramm können folgende Informationen entnommen werden:

- Abbildung *aller* relevanten Einflussgrößen im Diagramm
- Geometrische und physikalische Einflussgrößen
- Die Aggregation von Prozesseinflussgrößen (x-, y-Richtung) ist möglich

Vergleichende Darstellung von Fügeaufgabe und Fügeverfahren



Merkmale	Maßnahmen
G1 - Positionstoleranzen in x-,y-Richtung	Keine, d.h. Automatisiertes Nieten möglich
G2 - Toleranzen der Werkstückdicke	Keine, d.h. Fügeteil entspricht den Sollvorgaben
G3 - Schwankung Oberflächeneigenschaften (Schmutz)	Keine, ggf. Entfettung der Bauteile
G4 - Schwankung von mechan. Werkstückeigenschaften	Notwendig, d.h. Fertigung prüfen oder adaptive Montage

Legende:  
 0= 0% d.h. geringe Merkmalsausprägung bzw. Systemrobustheit  
 1= 100% d.h. hohe Merkmalsausprägung bzw. Systemrobustheit

**Bild 43:** Netzdiagramm zum Abgleich von Fügeteilqualität und Fügeprozess

In Abhängigkeit der angewandten Produktionstechnologie für die Fügeteile treten Unterschiede in der Ausprägung der einzelnen Fügstellentoleranzen auf. Diese sind vom zeitlich nachgeschalteten Montagesystem sicher zu beherrschen. Um das Zusammenspiel (den Match) zu prüfen, sollte eine *Systemfähigkeitsanalyse* erfolgen. Schließlich werden die bauteil- und produktbezogenen Anforderungen mit der Leistungsfähigkeit des Montagesystems, d.h. den Ergebnissen aus der Sensitivitätsanalyse verglichen. Dabei sind die vorhandenen Fügeteiltoleranzen inklusive der Positioniergenauigkeiten mit dem Toleranzausgleichspotential des Fügeverfahrens zur Deckung zu bringen. In einer Vorfeldanalyse werden die beiden Netzdiagramme übereinander gelegt (Bild 43). Je höher die Deckungsgleichheit ist, umso höher ist die Eignung des Füge-systems für die jeweilige Applikation.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass für die Auswahl einer robusten Montagetechnologie umfassende anlagenbezogene und produktbezogene Kenntnisse erforderlich sind. Es ist ein Abgleich zwischen der gemessenen Systemleistung und den Produktanforderungen unter Berücksichtigung der realen Fügeiteiltoleranzen erforderlich. Bei unzureichender Positioniergenauigkeit können so frühzeitig robustheitssteigernde Maßnahmen getroffen werden, noch bevor es im Produktionsbetrieb zu Störungen kommt.

Die einzelnen Fügeverfahren sind in ihren Verbindungseigenschaften sehr unterschiedlich. Welches Verfahren oder System bei der Produktherstellung zum Einsatz kommt, hängt zentral von den gestellten Anforderungen an die Verbindung ab. Eine *Substituierbarkeit* der Fügeverfahren untereinander ist meist nur sehr eingeschränkt möglich. Es bestehen große Verfahrensunterschiede im Hinblick auf:

- das fügbare Werkstückspektrum (z.B. Mischbauweise)
- die statische und dynamische Festigkeit der Verbindungen
- die Lösbarkeit der Verbindung (Service, Recycling)
- die Robustheit der Fügeprozesse gegenüber Störeinflüssen
- die Investitions- und Betriebskosten

Eine differenzierte Betrachtung der Fügeverfahren ist somit zwingend erforderlich. Neben einer fertigungsgerechten Konstruktion muss zudem auf die Einhaltung des Kostenrahmens in der Fertigung geachtet werden. Hierfür sind Informationen über die *Robustheit von Montagesystemen* als Entscheidungsgrundlage für Konstruktion und Arbeitsplanung erforderlich. Eine generelle quantitative Bewertung von Fügeverfahren hinsichtlich ihrer *Robustheit* ist nur bedingt möglich, da die Robustheitskenngrößen sehr stark von der herstellereigenen technologischen Ausgestaltung der Montageanlage und den fallspezifischen Produktanforderungen abhängen. Somit ist unter den genannten Voraussetzungen lediglich ein grob qualitativer Robustheitsvergleich zwischen den Fügeverfahren zulässig. Die graphisch aufbereiteten Informationen zur Montagesystemrobustheit können, trotz der genannten Einschränkungen, eine wichtige Entscheidungshilfe für den Konstrukteur und den Fertigungsplaner bilden. Die Systemeignung kann für eine konkrete Produktapplikation mittels einer ausführlichen Montagesystemfähigkeitsanalyse ermittelt werden. Die aufgrund experimenteller Prozessuntersuchungen und der Sensitivitätsanalyse gewonnenen Ergebnisse können als konkrete Anforderung an das prozessausführende Montagesystem verwendet werden. Ist die zulässige Toleranzempfindlichkeit eines Montageprozesses und damit die Systemanforderung bekannt, dann kann eine Analyse der Montagesystemfähigkeit erfolgen.

## 4 Adaptive Prozesssteuerung und Entstörstrategien in automatisierten Montagesystemen

Wie in Kap. 2.1 aufgezeigt, zeichnen sich Montagetätigkeiten durch eine hohe Aufgabenvielfalt aus. Entsprechend vielfältig ist auch das Spektrum an verfügbaren mechanischen und steuerungstechnischen Komponenten für Montagezellen. In der Praxis setzen sich zunehmend *modulare Montagesysteme* durch, bei denen ein Grundmodul um produktspezifische Technologiemodule ergänzt wird. Durch den Einsatz von modularen Systemkomponenten für modular strukturierte Produkte wird eine hohe *Wandlungsfähigkeit* von Montageanlagen erreicht [116]. Aufgrund der spezifischen Bauteileigenschaften flächiger Leichtbauteile sind fertig vorkonfektionierte Montagemodule am Markt nicht erhältlich. Vielmehr werden Montagesysteme für diesen Einsatzzweck aus einer breiten Palette an Standardkomponenten individuell konfiguriert (Bild 44).

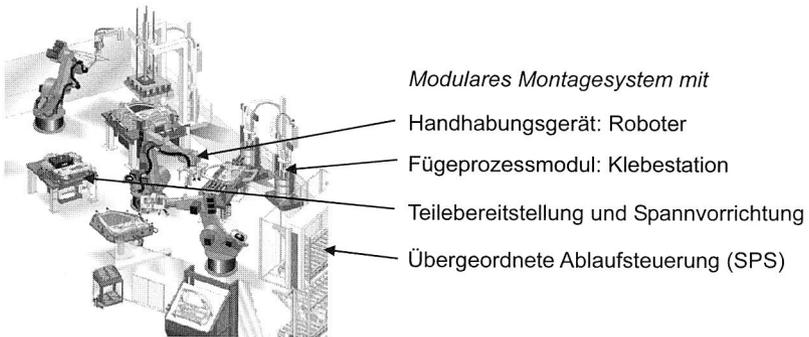


Bild 44: Modularer Aufbau von Montagesystemen am Beispiel der PKW-Türmontage bei Mercedes (Quelle: KUKA)

Die Wiederverwendung von teuren Produktionsanlagen durch *Re-Konfiguration* ist bei häufigen Modellwechseln infolge kürzer werdender Produktlebenszyklen und einer hohen Variantenvielfalt (Produktfamilie) wirtschaftlich sinnvoll. Vor dem Hintergrund zunehmenden Kostendrucks gewinnt die Wiederverwendbarkeit von Anlagen [44] und Systemen [113] zur Einsparung von Investitionskosten einen zunehmenden Stellenwert. Flexible *Baukastensysteme für Montageanlagen* ermöglichen den Aufbau komplexer Anlagen aus relativ kostengünstigen Standardkomponenten. Die Umrüstung auf ein neues Produkt kann aufgrund des hohen Anteils *wiederverwendbarer Komponenten* schnell und relativ kostengünstig erfolgen. Flexibel umrüstbare Montagesysteme bedeuten einen Investitionsschutz. Die hohen Investitionskosten für automatisierte Montageanlagen lassen sich durch eine hohe Lebensdauer für mehrere Produktgenerationen und -varianten besser amortisieren.

Grundvoraussetzung für einen modularen Anlagenaufbau und für die Unabhängigkeit von einem bestimmten Lieferanten sind *standardisierte Schnittstellen* für:

- Mechanische Verbindungen
- Energieversorgung
- Prozesssteuerung über Feldbusse oder eine Direktverdrahtung
- Prozessdatenaustausch, beispielsweise über serielle Schnittstelle, Ethernet

Die Steuerung von Montageanlagen erfolgt durch eine übergeordnete SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung). Diese erledigt die logische Verknüpfung der Handhabungsgeräte, Fügeeinrichtungen und des Materialflusses. Konventionelle SPS'en verfügen über unterschiedliche Programmiersprachen zur Erzeugung von Montagesequenzen. Sie besitzen jedoch keine spezifischen Funktionen zur Unterstützung des Bedieners in Hinblick auf die Programmierung von Reaktionsstrategien zur präventiven Fehlervermeidung sowie gezielte Entstörstrategien bei Prozessstörungen.

Fügegeräte wie beispielsweise Schraubwerkzeuge, Stanznietgeräte etc. werden binär über die Betriebsmittelschnittstelle angesprochen und melden i.d.R. einfache, binäre Daten über das Prozessergebnis an die SPS zurück. Diese einfachen Gerätesteuerungen erlauben keine automatische Übertragung umfangreicherer Informationen wie Schraubkurvenverläufe an die übergeordnete SPS und bieten keine Möglichkeit zur Feineinstellung von Prozessparametern über die SPS.

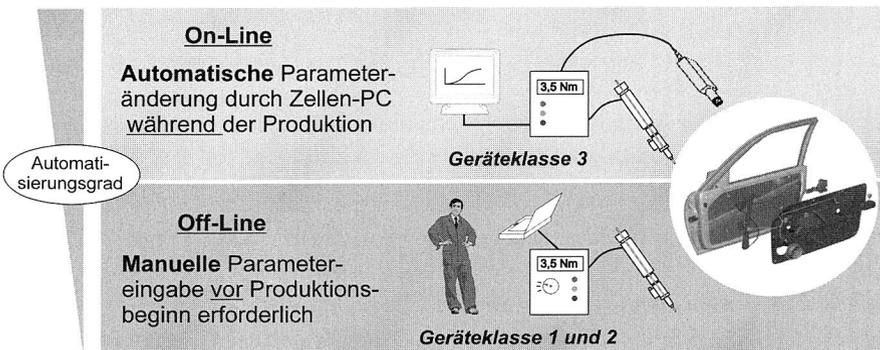


Bild 45: Gerätesteuerungsklassen unterteilt nach der Manipulierbarkeit von Prozessparameterwerten vor und während der Montage

Für die *adaptive Prozesssteuerung* in Montageanlagen gibt es somit a priori keine vordefinierten Schnittstellen. Die *Regelbarkeit* der Füge- und Montageprozesse im Sinne der adaptiven Montage hängt jedoch im wesentlichen von dem Vorhandensein offener Schnittstellen in der Anlagensteuerung ab. Entscheidend sind somit die verfügbaren Ge-

räteschnittstellen zur Einstellung der Prozessparameter für die Prozesssteuerung und –überwachung. Entweder sieht der Gerätehersteller, beispielsweise eines Industrieroboters, a priori spezifische hard- und softwareseitige Schnittstellen für Robot Vision vor. In diesem Fall ist eine Adaption geometrischer Prozessparameter gut möglich. Oder der Gerätehersteller implementiert keine spezifischen, externen Schnittstellen und es bleibt nur die Möglichkeit, vorhandene Standardschnittstellen zu nutzen oder soweit möglich nachzurüsten. Dies trifft insbesondere auf die Adaption technologischer Prozessparameter bei Fügegeräten zu. Es wurde eine Systematik zur Klassifizierung von Gerätesteuerungen hinsichtlich ihrer Schnittstellen zur Prozessparametermanipulation entwickelt. Es kann zwischen folgenden *drei Steuerungsklassen* unterschieden werden (Bild 45):

1. Geräteklasse: Einfache Gerätesteuerungen verfügen häufig lediglich über eine *manuelle Einstellmöglichkeit der Prozessparameter* an Drehreglern und/oder Ventilen. Weiterhin fehlt meist die Sensorik zur kontinuierlichen Prozessüberwachung und Qualitätsdatenerfassung. Eine Regelbarkeit ist a priori nicht vorgesehen, sondern kann nur durch eine Steuerungsmodifikation erreicht werden.
2. Geräteklasse: Moderne Maschinensteuerungen besitzen die Möglichkeit *einer elektronischen Parametereinstellung mittels PC und herstellerspezifischer Software*. Diese kann meist über eine Ethernetverbindung oder eine serielle Schnittstelle erfolgen. Die Parameter werden häufig in einer zahlenmäßig begrenzten Anzahl von Programmen in der Steuerung gespeichert. Beispiel hierfür ist die Schraubersteuerung.
3. Geräteklasse: Offene Steuerungen mit der Möglichkeit einer direkten, kontinuierlichen *Einflussnahme auf Prozessparameter über herstellernerneutrale Schnittstellen*; Anschlussmöglichkeit für prozessspezifische Sensorik wie beispielsweise Kraft-/Wegaufnehmer oder Positionsmessung mittels Robot Vision.

Die Einteilung nach den Geräteklassen kann unabhängig vom gewählten Fügeverfahren erfolgen. Prinzipielle Unterschiede ergeben sich durch die anlagenspezifisch bereitgestellten Schnittstellen wie digitale Betriebsmittelschnittstelle, Feldbus- oder Ethernetanbindung. Die zweite Geräteklasse nutzt dabei meist Standardschnittstellen, jedoch ist die Programmiersoftware i.d.R. eine herstellerspezifische Sonderlösung. Die Parametereingabe erfolgt einmalig vor Prozessbeginn (zeitdiskret). Lediglich die dritte Geräteklasse verfügt über die Möglichkeit der kontinuierlichen Prozessparameteradaption mittels montageinterner Regelkreise im Sinne des adaptiven Gesamtkonzepts.

### *Marktanalyse*

Eine Marktanalyse zur Steuerungstechnik von Stanzniet-, Schraub- und Kleb-/ Dichtmittelauftragssystemen hat ergeben, dass keine Standardlösungen der *dritten Geräteklasse* am Markt zu finden waren. Die ermittelten Gerätesteuerungen verfügten nicht per se

über die Möglichkeit der direkten Anbindung an die übergeordnete Ablaufsteuerung zur kontinuierlichen Adaption technologischer Prozessparameter. Eine Ausnahme besteht lediglich beim *Kleb-/Dichtmittelauftrag*, beispielsweise bei Gerätesteuern der Fa. SCA. Hier sind Systemlösungen verfügbar, bei denen die Klebstoffausbringungsmenge in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters im Tool-Center-Point (TCP) kontinuierlich angepasst werden kann. Zudem existieren kommerzielle Systemerweiterungen zur Konturverfolgung beim Klebstoffauftrag [124]. Analoges gilt beispielsweise auch für das robotergeführte *Bahnschweißen* [114]. Jedoch besteht in beiden Fällen keine Möglichkeit der direkten Korrektur von technologischen Prozessparametern in Abhängigkeit von Bauteiltoleranzen wie beispielsweise der Sickentiefe.

Bei Verwendung von Fügegeräten der *zweiten Geräteklasse* können Programme (beispielsweise 2 Byte = 16 Programme) mit unterschiedlichen Werten für die Steuer- und Überwachungsparameter in fest definierten Stufensprüngen a priori vorgelegt werden. Eine kontinuierliche Adaptierbarkeit der Prozessparameter kann hiermit jedoch nicht erreicht werden. Zudem wird bei einer größeren Anzahl von Fügeteilen oder Bauteilvarianten in einer Fertigungszelle schnell die Speichergrenze erreicht. Ein weiterer Nachteil ist die mangelnde Transparenz der aktuell eingestellten Parameter in Bezug zur übergeordneten Ablaufsteuerung (SPS). Zusammenfassend besteht das *Defizit* in den Gerätesteuern und in den übergeordneten Ablaufsteuerungen darin, dass in herkömmlichen Steuerungen keine oder nur unzureichende Funktionen zur direkten Prozessparameterbeeinflussung in Abhängigkeit der Fügequalität gegeben sind.

Beim „Bolzen-Loch-Problem“ in der Montage (z.B. Positionierung der Schraubspindel) ist beispielsweise die relative Lage der zu fügenden Teile von entscheidender Bedeutung. Dies gilt analog auch für das Positionieren der Schraubspindel mittels Roboter. Die Sollpositionen sind dabei aus den CAD-Daten der Produkte bekannt und sind fest im Handlingsgerät programmiert, wohingegen die jeweiligen Ist-Positionen über eine geeignete Sensorik erfasst werden. Hier kann beispielsweise ein Bildverarbeitungssystem oder ein Laserscanner zum Einsatz kommen. Aus dem Vergleich von Ist- und Sollwert kann eine geeignete Stellgröße für das Montagesystem bestimmt und eine entsprechende Korrektur der programmierten Position veranlasst werden.

Beim Stanznietprozess sind weniger die oben genannten geometrischen Positionsparameter in der Ebene erfolgsentscheidend, sondern vielmehr technologische Parameter wie die Nietsetzkraft, die von den Füge Teileigenschaften (Kap. 3.3.2) abhängt.

Aus diesem Grund wurde das Konzept der maschineninternen Regelkreise entwickelt, das eine Adaption von geometrischen und technologischen Prozessparametern über Standardschnittstellen ermöglicht. Das Bild 46 zeigt weiterhin die montageübergreifende Kommunikation mit den Bereichen Konstruktion, Fertigung und Qualitätssicherung zur

Fehlervermeidung, die in Kap. 5 erläutert wird. Zur Nutzung der schnellen montageinternen und systemübergreifenden Regelkreise ist damit ein umfassendes Softwaresystem zur fehlertoleranten Montage erforderlich. Für die maschineninternen Regelkreise wurde ein *Kommunikationsinterface* entwickelt, welches die geforderten Funktionalitäten erfüllen kann. In den Regelkreisen erfolgt über das Kommunikationsinterface in der PC-basierten Ablaufsteuerung die selbständige Anpassung des Montagesystems an Bauteiltoleranzen, Änderungen der Produktionsbedingungen oder Positionierungsungenauigkeiten. Nach einem Abgleich mit dem, in der Ablaufsteuerung hinterlegten Prozessmodell werden die notwendigen Reaktionen ausgelöst. Diese können sowohl geometrische als auch technologische Korrekturmaßnahmen sein.

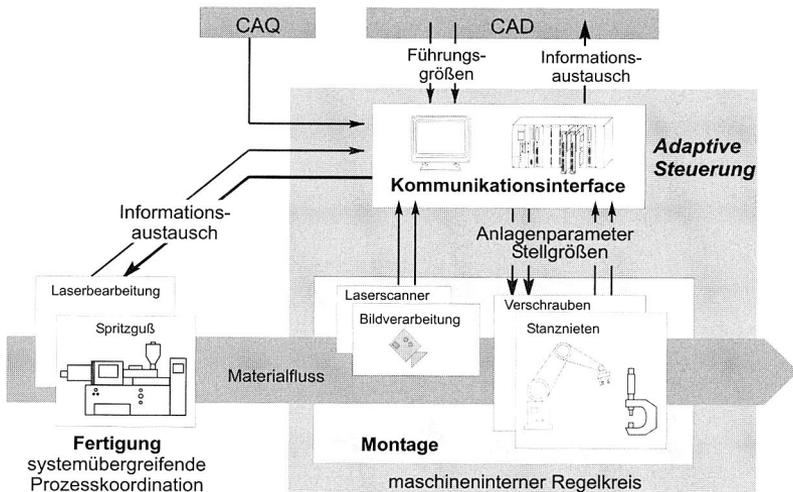


Bild 46: Prinzipdarstellung der adaptiven Montagesteuerung

Das Bild 47 zeigt die Funktionsweise des adaptiven Steuerungsansatzes für geometrische und technologische Prozessparameter. In einer lokalen Datenbank wird verfahrensspezifisches Prozesswissen aus den experimentellen Fügeprozessuntersuchungen für die Montage flächiger Leichtbauteile gespeichert. Dies erfolgt in Form von Datensätzen, wobei in einer Tabelle den einzelnen Toleranzbändern der Einflussgrößen jeweils optimale Steuer- und Überwachungsparameter zugeordnet werden. Hieraus lassen sich folgende *Anforderungen an das Kommunikationsinterface „Motion“* ableiten:

- Programmierbarkeit von mehrstufigen Reaktionsstrategien zur adaptiven Montage
- Modularer Aufbau & Erweiterbarkeit zur Integration unterschiedlicher Fügeverfahren
- Standardisierte Schnittstelle zur Datenbankanbindung (=Montageprozesswissen)

Wie in Bild 47 dargestellt, wird mittels der Software-SPS Codesys der Aufruf von Montagesequenzen über binäre Steuersignale initiiert. Über das Kommunikationsinterface *Motion* erfolgt die *Adaption von geometrischen und technologischen Fügeprozessparametern* in Abhängigkeit der Qualität der einlaufenden Fügeteile.

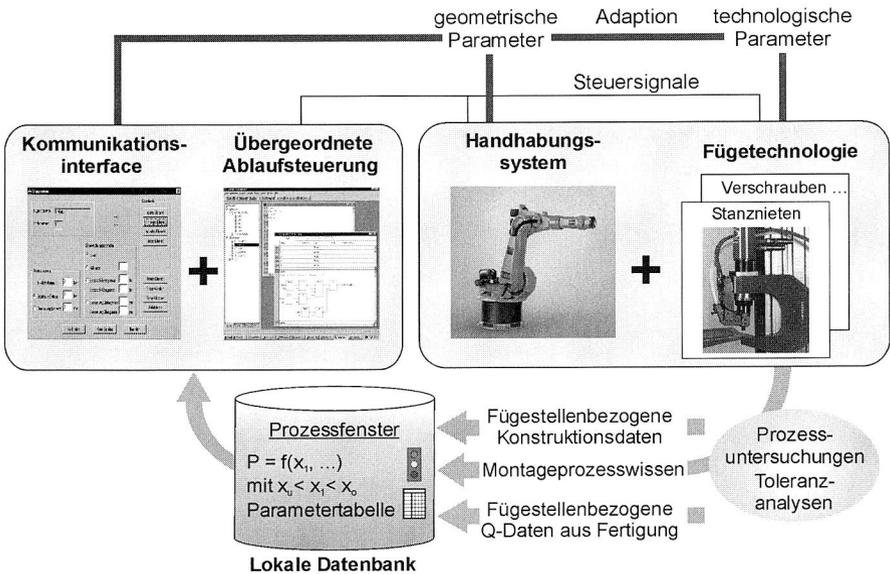


Bild 47: Zelleninterner Regelkreis zur fehlertoleranten Montage

Bei der Klassifizierung der unterschiedlichen Toleranzen und entsprechender Regelstrategien wurde nach der *Ampel-Methode* vorgegangen. Hierbei erfolgt die Einteilung der festgestellten Toleranzabweichungen in drei Bereiche. Im grünen Bereich herrschen geringe Abweichungen vor, es ist keine Anpassung der Parameter nötig. Im gelben Bereich sind Abweichungen vorhanden, die eine Anpassung einzelner oder mehrerer Parameter erfordern. Im roten Bereich sind die maximal zulässigen Toleranzen überschritten, weshalb die Bauteile nicht mehr gefügt werden können. Die logischen Zusammenhänge werden modelliert und in der Steuerung hinterlegt.

Nachfolgend wird die Funktionsweise der adaptiven Parameteranpassung nach der Ampel-Methode ausführlich erörtert. Im Anschluss daran werden Konzepte zur automatischen Anlagenentstörung diskutiert. Zuletzt erfolgt die Beschreibung wesentlicher steuerungstechnischer Komponenten des dargestellten Gesamtkonzeptes in Vorbereitung der Implementierungsphase.

## 4.1 Präventive Verfügbarkeitsicherung durch dynamische Adaption technologischer Prozessparameter

Zur Vermeidung von Anlagenstörungen und -stillständen infolge Schwankungen in der Fügequalität lassen sich *ex-ante* Maßnahmen zur Prozessparameteranpassung treffen. Dabei steht zunächst die Frage im Mittelpunkt, welche Parameter wie anzupassen sind. Prozessparameter lassen sich in die beiden Kategorien *Steuer- und Überwachungsparameter* unterteilen.

Beide Parameter besitzen unterschiedliche Funktionen, was nachfolgend am Beispiel der Schraubtechnik in Bild 48 aufgezeigt wird. Diese Parameter sind für die Vermeidung von Anlagenstörungen gleichermaßen von hoher Relevanz. Zunächst wird die Ausgangssituation einer Schraubverbindung aus Fügebauteilen mit einer geringen zulässigen Dickentoleranz betrachtet. Zur Erreichung einer definierten Vorspannung wird die Schraube mit einem definierten Drehmoment  $M_1$  angezogen (Bild 48, links). Nach Erreichen dieses Zielwertes schaltet die Schraubersteuerung automatisch ab, wobei Kurve ① den Drehmomentverlauf ( $M$ ) in Abhängigkeit des Drehwinkels ( $W$ ) zeigt.

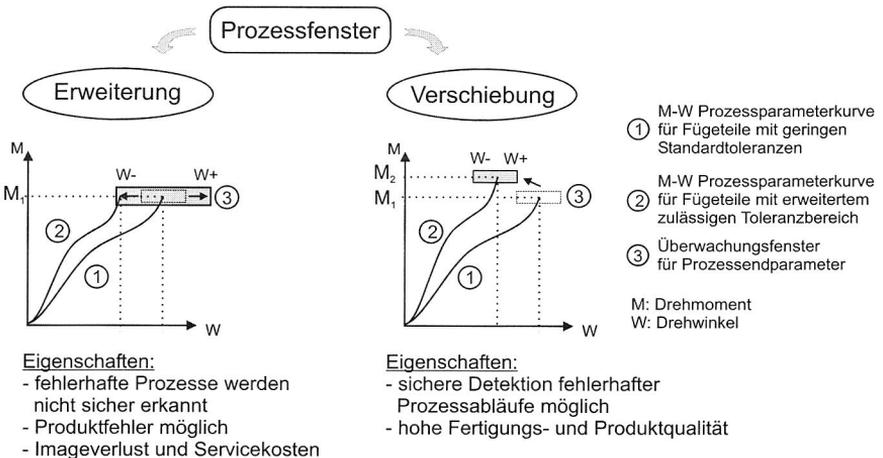


Bild 48: Strategien zur Prozessfensteranpassung in Gerätesteuern am Beispiel der Schraubtechnik

Als Überwachungsparameter wird der Drehwinkel, d.h. die Anzahl an Schraubumdrehungen verwendet. Liegt der Drehwinkel nach Erreichen des Zielwertes  $M_1$  in einem vorher definierten Überwachungsbereich/ -fenster ③, dann wird die Verschraubung als in Ordnung (i.O.) erkannt, andernfalls wird ein Fehler mit nicht in Ordnung (n.i.O.) angezeigt. Beim Auftreten von zunehmenden Toleranzabweichungen in den Fügebauteilen, im

vorliegenden Beispiel sind dies Dickentoleranzen, kann es zur Verschiebung von Prozesskurvenverläufen ② und damit zu Prozessfehlern kommen. Dies führt zu hohen Qualitätskosten. Die betriebliche Praxis zeigt, dass im Falle häufiger Prozessstörungen infolge von Bauteiltoleranzen die Tendenz besteht, den zulässigen Wertebereich für die Überwachungsparameter und damit das Überwachungsfenster zu verbreitern ③.

Es erfolgt eine *Erweiterung (Enlargement)* der zulässigen Parametergrenzwerte für die Überwachungsparameter, d.h. eine Verbreiterung des Prozessfensters. Diese Erweiterung hat den Vorteil, dass sie einfach durchzuführen und bei nahezu allen konventionellen Montagegeräten praktikabel ist. Das Störpotential von automatisierten Anlagen lässt sich auf diese Art reduzieren. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch in einer starken Schwankungsbreite der Montageergebnisse, so dass die Produktqualität starken Schwankungen unterworfen ist. Als Folge kann dies zu Funktionsausfällen und Reklamationen durch den Kunden führen.

Ein alternativer Ansatzpunkt besteht in der *Verschiebung (Translation)* der Prozessfenster (Bild 48, rechts). Diese Translation führt zu einer Anpassung des Zielwerts der Steuergröße und damit lediglich zu einer Verlagerung des ursprünglichen Prozessfensters. Im Bild 48 ist dieser Sachverhalt durch den Übergang des Endwerts der Steuergröße von  $M_1$  zu  $M_2$  dargestellt. Die Produktqualität weist eine reduzierte Streubreite auf, während das Störpotential in automatisierten Montagesystemen abnimmt.

Diese Verschiebung erfolgt zielgerichtet in Abhängigkeit der montagerelevanten Werkstückmerkmale. Um eine automatische Anpassung der Prozessparameter möglich machen zu können, müssen *Prozesszusammenhänge* zwischen den Fügestelleneigenschaften der zu montierenden Bauteile und den optimalen Fügeprozessparametern rechnerintern abgebildet werden. Zur Abbildung von Parameterabhängigkeiten mit geringer Komplexität, d.h. Fügeparameter in Abhängigkeit einer oder zweier Einflussgrößen (ohne Wechselwirkungen), kann eine *tabellarische oder funktionale Verknüpfung* der Parameter gewählt werden. Die Montageeinflussgrößen können dabei quantitativer oder auch qualitativer Natur sein. Somit lässt sich auch auf Fügeartikelchargen von unterschiedlichen Lieferanten mit unterschiedlicher Qualität flexibel reagieren. Das Bild 49 zeigt exemplarisch die quantitativen Zusammenhänge der in Kap. 3.3.2 beschriebenen Versuchsergebnisse zum Stanznieten toleranzbehafteter Aluminiumbleche in tabellarischer Form. Diese numerische Wertezuordnung erfolgt durch den Prozessspezialisten in der Montagezelle. Die Eingabemaske der neu entwickelten Steuerungssoftware enthält neben der Wahlmöglichkeit des Fügeverfahrens insbesondere die Eingabemöglichkeit von festen und variablen Prozesseinflussgrößen sowie Parameterzuweisungen nach der Ampel-Methode.

*Einsatz von Expertensystemen oder Neuronalen Netzen zur Prozessmodellierung*

Bei steigender Komplexität der Abhängigkeiten zwischen Bauteileigenschaftsmerkmalen, Prozessparametern und bei Wechselwirkungen von Einflussgrößen können leistungsfähigere Softwareinstrumente wie *Expertensysteme* oder *Neuronale Netze* zur Prozessmodellierung eingesetzt werden. *Expertensysteme* eignen sich zur Abbildung formalisierbaren Wissens, während *Neuronale Netze* ein leistungsfähiges Werkzeug zur rechnerinternen Verarbeitung nicht formalisierbaren Wissens darstellen.

**Numerische Zuordnung der Stanznietparameter in tabellarischer Form**

*Ampel-Methode*

	Prozessparameter z	Bauteileigenschaften x
Standardbereich	170 bar	2,0 - 2,2 mm
Erweiterter Bereich	185 bar	2,21 - 2,4 mm
Unzulässiger Bereich	-	> 2,4 mm

**Wahl des Fügeverfahrens**

Stanznieten

**Allgemeine Fügeteileingaben:**

1) Fügeteilwerkstoff und Hilfsfügeteil  
oder  
2) Montagefertigteilbezeichnung (Nr.)

Werkstoff BT 1: AA 6016-T4

Werkstoff BT 2: AA 6016-T4

Werkstoff BT 3:

Hilfsfügeteil: Halbhohlniet mit Senkkopf 5x5,5

Fügeteile: BT1 + BT2

**Eingabe der Fügeteilmerkmalswerte mit zugehörigen Prozessparameterwerten:**

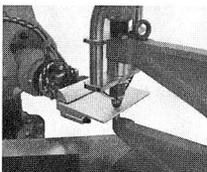
Fügestelle IST-Wert:

X1: 2,00 bis 2,20 mm

X1: 2,21 bis 2,40 mm

X1: > 2,40 mm

**Parameter-Eingabemaske Montagesteuerung**



Prozessparameterwert

Setzdruck: 170 bar

Setzdruck: 185 bar

Ausschleusen

Bild 49: Einfache numerische Zuordnungsalternativen zwischen Bauteileigenschaft und Prozessparameter

Um diese Programme als Regler für die adaptive Montage nutzen zu können, muss eine Schnittstelle zwischen den Softwaretools und der Gerätesteuerung implementiert werden. Zudem ist zu beachten, dass in diesen Fällen der Systemaufbau und die Pflege der Datenbasis mit einem nicht unerheblichen Aufwand an Fachpersonal verbunden ist. Bei der Realisierung des Konzepts der adaptiven Montage wurden primär singuläre Abhängigkeiten modelliert und somit auf den Einsatz dieser Programme verzichtet.

## 4.2 Reaktive Verfügbarkeitssicherung mittels mehrstufiger Fehlerreaktionsstrategien

Ziel ist der schnelle Wiederanlauf von automatisierten Montageanlagen nach einer Prozessstörung. Hierfür können *ex-post* wirkungsvolle Steuerungsmaßnahmen getroffen werden. Zudem lassen sich die aufbereiteten Informationen über Störungsursachen zur zukünftigen Störungsvermeidung nutzen. Eine mehrstufige Fehlerreaktionsstrategie enthält Funktionen zur Fehlerursachenanalyse und im Falle *werkstück- oder hilfzüge- teilbedingter* Störungen:

- Strategien zur Prozesswiederholung, u.U. mit einem neuen Fügehilfsmittel
- Dynamischer Einsatz von Inline-Messsystemen zur Qualitätsbeurteilung der Fügestelle und Anpassung der Fügeparameter
- Ausschleusen fehlerhafter Fügeteile an spezielle Kontroll- und Reparaturarbeitsplätze
- Information übergeordneter Instanzen, z.B. Leitstand
- Statistische Auswertung

Ergänzend zu den Maßnahmen für eine proaktive Prozessparameternachführung werden fügeprozessspezifische Fehlerreaktionsstrategien am Beispiel der lösbaren Schraubtechnik und der prinzipiell nicht lösbaren Stanzniettechnik diskutiert.

### Reaktionsstrategien im Falle von Prozessstörungen beim *Verschrauben*

Für lösbare Verbindungstechniken wie der Schraubtechnik sind die Reaktionsmöglichkeiten relativ breit gefächert. Im Falle einer fehlerhaften Verschraubung kann eine erste Reaktionsstrategie

- im Lösen und wiederholten Anziehen der Verbindung mit den gleichen Schraubparametern bestehen. Ist dieses Vorgehen nicht erfolgreich, dann kann
- das Fügehilfselement gegen ein Neues ausgetauscht und der Schraubvorgang wiederholt werden. Bei Erfolglosigkeit dieser einfachen Reaktionsmaßnahmen kann die Aktivierung von
- sensorbasierten Messsystemen zur Beurteilung der Schraubgewindegüte erfolgen, soweit vorhanden. Danach erfolgt das wiederholte Anziehen der Verbindung mit den angepassten Schraubparametern.

Sind alle Reaktionsstrategien wirkungslos, so bleibt in der untersten Reaktionsstufe nur das Ausschleusen der Bauteile.

### Reaktionsstrategien im Falle von Prozessstörungen beim *Stanznieten*

Da es sich beim Stanznieten um eine unlösbare Verbindungstechnik handelt, scheidet Wiederholstrategien von vornherein aus. Im günstigsten Fall ist die Anzahl der Nietverbindungen in den Fügeteilen überdimensioniert, so dass eine einzelne fehlerhafte Nietung toleriert werden kann. Eine weitere Ausnahme besteht darin, dass der Stanzniet mit erhöhter Setzkraft nochmals „nachgedrückt“ werden kann, ohne dass ein neuer Niet zugeführt wird. Daneben existieren unterschiedliche *Reparaturkonzepte* im Falle einer fehlerhaften Stanznietverbindung:

Die erste Reparaturalternative besteht im Ausstanzen der fehlerhaften Nietstelle, wobei eine Lochung der beiden Fügepartner erfolgt, die im Durchmesser größer als der Stanznietkopf ist. In diese Vorlochung kann dann beispielsweise ein *Blindniet* eingesetzt werden. Dies erfordert jedoch eine zusätzliche gerätetechnische Ausstattung für die Stanzmaschine und das Blindnietgerät.

Eine zweite Alternative besteht im Setzen eines *zusätzlichen Stanznietes*, neben der fehlerhaften punktförmigen Nietverbindung. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass der fehlerhafte Niet geometrisch im Fügepart nicht „stört“, d.h. die Optik und Funktion des Produktes nicht beeinträchtigt. Gegebenenfalls kann der Niet auch mit einer speziellen Punktschweißvorrichtung am Kopf fixiert und herausgezogen werden. Ob ein zusätzlicher Niet als Reparaturlösung zulässig ist, hängt auch von den Produkthanforderungen bezüglich der statischen und dynamischen Festigkeit ab. Die Konstruktionsabteilung muss die zulässige Reparaturlösung im Vorfeld fügstellenbezogen freigeben und eine entsprechende Reparaturstelle für jede Nietverbindung räumlich festlegen.

Hierbei handelt es sich um *einstufige* Reaktionsstrategien, da nach einer erfolglosen Reparatur meist keine weiteren Reparaturmaßnahmen sinnvoll sind. Wenn alle Reaktionsstrategien ausgeschöpft sind, bleibt in der untersten Reaktionsstufe nur das automatische Ausschleusen der Bauteile zur manuellen Nacharbeit oder Verschrottung übrig.

### 4.3 Steuerungstechnische Systemkomponenten

Die Anlagenablaufsteuerung stellt das zentrale Nervensystem dar, über das alle Montagekomponenten miteinander vernetzt sind. Im vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass es zur Umsetzung der adaptiven Prozesssteuerung hard- und softwaretechnischer Erweiterungen im automatisierten Montagesystem bedarf. Zunächst steht die Frage im Mittelpunkt, wie das Zusammenspiel der einzelnen Steuerungskomponenten aussieht und welche Komponenten von diesen Erweiterungen betroffen sind. Nachfolgend werden daher die wesentlichen steuerungstechnischen Aspekte von Hardware- und Softwarekomponenten mit Relevanz für die adaptive Prozesssteuerung dargestellt.

#### 4.3.1 Steuerungshardware Zellenrechner, SPS und Gerätesteueringen

Die vorherrschende Vernetzungsstrategie für Automatisierungskomponenten in Montagesystemen beinhaltet eine *dezentrale Ablaufsteuerung* (Bild 50, links). Die steuerungstechnische Verkettung der Gerätesteueringen, Sensoren und Aktoren erfolgt über eine SPS, die den Montageablauf in der Anlage koordiniert. Der Signal- und Datenaustausch erfolgt auf der Steuerungsebene über einen Feldbus oder die Direktverdrahtung. Der separate Montagezellenrechner sorgt für die Prozessvisualisierung und Anbindung an die Leitebene über Ethernet.

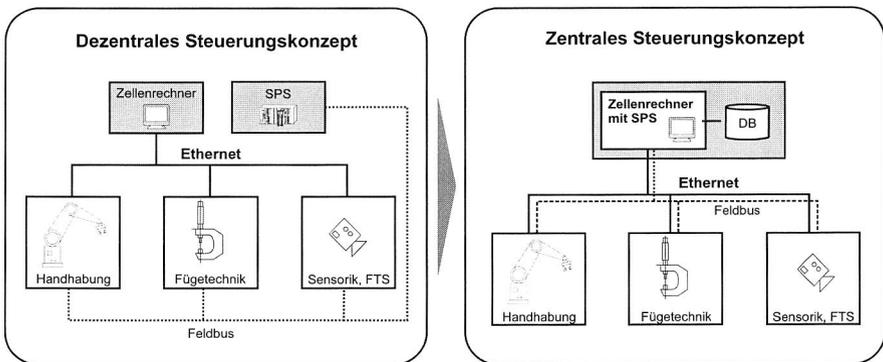


Bild 50: Trends bei der steuerungstechnischen Vernetzung von Montagesystemen

Die Hardware-SPS wird über einen *Feldbus* mit den Automatisierungskomponenten physikalisch und steuerungstechnisch verbunden. Automatisierungskomponenten, die über keinen direkten Feldbusanschluss verfügen, können durch digitale und analoge Ein-/Ausgangsmodule über einen Feldbus angesteuert werden. Die Ein- und Ausgänge der Betriebsmittelschnittstelle der Automatisierungskomponenten werden hierzu direkt mit den Feldbusmodulen (I/O-Module) verkabelt. Die Direktverdrahtung von Automati-

sierungskomponenten verliert zunehmend an Bedeutung, da die Anzahl freier Ein-/ Ausgänge an den Gerätesteuern häufig klein, der Verdrahtungsaufwand sehr hoch und die Flexibilität bezüglich des Austausches von Systemkomponenten gering ist. Eine *konventionelle Hardware-SPS* ist eine kompakte, robuste Steuerungskomponente die über ein spezielles Programmiergerät (PG) programmiert wird. Eine eigene Bedienoberfläche ist nicht vorhanden. Der Vorteil der Hardware-SPS liegt in der Störungsunempfindlichkeit und in der platzsparenden Bauweise. Nachteilig ist die schwere Zugänglichkeit, da die Steuerung und das Steuerprogramm stark abgekapselt sind.

In den letzten Jahren ist die Leistungsfähigkeit von PC-Systemen stark gestiegen, während die Kosten rückläufig waren. Dies ließ PCs für industrielle Einsatzbereiche in Robotersteuerungen und als SPS-Ersatz interessant werden. Aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen in der Fertigung sind konventionelle Office-PC's hierfür jedoch nicht geeignet. Es wurden spezielle *Industrie-PC's* (IPC) entwickelt, die den EMV-Ansprüchen genügen. Da hier ebenfalls handelsübliche Hardwarekomponenten (Mainboards etc.) zum Einsatz kommen, sind diese kostengünstig. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Anbietern leistungsfähiger, echtzeitfähiger SPS-Software für IPCs.

Mit zunehmendem Einzug der IPCs in die Produktionstechnik, findet verstärkt eine Übernahme von SPS-Funktionalitäten durch den Zellenrechner statt. Damit erfolgt ein Übergang von der dezentralen zur *zentralen Steuerungsstruktur* mittels Montagezellenrechner (Bild 50, rechts). Die installierte Soft-SPS stellt dabei einen zusätzlichern Task dar, der auf dem Zellenrechner (IPC) läuft und die Montageablaufsteuerung übernimmt. Zudem erfüllt der IPC die konventionellen Aufgaben wie Leitstandsanbindung und Visualisierung. Hierdurch lassen sich Investitionskosten und Servicekosten sparen. In kleineren Montageanlagen kann zusätzlich eine Verschmelzung des Zellenrechners mit der Soft-SPS Funktionalität und einer PC-basierten Robotersteuerung stattfinden. In diesem Fall übernimmt der IPC zudem noch komplexe Achssteuerungsaufgaben bei Handhabungsgeräten.

#### *Feldbusebene und Ethernetkommunikationsebenen*

Typisch für die Kommunikation auf der *Feldbusebene* ist, dass die Signale sehr schnell, d.h. in Echtzeit übertragen werden müssen. Dabei handelt es sich überwiegend um kleine binäre Datenblöcke. Typischerweise werden Signale für die Auswahl der Montageprogramme, die Start- und Stopfbefehle hierzu sowie das Feedback zum Prozessergebnis bidirektional übermittelt. Zusätzlich können jedoch auch analoge Sensorsignale übertragen werden. Weit verbreitete Feldbusse sind Profibus, Interbus etc.

Intelligente Montagekomponenten wie Robotersteuerungen, moderne Fügegerätesteuerungen verfügen zudem über eine *zweite Kommunikationsebene*. Über diese kann eine:

- Programmierung und Einstellung der Prozessparameter
- Kontrolle der laufenden Prozessdaten
- Diagnose im Störfall

der Gerätesteuerung erfolgen. Zur Programmierung der Fügeprozessparameter in Gerätesteuerungen existieren prinzipiell *drei Alternativen*:

- Manuelle Eingabe über Benutzerschnittstelle mit Tasten, Drehregler und Display
- Eingabe durch ein Programmiergerät oder Notebook
- Eingabe über Zellen-PC oder vom PC der Arbeitsvorbereitung über Intranet

Die Vernetzung auf dieser Ebene geschieht heute meist über *Ethernet*, früher war es die serielle Schnittstelle. Für die Umsetzung der adaptiven Prozesssteuerung ist ein Zugriff des Zellenrechners sowohl über Ethernet, als auch über die klassische serielle Schnittstelle auf die Fügegerätesteuerung vorzusehen. Alternativ existieren zudem Automatisierungskomponenten bei denen die Prozessparametereingabe direkt über eine geräteinterne Benutzerschnittstelle mit Tasten und Display erfolgt. Eine solche Gerätesteuerung lässt sich nicht in das Konzept der stufenlosen adaptiven Prozesssteuerung integrieren, hier hilft nur ein Austausch der Steuerung.

Größere Datenmengen, wie sie bei der Programmierung und Gerätediagnose auftreten, können über Ethernet sehr schnell ausgetauscht werden. Prozessparameter können modifiziert werden und eine Dokumentation von Prozessdaten und Prozesskurvenverläufen ist möglich. Heute geht der Trend bei den Herstellern „intelligenter“ Automatisierungskomponenten zunehmend dahin, die Gerätesteuerung mit einem eigenen Web-Server auszustatten. Als Kommunikationspartner reicht ein PC mit einem konventionellen Web-Browser aus. Hierdurch entfällt die aufwendige Installation von herstellerspezifischer Kommunikationssoftware auf dem Zellenrechner. Weiterhin wird es ermöglicht, von einem beliebigen PC im Intranet oder vom Internet auf die Automatisierungskomponenten zuzugreifen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung zur Ferndiagnose im Störfall und zum montageübergreifenden Datenaustausch mit Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung (Kap. 4.2, Kap. 5.3 ff). Jedoch sind *Sicherheitsvorkehrungen* erforderlich um einen unbefugten Datenzugriff zu unterbinden. Aus diesem Grund werden häufig nur lesende Funktionen zur Datenabfrage, nicht aber schreibende Funktionen zur Änderung der Prozessparameter an den Montagegeräten zugelassen.

Charakteristisch für die Kommunikation auf dieser Ebene ist es, dass die Signale nicht in Echtzeit übertragen werden müssen. Es handelt sich überwiegend um größere Da-

tenmengen wie Geräteprogramme und Prozessverlaufsdaten, die zwischen Montagezellenrechner und PPS-Rechner oder in andere Bereiche übertragen werden.

Es laufen zudem intensive Bemühungen seitens der Hersteller von Automatisierungskomponenten, Ethernet echtzeitfähig zu machen. Durch industrial Ethernet ließen sich beide Kommunikationsebenen verschmelzen und damit Kosten sparen. Eine zweifache Verkabelung von Steuerungskomponenten ( Bild 50, rechts) wäre damit überflüssig.

Neben dem zentralen Steuerungskonzept bedarf es für die Prozessparameteradaption einer leistungsfähigen *Kommunikationssoftware*, die über standardisierte Schnittstellen einen Datenaustausch auf beiden Steuerungsebenen ermöglicht und diesen koordiniert.

#### **4.3.2 Steuerungssoftware Ablaufsteuerung, OPC-Datenschnittstelle und Kommunikationsinterface *Motion***

Der Montagezellenrechner stellt auf den beiden dargestellten Steuerungsebenen die Kommunikationsschnittstelle zu den unterlagerten Gerätesteuern dar. Weiterhin bildet er das Benutzerinterface (HMI) für den Anlagenbediener. Er übernimmt somit in modernen Montageanlagen mehrere Funktionen und verfügt über eine Vielzahl unterschiedlicher Softwaretools zur Funktionserfüllung. Nachfolgend werden die, für die adaptive Montagesteuerung relevanten Softwaretools erläutert. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Kommunikationsinterface „Motion“ bildet eine verbindende Klammer bzw. einen Framework um die einzelnen Softwaretools. Dies ist Voraussetzung für die Anpassung technologischer Fügeprozessparameter und damit für die adaptive Montage flächiger Leichtbauteile.

##### *Geräteparameterprogramm:*

Die Programmierung der Prozessparameter von Gerätesteuern wie der Schraubersteuerung von Fa. Bosch oder der Stanznietgerätesteuern von Fa. Böllhoff erfolgt mit herstellereigenen Softwaretools. Die Software zur Parametereinstellung läuft meist auf einem Notebook mit Windows-Betriebssystem. Es gibt keine standardisierenden Normen zur Gestaltung dieser Programme und Schnittstellen. Zur Durchführung von Parameteränderungen in den Gerätesteuern durch ein übergeordnetes Programm (z.B. Kommunikationsinterface) müssen dort entsprechende Softwareroutinen zur Parametereinstellung integriert werden.

##### *Montageablaufprogramm:*

Der Montageablauf wird in SPS-Programmen festgelegt. Dieses Ablaufprogramm und die zugehörige SPS bilden das Herzstück einer Montageanlage. Es wird die Reihenfolge bestimmt, in der Ausgangssignale in Abhängigkeit von Eingangssignalen gesetzt werden. Dies betrifft den Materialfluss in der Anlage, die Roboter und die Fügegeräte,

sofern sie nicht direkt über die Robotersteuerung angesprochen werden. Die zur Programmerstellung eingesetzten Programmiersprachen Ablaufsprache (AS), Anweisungsliste (AWL), Kontaktplan (KOP) etc. sind nach IEC 1131-3 genormt. Mitunter werden aber auch herstellerspezifische Programmiersprachen wie STEP für die Siemens-SPS S7 eingesetzt. Nach der Ablaufprogrammierstellung am PC wird der Programmcode kompiliert, d.h. speziell für die SPS-Steuerungshardware übersetzt, und in die Echtzeitumgebung geladen. Während des laufenden Montagebetriebs sind somit keine Änderungen im SPS-Programm mehr möglich. Damit müssen alle Funktionen zur adaptiven Prozesssteuerung und die Entstörstrategien bereits vorab im SPS-Programm hinterlegt werden. Dies bedeutet aber nicht, dass alle Prozessparametereinstellungen als fixer Wert gespeichert sein müssen. Es kann mit Variablen gearbeitet werden, denen fall-spezifisch von einem übergeordneten Programm (Kommunikationsinterface) Parameterwerte zugeordnet werden. Die SPS-Programmierstellung findet i.d.R. auf einem PC mit Windows-Betriebssystem statt. Das SPS-Programm selbst läuft auf einem Echtzeit-Betriebssystem in der SPS.

Zunächst stellt sich die Frage, über welche Softwareschnittstelle eine Kommunikation zwischen SPS, Gerätesteuerung und dem übergeordneten Kommunikationsinterface ablaufen kann. Im Bereich der Fertigungsprozessstechnik hat sich die standardisierte OPC- Softwareschnittstelle durchgesetzt.

##### *OPC-Softwareschnittstelle:*

OPC steht für „OLE for Process Control“ und bezeichnet einen Industriestandard für den Austausch von Daten zwischen Softwareanwendungen der Automatisierungstechnik. OPC basiert auf der, aus dem Officebereich bekannten OLE-Technologie. Bei OLE handelt sich um eine offene, erweiterbare Architektur, die auf dem Component Object Model (COM) basiert. Auf der Basis von OLE/COM können Softwareanbieter unabhängig voneinander Softwarekomponenten entwickeln, die später über diese Schnittstelle Daten austauschen können. DCOM (Distributet COM) stellt eine Erweiterung der COM-Technologien für den Datenaustausch über mehrere verteilte Rechner dar [39]. Durch die OPC-Spezifikation soll für Softwarehersteller eine einheitliche Datenschnittstelle definiert werden. Hierzu wurde 1996 die OPC Foundation in den USA gegründet, zu deren Mitgliedern heute fast alle namhaften Steuerungshersteller wie Siemens, Rockwell Automation, ABB etc zählen. Die OPC-Technologie bietet folgende Vorteile:

1. *Auflösung von Herstellerabhängigkeiten:* Bei konventionellen Steuerungslösungen wird für den Datenaustausch zwischen der Prozesshardware und einer Softwareapplikation ein herstellerspezifischer Treiber benötigt, der an das jeweilige Betriebssystem angepasst ist. OPC bietet jedoch ein Standardinterface, unabhängig von der konkreten Anwendung. Der Hersteller einer Hardwarekomponente braucht somit

nur noch *ein* OPC-Server-Interface implementieren und die Softwareentwickler müssen in ihre Applikationen nur noch eine OPC-Client-Schnittstelle integrieren. Somit entfällt das aufwendige Anpassen von Treibern, falls sich bei einer Automatisierungskomponente durch neue Produktrevisionen die Kommunikationsfunktionen ändern. Eine Anpassung in den existierenden Client-Anwendungen ist nicht erforderlich. Der Anwender kann zudem frei zwischen verschiedenen Anbietern von Hard- und Softwarekomponenten wählen und muss nicht mehr auf die Verfügbarkeit passender Treiber achten. Durch diese Standardschnittstelle kann sich der Anwender allein auf wirtschaftliche und funktionale Auswahlkriterien konzentrieren.

2. *Multi-Client Zugriff:* Der OPC-Server ist in der Lage, die Anfragen von mehreren Clients zu bearbeiten. Somit können die vorhandenen Daten beispielsweise von einem Messsystem, einer Visualisierung oder einer Datenbank-Archivierung mehrfach genutzt werden. Der OPC-Server nutzt hierfür die COM-Technologie des Betriebssystems (Microsoft) zur Multi-Client-Fähigkeit.
3. *Netzwerkfähigkeit:* Um über mehrere Netzwerke kommunizieren zu können, nutzt OPC die DCOM-Technologie. Dabei verbirgt die DCOM-Laufzeitbibliothek die Zugriffsdetails. Der OPC-Client bemerkt somit nicht, ob es sich um eine lokale oder eine verteilte Datenquelle (Server) handelt.

Voraussetzung für die Kommunikation über die OPC-Schnittstelle ist die Realisierung der Schnittstelle in den einzelnen Softwaretools des Montagezellenrechners. Die OPC-Schnittstelle wurde von den meisten SPS-Softwareanbietern bereits integriert. In die Programmiersoftware von Fügegerätesteuern erfolgt die Umsetzung bislang noch nicht, weshalb eigene Programmroutinen für die Prozessparametereinstellung geschrieben werden müssen. Zudem ist die Umsetzung der Schnittstelle im übergeordneten Kommunikationsinterface *Motion* erforderlich.

#### *Kommunikationsinterface „Motion“:*

Das Kommunikationsinterface *Motion* (= adaptive Montagereaktionsstrategien) stellt das Bindeglied zwischen der Ablaufsteuerung und den Gerätesteuern dar (Bild 51). Es beinhaltet ein Prozessmodell in dem die Parameterwerte und die Freigabe seitens der Konstruktion und Arbeitsvorbereitung für die Prozessparameteradaption hinterlegt sind. Zudem erhält das Interface Qualitätsdaten zu eingehenden Fügeteilen bzw. Teilechargen, entweder direkt über die Qualitätskontrolle (z.B. Fertigungsdaten) oder über Inline-Messsysteme in der Montageanlage. Im Kommunikationsinterface definiert das Objektmodell die statischen und beschreibenden Informationen der relevanten Objekte in einem Montagesystem. Es beinhaltet im Wesentlichen die Identität der Objekte, deren Beziehungen untereinander, die jeweiligen Ausprägungen und die Operationen, die das Objekt ausführen kann. Ein Objektmodell bildet den Rahmen, an dem

einerseits der dynamische Ablauf, aber auch die funktionalen Abhängigkeiten definiert werden. Im betrachteten Bereich der Montagesysteme sind typische Objekte die einzelnen Füge-teile oder eine Maschine, mit der ein bestimmter Montageschritt durchgeführt wird. Zum Aufbau des Informationsmodells wird ein solcher objektorientierter Ansatz verfolgt, der die Modellierung des Montagesystems, der Prozesse und des Informationsflusses beinhaltet und darüber hinaus zugeordnete fehlertolerante Montage- bzw. Entstörstrategien beinhaltet.

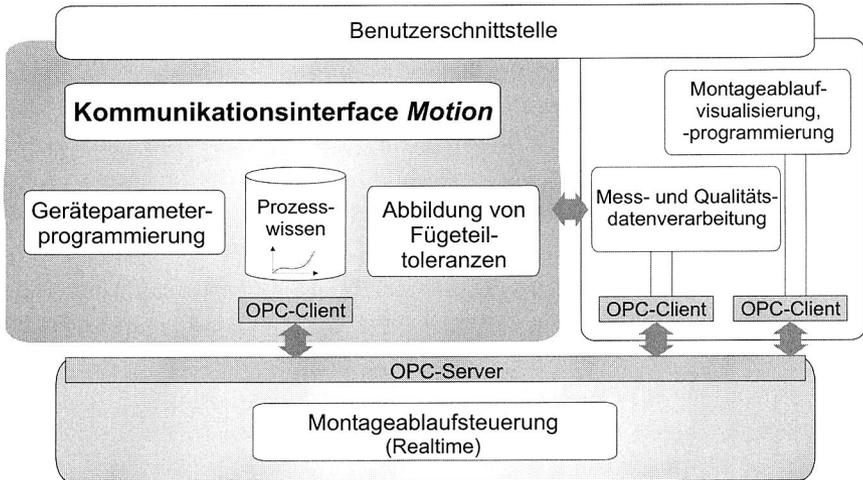


Bild 51: Funktionen des Kommunikationsinterfaces „Motion“

Der wesentliche Nachteil einer alleinigen Konzentration auf maschineninterne Prozessregelkreise liegt zum einen im hohen Sensorikaufwand für redundante Messsensoren in den Fertigungs- und Montagezellen. Sensoren stellen allgemein eine zusätzliche Komponente dar, die Störungen oder einen Ausfall verursachen kann. Zum anderen treten verkürzte Reaktionszeiten bei der Kompensation von Bauteilabweichungen durch die Mess- und Regelzeiten auf. Um deren Wirksamkeit nachhaltig verbessern zu können, werden mit einer *montageübergreifenden Vorsteuerung* die Möglichkeiten der Prozesssicherung erweitert. Durch eine fügeteilbezogene bzw. chargenbezogene Informationsübertragung aus den vorgelagerten Fertigungsschritten können zeitlich vorlaufende Korrekturmaßnahmen angestoßen werden.

## 5 Multilateraler Informationsaustausch in der Prozesskette von der Konstruktion bis zur Montage

### 5.1 Montagevorgeschaltete Unternehmensbereiche und deren informationstechnische Verketzung mit der Montage

Der klassische Produktentstehungsprozess startet im Bereich Entwicklung & Konstruktion. Dort werden die notwendigen Fertigungsinformationen in Form von Zeichnungen und Stücklisten erstellt. Im Anschluss daran erfolgt in der Arbeitsvorbereitung die Fertigungsplanung und die terminliche Einlastung mittels PPS in die Fertigung, Montage und ins Prüffeld. Der Arbeitsablauf und der Informationsfluss sind primär unidirektional zur Montage hin gerichtet. Eine Informationsrückführung in montagevorgelagerte Bereiche erfolgt meist sporadisch bei Prozessstörungen wie Zeichnungs- oder Fertigungsfehlern.

Es zeigt sich, dass die konventionelle *Steuerung* von Fertigungs- und Montageprozessen relativ starr abläuft und in dessen Folge nur unbefriedigende Ergebnisse liefern kann. Vorteilhafter ist der Einsatz von *Regelstrukturen*, die die laufenden Prozesse dynamisch den situativen Gegebenheiten anpassen oder Informationen aus vorhergehenden Produktionsergebnissen nutzen. Das regelungstechnische Feedback von Informationen erfolgt in der Montage meist nur an direkt vorgelagerte Arbeitsbereiche wie der Fertigung, d.h. die Informationsweitergabe greift nur sehr kurz. Zudem erfolgt die Informationsweitergabe in der Praxis häufig sporadisch und wenig systematisch. Diese klassische Informationsverketzung verfügt über den Nachteil, dass die einzelnen Bereiche weitestgehend isoliert voneinander arbeiten. Ein wesentlicher Optimierungsansatz besteht in der:

- Erarbeitung einer Systematik für die zyklische Informationsrückkopplung
- Einbeziehung aller montagevorgelagerten Bereiche in die adaptive Montagesteuerung und rechnerbasierte Informationsrückführung fertigungs- und konstruktionsrelevanter Informationen
- Filterung und Verdichtung relevanter Informationen, um eine Datenflut zu vermeiden

Die Kombination des in Kap. 4 beschriebenen maschineninternen Regelkreises mit einem montagesystemübergreifenden Prozessregelkreis (Bild 52) bietet zahlreiche Vorteile. Auf potentielle Störungsursachen kann auf Montagezellenebene frühzeitig präventiv reagiert werden und damit die Anlagenverfügbarkeit erhöht werden. Falls während der *Teilefertigung* von Fügekomponenten signifikante Trends oder Abweichungen vom Sollwert mittels SPC beobachtet werden, kann durch die übergeordnete Montageprozesslogik ein mögliches Störpotential in der Montage frühzeitig erkannt und darauf reagiert werden.

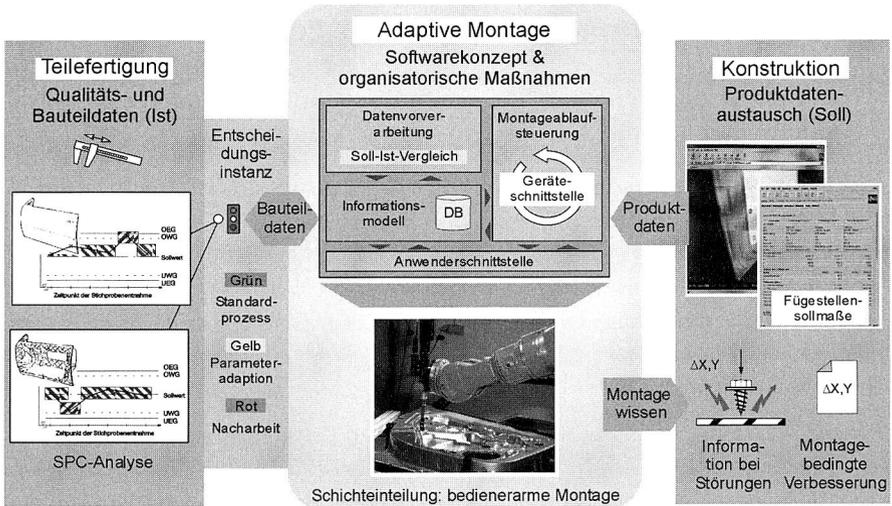


Bild 52: Bereichsübergreifende Montageprozesskoordination

Auf diesen Erkenntnissen beruhend kann die *organisatorische und personelle Planung* der Montage sowie die logistische Teilebereitstellung je nach Ausprägung und Störpotential erfolgen. Zudem bilden die fügeteil- und produktbezogenen Informationen die Datenbasis für montageinterne Steuerungsmaßnahmen zur präventiven Fügeprozessparameteranpassung nach der *Ampelmethode* (siehe Kap. 3.3 und Kap. 4) und damit zur Störungsvermeidung. Eine weitere Strategie besteht in der *endmontagenahen Zufertigung* von Fügepartnern geringer Komplexität (siehe Kap. 5.2).

In der entgegengesetzten Richtung können Informationen über Montageprozessstörungen zur schnellen Korrektur von Fertigungsprozessen genutzt werden. Weiterhin wird eine informationstechnische Verknüpfung konzipiert, die einen bidirektionalen Datenverbund zwischen *Konstruktion* und Montage erlaubt. Damit wird einerseits der Montage ermöglicht, flexibel auf Soll-Vorgaben aus der Konstruktion zuzugreifen. Andererseits kann eine schnelle, formal aufbereitete Rückmeldung montagerelevanter Verbesserungen für den Konstruktionsbereich erfolgen.

## 5.2 Informationsanforderungen in der Fertigung

Im Gegensatz zur konventionellen Montage, bei der die Einzelteile zufällig - statistisch verteilt - kombiniert werden und es dadurch zu wechselnder Produktqualität bzw. Montageproblemen kommen kann, werden bei der koordinierten, selektiven Teilebereitstellung gezielt die bestgeeignetsten Komponenten bereitgestellt. Die Strategie zur fehlertoleranten Montage beinhaltet somit eine koordinierte, intelligente *Bereitstellung der Füge-teile aus den Fertigungsprozessen*. Dabei richtet sich die Bereitstellung der Bauteile in der Montagezelle nach den ermittelten Fertigungstrends signifikanter Werkstückmerkmale mittels SPC, d.h. Toleranz-Istdaten. Die zeitliche Entwicklung montage- und funktionsrelevanter Füge-teilmerkmale wird erfasst und der übergeordneten Montageprozesssteuerung zugeführt (Bild 53). Diese Informationen werden mit den Toleranz-Sollvorgaben aus der Konstruktion sowie mit dem implementierten Prozesswissen zur Montage verglichen.

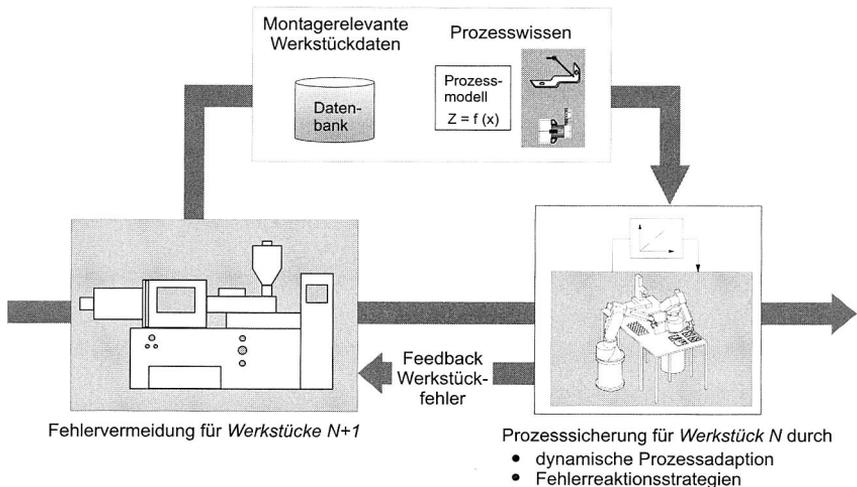


Bild 53: Informationsaustausch zur Anpassung der Montageprozesse an bekannte Fertigungstoleranzen und zur Informationsrückführung an die Fertigung

Werden während der Teilefertigung von Produktkomponenten signifikante Trends oder Abweichungen vom Sollwert beobachtet, können durch die übergeordnete Prozesslogik mögliche Störpotentiale erkannt werden, die bei der nachgeschalteten Montage dieser Bauteile auftreten können. Auf diesen Erkenntnissen beruhend erfolgt die *organisatorische und personelle Planung* der Montage sowie die logistische Teilebereitstellung je nach Ausprägung und Störpotential. Fügekomponenten, deren Parameter nahezu dem Sollwert entsprechen, werden dabei bedienerarmen Schichten zugeführt bzw. finden in

der automatisierten Montage Verwendung, da ein geringer bauteilbedingter Ausfall der Anlage vorliegt. Hingegen werden Bauteile, deren Merkmale stark trendbehaftet sind oder nahe an den Warn- bzw. Eingriffsgrenzen liegen in Schichten mit qualifiziertem Montagepersonal bereitgestellt. Durch eine fügeteilbezogene bzw. chargenbezogene Informationsübertragung aus den vorgelagerten Fertigungsschritten können so zeitlich vorlaufende organisatorische und prozesstechnische Maßnahmen in der Montage angestoßen werden. Die dazu notwendige *Datenübertragung* kann alternativ durch

- dezentrale Konzepte mittels elektronischer Werkstückdatenträger oder
- zentrale Konzepte mittels vernetzter Zellenrechner

realisiert werden. Diese fügeteilbezogenen Fertigungsinformationen bilden weiterhin die Datenbasis für montageinterne Steuerungsmaßnahmen zur *präventiven Fügeprozessanpassung* (siehe Kap. 4).

Eine weitere Strategie besteht in der *endmontagenahen Zufertigung von Fügeteilen* geringer Komplexität, um Handhabungsoperationen zu sparen und so die Prozesskette zu verkürzen. Dabei wird von einem komplexen Basisbauteil ausgegangen, welches bezüglich Materialkosten, Herstellungsaufwand, Prozesssicherheit oder Handling aufwendig herzustellen ist. An diesem komplexen Bauteil werden alle signifikanten Fügestellen vermessen und die bauteilspezifische reale Form und Lage der relevanten Funktionsflächen bestimmt. Durch einen Soll-Ist-Abgleich mit den im übergeordneten Prozesswissen gespeicherten Daten werden die einzelnen, montagerelevanten Abweichungen ermittelt. Nach Kenntnis der notwendigen Parameter kann anschließend die Fertigung der zu montierenden Einzelteile auf Maß gestartet werden. So werden beispielsweise Blechwinkel, deren Fertigungsprozess wesentlich leichter an die neuen Anforderungen angepasst werden kann, speziell gefertigt und das benötigte Lochbild exakt für die erforderlichen Befestigungsstellen eingearbeitet. Anschließend werden die einzeln aufeinander abgestimmten Komponenten synchron der Montage zugeführt und dort sicher und störungsfrei gefügt. Ein Nachteil dieser Strategie besteht jedoch in dem hohen Aufwand für die exakte Fügeteilvermessung, im Aufwand für die spezifische Zufertigung von Montagekomponenten und im logistischen Aufwand für Teiletransport und -bereitstellung. Zudem ist die Austauschbarkeit der Einzelkomponenten im Servicefall nur sehr eingeschränkt gegeben.

Aufgrund vielfältiger Überlagerungsmöglichkeiten hinsichtlich möglicher Fügestellentoleranzen der einzelnen Fügepartner und wegen der meist hohen Variantenzahlen im Endprodukt ist mit einer *Datenflut in der Montage* zu rechnen. Es muss daher bereits im Vorfeld sehr genau geklärt werden, welche Daten aus den Fertigungsbereichen ohne übermäßig großen Sensor- und Konvertierungsaufwand erfasst und den Montagestationen zielgerichtet bereitgestellt werden können. Zudem ist zu spezifizieren, welche Pa-

parameter und Abweichungen primär herangezogen werden müssen, um zeitlich vorlaufende Maßnahmen ergreifen zu können.

In entgegengesetzter Richtung kann ein schnelles *Feedback bezüglich erkannter Qualitätsprobleme* von Bauteilchargen von der Montage an die Fertigung oder an den Lieferanten zurückgegeben werden. Die Grundvoraussetzungen sind

- Kenntnisse über die Lieferteilcharge, Herkunft, Produktionszeitpunkt
- Direkte datentechnische Vernetzung
- Einheitliche Kommunikationsplattform (Software)

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so ist der Grundstock für eine informationstechnische Rückwärtskopplung von der Montage zur Fertigung mit dem Ziel der robusten Gestaltung von Produktionsprozessketten gelegt. Die geforderte einheitliche Kommunikationsplattform und datentechnische Vernetzung für den bilateralen bereichsübergreifenden Produkt- und Prozessdatenaustausch zwischen Montage und Fertigung kann ein *Produktdaten-Management-System (PDM)* bilden. Allerdings bedarf es einer Erweiterung des PDM-Systems zum Abbilden von Fertigungs- und Montageinformationen.

### 5.3 Informationsanforderungen in der Konstruktion

Der Konstrukteur muss eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen wie das Design for X (Dfx) und technische bzw. gesellschaftliche Trends bei der Produktentwicklung berücksichtigen [57], [63]. So lässt sich aktuell der Entwicklungstrend hin zu mechatronischen Systemen beobachten, die eine hohe Integrationsdichte elektronischer Funktionen in mechanischen Komponenten aufweisen, auch in der Montage [1]. Zur Beherrschung der Teilevielfalt bei OEMs steigt die Nachfrage nach Subsystemen bzw. Modulen wie Türmodule, Cockpit etc. die von den Zulieferern meist Just in Time (JIT) geliefert werden. Ein weiterer Trend in der Automobilbranche zeigt in Richtung Leichtbaukonstruktion (vgl. Kap. 2) und ökologische Produktgestaltung [60]. Der Einsatz innovativer Werkstoffsysteme wie die Hybridbauweise im PKW bedingt den Einsatz neuer Produktionsverfahren und Fügetechnologien. Dabei ist die Konstruktion beim Einsatz neuer Werkstoffe und Produktionsverfahren auf die Erfahrung und Zusammenarbeit mit nachgeschalteten Bereichen wie Versuchsfeld, Fertigung oder Montage angewiesen.

Die hohen Anforderungen an den Konstrukteur bedingen die Entwicklung und den Einsatz unterstützender Softwaretools, die Konstruktion und Berechnung integrieren [61]. Das *Design System mfk* [58] enthält beispielsweise umfassende Analyse- und Synthesefunktionen für die Entwicklungstätigkeit. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass neue Produkte die Kundenanforderungen erfüllen und zudem eine kostenminimale Pro-

duktion ermöglicht wird. Zur Unterstützung des Konstrukteurs wurde im SFB 396 ein *Assistenzsystem* [111] entwickelt. Dieses hilft dem Konstrukteur bei der Entscheidungsfindung durch multimediale Informationen und die Abbildung von Konstruktionsregeln. Ein wichtiger Erfolgsfaktor im Betrieb ist das aktive *Wissensmanagement* [67]. Zur Unterstützung des gesamten Produktentwicklungsprozesses werden zudem rechnergestützte Werkzeuge entwickelt, die beispielsweise auf *Workflow-Management-Systemen* beruhen [64]. Für die Unterstützung der Aufgabenstellungen bei der Produktentwicklung und im Fertigungsbereich kommen bislang meist sehr unterschiedliche Rechnerwerkzeuge zur Anwendung. Dabei handelt es sich weitestgehend um Insellösungen in den einzelnen Teilbereichen, die voneinander isoliert arbeiten. Ein wichtiger Entwicklungsschwerpunkt ist die Realisierung leistungsfähiger standardisierter Schnittstellen für den schnellen Informationsaustausch innerhalb der Konstruktion, aber auch hin zu nachgeschalteten Arbeitsbereichen.

Eine integrierende Funktion haben sog. *Produktdaten-Management-Systeme (PDM)* die heute zur Verwaltung von Zeichnungsdaten, Stücklisten sowie Projektdaten in der Konstruktions- und Planungsebene eingesetzt werden. Ein direkte Anbindung der Montageebene erfolgt bislang meist nicht, obwohl gerade hier der elektronische Zugriff auf zentral verwaltete Konstruktions- sowie Planungs- und Fertigungsdaten (Arbeitspläne, Maschinendaten, Qualitätsdaten) ein weiteres Integrationspotential bieten würde. Zur Abbildung von bidirektionalen Montageinformationen bedarf es einer Erweiterung des PDM-Systems. Die PDM-Software kann dann als Plattform zum Austausch von fügeteilbezogenen Daten zwischen Montage und Konstruktion sowie zwischen Montage und Fertigung via Intranet genutzt werden. Hierüber lassen sich dann montagerelevante Fügestellen-Solldaten (z.B. Toleranzen) aus der Konstruktion an die Montage bereitstellen. Weiterhin kann über das PDM-System eine Rückführung von Montagewissen in die Konstruktion erfolgen.

Alternativ besteht die Möglichkeit, die Informationen über einen *Web-Server* zugänglich zu machen. Über einen Browser kann dann vom Montagezellenrechner aus via Internet direkt auf fügerrelevante Produktdaten aus dem Konstruktionssystem (Catia, Pro/E, Solid Works etc.) zugegriffen werden. Die Browserlösung hat jedoch sicherheitstechnische Nachteile. Die zentrale Verwaltung von Projekt-, Konstruktions-, Fertigungs- und Montagedaten erfolgt somit nachfolgend in einem bereichsübergreifenden *PDM-System*.

## 6 Prototypische Implementierung des hierarchisch-adaptiven Steuerungskonzeptes in eine Roboterzelle

Zunächst wird der Aufbau der Versuchszelle mit Blick auf die Geräteausstattung und die Steuerungstechnik erörtert. Im Anschluss daran erfolgt die ausführliche Darstellung des Konzepts der adaptiven Prozessparameteranpassung mittels *Motion* und des bereichsübergreifenden Informationsaustausches über ein *PDM*-System.

### 6.1 Aufbau der roboterbasierten Montageversuchszelle

Am Lehrstuhl FAPS wurde eine Doppelroboterzelle zur Implementierung und Verifizierung des Konzepts der adaptiven, automatisierten Montage am Beispiel flächiger Leichtbauteile aufgebaut. In einer Beispielprozesskette (vgl. Bild 16) werden zunächst die PKW-Türkarosse sowie das Türmodul stanzengetietet. Im Anschluss daran wird das vormontierte Türmodul mit einer pneumatischen Greiferspinne aufgenommen und am Außenumfang eine Dichtmittelschnur aufgebracht. Das Türmodul wird in die Türkarosse (Türrohling) eingesetzt und mit einem zweiten Roboter automatisch verschraubt. Das Bild 54 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchszelle.

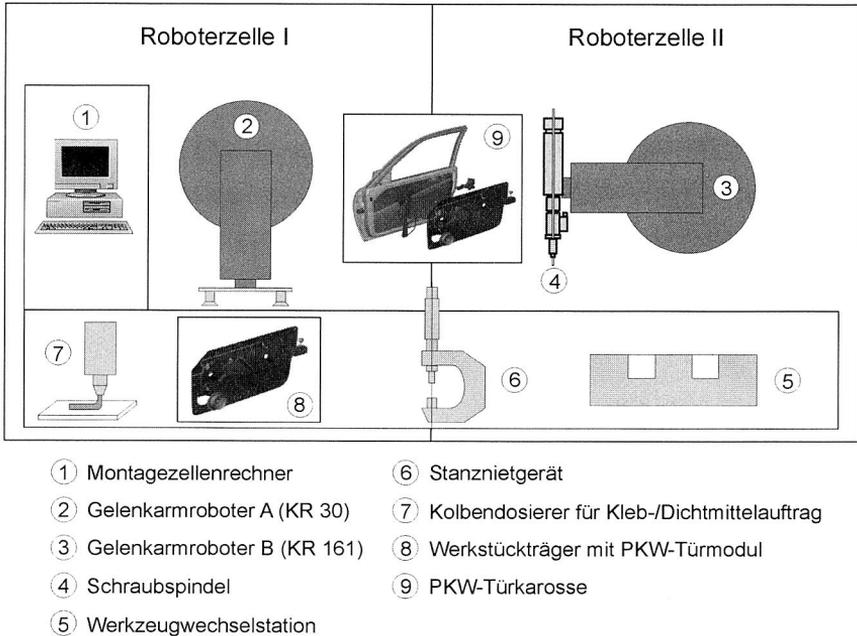


Bild 54: Schematischer Aufbau der Versuchszelle am Lehrstuhl FAPS

Als Handlingsgeräte für die flächigen Leichtbauteile und für die Fügwerkzeuge werden zwei sechssachsige Gelenkarmroboter der Fa. KUKA eingesetzt (Bild 54). Am Roboter ③ ist ein drehmomentgesteuertes, einspindeliges Schraubwerkzeug ④ der Fa. Bosch über einen Werkzeugwechselanschluss angebracht. An der Werkzeugwechselstation ⑤ kann das Schraubermundstück gewechselt oder die Schraubspindel abgelegt werden. Am zweiten Industrieroboter ② ist eine speziell entwickelte Greiferspinne mit federelastischer Aufhängung der Saugelemente und einer pneumatischen Zentriervorrichtung angebracht, die der Handhabung des Türmoduls dient. Die Zelle verfügt über einen Kolbendosierer der Fa. SCA für den volumengeregelten Auftrag von Kleb-/Dichtstoffen (Dichtschnur) ⑦ auf flächige Leichtbauteile. Weiterhin wurde die Zelle durch eine Stanznieteinheit ⑥ mit integrierter Prozessdatenüberwachung (Fa. Böllhoff) erweitert. Der PKW-Türrohling, in den der Modulträger einzusetzen ist, wird von einer Spannvorrichtung gehalten, die sich im gemeinsamen Arbeitsraum ⑨ der beiden Roboter befindet. Für die Ablaufsteuerung in der Montagezelle ist der Zellenrechner ① zuständig.

Entsprechend Bild 55 stellt der Zellenrechner die zentrale Steuerungsinstanz in der Montagezelle dar, die die Steuerimpulse an untergelagerte Gerätesteuern wie Roboter und Fügegeräte verteilt. Auf dem Zellenrechner sorgt die Soft-SPS *Codesys* der Fa. 3S zusammen mit dem Kommunikationsinterface *Motion* für einen reibungslosen Montageprozessablauf.

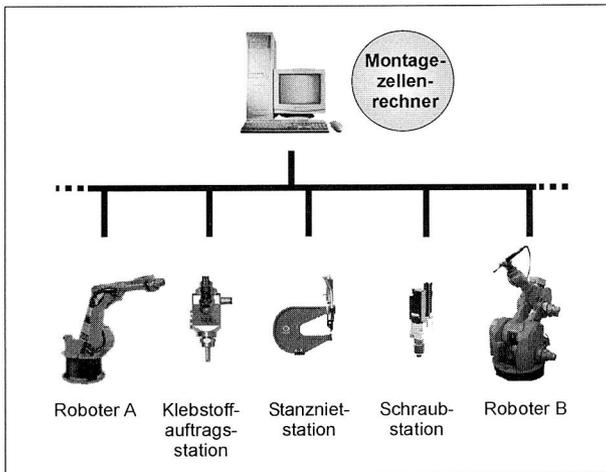
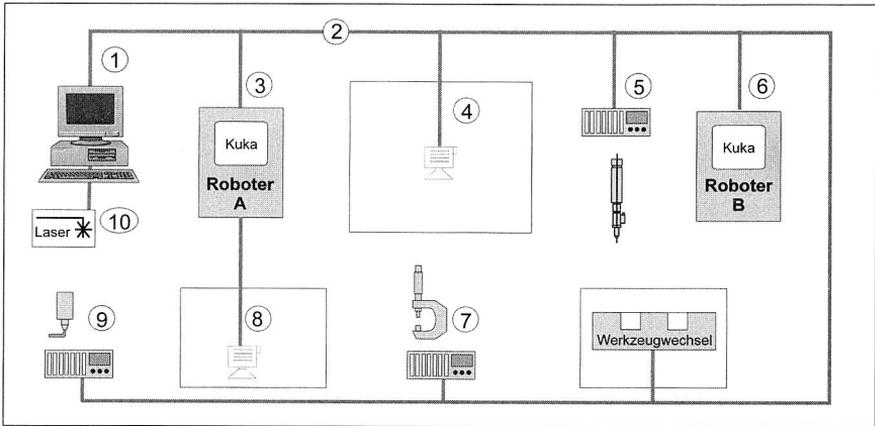


Bild 55: PC-basierter Zellenrechner als zentrale Steuerungsinstanz

Das Bild 56 gibt einen Überblick über die steuerungstechnische Verknüpfung der einzelnen Zellenkomponenten. Das zentrale Nervensystem der Versuchszelle bildet der Interbus-Feldbus mit optischen, EMV-unempfindlichen Lichtwellenleitern (Fa. Phönix

Contact). Über diesen Bus ② koordiniert der Zellenrechner ① mittels der Soft-SPS alle Steuergeräte wie Roboter ③, ⑥ sowie Fügegeräte ⑤, ⑦, ⑨ und damit den gesamten Montageprozessablauf. Das Robot-Vision-System ⑧ ist direkt mit der KRC1-Robotersteuerung angekoppelt. Das Messsystem mit hochauflösender CCD-Kamera ④ verfügt über einen eigenen Messrechner, der via Ethernet mit dem Zellenrechner verbunden ist, während der Laserscanner ⑩ direkt an den Zellenrechner angeschlossen ist.



- |                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| ① Zellenrechner (Windows-PC)          | ⑥ Robotersteuerung (Noval+)        |
| ② Feldbus Interbus, Ethernet          | ⑦ Stanznietsteuerung Fa. Böllhoff  |
| ③ Robotersteuerung (KRC1)             | ⑧ Bildverarbeitungssystem Fa. KUKA |
| ④ Bildverarbeitungssystem Fa. Stemmer | ⑨ Klebesystemsteuerung Fa. SCA     |
| ⑤ Schraubersteuerung Fa. Bosch        | ⑩ 2D-Laserscanner Fa. MEL          |

*Bild 56: Steuerungstechnische Verknüpfung und Messtechnik in der Roboterzelle*

Entsprechend Bild 57 übernimmt der Zellenrechner die Funktion des Masters, dem die Gerätesteuern für Roboter und Fügegeräte als Slaves untergeordnet sind. Moderne Gerätesteuern wie die Robotersteuerung KRC1 von Fa. Kuka oder die Klebesteuern von Fa. SCA können direkt über eine PC-Einsteckkarte an den Feldbus angekoppelt werden. Ältere bzw. einfachere Gerätesteuern wie die Schraubersteuerung von Fa. Bosch verfügen über eine digitale Betriebsmittelschnittstelle mit digitalen I/Os. Zur Ankoppelung an den Feldbus sind in diesem Fall digitale I/O-Module auf der Feldbusseite erforderlich.

Um eine harte Echtzeitfähigkeit des Zellenrechners in der Versuchszelle zu gewährleisten, erfolgte auf dem IPC die Installation des Echtzeitbetriebssystems VxWorks. Auf diesem wird das Laufzeitsystem des Montageprogramms von Codesys ausgeführt. Eine

spezielle PC-Einsteckkarte (Fa. LP-Elektronik) sorgt für das „switchen“ zwischen dem Echtzeitbetriebssystem (VxWorks) und dem Windowsbetriebssystem (WinNT/ Win2000). Der VxWorks-Interrupt Task besitzt dabei die höchste Ausführungspriorität (Bild 58).

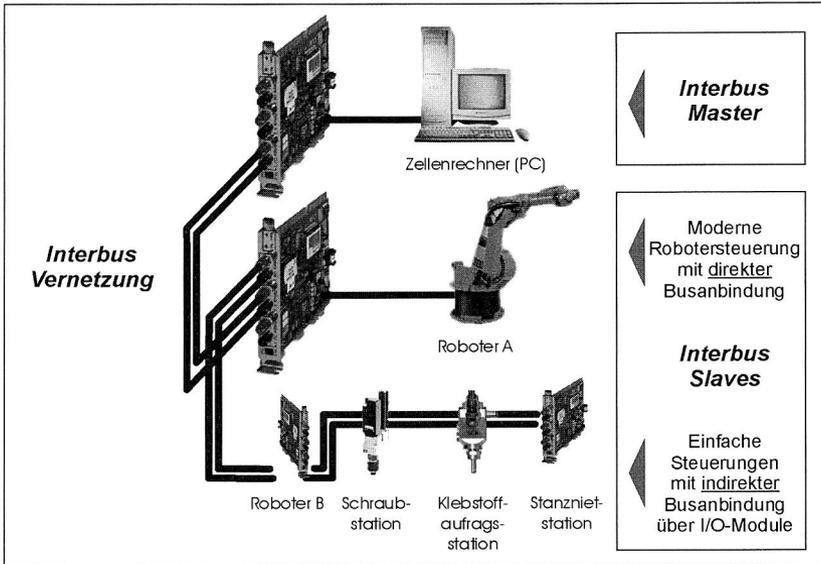


Bild 57: Vernetzung der Montagezellenkomponenten mit dem Interbus

Das vorgestellte Steuerungskonzept wird analog auf der PC-basierten Robotersteuerung von KUKA eingesetzt (d.h. switchen zwischen Win95 und VxWorks). Damit kann die Soft-SPS Codesys auch direkt auf der Robotersteuerung installiert werden und auf der PC-basierten Robotersteuerung ablaufen. In diesem Fall übernimmt die Robotersteuerung als Master die Kontrolle über die Zelle und fungiert als Zellenrechner. Der Vorteil besteht darin, dass in dieser höchsten Integrationsstufe auf die Hardware eines separaten Zellenrechners verzichtet werden kann. Die Grundvoraussetzung hierfür ist eine sehr leistungsfähige Robotersteuerung.

Darüber hinaus existiert eine zweite Steuerungsebene, in der der Montagezellenrechner über Ethernet oder die serielle Schnittstelle mit den unterlagerten Gerätesteuern verbunden ist. Diese Vernetzung läuft quasi parallel zu der in Bild 57 dargestellten Feldbusvernetzung. Hierüber können Geräteprogramme mit den Prozessparametern und Prozesskurvenverläufe (z.B. Kraft-Weg-Kurven) ausgetauscht werden.

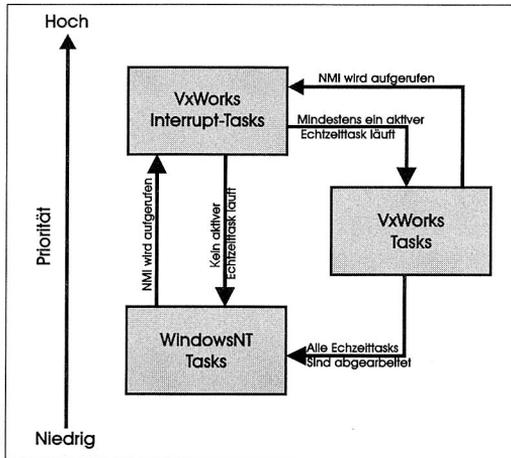
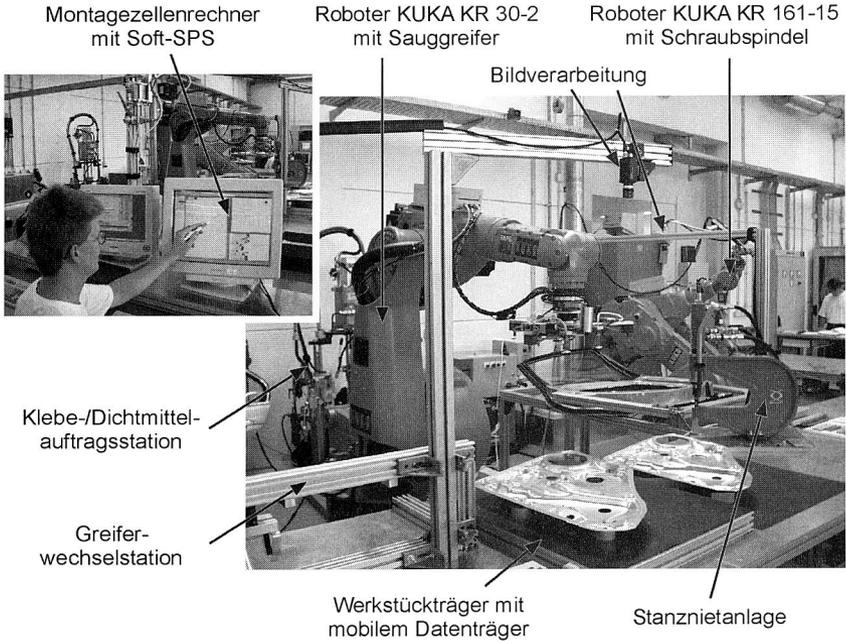


Bild 58: Prioritäten der Systemtasks auf dem Zellenrechner

Das Bild 59 zeigt die realisierte Doppelroboterzelle am Lehrstuhl FAPS. Der für das Türmodulhandling zuständige Roboter KUKA KR 30 verfügt über die moderne PC-basierte Steuerung KRC1, die direkt mit dem Feldbus gekoppelt werden kann. Der zweite KUKA-Roboter KR 161 mit der Steuerung Noval+ von Fa. IRA-TEC wird über ein digitales I/O-Modul an den Feldbus angeschlossen. Die Gerätesteuerung der Schraubspindel ist ebenfalls über den Feldbus mit dem Zellenrechner gekoppelt. In jeder Stufe des Schraubvorganges kann durch die integrierte Sensorik ein Abbild des Prozessverlaufs erstellt werden. Die Bewertung der Sensorinformationen aufgrund der vorgegebenen binären Steuerdaten, Sollwerte und Toleranzbänder wird parallel zum Ablauf des Schraubvorganges vorgenommen. Die Steuerung des Stanznietensystems ist über den Feldbus mit dem Zellenrechner verbunden. Zudem erfolgt das Auslesen der Prozesskurvenverläufe aus der Stanzniet- und der Schraubersteuerung und deren Prozessparameterprogrammierung über eine serielle Verbindung mit dem Zellenrechner. Zur Prozessdatenverarbeitung beim Stanznieten kommt die Software BIMON und Biforce 40 (Fa. Binär) auf dem Zellenrechner zum Einsatz. In Bezug auf die Stanznietsteuerung musste zudem eine elektromechanische Steuerungserweiterung (siehe Kap 6.2.2) durchgeführt werden. Via Ethernet erfolgt zudem die datentechnische Vernetzung mit den vorgelagerten Bereichen Fertigung und Konstruktion.

Aufgrund der einfachen und kostengünstigen Gestaltung der Spannvorrichtung für das PKW-Türmodul und den Türrohling treten Verschiebungen des Bauteils aus der Sollposition heraus auf. Zur Erfassung der Lage und der Geometrie des Türrohlings dient eine hochauflösende Bildverarbeitungskamera. Diese ist über eine serielle Schnittstelle mit dem Zellenrechner verbunden.



*Bild 59: Realisierung der Versuchszelle mit adaptiven Steuerungsstrategien*

Ein zweites Bildverarbeitungssystem ist über dem Türmodul positioniert und direkt mit der Robotersteuerung verbunden. Das BV-System dient zur Messung der Bauteilpositionierung und vorbestimmter Bauteilmerkmale wie Fügestellendurchmesser in der x,y-Ebene. Diese Koordinaten werden zur Lagekorrektur der Roboterpositionierung benötigt. Zudem lassen sich mit der Bildverarbeitung auch die Position und die Geometrie der Fügestellen in der Ebene prüfen. Weiterhin wird ein 2D-Laserscanner eingesetzt, der eine hochgenaue Messung in der dritten, d.h. in der z-Ebene ermöglicht. Der Laserscanner erlaubt beispielsweise die Vermessung der Geometrie der Stanznietverbindungen, d.h. es kann die ordnungsgemäße Lage des Nietkopfs optisch geprüft werden. Für die Datenübertragung von fügestellenspezifischen Qualitätsinformationen aus der Fertigung an die Montage ist sowohl ein dezentrales Konzept über mitlaufende elektronische Werkstückdatenträger, als auch ein zentrales Konzept über vernetzte Zellenrechner vorgesehen. Nachfolgend wird die steuerungstechnische Umsetzung der adaptiven Montageprozesssteuerung näher beschrieben.

## 6.2 Entwicklung einer adaptiven Montageprozesssteuerung unter Einbeziehung des Informationsaustausches mit der Fertigung

Zur Realisierung der maschineninternen Prozessregelkreise wurde ein Modell für die Erfassung, Analyse und Reaktion auf geometrische und technologische Abweichungen im Montageprozess entwickelt. Im Gegensatz zu konventionellen Steuerungsverfahren, die lediglich eine Einhaltung der Grenzwerte überwachen, wurde ein erweiterter Regelkreis konzipiert, der in Abhängigkeit der aktuellen Zustände differenzierte Reaktionsstrategien ermöglicht [18]. Dieses Modell wurde für das Bauteilhandling sowie für die Fügeverfahren Schrauben und Stanznieten realisiert. In den Versuchen zur Toleranzanalyse der beiden Fügeverfahren (Kapitel 3.2) konnte nachgewiesen werden, dass durch eine situationsangepasste flexible Vorgabe der Fügeparameter und Prozessgrenzwerte eine deutliche Erhöhung der Prozesssicherheit in der Montage erreicht wird und eine Aufweitung von Prozessfenstern in der vorgelagerten Teilefertigung möglich ist.

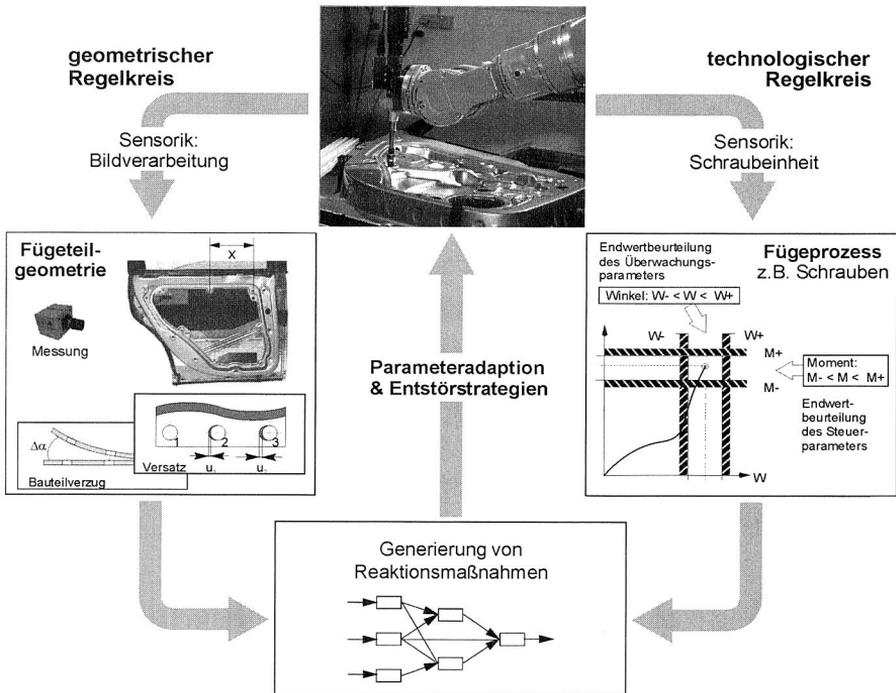


Bild 60: Maschineninterne Regelkreise zur Analyse geometrischer und technologischer Fehler und zur Generierung problemangepasster Reaktionsstrategien

Zum Aufbau der Regelkreise wurden zunächst die für die Füge­teile ermittelten Bauteil­toleranzen analysiert und zulässige Toleranzfenster für die Montageprozessparameter festgelegt. Eine Differenzierung erfolgte dabei bezüglich technologischer und geometrischer Prozesskennwerte (Bild 60).

Im Bereich *technologischer Prozessparameter* wie sie beispielsweise beim Verschrauben auftreten, erfolgt eine punktuelle Auswertung der Spitzenwerte des Prozesssignalverlaufs. Es werden Lage und Koordinaten des Endpunktes der Schraubkurve betrachtet. Die für die Anpassung der Schraubprozessparameter erforderlichen Prozessdaten wurden in umfangreichen experimentellen Prozessuntersuchungen gewonnen (siehe Kapitel 3.1). Für die adaptive Schraubprozessführung werden die Steuergröße Drehmoment und die Überwachungsgröße Drehwinkel gemäß der *Ampel-Methode* entsprechend der Füge­teilqualität angepasst. Die Werkstückdatenerfassung erfolgt mittels Sensorik und mobiler Datenträger. Zudem wird der Prozessendwert von Drehwinkel und Drehmoment mit den festgelegten Toleranzgrenzen verglichen und die Entscheidung über eventuell einzuleitende Reaktionen getroffen. Liegt der kombinierte Endwert innerhalb des Gutfensters, so gilt die gesamte Verschraubung als "In Ordnung" (i.O.). Bei außerhalb des Toleranzfensters liegenden, sog. "Nicht-in-Ordnung"-Verschraubungen (n.i.O.), wird zwischen behebbaren und nicht behebbaren Fehlern unterschieden. Für behebbare Fehler werden die entwickelten und hinterlegten Reaktionsstrategien angestoßen, wie beispielsweise die Wiederholung eines Schraubprozesses nach dem Lösen der Verbindung. Andernfalls erfolgt ein Ausschleusen des fehlerhaften Bauteils.

Zur Umsetzung dieser Funktionalitäten wird das in Kap. 4 vorgestellte Softwarekonzept verwendet. Dieses beinhaltet als Steuerungskern eine Ablaufsteuerung auf Basis der Soft-SPS Codesys. Durch das auf dem Zellenrechner vorhandene SPS-Programmier­tool erfolgt zudem die *Visualisierung* des Montageablaufs. Die Umsetzung erfolgt auf einem Zellenrechner mit Windows-Betriebssystem. Der Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Softwaretools läuft über die OPC-Schnittstelle. Mittels des selbstentwickelten *Kommunikationsinterface Motion* wird die Möglichkeit geschaffen, von der ersten Prozesssteuerungsebene, die in Echtzeit den Montageablauf steuert, auf die zweite Steuerungsebene zuzugreifen. Über die zweite Steuerungsebene können Prozesskurvenverläufe gesichtet bzw. analysiert und Prozessparameter stufenlos angepasst werden. Hierzu sind gerätespezifische Programmier­tools für die Prozessparameter erforderlich, die entweder vom Gerätehersteller bereitgestellt werden oder selbst entwickelt werden müssen. Zudem enthält das Kommunikationsinterface das Prozessmodell in dem die Logik für die vordefinierten Reaktionsmechanismen hinterlegt ist. Nachfolgend wird das *Kommunikationsinterface Motion* und anschließend die Anbindung an die *Ablaufsteuerung Codesys* erläutert.

### 6.2.1 Funktionalitäten des Kommunikationsinterfaces *Motion* sowie Anbindung an die Datenbank und die Ablaufsteuerung

Das in Kapitel 4.3.2 vorgestellte Softwarekonzept der adaptiven Montageprozesssteuerung wurde in der Versuchszelle am Beispiel des roboterbasierten Verschraubens und Stanznieten exemplarisch umgesetzt. Hierbei erfasst das Kommunikationsinterface *Motion* (= adaptive Montagereaktionsstrategien) Daten aus den Montageprozessen und analysiert diese im Zusammenhang mit detailliertem Wissen über die flächigen Bauteile und deren Fertigungs- und Montageprozesse. Darauf aufbauend können wirkungsvolle Strategien zur präventiven Störungsvermeidung und Störungsbehebung abgeleitet werden. Hauptbestandteile des Interfaces sind das Datenvorverarbeitungsmodul, das Informationsmodul und die Geräte- bzw. Technologiemodule (Bild 61).

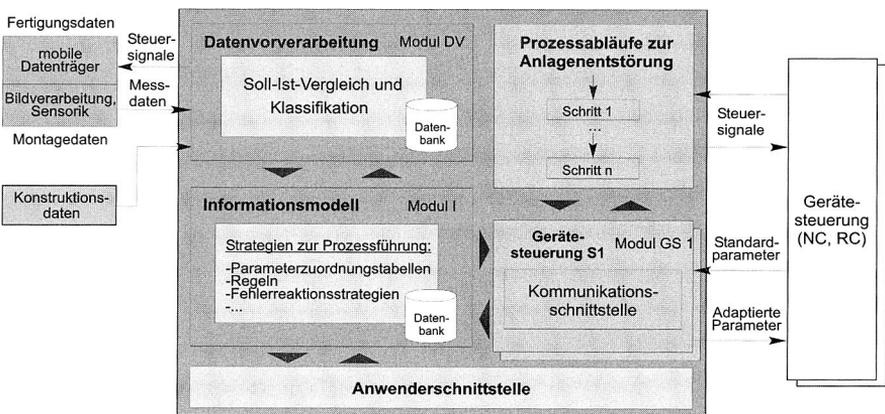


Bild 61: Softwarekonzept des Kommunikationsinterfaces *Motion* zur fehlertoleranten Montage auf Basis eines Informationsmodells

Das *Datenvorverarbeitungsmodul* realisiert den Vergleich der Fertigungs- und Montagedaten mit den Konstruktionsinformationen der Produkte. Es wurde die Möglichkeit der rechnerunterstützten Informationsübermittlung und Kommunikation zwischen Konstruktion und Montage auf Basis des Produkt- und Prozessmodells genutzt. Hierzu werden in der Konstruktion die montagerelevanten Füge-teil-daten aus der CAD-Software gefiltert und diese Daten entweder über das PDM-System (siehe Bild 52) oder über einen Web-Server mittels Intranet konstruktionsübergreifend verfügbar gemacht. Im letzteren Fall kann mittels eines konventionellen Browser (beispielsweise MS Internet Explorer) über den vernetzten Zellenrechner auf diese Fügestellen-Solldaten aus der Konstruktion zugegriffen werden. Die beispielhafte Umsetzung erfolgte für die PKW-Tür und das Tür-

modul mit der CAD-Software Pro/E am Lehrstuhl KTmfk [111]. Die Bauteilsolldaten können anschließend manuell in vorkonfigurierte Masken des Datenvorverarbeitungsmoduls mit copy & paste aus dem PDM-System oder dem Browser kopiert werden. Dabei muss eine eindeutige Bauteilbezeichnung sowie Fügstellenummerierung im Stammdatenkopf erfolgen. Anschließend können diesen Stammdaten den tatsächlichen Fügstellen-Ist-Daten zugeordnet werden. Diese Ist-Daten können beispielsweise über mobile Datenträger transportiert und am Zellenrechner über das Kommunikationsinterface eingelesen werden. Alle erforderlichen, aktuellen Fügteilinformationen werden im integrierten Datenmodell [41], [62] gespeichert. Im nächsten Schritt erfolgt ein Soll-/Istdatenvergleich und die Speicherung des Ergebnisses im Datenmodell. Die Ergebnisse des Soll-/Istvergleichs stellen die Eingangsinformationen für das *Informationsmodell* dar. In diesem ist eine Abbildung der Zellenstrukturierung sowie eine Hinterlegung der Toleranzinformationen und Regelmechanismen enthalten. Hier werden die Klassifizierung der Abweichungen (Ampelmodell) in Zusammenhang mit den Toleranzbeziehungen und die Ableitung der Regelstrategien zur fehlertoleranten Montage umgesetzt.

Im *Gerätesteuerungsmodul* erfolgt die dynamisch, adaptive Anpassung der Steuer- und Überwachungsparameter in den Geräteprogrammen an die reale Montagesituation. Anschließend werden die Steuerprogramme an die Montagegeräte übertragen.

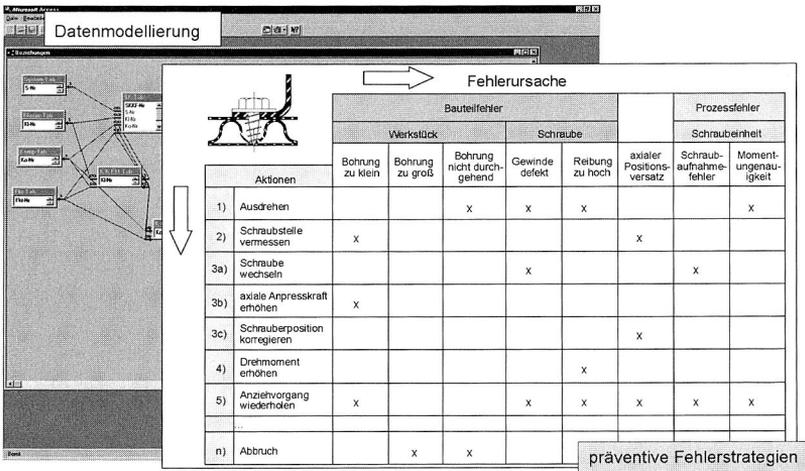


Bild 62: Datenmodell des Informationssystems mit der exemplarischen Darstellung von Zuordnungstabellen zwischen Fehlerursachen und -strategien

Zur Repräsentation der system- und technologiespezifischen Daten im Informationsmodell ist ein *Datenmodell* auf Basis einer relationalen Datenbank konzipiert worden. Im

Strategiewissen werden die ermittelten Toleranzbeziehungen in Zusammenhang mit entsprechenden Reaktionsstrategien hinterlegt (Bild 62). Hierzu werden zunächst für einzelne Fügetechnologien in tabellarischer Form mögliche Fehlerreaktionsstrategien erarbeitet und anschließend in einer Datenbank abgebildet.

Die Reaktionsstrategien beinhalten vor allem die adaptiven Parameter zur dynamischen Anpassung der Montageprogramme, um eine Kompensation möglicher geometrischer oder technologischer Schwankungen zu erzielen. Für die Erstellung des Datenmodells wurde aufgrund seiner Leistungsfähigkeit und der standardisierten Schnittstellen zur Ankopplung von Client-Software (z. B. ODBC) das Datenbanksystem *Microsoft Access 7.0* eingesetzt. Auf Basis dieses zentralen Informationsspeichers für das Montageprozesswissen kann sowohl die Integration der präventiven Fehlerstrategien als auch die Anbindung der weiteren Softwaremodule zur Datenvorverarbeitung und Montagesteuerung erfolgen. Die datentechnische Anbindung des Kommunikationsinterface *Motion* an die Ablaufsteuerung *Codesys* erfolgte mittels OPC.

Übersicht Ablaufprogramme      Variablenliste      Visualisierung      Gewähltes Ablaufprogramm

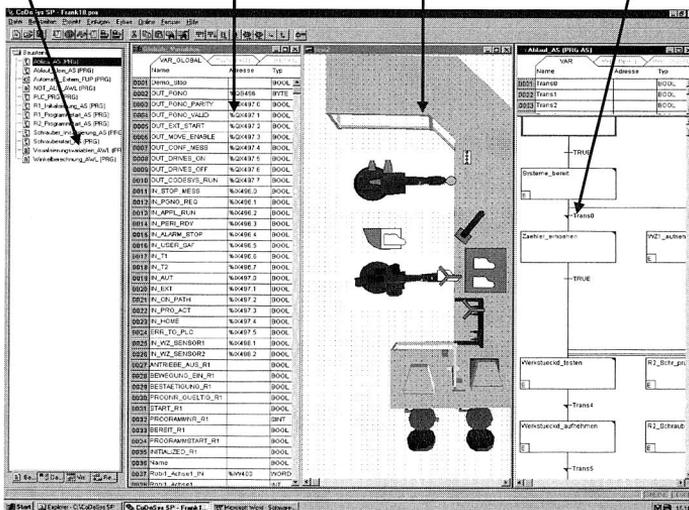


Bild 63: Hauptbildschirm des Programmier- und Visualisierungstools Codesys

Das Kommunikationsinterface *Motion* verfügt über einen OPC-Client, über den es Daten mit der Soft-SPS *Codesys* (OPC-Server) austauschen kann (Bild 64). Der Standardmontageablauf wird in *Codesys* hinterlegt (Bild 63). Die Programmierung des Mon-

tageablaufs wird in einer Programmiersprache nach DIN IEC1131-3 durchgeführt. Das Programmierwerkzeug verfügt zudem über Visualisierungsfunktionen. Während der Abarbeitung der einzelnen Montagesequenzen überprüft die Ablaufsteuerung fortlaufend, ob zur Fügeparameteradaption das Kommunikationsinterface *Motion* aktiviert werden muss. Analog wird im Falle von Montageprozessstörungen verfahren.

Das Kommunikationsinterface stellt somit das Bindeglied zwischen der Ablaufsteuerung und den Gerätesteuerungen dar (siehe Kap. 4.3.2). Die Programmierung des Kommunikationsinterfaces *Motion* erfolgte in Visual C++. Grundsätzlich sind die beiden Fälle Parameteranpassung zur Störungsvermeidung und Fehlerreaktionsmaßnahmen im Störfall berücksichtigt. Das Bild 64 zeigt die Einstiegsmaske für die Eingabe dieser mehrstufigen Reaktionsstrategien. Dahinter verbirgt sich das Prozessmodell, indem die Parameterwerte für die Prozessparameteradaption hinterlegt werden [20].

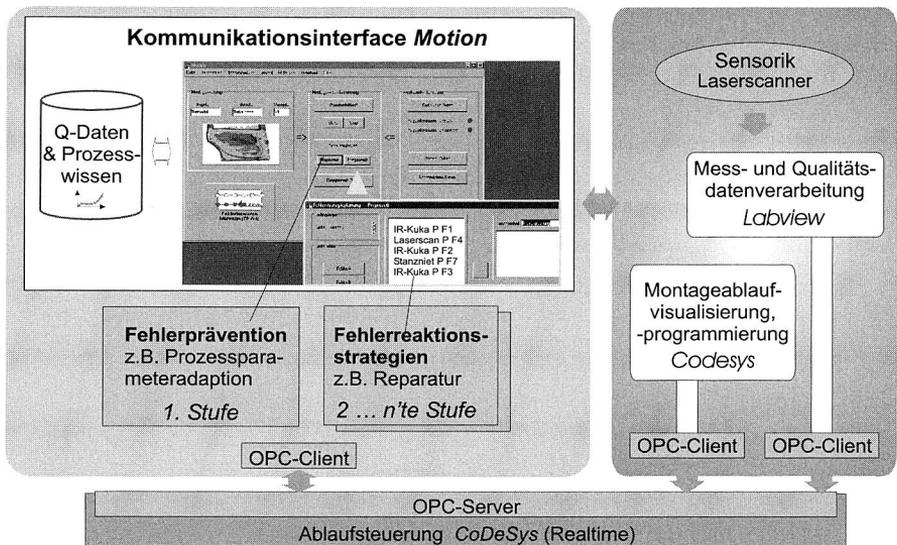


Bild 64: Schnittstellen des Kommunikationsinterfaces zur Steuerungsebene

Zur Ermittlung montagerelevanter Bauteil-Istdaten wurden verschiedene Dateneingabemöglichkeiten realisiert. Dabei wird von einer automatischen Datenerfassung, die auf unterschiedlichen Informationsquellen basiert, ausgegangen, da die alleinige Betrachtung einer Quelle nicht alle notwendigen Angaben für zuverlässige Regelkreise liefern kann. Zunächst werden sowohl die systemimmanenten Sensoren, als auch externe Sensoren wie Bildverarbeitung oder Laserscanner genutzt.

Für die Messdatenverarbeitung des Laserscanners wurde das Auswerte- und Visualisierungstool Labview eingesetzt und programmiert. Dieses ist über die OPC-Schnittstelle mit *Motion* verbunden. Weiterhin wurde ein autark arbeitendes Bildverarbeitungssystem in die flexible Montagezelle integriert, das eine automatisierte Werkstückvermessung wie beispielsweise der Ist-Positionen der Schraubstellen durchführt. Durch einen Vergleich der Ist-Daten mit den, im Rechner hinterlegten Soll-Daten wird eine Lagekorrektur der Schraubspindel vorgenommen. Das Interface erhält so Qualitätsdaten zu eingehenden Fügeteilen, entweder direkt über die Qualitätskontrolle (z.B. Fertigungsdaten) oder über Inline-Messsysteme in der Montageanlage. Eine Aktivierung des Bildverarbeitungssystems kann auch direkt nach einer detektierten Prozessstörung erfolgen. Nach Beendigung der Messaktion liefert der Bildverarbeitungsrechner die Messinformationen über eine Datenschnittstelle an den Zellenrechner der Montagestation zurück. Die Zustandsdaten werden mit dem Prozessmodell korreliert und detaillierte Aussagen über die Fehlerart und Fehlerursachen generiert. Bei funktionsunkritischen Toleranzen werden problemangepasste Reaktionsstrategien zur Fehlerkompensation eingeleitet. Diese Funktionalitäten des modularen Softwarekonzeptes wurden in *Motion* softwaretechnisch umgesetzt [65].

Am *Beispiel des Stanznietens* flächiger Leichtbauteile wird nachfolgend die Funktionsweise dieses Konzeptes erläutert. Zunächst müssen die Verfahrenprogramme für das Bauteilhandling erstellt und im Industrieroboter gespeichert werden. Parallel hierzu erfolgt die Einstellung der Standardprozessparameter in den Programmen der Stanznietgerätesteuerung. Beides muss sowohl für die Standardmontageabläufe, als auch für die Fehlerreaktionsstrategien erfolgen. Die in den Gerätesteuern hinterlegten Teilprogramme sind modular aufgebaut. Damit lassen sich die einzelnen Module auch für Störstrategien nutzen. Zur adaptiven Montage reicht zudem eine einfache Änderung der Parameterkonfiguration, ohne dass eine Änderung der Teilprogramme notwendig ist.

Daraufhin werden die kompletten Montagesequenzen in die *Ablaufsteuerung Codesys* (z.B. in einer SPS-Programmiersprache nach DIN IEC 1131-3) eingegeben, wobei zusätzlich verfahrensspezifische Fehlerpotentiale für den jeweiligen Montagefall zu berücksichtigen sind. Problemadäquate Reaktionsmechanismen hierzu werden im Kommunikationsinterface *Motion* hinterlegt. So ist beispielsweise das Stanznieten im Vergleich zu konventionellen Fügeverfahren tolerant hinsichtlich Positionierfehler des Setzwerkzeugs in der Ebene. Im Gegensatz zum Verschrauben oder Blindnieten ist aus Prozesssicht kein hochgenaues Positionieren an der Fügestelle erforderlich. Damit entfällt die Erfordernis spezieller Messroutinen (z.B. mittels Robot Vision) für diesen Arbeitsschritt. Hingegen besitzen Blechdickentoleranzen einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Stanznietverbindung bei Verwendung von Al-Nieten. Um Bauteiltoleran-

zen im Sinne einer robusten Prozessführung ausregeln zu können, müssen vor dem jeweiligen Montageschritt zunächst fügeteilspezifische Qualitätsinformationen aus dem *mobilen Werkstückdatenträger* der Transporteinheit oder einer Datenbank ausgelesen werden. Hierfür sind in der Ablaufsteuerung entsprechende Aktionen zu programmieren. Diese bauteil- oder chargenspezifischen Daten zu den Fügestelleneigenschaften müssen in das Kommunikationsinterface *Motion* eingelesen und mit dem, in der Montagedatenbank hinterlegten Prozesswissen zum Stanznieten verglichen werden. In der *Datenbank* sind sowohl die Standardprozessparameter, als auch Korrekturwerte im Falle von Fügeteiltoleranzen hinterlegt.

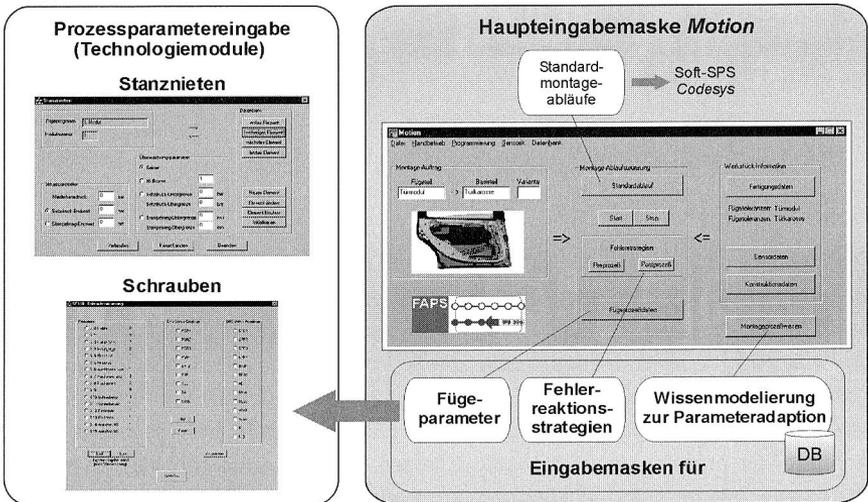


Bild 65: Benutzerschnittstelle und Eingabemasken des Kommunikationsinterfaces

### Beispiel Stanznieten

Die für das jeweilige Bauteil oder die Bauteilcharge neu ermittelten Einstelldaten der Steuerparameter Nietsetzkraft und Niederhalterkraft werden mit dem eingestellten Standardwert verglichen und bei Bedarf in der Stanznietgerätesteuerung korrigiert. Hierfür wurden verfahrensspezifische Geräte- bzw. Technologiemodule in *Motion* (Bild 65, links) realisiert. Parallel zu den Steuerparametern müssen zusätzlich die Überwachungsparameter angepasst werden, um eine Störmeldung bei adaptierten Steuerparametern und engen Prozessfenstern zu vermeiden. Beim Stanznieten mit Prozessüberwachung (Kraft-Weg-Sensorik) können hierzu mehrere fügestellenspezifische Hüll-

kurven (Kraft- Weg-Kurve) im System hinterlegt werden [19]. Da sich die Fügefahren hinsichtlich der relevanten Prozessparameter stark unterscheiden, wurden zusätzlich Eingabemasken für die Prozesse Kleb-/Dichtmittelauftrag und das Verschrauben erstellt (Bild 65).

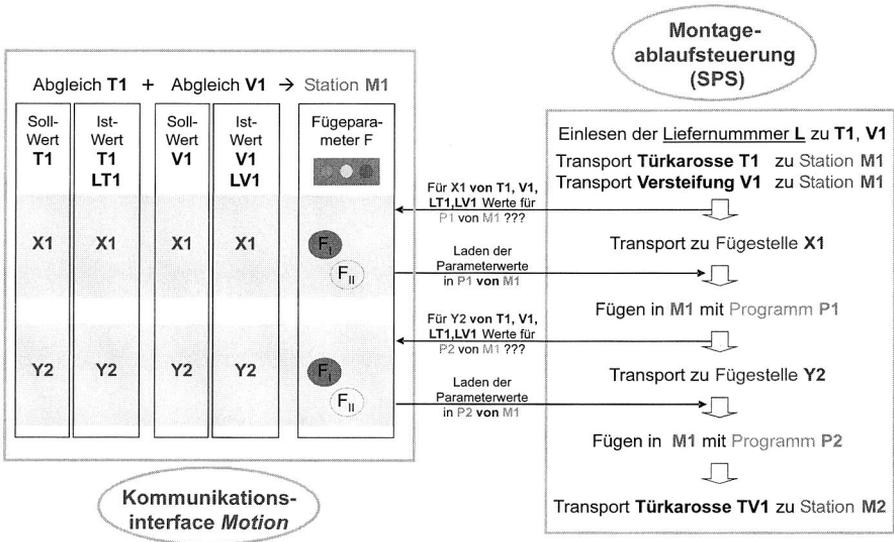


Bild 66: Ablaufschema zur zeitlichen Synchronisation des Datenaustausches zwischen Ablaufsteuerung und Kommunikationsinterface

In vollautomatisierten Montageanlagen spielt neben der präventiven Parameteradaption die Auslösung vordefinierter Fehlerreaktionsstrategien bei Anlagenstörungen eine wichtige Rolle. Ursache für Störungen können neben technischen Anlagendefekten auch nicht kompensierbare Füge- oder Fügehilfsteiltoleranzen sein. Für teure Baugruppen mit einer bereits hohen Wertschöpfung sind Reparaturkonzepte im Falle von Fügefehlern vorzusehen. Bereits vor der Anlagenprogrammierung ist eine systematische Analyse potentieller Störungen und zulässiger Reaktionsmaßnahmen durchzuführen. Für das Stanzen bestehen die Reaktionsstrategien Setzen eines neuen Nietes neben der fehlerhaften Nietstelle oder Entfernen des fehlerhaften Nietes sowie Setzen eines neuen Blindnietes an der gleichen Stelle. Im Vorfeld wird in Zusammenarbeit mit der Konstruktion festgelegt, welche Reparaturmaßnahmen bei einer konkreten Verbindungsstelle zulässig sind. Die Fehlerstrategien können auch mehrstufig sein. Sie werden mit einer entsprechenden Freigabe im Kommunikationsinterface Motion gespeichert. Wichtig für die konkrete Ausgestaltung der Reaktionsmaßnahme ist diesbezüglich die gerä-

tetechnische Ausstattung in der Montagezelle sowie die Freigabe fügstellenspezifisch zulässiger Reparaturmaßnahmen seitens der Konstruktion.

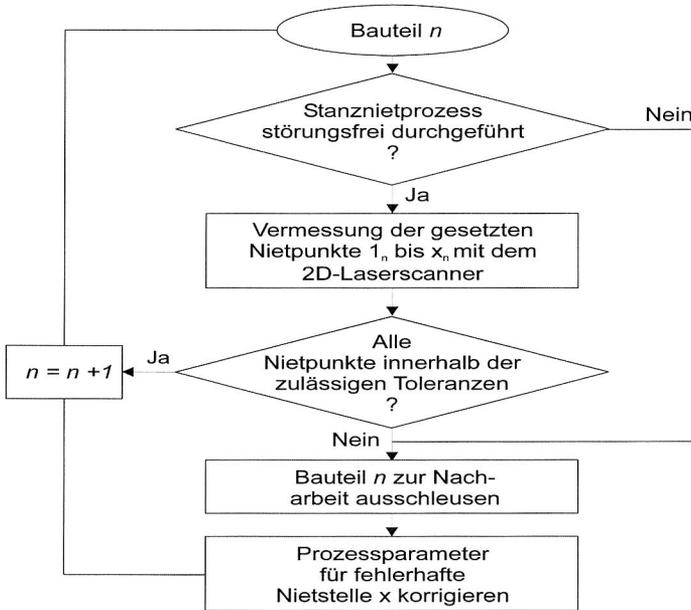


Bild 67: Messablauf zur Erkennung fehlerhafter Stanznietverbindungen mit einem 2D-Laserscanner

Zur Kontrolle der Fügstellenqualität sowie der Wirksamkeit der Steuerungsmaßnahme kann eine problemspezifische Sensorik eingesetzt werden. In die Versuchszelle wurde hierzu ein 2D-Laserscanner zur Kontrolle von Stanznietverbindungen eingebaut. Der Verfahrensablauf zur Prüfung der Stanznietverbindungen ist Bild 67 zu entnehmen. Bei störungsfreiem Prozessablauf werden die einzelnen Nietstellen vermessen und bei Bedarf die Prozessparameter fügstellenspezifisch adaptiert. Der realisierte Regelkreis wird in Bild 70 veranschaulicht. Mit dem Lasersensor wird die Fügstelle optisch abgetastet und der oberflächenbündige Nietkopfsitz überprüft. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt mit der Messsoftware *Labview* (Bild 68). Diese Maßnahme kann sowohl für jede Fügeverbindung als auch stichprobenweise durchgeführt werden. Die Prüfschärfe kann während der laufenden Fertigung zur Reduzierung unproduktiver Nebenzeiten stufenweise abgesenkt werden.

Automatisierte Vermessung von montagerelevanten Q-Merkmalen

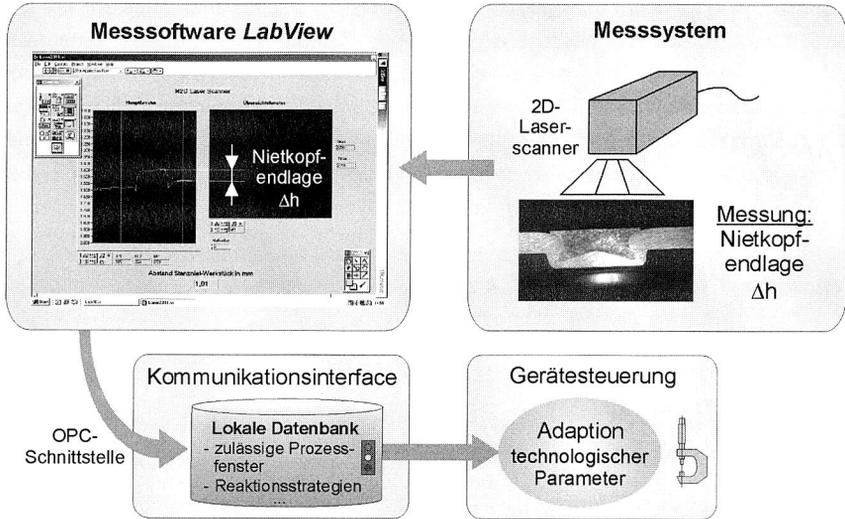


Bild 68: Messung der Nietkopfendlage mit einem 2D-Laserscanner

Beispiel Verschrauben

Zudem wird nachfolgend die Generierung und automatische Abarbeitung von Fehlerreaktionsmaßnahmen im Störfall an einem weiteren Beispiel, dem des Verschraubens metrischer Schrauben in die PKW-Türkarosse betrachtet [19]. Der Standardmontageablauf für das Einlegen und Verschrauben des Türmoduls in die Türkarosse wird analog zum Stanznieten in der Ablaufsteuerung *Codesys* programmiert. Der Montageablauf setzt sich dabei aus mehreren Einzelprogrammen für die Roboterpositionierung und für die Schraubprogrammorauswahl in der Fügegerätesteuerung der Schraubspindel zusammen (Bild 69). Die exakte Lage der Schraubstelle in der Türkarosse kann durch die Aktivierung des Bildverarbeitungssystems ermittelt und die Schraubspindelpositionierung korrigiert werden. So lassen sich bereits im Vorfeld Störpotentiale verringern. Tritt dennoch eine Störung im Schraubprozess ein, so würde normalerweise ein Abbruch der Montagearbeit erfolgen und automatisch das Bedienpersonal alarmiert.

Um Stillstandszeiten zu vermeiden, werden im Kommunikationsinterface *Motion* mehrstufige Fehlerreaktionsstrategien hinterlegt. Im Störfall schaltet die Soft-SPS das Montagesystem nicht ab, sondern schaltet in das Kommunikationsinterface um. Dort werden

anhand der anliegenden Fehlersignale aus den Gerätesteuerungen geeignete Reaktionsweisen ausgewählt. Zuvor müssen diese Aktionen jedoch in Reaktionsprogrammen hinterlegt werden. Dabei besteht der komplette Verfahrensablauf eines Montageprogramms aus einer sequentiell abzuarbeitenden Liste von Elementarabläufen, wie z. B. 'Verschraube Position A', 'Nachziehen Position B', 'Löse Position C'. Ein Elementarablauf stellt wiederum eine sequentiell auszuführende Liste aus Bewegungs- und Schraubprogrammen dar. Im System *Motion* sind Möglichkeiten vorhanden, diese kompletten Verfahrensabläufe dialoggeführt sehr einfach und schnell zu erstellen. Durch Markierung der zur Verfügung stehenden Grundbewegungs- und Technologieprogrammen lassen sich die Elementarabläufe erzeugen (Bild 69).

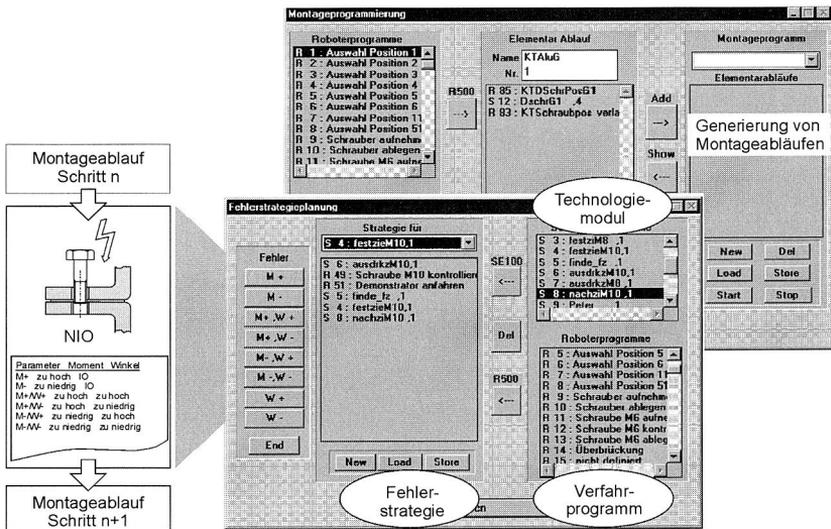


Bild 69: Generierung spezifischer Reaktionsstrategien am Beispiel der Schraubtechnik im Kommunikationsinterface Motion

Tritt ein Verschraubungsfehler während der Abarbeitung eines Montageprogramms auf, so wird eine speziell auf diese Störung zugeschnittene Fehlerstrategie angestoßen. Unter einer Fehlerstrategie wird in *Motion* eine elementare Ablaufliste aus Handhabungs- und/oder Schraubprogrammen verstanden. Die Strategie gestaltet sich je nach erkanntem Prozessfehler und je nach den bereits abgearbeiteten Reaktionsstrategien sehr unterschiedlich und kann für jede Fügestelle in Abhängigkeit vom Fehler frei definiert werden, d. h. es sind auch mehrstufige Strategien möglich [17].

Zur Vermeidung von Störfällen können Schraubparameter auch flexibel an das zu bearbeitende Füge teil angepasst werden. So kann es vorkommen, dass die in die PKW-

Türkarossen eingeschweißten Muttern von Charge zu Charge unterschiedliche Gewindegüten aufweisen. Um eine einheitliche Vorspannkraft in der Schraubverbindung zu erhalten, macht dies die Anpassung des Anziehmoments an die Türcharge erforderlich.

Noch deutlicher wird dies am Beispiel des in Kap. 3.3.1 vorgestellten Beispiels des *Direktverschraubens in Al-Sandwich-Bauteile*. So ist es nicht unwahrscheinlich, dass zukünftig PKW-Türkarossen, aufgrund der hohen Steifigkeit und des guten Energieabsorptionsverhaltens im Crashfall aus diesem Sandwich-Werkstoff bestehen werden (Bild 30 ff). In den experimentellen Schraubversuchen (Kap. 3.3.1) hat sich gezeigt, dass der Schraubprozess empfindlich auf Durchmesserabweichungen der Vorbohrung reagiert. Der Schraubstellendurchmesser kann mittels einer Bildverarbeitungskamera (vgl. Bild 24) vermessen werden. Auf Grundlage des Messergebnisses erfolgt schließlich eine automatische Korrektur der Schraubparameter. Zu diesem Zweck wird zu Beginn des Ablaufprogramms (*Codesys*) in das Kommunikationsinterface *Motion* umgeschaltet und die dort hinterlegten Messprogramme und Adaptionsmaßnahmen abgearbeitet. Anschließend kann mit der Abarbeitung des Standardmontageablaufs in der Ablaufsteuerung begonnen werden. Somit sind flexible und automatische Reaktionsstrategien zur Kompensation funktionsunkritischer Abweichungen in der Montage vorhanden, die in Form von Regelkreisen zur geometrischen und technologischen Anpassung an die Ist-Parameter der flächigen Leichtbauteile realisiert sind.

## 6.2.2 Steuerungstechnische Erweiterung der Stanznietgerätesteuerung zur adaptiven Prozessparameternachführung

Im vorhergehenden Kapitel wurden die softwaretechnischen Erweiterungen für die dynamische Prozessparameteranpassung beim Stanznieten erläutert. Der Montagezellenrechner steuert dabei über die Soft-SPS die Handlingsroboter, den Materialfluss, die Sensorik und das Stanznietssystem. Über ihn erfolgt die Vorwahl der Roboterprogramme und der Stanznietgeräteparameter bzw. -programme. Zur Ablaufsteuerung wird die Soft-SPS *Codesys* eingesetzt, die auf einem eigenständigen PC mit WinNT/ Win2000 und dem Echtzeitbetriebssystem VxWorks läuft. Alle montagerelevanten Fertigungsdaten oder Messdaten durch die Sensorik werden im Zellenrechner gespeichert. Werkstückträger mit mobilen Datenträgern oder Rechnernetzwerke dienen dazu, montagerelevante Informationen aus der Fertigung in die Montage zu übermitteln. Wie bereits in Kap. 4 dargestellt, sind für den Aufbau von adaptiven Steuerungskonzepten die verfügbaren Schnittstellen zur Einstellung bzw. Programmierung der Prozessparameter an den Fügegeräten von entscheidender Bedeutung. Im Falle der am Lehrstuhl FAPS eingesetzten *hydraulischen Stanznieteinheit (Fa. Böllhoff)* musste eine Erweiterung der Gerätesteuerung von der Geräteklasse eins hin zur Geräteklasse drei durchgeführt werden.

Hierfür wurde eine elektromotorische Lösung zur Verstellung des hydraulischen Ventils und damit zur Setzdruckeinstellung konzipiert und realisiert (Bild 70).

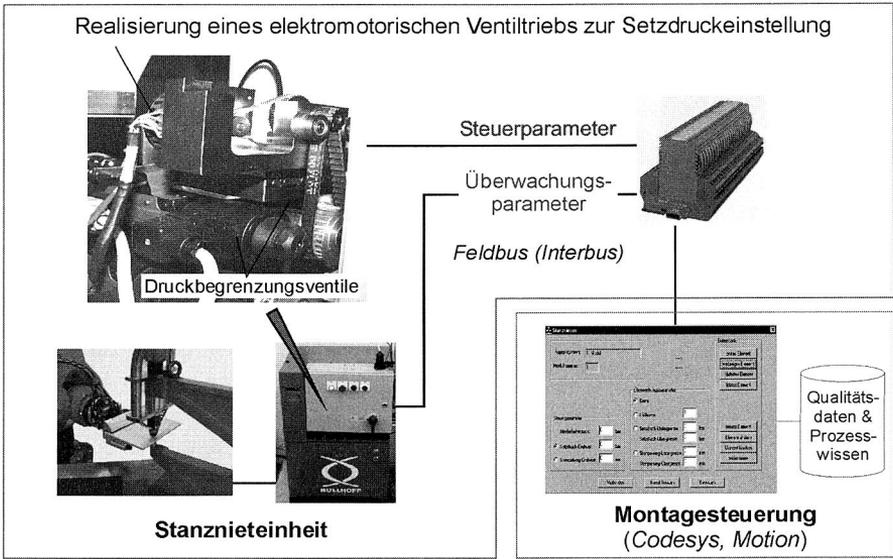


Bild 70: Realisierter Regelkreis zur adaptiven Prozesssteuerung beim Stanznieten

Zur Einstellung des Systemdrucks am Hydraulikaggregat der Stanznieteinheit wird ein Servomotor eingesetzt, der über eine Regelkarte digitale Steuerimpulse aus dem digitalen I/O-Interbusmodul erhält. Die Parameteradaption des Setzdrucks über den Feldbus und die Soft-SPS ist damit gegeben. Weiterhin wurden in *Motion* Funktionen realisiert, die eine schnelle Konfiguration der Steuer- und Überwachungsparameter beim Stanznieten zulassen. Der Datenaustausch zwischen der Stanznietsteuerung und dem Zellenrechner erfolgt dabei über die serielle Schnittstelle.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass Wechselwirkungen zwischen bauteilbezogenen Merkmalstoleranzen und den Montageprozessen durch das Ampel-Modell abgebildet werden können. Die vordefinierten *Referenzmodelle* für die jeweiligen Montageprozesse müssen von einer Montagefachkraft gepflegt und das Ampel-Modell mit Daten gefüllt werden, was im vorliegenden Lösungsansatz jedoch eine umfangreiche Dateneingabe erfordert. Dennoch konnte mit den realisierten Schnittstellen und dem Softwaretool *Motion* der Regelkreis geschlossen werden. Am Beispiel des Verschraubens und des Stanznietens konnte das Konzept der montageinternen Regelkreise zur kontinuierlichen Adaption von technologischen Fügeprozessparametern realisiert und dessen Wirksamkeit exemplarisch nachgewiesen werden.

Für die die Akzeptanz dieses Konzeptes in der Anwendungspraxis ist der Aspekt der *Datensicherheit vor unbefugtem Zugriff von externer Seite* zu beleuchten. Um Montagestörungen aufgrund von Manipulationen an den Steuerungsdaten vorzubeugen, sind geeignete Schutzmechanismen in das Softwarekonzept zu integrieren. Eine interne Prozessdatenänderung von unautorisierten Montage Mitarbeitern wird durch den Passwortschutz am Zellenrechner stark erschwert. Zusätzlich können alle Maßnahmen getroffen werden, die auch im Office-Bereich bei PC's eingesetzt werden. Hierzu zählt beispielsweise die Erfassung biometrischer Daten wie der Fingerabdruck.

Eine große Herausforderung ist der Schutz des Firmennetzes und damit des Intranets in der Montage durch Zugriffe von außerhalb. Während der Zugriff im werks- oder standortinternen *Intranet* noch vergleichsweise überschaubar und damit beherrschbar ist, bestehen durch eine Vernetzung mit Lieferanten oder Zweigwerken über *Internet* erhebliche Sicherheitsrisiken. Diese können durch den Einsatz von Firewalls reduziert, aber nicht vollständig behoben werden. Daher ist der Einsatz verschlüsselter Verbindungen (VPN) sinnvoll. Den höchstmöglichen Schutz erhält man, wenn generell Veränderungen von Prozessparametern von außerhalb des Zellenrechners nicht möglich sind, indem nur lesende und keine schreibenden Zugriffsrechte vergeben werden. Eine völlige Sicherheit vor externer Manipulation kann es jedoch nicht geben. Dies ist ein Grund dafür, weshalb viele moderne Gerätesteuerungen lediglich die Möglichkeit bieten, über einen Web-Server innerhalb der Gerätesteuerung Prozessdaten extern bereitzustellen. Diese Prozessinformationen können dann am Zellenrechner visualisiert werden, wohingegen eine direkte Veränderung der Prozessparameter in der Steuerung nicht zugelassen wird.

### **6.3 Erweiterung eines PDM-Systems zur Koordination von Montage und Konstruktion**

PDM-/ EDM-Systeme werden heute zunehmend in Unternehmen eingesetzt um bereichsübergreifend Projektinformationen auszutauschen. Sie können auch als Plattform zum Austausch von fügeteilbezogenen Daten zwischen Montage und Konstruktion sowie zwischen Montage und Fertigung über *Intranet* genutzt werden. Hierzu bedarf es einer Erweiterung des PDM-Systems zum Abbilden von bidirektionalen Montageinformationen. Zudem kann eine Rückführung von Montagewissen in die Konstruktion und umgekehrt die Bereitstellung von produktbezogenen Fügstellen-Solldaten (z.B. Toleranzen) aus der Konstruktion an die Montage erfolgen. Die Installation und Programmierung des *PDM-Clients* wurde auf dem Montagezellenrechner realisiert. Dieser bildet

die zentrale Benutzerschnittstelle zur Kommunikation mit den vorgeschalteten Arbeitsbereichen wie Konstruktion und Fertigung über das PDM-System.

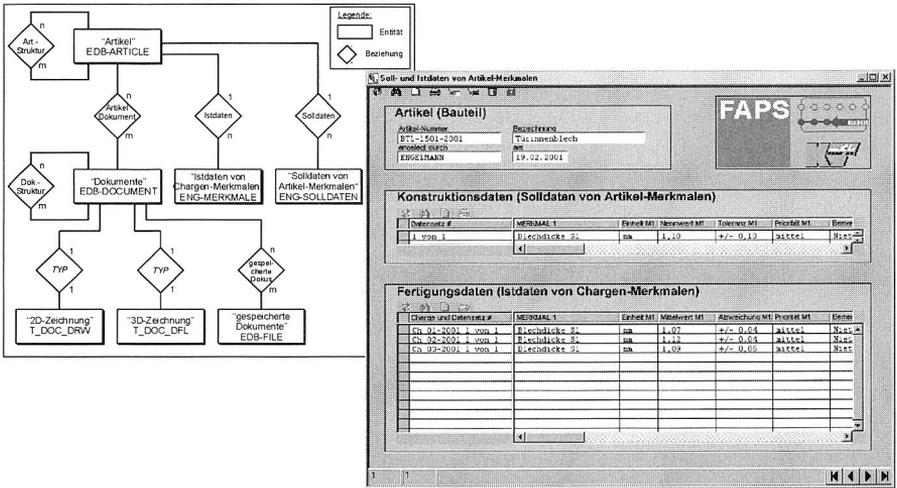


Bild 71: Datenmodell und Eingabemaske für den direkten Datenaustausch der Montage mit vorgeschalteten Arbeitsbereichen durch ein PDM-System

Die zentrale datentechnische Vernetzung der Montage mit den vorgeschalteten Bereichen wie Fertigung und Konstruktion erfolgt mittels eines PDM-Systems (Axalant, Fa. Eigner+Partner). In Zusammenarbeit mit dem Konstruktionsbereich wurde die Anbindung eines PDM-Clients im Montagebereich an einen PDM-Server in der Konstruktion realisiert. Zudem erfolgte die Modellierung eines Prozessdatenmodells zur Abbildung von Betriebsdaten in der Montage (Bild 71). Die Umsetzung der Client-Benutzerschnittstelle erfolgte auf dem vernetzten Montagezellenrechner. Hierzu musste der Client an die Informationserfordernisse der Montage angepasst (customized) werden. Im Folgenden wird primär der direkte Datenaustausch mit dem *Konstruktionsbereich* über das PDM-System erläutert.

Die Konstruktion legt die geometrischen sowie mechanischen Bauteileigenschaften inklusive der Toleranzvorgaben und damit auch die geeigneten Fertigungs- und Montageverfahren fest. Große zulässige Fertigungstoleranzen beinhalten ein erhöhtes Montagestörfpotential und beeinflussen damit die Wirtschaftlichkeit automatisierter Montageanlagen. Umgekehrt führen sehr enge Fügeteiltoleranzen zu erhöhten Produktionskosten. Die Vorgaben zur Fügestellengeometrie inklusive zugehöriger Toleranzwerte werden auch heute noch in Bauteilzeichnungen unter einer Bauteilidentifikationsnummer

abgespeichert. Zusätzlich existieren für Baugruppen Montagezeichnungen und Stücklisten. Die Problematik besteht darin, dass EDV-Systeme Konstruktionszeichnungen nicht interpretieren können. Somit müssen die einzelnen Fügestellen eine eindeutige Bezeichnung (auch in der CAD-Zeichnung) erhalten und die Werte textuell in die EDV übertragen werden. Das Bild 72 zeigt die generierten Eingabemasken für die Übertragung der Fügeeteil-Solldaten und Istdaten in die PDM-Software.

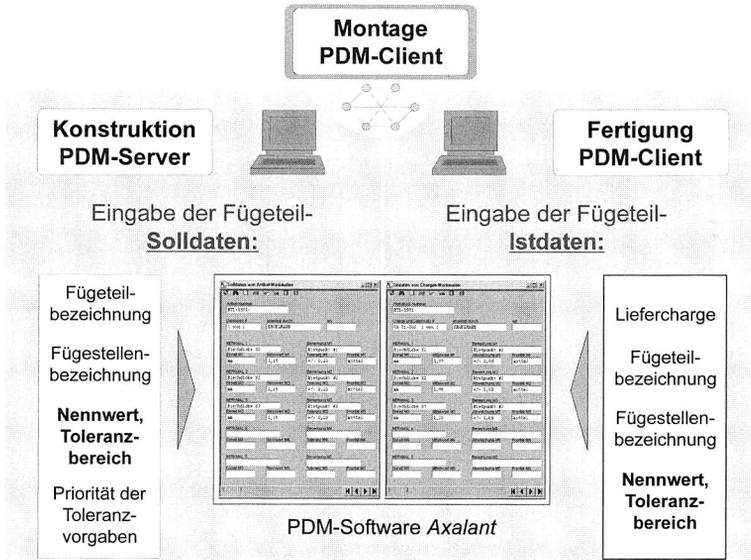


Bild 72: Eingabemaske für Fügestellen Soll- und Istdaten in das PDM-System

Unter der Bauteil- bzw. Baugruppenidentifikationsnummer können im PDM-System *Solldaten* zu den nominellen Fügestellenmerkmalen hinterlegt werden (Bild 72, links). Es lassen sich Angaben dazu machen, ob es sich um funktionale Toleranzen handelt und ob eine Aufweitung von Toleranzfenstern aus Wirtschaftlichkeitsgründen unter bestimmten Rahmenbedingungen möglich ist. Der schnelle, direkte Datenaustausch zwischen Montage und Konstruktion mittels PDM hilft, Fehler präventiv zu vermeiden. Es werden folgende *konstruktionsbezogene Daten auf dem PDM-Server* bereitgestellt:

- Vorgaben der zulässigen Bauteiltoleranzen (Sollwerte) seitens der Konstruktion
- Anfragen für die Aufweitung von Toleranzfenstern seitens der Montage

Neben den Sollwerten sind die *Istwerte zur Fügebauteilqualität* aus der Fertigung von hoher Montagebedeutung. Die Montage benötigt aus der Qualitätskontrolle Informationen darüber inwieweit die gelieferten Fügebauteile die Toleranzvorgaben aus der Konstruktion einhalten. Die generierten Eingabemaschen (Bild 72, rechts) erlauben einen direkten Zugriff auf montagebedeutungsvollere Fügebauteilinformationen aus dem Fertigungsbereich wie:

- Qualitätsdaten zu Fügebauteilen (Istwerten)
- Prozessvorgaben an die Montage durch die Montageplanung

In der Fertigung können so montagebedeutungsvolle Toleranzinformationen zu den Fügebauteilen im PDM-System hinterlegt und direkt im Montagebereich abgerufen werden. Hierzu musste der Client an die Informationserfordernisse der Montage angepasst (customized) werden. Von der Fertigungsseite wurden SPC-Datensätze zu montagebedeutungsvollen Produktmerkmalen in die relationale Datenbank eingegeben. Zur Vereinfachung können die Qualitätsdaten direkt aus einem QM-Softwaretool in das PDM-System übertragen werden. Der Montageanlagenbediener hat damit die Möglichkeit, sich vorab am Montagezellenrechner im PDM-System über das Qualitätsniveau der sukzessive in die automatisierte Montagezelle einlaufenden Fügebauteile zu informieren. Es erfolgt eine Prüfung der Fertigungsdaten im PDM-System und ggf. die manuelle Übernahme von Qualitätsdaten in das Kommunikationsinterface *Motion*. Erforderlichenfalls können so die Montageprozessparameter über die Zellensteuerung angepasst werden.

Für einen mannlosen Montageprozessablauf mit Prozessadaption ist eine automatisierte Importfunktion der Qualitätsdaten aus dem PDM in die Montageablaufsteuerung erforderlich. Alternativ kann mit dem dezentralen Konzept der Datenübertragung mittels Werkstückdatenträgern auf den Paletten gearbeitet werden. Eine Datenschnittstelle zur automatischen Datenübergabe zwischen dem PDM-System und dem übergeordneten Kommunikationsinterface *Motion* in der Montagezelle wurde in der vorliegenden Arbeit noch nicht umgesetzt. Die relevanten Daten wurden manuell übertragen.

In entgegengesetzter Richtung können zudem zeitsynchron wichtige Informationen über fertigungstoleranzbedingte Montagestörungen zur Optimierung von Fertigungsprozessen sowie Möglichkeiten der Toleranzaufweitung zur Produktionskostenreduktion an die Fertigung zurückgemeldet werden. Der schnelle, direkte Datenaustausch zwischen Montage und Fertigung auf Basis des PDM-Systems hilft, Fehler präventiv zu vermeiden. Die Weiterentwicklung der dargestellten Kommunikationslösung ist in [97],[14] erläutert.

Fehler bei der montage- und fertigungsgerechten Produktgestaltung haben negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von automatisierten Produktionssystemen. Daher erfolgt in entgegengesetzter Richtung die *Rückkopplung von Montagewissen an die*

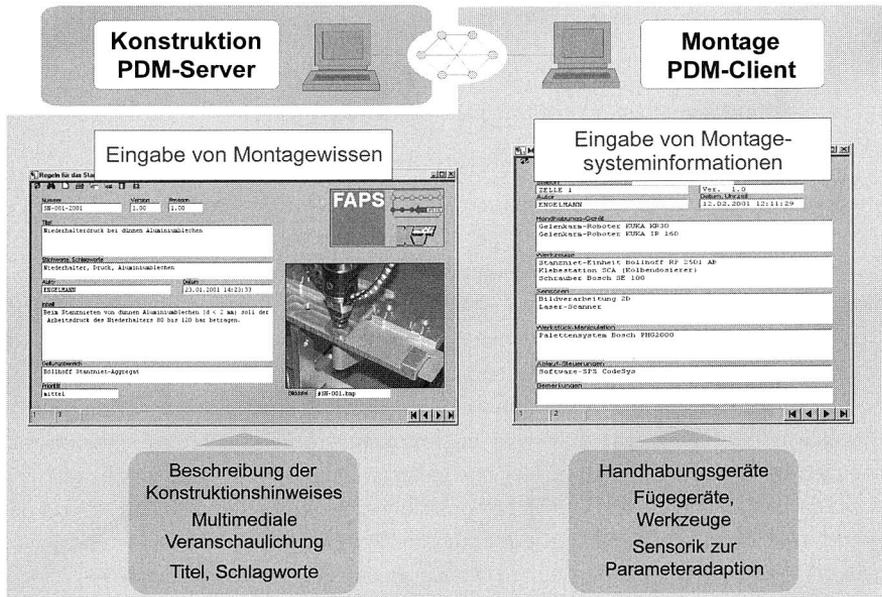
*Konstruktion* zur präventiven Vermeidung von Konstruktionsfehlern. Das Montagewissen muss zunächst formal aufbereitet werden und kann dann über eine spezielle Maske in das PDM-System eingegeben werden. In Bild 73, links ist exemplarisch ein Konstruktionshinweis zur optimalen Gestaltung von Stanznietverbindungen bei der Mischbauweise mit Aluminium und Kunststoff mit Angabe der optimalen Nietgeometrie (vgl. Kap. 3.3.2) angegeben. Der Konstruktionshinweis enthält neben der Kurzbezeichnung und den organisatorischen Daten eine ausführliche, textuelle Beschreibung. Die Eingabemaske beinhaltet *organisatorische Angaben* wie

- Fertigungs-/ Montageverfahren, z.B. Stanznieten
- Automatisierungsgrad und Ausstattung der Montagezelle
- Verfasser der Information, Erstellungsdatum, Revisionsnummer etc.

Kernstück bildet das textuelle Erfahrungswissen in Form einer Infobox. Zudem legt der Montageanlagenbediener eine Priorität (3 Stufen) und den Geltungsbereich für die Information fest. Eine Stichwortsuche erleichtert dem Konstrukteur das Auffinden von Informationen zu einem bestimmten Thema wie beispielsweise dem automatisierten Stanznieten. Der Konstrukteur hat die Möglichkeit, den Konstruktionshinweis zu kommentieren. Zudem können zur Illustration des Konstruktionshinweises multimediale Daten wie digitale Bilder und Videostreams hinterlegt werden. Bei Bedarf startet das PDM-System den entsprechenden Viewer automatisch, um beispielsweise Videoaufzeichnungen abspielen zu können. Bilder und Videomaterial werden i.d.R. mit einer Digitalkamera aufgenommen, auf dem Montagezellenrechner zwischengespeichert und dann in der zentralen Datenbank abgelegt. Nach der Speicherung der Konstruktionshinweise auf dem PDM-Server stehen sie bereichsübergreifend zur Verfügung.

Weiterhin kann das PDM-System als Datengrundlage für die Erstellung allgemeingültiger Konstruktionsregeln fungieren. Aus dem PDM-System lassen sich Montageinformationen und Anwendungsbeispiele entnehmen und in Form von Konstruktionsregeln aufbereiten. An der Universität Erlangen wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 396 ein Assistenzsystem zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Umsetzung der komplexen Anforderungen des Design for X entwickelt [111]. Dieses unterstützt den Konstrukteur bei der montagegerechten Produktgestaltung für die automatisierte roboterbasierte Montage.

Zusätzlich wurde die Möglichkeit der Eingabe von Informationen zur Spezifizierung von Fertigungs- und Montageanlagen als Arbeitsgrundlage für die *Montageplanung* geschaffen (Bild 73, rechts). In der Montage werden die Anlagendaten fortlaufend aktualisiert und die Ausstattung der Fertigungszelle mit Handhabungseinrichtungen, Fügegeräten und Sensorik beschrieben. Zur Unterstützung der Montageplanung erfolgt ein Hinweis auf die Fehlertoleranz sowie Robustheit des Montagesystems.



**Bild 73:** Eingabemasken des Montage-PDM-Clients zur Speicherung von Montagewissen für den bilateralen Informationsaustausch mit der Konstruktion

Zusammenfassend können formalisierte Montagehinweise dem Konstrukteur bei der montagegerechten Produktgestaltung helfen. Damit werden Montagestörungen präventiv vermieden und die gesamte Prozesskette robuster gestaltet. Analoges gilt für den bereichsübergreifenden Austausch von fügeteilbezogenen Soll- und Istdaten, die die Basis für die adaptive Montageprozessführung bilden. Die erforderlichen Funktionalitäten für die Dateneingabe und -manipulation wurden im PDM-Client des Montagezellenrechners erfolgreich implementiert.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lösungsansatzes unter Einsatz der Simulationstechnik

Neben den Faktoren *Produktqualität und Lieferzeit* stellen insbesondere die *Kosten* einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor dar. Erfolgreiche Unternehmen arbeiten kontinuierlich an Strategien zur simultanen Optimierung dieser drei Erfolgsfaktoren. Der in der Arbeit vorgestellte holistische Ansatz zur robusten Gestaltung von Prozessketten beinhaltet adaptive Steuerungslösungen in der automatisierten Montage mit dem Ziel einer partiellen Aufweitung von Fügeiteiltoleranzen sowie einer Verminderung von störungsbedingten Anlagenstillstandszeiten. Darüber hinaus erfolgt der Einsatz eines *bereichsübergreifenden, multimedialen PDM-Systems* für einen schnellen Informationsaustausch zur präventiven Fehlervermeidung. Die Umsetzung dieser Maßnahmen beinhaltet ein großes Potenzial zur Senkung der Fertigungskosten in der gesamten Prozesskette. Auf der anderen Seite sind zur Realisierung dieses holistischen Gesamtkonzepts Investitionen für die Erweiterung der Montage- und Informationssysteme erforderlich. Mit Hilfe einer entscheidungstheoretischen, quantitativen Analyse soll anhand eines Investitionsprojektes exemplarisch geklärt werden, ob eine solche Erweiterungsinvestition in die Montage ökonomisch sinnvoll ist. Aus Gründen des Datenschutzes wurden die Daten eines namhaften Automobilherstellers in dem nachfolgenden Rechenbeispiel anonymisiert. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei der PKW AG wird unter Zugrundelegung folgender *entscheidungstheoretischer Überlegungen* durchgeführt:

- I) Dem Anlagenbetreiber (PKW AG) stehen *zwei Handlungsalternativen* zur Auswahl:
  - a) Implementierung einer adaptiven Prozesssteuerung für das Stanznieten im Karosseriebau sowie eines PDM-Systems für den bereichsübergreifenden Informationsaustausch oder
  - b) Unterlassungsalternative
- II) Die Handlungskonsequenzen werden zum einen durch die Entscheidung des Anlagenbetreibers, zum anderen aber auch durch eine Vielzahl sonstiger ergebnisbeeinflussender Faktoren (z.B. Konkurrenzsituation) bestimmt, deren Entwicklung der Entscheidende weder kontrollieren noch eindeutig vorhersagen kann. Zur Vereinfachung wird in diesem betriebswirtschaftlichen Entscheidungsmodell unterstellt, dass der Anlagenbetreiber die *zukünftige Entwicklung seiner Umwelt voraussehen kann*. Damit kennt er bereits die wesentlichen eintretenden Umweltzustände, wie beispielsweise die Entwicklung der Absatzzahlen oder die Fügeiteilqualität. Es handelt sich um eine *Entscheidung unter Sicherheit*, was die Investitionsrechnung vereinfacht.
- III) Die *monetäre Zielgröße* stellt die *Maximierung des Unternehmensvermögens* dar.

Nachfolgend wird anhand der Beispielanwendung *Stanznieten einer PKW-Türkarosse* bei der PKW AG geprüft, inwieweit die in Bild 4 dargestellte Zielsetzung der Produktionskostenreduktion erfüllt werden kann. Hierzu werden die in der Versuchszelle am FAPS ermittelten Ergebnisse auf die Serienstückzahl hochgerechnet. Zur Berücksichtigung von Zinseffekten erfolgt eine *Dynamische Investitionsrechnung* (Bild 74). Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird für einen Zeitraum von *vier Jahren* durchgeführt, da davon auszugehen ist, dass alle vier Jahre ein Modellwechsel stattfindet. Danach wird die Produktionsanlage ersetzt. Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit des dargestellten holistischen Konzepts, müssen folgende ökonomische Daten bestimmt werden:

- I. Investitionskosten mit Abschreibungszeitraum und Betriebskosten
- II. Erwartete Einsparungen durch robustheitssteigernde Maßnahmen

zu I.: Die zusätzlichen *Investitions- und Betriebskosten* für die Systemerweiterung lassen sich durch die Auswertung der getätigten Ausgaben für die erforderlichen Automatisierungskomponenten, d.h. Hard- und Software ermitteln. Hierbei ist eine enge Zusammenarbeit mit der Arbeitsvorbereitung, der EDV und dem betriebsinternen Rechnungswesen erforderlich. Zunächst werden die Auszahlungen bzw. Kosten ermittelt.

Für die *adaptive Prozessparameteradaptation beim Stanznieten* wird die Annahme getroffen, dass die Systemlösung an *einer* Roboterlinie eingesetzt wird. Es errechnen sich folgende Zusatzkosten:

1. Investitionskosten für Hard- und Softwareerweiterung: Für die hardwaretechnische Erweiterung der Gerätesteuerung des Stanznietensystems zur stufenlosen elektronischen Einstellung des Setz- und Niederhalterdrucks wird ein Servomotor mit Servoantrieb und digitalem Ein-/Ausgabemodul für den Feldbus benötigt. Für die zusätzliche Hardwareausstattung sind 1.100 € zu veranschlagen. Zudem wird für die Aufnahme der Kraft-Weg-Kurven beim Stanznieten eine spezielle Auswerteeinheit am Hydraulikaggregat erforderlich. Die Auswertung der Prozessdaten erfolgt am Zellenrechner mit den Programmen BIMON und Biforce 40 (Fa. Binär). Die Hard- und Softwarekosten für die optionale Systemerweiterung betragen 3.500 €. Hinzu kommen noch der Entwicklungsaufwand für das Kommunikationsinterface *Motion* (antellig ) und die Lizenzkosten für die Access-Datenbank (120 €). Das Kommunikationsinterface *Motion* kann in mehreren Montagezellen parallel Anwendung finden. Da die Software an mehreren Montagezellen eingesetzt werden kann, lassen sich die Entwicklungskosten in der Praxis auf mehrere Zellen umlegen und anteilig verrechnen. Nachfolgend wird jedoch vom ungünstigsten Fall ausgegangen, dass die Software nur in einer Montagezelle eingesetzt wird. Die Gemeinkosten für die Pro-

grammierung der Software *Motion* belaufen sich auf 20.500 €. In der Summe liegen die Investitionskosten für Hard- und Software bei 25.500 € pro Montagezelle.

2. Betriebskosten für Wartung und Datenpflege: Die automatisierte Prozessparameteranpassung erfolgt auf der Basis von Entscheidungsregeln (Ampel-Modell). Hierzu sind neben den zugehörigen Prozessparametern auch die Solldaten und ggf. Istdaten der Fügeteile zu hinterlegen. Die Datenbank muss stets gepflegt und erweitert werden. Je größer die Produktpalette ist, die auf der Stanznietanlage gefertigt wird, umso größer ist auch der Programmieraufwand. Im Schnitt können für die Datenpflege und die Wartung der zusätzlichen Steuerungskomponenten 3.000 €/a (2 Arbeitsstunden pro Woche zu 30 €/h) veranschlagt werden.
3. Zeitaufwand für die Versuchsdurchführungen (DOE): Zur Ermittlung der optimalen Einstellung der Stanznietprozessparameter sind Probenietungen erforderlich. In vielen Fällen können die Daten auch direkt aus der laufenden Produktion entnommen werden. Bei einem Produktneuanlauf ist die Datenbasis vergleichsweise klein und der experimentelle Aufwand hoch. Die Datenbasis nimmt im Laufe der Zeit stetig zu (Lerneffekt bzw. Erfahrungskurve). Im Schnitt können für die Versuchsdurchführung 1.500 €/a (1 Arbeitsstunde pro Woche zu 30 €/h) veranschlagt werden.

Für den *montageübergreifenden Informationsaustausch zur Fehlervermeidung* fallen zusätzlich Investitions- und Betriebskosten für das PDM-System an (im Beispiel ist dies die Software *axalant der Fa. Eigner & Partner*). Die Schwierigkeit besteht in einer gerechten Zurechnung der Kosten zu den einzelnen Montagestationen. Nachfolgend wird angenommen, dass die Kosten auf vier Montagestationen verteilt werden können.

1. Die *Gemeinkosten* für die *Investition* in Customizing-Tools (ca. 22.000 €) sowie der Programmieraufwand für das Customizing (ca. 20.000 €) zur Funktionserweiterung des PDM-Systems *axalant* müssen auf eine Vielzahl von Arbeitsstationen verteilt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die PDM-Basissoftware mit CAD-Integration (140.000 € für 20 User) bereits im Betrieb installiert ist und keine Zusatzkosten verursacht. Bei einer Aufteilung der Gemeinkosten auf beispielsweise *vier Montagestationen* entstehen anteilige Investitionskosten von 10.500 €.
2. Die *Einzelkosten* für die Rechnerhardware (je PC 2.000 €) und die Software-Clients (je 5.500 €) kann den einzelnen Fertigungsstationen direkt zugeordnet werden. Bei einer Abschreibungsdauer von drei Jahren ergeben sich anteilig 2.500 €/a.
3. *Betriebskosten* entstehen für die Eingabe der Konstruktions- und Fertigungsinformationen durch das Bedienpersonal. Die Datenbank im PDM-System muss stets gepflegt und erweitert werden. Im Schnitt können für die Datenpflege 3.000 €/a veranschlagt werden.

Zu II.: Die zu erwartenden positiven *Einsparungseffekte* durch das holistische Konzept zur Robustheitssteigerung von Prozessketten werden nachfolgend quantifiziert.

Zunächst ist zu klären, ob es sich um eine Erweiterungsinvestition in eine bereits bestehende Montageanlage handelt, für die bereits umfangreiche Informationen zu Produktionsausfällen und deren Ursachen vorliegen. In diesem Fall kann das vorhandene Datenmaterial für die Wirtschaftlichkeitsrechnung eingesetzt werden. Handelt es sich jedoch um eine komplette Anlagenneueinvestition auf der grünen Wiese, so müssen für das Störpotential erst Basisdaten ermittelt werden. In diesem Fall kann das Störpotential der geplanten Montageanlage durch Versuche an technisch vergleichbaren Anlagen abgeschätzt werden, oder aber es können Instrumente der Simulationstechnik (s.u.) eingesetzt werden. Nachfolgend wird von einer Erweiterungsinvestition ausgegangen.

Durch die *adaptive Prozessparameteradaptation beim Stanzen* lassen sich folgende Kosteneinsparungen erzielen:

1.) *Kosteneinsparungen im Produktionsprozess* ergeben sich durch geringere Materialkosten für das Blechhalbzeug (Coils) und durch reduzierte Störzeiten in der automatisierten Stanzenanlage. Die experimentellen Stanzenuntersuchungen (vgl. Kap. 3.3.2) haben gezeigt, dass sich durch die Anpassung des Nietsetzdrucks an die Blechqualität Prozessstörungen deutlich reduzieren lassen. Die Anlagenlaufzeit wird erhöht, der Teileausschuss vermindert und der Output gesteigert sowie die Auftragsdurchlaufzeiten reduziert. Die Einsparungen, die sich im Produktionsprozess ergeben, können wie folgt quantifiziert werden:

Die PKW AG fertigt im Schnitt 6.000 Fahrzeuge des Modells *Aluracer* im Jahr. Für jede der jährlich 12.000 Türrohkarossen (Seitentüren) werden 3 qm Blech benötigt. Es ergibt sich ein Jahresbedarf von 36.000 qm/a Blech. Bei einer Blechstärke von 1mm bedeutet dies einen Jahresverbrauch von 97,2 t (=  $36.000 \text{ m}^2 * 0,001 \text{ m} * 2,7 \text{ t/m}^3$ ). Durch die Aufweitung der zulässigen Dickentoleranzen für das Aluminiumblech Anticorodal 120 (AA6016, T4, EDT1) könnten im Einkauf die Beschaffungskosten um rund 5% gesenkt werden. Es ergibt sich eine *Materialkosteneinsparung* um:

$$3 \text{ €/kg} * 97.200 \text{ kg} * 5\% = 14.580 \text{ €/a}$$

Die Türkarossen werden bei der PKW AG in einer teilautomatisierten Stanzenanlage gefertigt. Überträgt man die Ergebnisse aus der roboterbasierten Versuchszelle am FAPS auf die roboterbasierte Montagelinie bei der PKW AG, so lässt sich in der Türrohkarossenfertigung die *Störrate* von 2% auf 1% bei adaptiver Prozesssteuerung reduzieren. Bei einer Stanzenprozessstörung würde die Türkarosse unbrauchbar und müsste entsorgt werden. Pro entsorgter PKW-Türkarosse entsteht ein Wertverlust von 100 € (ein Gutteil kann gewinnbringend verkauft werden). Demnach errech-

net sich eine *Ausschusskostenreduktion* um 50% auf  
 $12.000 \text{ Türkarossen/a} * 1\% * 100 \text{ €} = 12.000 \text{ €/a}$

2.) Verminderte *Reklamationskosten* aufgrund der Abnahme von Beanstandungen seitens des Kunden durch höhere Produktqualität: Eine sichtbare fehlerhafte Stanznietverbindung wird spätestens beim Lackieren der Seitentüre erkannt. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit hierfür ist sehr hoch. Versteckte Nietverbindungen unter der Türverkleidung sind für den Kunden nur schwer erkennbar. Es ist damit relativ unwahrscheinlich, dass ein Kunde eine fehlerhafte Stanznietverbindung in der Seitentüre reklamiert. Reduktion der Reklamationskosten: 0 €/a

3.) *Imagegewinn* beim Kunden durch höhere Produktqualität: Der Imagegewinn, der den Kunden zum Kauf des Produktes bewegt, kann nur schwer quantitativ beziffert werden. Er darf in der Gesamtbetrachtung jedoch nicht vernachlässigt werden.

Durch den *montageübergreifenden Informationsaustausch zur Fehlervermeidung* sind ebenfalls bereichsübergreifend Kostenvorteile zu erzielen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Kosteneinsparungen für interne *Geschäftsprozesse* zu quantifizieren. So stellt sich die Frage, wie viel Zeit der Konstrukteur spart, indem er über das PDM-System *axalant* einen direkten Zugriff auf Konstruktionsempfehlungen zur Gestaltung von Stanznietverbindungen aus dem Montagebereich erhält. Zudem ist eine Studie zu den Behebungskosten von Konstruktionsfehlern erforderlich. Ähnliches gilt bezüglich der Kommunikation mit den Fertigungsbereichen und der schnellen Behebung von unzulässigen Fertigungstoleranzen.

#### *Zusammenfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Investition in ein PDM-System:*

Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Ermittlung von zahlenmäßig belegbaren Einsparpotentialen und bei der gerechten Aufteilung der Gemeinkosten kann für die Investition in ein montageübergreifendes *PDM-System zur Fehlervermeidung keine* detaillierte Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt werden.

#### *Zusammenfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Investition in eine Systemlösung zur adaptiven Prozessparameternachführung in der Montage:*

Die zusätzlichen Investitionskosten für die Systemerweiterungen betragen insgesamt 25.500 €. Zudem errechnen sich Betriebskosten in Höhe von 4.500 €/a. Dem steht ein errechnetes Einsparpotential von rund 26.500 €/a für die adaptive Prozessführung beim Stanznieten gegenüber. Zur Berücksichtigung von Zinseffekten wird eine *dynamische Investitionsrechnung* [3], [56] durchgeführt. Die Laufzeit des Investitionsprojektes soll

$T = 4$  Jahre betragen. Zum Startzeitpunkt der Investition  $t=0$  und zu den anschließenden Periodenendzeitpunkten  $t = 1, 2, \dots, T$  treten die Zahlungssalden  $e_t$  (siehe Bild 74) auf. Ein positiver Saldo bedeutet einen Einzahlungsüberschuss (Erlös bzw. Kosteneinsparung höher als Kosten) und ein negativer Wert einen Auszahlungsüberschuss (Kosten höher als Erlöse), immer aus Sicht des Investors betrachtet. Die Abkürzung T€ in der Zahlungsreihe steht für den Multiplikator 1.000 €. Zur Berücksichtigung von Zins-effekten wird die *Kapitalwertmethode* angewandt. Hierbei erfolgt eine Abzinsung aller Zahlungssalden auf den Beginn des Planungszeitraumes  $t = 0$ . Als *Kalkulationszinsfuß* wird  $r = 4\%$  zugrunde gelegt (Vorgabe durch Rechnungswesen im Unternehmen).

Eine Investition ist dann sinnvoll, wenn ihr *Kapitalwert*  $K > 0$  ist. Bei einem positiven Kapitalwert ist die Verzinsung des, durch die Investition gebundenen Kapitals höher, als der Kalkulationszinsfuß (hier  $r = 4\%$ ). Die Investition lohnt, weil die Mittelrückflüsse aus dem Investitionsprojekt höher sind als die Zinsen am Kapitalmarkt.

Nachfolgend wird für die oben genannte, erste Handlungsalternative „Implementierung einer adaptiven Prozesssteuerung für das Stanznieten“ eine dynamische Investitionsrechnung durchgeführt:

Periode	$T=0$	$T=1$	$T=2$	$T=3$	$T=4$
Einzahlung $E_t$ (Erlöse)	0	26,5 T€	26,5 T€	26,5 T€	26,5 T€
Auszahlung $A_t$ (Kosten)	-25,5 T€	- 4,5 T€	- 4,5 T€	- 4,5 T€	- 4,5 T€
<b>Saldo <math>e_t</math></b> (= $E_t - A_t$ )	<b>-25,5 T€</b>	<b>22 T€</b>	<b>22 T€</b>	<b>22 T€</b>	<b>22 T€</b>

Bild 74: Zahlungsreihe des Investitionsprojektes „Adaptive Prozessführung“

Wie man in Bild 74 für die erste Handlungsalternative erkennen kann, sind die Salden  $e_t$  (Einzahlungsüberschüsse) in den Perioden  $T=1$  bis 4 stets konstant. Die Berechnung des Kapitalwerts zum Bezugszeitpunkt  $t = 0$  kann bei konstanten Salden anhand folgender Formel erfolgen [3]:

$$K = e_0 + e \cdot \text{RBF}(T, r)$$

Mit den Salden  $e_0 = -25,5 \text{ T€}$  und  $e = 22 \text{ T€}$  (siehe Bild 74) sowie dem Rentenbarwertfaktor  $\text{RBF}(T, r)$  bei  $T = 4$ ;  $r = 4\%$ , d.h.  $\text{RBF}(4; 0,04) = 3,63$  errechnet sich hieraus:

$$K = -25,5 \text{ T€} + 22 \text{ T€} \cdot 3,63 = \underline{54.360 \text{ €}}$$

Somit ergibt sich ein Kapitalwert von  $K = 54.360 \text{ €}$ . Da  $K > 0$  stellt sich die Investition als ökonomisch sinnvoll heraus. Die Investition bringt in den vier Jahren einen um  $54.850 \text{ €}$

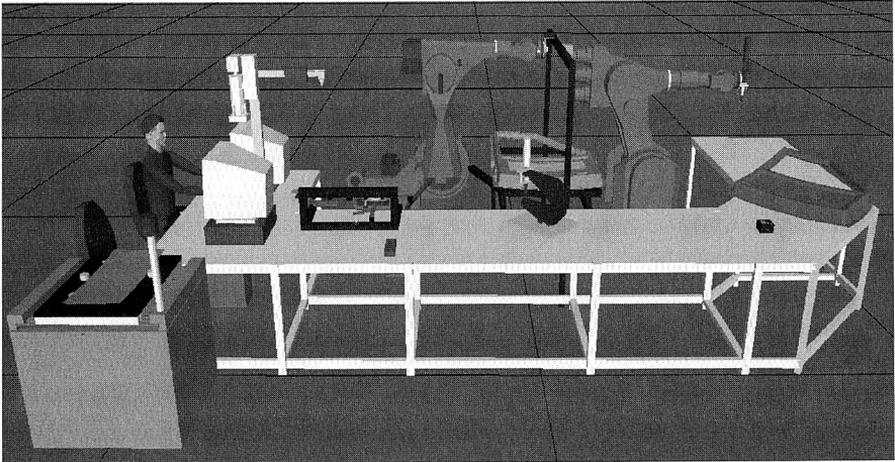
höheren Ertrag als die Unterlassungsalternative, bei der eine Geldanlage am Kapitalmarkt erfolgen würde. Am vorgestellten Beispiel des roboterbasierten Stanznietens von PKW-Türkarossen für den *Aluracer* bei der PKW AG konnte somit die Wirtschaftlichkeit der Erweiterungsinvestition in die adaptiven Montageprozessführung exemplarisch aufgezeigt werden.

### Einsatz der Simulationstechnik für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Mittels einer *Kinematiksimulation* lassen sich traditionell Kollisionsprüfungen in Montagezellen sowie die Offline-Programmierung der Handhabungsgeräte durchführen. Bereits in der Planungsphase von automatisierten Montageanlagen können so durch die *Simulationstechnik* Schwachstellen erkannt und durch deren Behebung die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflusst werden. In [117] wird auf die hohe Bedeutung der Simulation der *Flexibilität* von Montagesystemen in Hinblick auf die Anpassung an unterschiedliche Markt- und Produktszenarien hingewiesen. Mittels einer *Ablaufsimulation* kann der Materialfluss mit optimaler Pufferauslegung gestaltet werden. In [120] werden verschiedene Simulationswerkzeuge für Montageanlagen diskutiert, die jedoch keine Auftretenshäufigkeit von Montagefehlern simulieren können. Die Einsatzmöglichkeiten der Simulationstechnik gehen jedoch darüber hinaus, wie das nachfolgende Beispiel zeigen soll.

Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde anhand des Fügeverfahrens *Stanznieten*, in einer bestimmten Montagesystemkonfiguration durchgeführt. Analog lassen sich auch andere Fügetechnologien wie das automatisierte *Verschrauben* hinsichtlich ihrer ökonomischen Vorteilhaftigkeit analysieren. Bei Erstellung einer *neuen Montagelinie „auf der grünen Wiese“* besteht jedoch das Problem, dass keine Vergleichsdaten zu den Störraten (ohne adaptive Prozesssteuerung) als Grundlage für den Wirtschaftlichkeitsvergleich vorliegen. Für diesen Fall, dass keine vergleichbare Produktionsanlage zur Datenerhebung des realen Störpotentials vorhanden ist, stellt die Abschätzung mittels Simulation die Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeitsrechnung mit und ohne adaptive Systemerweiterung dar. Anhand des Beispiels „roboterbasiertes Verschrauben“ soll aufgezeigt werden, wie das Einsparungspotential durch den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems als robustheitssteigernde Maßnahme abgeschätzt werden kann. Durch die Bildverarbeitung (Robot Vision) lässt sich eine Reduzierung der Spannmittelkosten erreichen, da eine Positionskorrektur elektronisch über die Anpassung der Roboterkoordinaten erfolgt (Bild 24). Auf der anderen Seite fallen Investitions- und Wartungskosten für das Bildverarbeitungssystem inklusive der Beleuchtungseinrichtung an. Der wesentliche Kostenvorteil des Einsatzes von Robot Vision liegt jedoch in einer Reduzierung der Anlagenstörrate, die es zu berechnen gilt.

Ausgangsbasis bildet die *Kinematiksimulation* der Doppelroboterzelle für die Montage und das Verschrauben flächiger Leichtbauteile (Bild 75) mit der Simulationssoftware IGRIP der Fa. Deneb [85]. Hierbei wurde die in Bild 59 beschriebene Montagezellenarchitektur der Versuchsanlage abgebildet.



*Bild 75: Simulation der Doppelroboterzelle mit montagesystembedingten Positionierungenauigkeiten und fertigungsbedingten Werkstücktoleranzen*

In der Kinematiksimulation wird jedoch stets von *idealen Geometrien der Fügeteile und Werkzeuge* ausgegangen. In der Realität treten jedoch Abweichungen bzw. Streuungen in der Bauteilgeometrie und in den Positionstoleranzen der Handlingsgeräte sowie Werkzeuge auf. Die Simulationssoftware bietet über die Offline-Programmierung sowie Abbildung von Sollgeometrien hinausgehende Möglichkeiten der Montageprozesssimulation. So wurde die Montagesimulation dahingehend *erweitert*, dass zusätzlich zu den Idealabmessungen der Montagekomponenten Positionstoleranzen der Handhabungs- und Transportsysteme sowie Toleranzinformationen zu den fertigungsbedingten Füge-teiltoleranzen im Simulationsprogramm hinterlegt werden können. Hieraus lassen sich Aussagen über vorhandene Störpotentiale und damit die Stillstandswahrscheinlichkeit von Montageanlagen ableiten.

Das Bild 76 zeigt eine kinematische Fügeprozesssimulation am Beispiel des konventionellen Verschraubens eines PKW-Türmoduls in eine Türkarosse mittels einer robotergeführten Schraubspindel unter Verwendung metrischer Schrauben. Im Idealfall befindet sich die Schraube in der korrekten Position über der Schraubstelle. Befindet sich die Schraube jedoch aufgrund von Fertigungstoleranzen der Bohrung und/ oder Positions-

fehlern der Schraube bzw. Schraubspindel nicht exakt über der Schraubstelle, dann kann es zu Prozessstörungen kommen.

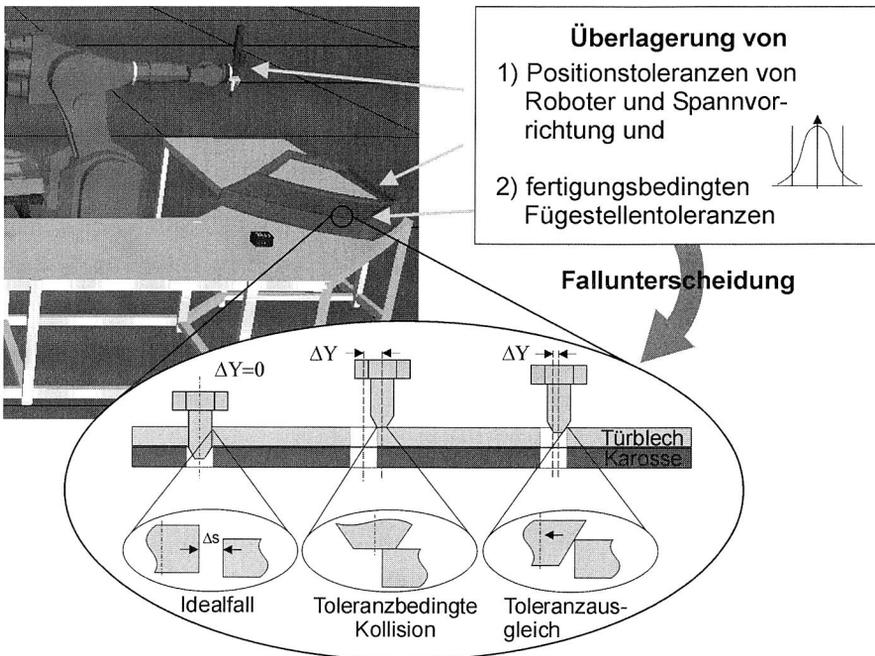


Bild 76: Toleranzbehaftete Fügungssimulation am Beispiel der Schraubtechnik

Prinzipiell lassen sich folgende *drei Fälle* der relativen Lage zwischen der Fügestelle und dem Fügehilfsmittel Schraube unterscheiden :

1. Fall: Im Idealfall sind die Mittelachsen der Fügstellen (Bohrung, Mutter) deckungsgleich mit der Mittelachse der Schraube, d.h. Achsversatz  $\Delta Y=0$
2. Fall: Es liegt ein erheblicher Versatz zwischen der Fügestelle und der Schraube vor, weshalb es zu einer Kollision kommt und die Verschraubung nicht mehr ordnungsgemäß durchgeführt werden kann.
3. Fall: Es liegt ein geringfügiger Versatz zwischen der Fügestelle und der Schraube vor. Dieser kann durch Einführschrägen an den Bauteilen und eine elastische Aufhängung des Werkzeugs ausgeglichen werden. In der Realität gleitet die Schraube in die Bohrung und die Verschraubung kann ordnungsgemäß durchgeführt werden. Durch sukzessives Nachpositionieren kann die korrekte Endposition erreicht werden.

Um diese unterschiedlichen Schraubfälle unterscheiden zu können, wird die Kollisionskontrolle im Simulationsprogramm eingesetzt. Im Idealfall (1.Fall) erkennt das Programm keine Kollision und die Simulation kann standardmäßig ablaufen. Im zweiten und dritten Fall erkennt das Simulationsprogramm jeweils eine Kollision und würde die Simulation abbrechen. Im zweiten Fall ist dies gerechtfertigt, aber im Dritten nicht, da in der Realität die Einführschräge eine ordnungsgemäße Verschraubung ermöglichen würde. Um im dritten Fall einen fehlerfreien Simulationslauf zu erhalten, muss das Programm diesen Fehlerfall erkennen und eine Fallunterscheidung treffen. Dies kann beispielsweise durch eine Programmlogik erfolgen, in der die Schraube in der Ebene um einen Wert  $x$  (z.B.  $x = 0,1\text{mm}$ ) in horizontaler Richtung zur Mittelachse der Fügestelle hin verschoben wird. Nun wird geprüft, ob sich die Schraube ohne Kollision in die Bohrung, um einen vertikalen Tiefenwert  $z$  einführen lässt. Ist dies der Fall, dann handelt es sich um den zweiten Fügefall. Sind beispielsweise die Werte  $z$  und  $x$  identisch ( $z = x$ ), dann beträgt die Einführschräge  $45^\circ$ . Beträgt der Tiefenwert  $z=0$  so liegt eine Kollision vor und es handelt sich um den zweiten Fügefall. Nachdem die drei Fügefälle am Beispiel des Bolzen-Loch-Problems beim Schrauben diskutiert wurden, kann nun der *Ab-  
lauf der toleranzbehafteten Montagesimulation* vorgestellt werden.

Im *ersten Schritt* wird eine konventionelle Montagesimulation durchgeführt. Hierzu werden alle Montagezellenkomponenten sowie die Fügeteile und Fügehilfselemente in ihrer idealen Sollgeometrie im Simulationssystem abgebildet. Für das Simulationsbeispiel wird der Roboter, die Bildverarbeitungs-/Messsysteme, die Schraubspindel mit Mundstück, die Schrauben, die Fügeteile mit den Fügstellen (PKW-Türmodul und Türkarosse) und das Spannsystem für den Werkstückträger in ihrer Idealgestalt modelliert und in der Zelle positioniert. Daraufhin wird das *Ablaufprogramm* für den Montageprozess, beginnend bei der Aufnahme der Schraube ins Mundstück der Schraubspindel bis hin zum Positionieren der Schraube an der jeweiligen Fügestelle und die Zustellbewegung des Werkzeugs in axialer Richtung programmiert.

Im *zweiten Schritt* werden zusätzlich zur idealen Geometrie der einzelnen Montagesystemkomponenten jeweils mögliche *Toleranzfelder* definiert und im Programm gespeichert. Über MACRO-Funktion und das USER-Menü lassen sich mittels der Syntax GSL und CLI zusätzliche Simulationslogiken und -funktionen in die Simulationssoftware IGRIP integrieren. Die realen Positionstoleranzen der Handhabungsgeräte können durch experimentelle Untersuchungen (z.B. Systemfähigkeitsanalyse) ermittelt werden. Die Informationen zu den Fügepartitoleranzen werden anhand von Bauteilvermessungen bestimmt und stammen i.d.R. aus dem Bereich Qualitätssicherung in der Fertigung.

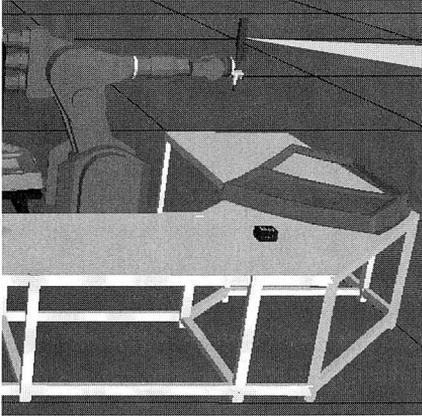
Die experimentell ermittelten Toleranzbereiche werden den Zellenkomponenten zugeordnet. Neben der Streubreite der Einzelmaße werden auch Verteilfunktionen definiert.

Die *Fügestellentoleranzen* im Bauteil lassen sich auf *zwei Arten im Simulationsprogramm abbilden*. Zum einen kann für jeden Toleranzfall ein eigenes Fügeteil gezeichnet und in das Simulationsprogramm importiert werden, was jedoch sehr zeit- und speicheraufwendig ist. Besser ist es, von einer idealen Fügeteilgeometrie auszugehen und im CAD- Bereich der Simulationssoftware einen individuellen Toleranzwert für die jeweiligen Fügestellen aufzuaddieren. Damit unterscheiden sich die Fügestellengeometrien zwischen den einzelnen Simulationsläufen. Den im Simulationsprogramm gespeicherten Roboterpositionen bzw. Werkzeugpositionen werden die *Positionstoleranzen* additiv überlagert. Am Ende der Wirkkette steht die Schraube in der Schraubspindel mit einer exakt definierten Positionierungsunsicherheit (z.B.  $\pm 0,5\text{mm}$ ). Zudem besteht die Möglichkeit, Lagetoleranzen gezielt auf Null zu setzen, wenn beispielsweise Bildverarbeitungssysteme eingesetzt werden, die eine exakte Lagebestimmung der Teile ermöglichen.

Zudem existiert die Auswahlmöglichkeit zwischen *zwei Simulationsmodi* für das Durchlaufen des Simulationsprogramms. Zum einen kann die Simulation mit den *maximal möglichen Toleranzen* durchfahren werden, um so Störpotentiale zu erkennen. Alternativ kann mit der hinterlegten *Toleranzverteilung*, z.B. gaußsche Standardverteilung gearbeitet werden. In diesem Modus werden die, im jeweiligen Simulationslauf aufgeschalteten Toleranzen mittels Zufallsgenerator aus dem angegebenen Toleranzbereich bestimmt. Über eine Vielzahl von Simulationsläufen kann dann ein statistisch repräsentatives Ergebnis für die Störwahrscheinlichkeit in der Montagezelle aufgrund von Positions- und Bauteiltoleranzen ermittelt werden.

Im *angegebenen Beispiel* wurde die Störwahrscheinlichkeit für das automatisierte Verschrauben des PKW-Türmoduls mit metrischen Schrauben ermittelt. Hierzu wurden die Toleranzinformationen wie beschrieben im Simulationsprogramm hinterlegt und anschließend 100 Montagedurchläufe im zweiten Modus, d.h. Rechnung mit gaußscher Toleranzverteilung, durchgeführt. Bei jedem Simulationsdurchlauf werden die verwendeten Toleranzwerte in einer Infobox angezeigt. Der Roboter führt die Relativbewegungen anhand der vorgegebenen Werte (Tag-Points) durch, beginnend bei der Aufnahme der Schraube bis hin zum Positionieren der Schraubspindel und dem Verschrauben der Fügepartner. Tritt dabei eine Kollision von Schraube und Türmodul oder Türkarosse auf, so kommt es zu der oben beschriebenen Fallunterscheidung. Ist der Versatz zu groß, so wird die Simulation abgebrochen. Andernfalls setzen die Korrekturmechanismen zum Fehlerausgleich ein, wobei das Nachgeben einer oder mehrerer Systemkomponenten simuliert wird. Das Simulationsergebnis zeigte am Ende eine Störwahrscheinlichkeit von 1% bei 200 Simulationsläufen (Bild 77). Dieses gute Ergebnis ist auf den Einsatz von *Robot-Vision* zur Lageerkennung der Fügeteile sowie dem Einsatz von Zentrierhilfen bei der Werkstückpositionierung zurückzuführen. Ohne Einsatz der Bildverarbeitung lag die Störwahrscheinlichkeit bei genau 4%. Die Simulationsergebnisse

können in die Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Systemerweiterung der adaptiven Montageprozesssteuerung einfließen, wenn keine realen Stördaten vergleichbarer Anlagen verfügbar sind.



Simulation: Verschraubung Türmodul

Toleranzvorgabe: Normalverteilung für  
Positions- und Geometriewerte

X-Richtung: max. 0,6 mm

Y-Richtung: max. 0,6 mm

Z-Richtung: max. 0,6 mm

Toleranzausgleich: Robot Vision

Anzahl Simulationsläufe: 200

**Ermittelte Störquote: 1,0 %**

*Bild 77: Ergebnisse der Schraubprozesssimulation am Beispiel PKW-Türmodul*

Zusammenfassend besitzt die toleranzbehaftete Montagesimulation den Vorteil, dass mit realitätsnahen Montagebedingungen gearbeitet wird, in der Fertigungstoleranzen und Positioniergenauigkeiten berücksichtigt werden. Die so ermittelten Simulationsergebnisse helfen, die technologischen Risiken sowie die ökonomische Vorteilhaftigkeit realitätsnah abschätzen zu können.

## 8 Zusammenfassung

Die automatisierte Montage komplexer Produkte wie Krafffahrzeuge aus flächigen Leichtbauteilen stellt hohe Anforderungen an die Montagesystemgestaltung. Hierbei stellt die *flexible Automatisierung* von Montageabläufen ein erhebliches Rationalisierungspotential zur Kostenreduktion dar. Eine Maßnahme zur Vermeidung von Montagestörungen ist die Null-Fehler-Produktion in *jeder* Fertigungsstufe. Das Six-Sigma Paradigma beinhaltet sehr eng gefasste, zulässige Schwankungsbreiten für Bauteilmerkmale mit dem Nachteil hoher Fertigungskosten. Durch die Toleranzaufweitung von nicht funktionskritischen Fügeiteilmerkmalen in vorgelagerten Fertigungsprozessen ergibt sich ein Kosteneinsparungspotenzial. Diese Toleranzen müssen jedoch in der Montage sicher beherrscht werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in der robusten Gestaltung von Montageprozessen gegenüber variablen Einflussgrößen wie Bauteiltoleranzen sowie in der Verkürzung der Produktionsprozessketten. Zunächst wurden unterschiedliche Lösungsansätze zur *proaktiven und reaktiven Verfügbarkeitssicherung* von automatisierten Montagesystemen diskutiert. Die festgestellten Defizite liegen in deren Proprietät und bedingten Modularität. Als Reaktion darauf wurde ein innovatives Konzept basierend auf einem *holistischer Ansatz* zur Schaffung robuster Prozessketten für flächige Leichtbauteile erarbeitet.

Ein wesentlicher Aspekt dieses Ansatzes ist die adaptive Prozessführung in der Montage. Ausgangspunkt war zunächst eine systematische Analyse und Klassifizierung der Störgrößen in Montageprozessen. Hierzu wurde eine erweiterte FMEA entwickelt, die bereits in der Planungsphase automatisierte Fehlerreaktionsstrategien für die Montage definiert. Durch experimentelle Sensitivitätsanalysen der Toleranzempfindlichkeit beim Direktverschrauben in Sandwichkonstruktionen und beim Stanznieten von Aluminiumblechen konnte nachgewiesen werden, dass sich durch eine Nachführung von Steuer- und Überwachungsparametern die Toleranzfenster von Fügeiteilmerkmalen erweitern lassen. Zur Erreichung der adaptiven Systemfunktionalität müssen die in die Montage eingebundenen Gerätesteuerungen über geeignete Hardwareschnittstellen verfügen sowie adaptive Softwarefunktionalitäten vorhanden sein. Eine durchgeführte Marktstudie zeigte, dass sowohl bei den Montagegerätesteuerungen, als auch bei den Montageablaufsteuerungen (SPSen) ein großer Entwicklungsbedarf im Hinblick auf externe Schnittstellen für die Prozessparameteranpassung besteht. So mangelt es an herstellerunabhängigen, universellen Referenzmodulen für die in der Montage eingesetzten Fügeitechnologien. Zudem fehlen leistungsfähige Funktionen zur Modellierung und Speicherung von Regelzusammenhängen zwischen Werkstücktoleranzen und Korrekturwerten für Fügeprozessparameter. Aufgrund dieser Defizite in kommerziell verfügbaren Ablaufsteuerungen, wurde das Kommunikationsinterface *Motion* entwickelt. Dieses ermöglicht eine direkte Kopplung zu den unterlagerten Fügegerätesteuerungen,

zur übergeordneten Ablaufsteuerung und zur relationalen Prozessdatenbank. In der Datenbank sind gemäß dem erläuterten Ampel-Modell steuerungstechnische Reaktionsstrategien für die adaptive Montageprozessführung hinterlegt. Es wurden herstellerunabhängige Referenzmodule für die genannten Füge Technologien programmiert, deren Kommunikationskanäle durch den Anlagenbetreiber nur noch systemspezifisch konfiguriert werden müssen. Der Vorteil einer gezielten Aufweitung zulässiger Toleranzfelder von funktionsunkritischen Bauteilmerkmalen infolge der adaptiven Prozessparameternachführung liegt darin, dass sich die Genauigkeitsanforderungen an vorgelagerte Prozessschritte punktuell senken und somit Produktionskosten reduzieren lassen.

Der zweite Aspekt des holistischen Ansatzes besteht in der informationstechnischen Vernetzung der Montage mit vorgeschalteten Bereichen wie Fertigung und Konstruktion. Dies erfolgt heute meist über einen Server, der dem Montagepersonal den Zugriff auf Konstruktionszeichnungen, Q-Daten und die Kommunikation per Email ermöglicht. Eine datentechnische Aufbereitung dieser Informationen zur direkten Verwendung in automatisierten Montagesystemen erfolgt nicht. Daher wurde die Vernetzung einer Montagezelle mit einem *PDM-System* durchgeführt. Der PDM-Client auf dem Montagezellenrechner bietet dabei die Möglichkeit auf Füge Stellen-Solldaten aus der Konstruktion zuzugreifen und diese mit aufbereiteten Füge Stellen-Istdaten aus der Fertigung und Qualitätssicherung abzugleichen. Das Ergebnis wird in das Kommunikationsmodul *Motion* übernommen. Zudem wurde das PDM-System dahingehend erweitert, dass *Konstruktionshinweise aus der Montage* in textueller und graphischer Form direkt in der Datenbank des PDM-Systems abgelegt und so der Konstruktion zugänglich gemacht werden können. Durch Fehlerprävention lassen sich so bereichsübergreifend robuste Prozessketten für die Montage flächiger Leichtbauteile realisieren.

Das vorgestellte holistische Konzept zur robusten Gestaltung von Prozessketten wurde exemplarisch in einer roboterbasierten Versuchszelle implementiert und am Beispiel der Füge Techniken Stanznieten und Direktverschrauben verifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten maschineninternen und systemübergreifenden Regelkreise eine applikationsspezifische Aufweitung der Toleranzfenster in den vorgelagerten Fertigungsbereichen ermöglichen. Ergänzend lassen sich bereits in der Produktionsplanungsphase mittels einer Kinematiksimulation produktspezifische Informationen zum vorherrschenden Störpotential in einer automatisierten Montageanlage ermitteln und Simulationsdaten zur Wirkung von verfügbarkeitssichernden Maßnahmen gewinnen. Eine abschließende Kostenanalyse am Beispiel des Stanznietens von PKW-Türkarossen zeigte die ökonomische Vorteilhaftigkeit des vorgestellten holistischen Ansatzes.

## Literaturverzeichnis

- [1] Angerer, T.: Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten; Dissertation, TU München (iwb, Band 185); Herbert Utz Verlag, München, 2004
- [2] Birkelbach, R.: Neue Verbindungstechnik für Dünobleche; Stahl, 1994, Nr. 5, S. 46-48
- [3] Bitz, M.: Übungen in Betriebswirtschaftslehre; 5. Auflage; Vahlen-Verlag, München, 1999 ; S. 195 – 267
- [4] Bone, G.M.; Capson, D.: Vision guided fixtureless assembly of automotive components ; Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 19/ 2005; p. 79 – 87
- [5] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.: Design for Assembly (DfA): a designer's handbook; Boothroyd Dewhurst Inc., Wakerfield, Rhode Island
- [6] Branam, B.: Design for Assembly Cuts Assembly Defects by 80 Percent; Motorola Inc.; Appliance Manufacture; 1991
- [7] Brodtmann, Thilo; Rohwedder, Joachim: Robotik + Automation - Die Branche lag voll im Soll; Maschinenmarkt, 10.03.2005
- [8] Ceglarek, D.,; Shi, J.: Fixture diagnosis for sheet metal assembly with consideration of measurement noise; Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Bd. 121 (1999) H. 4, S. 771 - 777
- [9] Dohmen, M.: Entwicklung eines stationären visuellen Mehrensensorsystems zur Referenzmaßfassung bei großen Werkstücken; Dissertation, Ruhr-Universität Bochum; Shaker-Verlag, Aachen; 1999
- [10] Ehrenstein, G. W.; Ahlers-Hestermann, G. (Hrsg): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik; Hanser Verlag, München, 2004
- [11] Erlach, K.; Zeh, K-P.: Produktion in Deutschland oder Osteuropa ?; wt Werkstattstechnik online; 95 (2005) H.4; S. 186 – 190
- [12] Eversheim, W.; Schuh, G.: Standart, individualisiert – individuell; In: Reinhard, G.; Zäh, M.F. (Hrsg.), Marktchance Individualisierung; Springer Verlag, Berlin; S. 55 – 63
- [13] Feldmann, K.; Gergs, H-J.; Slama, S.; Wirth, U.: Montage strategisch ausrichten – Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen; Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg; 2004

- [14] Feldmann, K.; Meerkamm, H.; Rückel, V.; Koch, A.: Prozessdatenmanagement – der Schlüssel zum Erfolg; ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 99 (2004). H.10, S. 582 – 585
- [15] Feldmann, K.: Anforderungen an leistungsfähige Montagelösungen im globalen Wettbewerb; 1.IIR Montageforum in Stuttgart, 28.6.2000
- [16] Feldmann, K.; Müller, B.; Haselmann, T.: Lösungskonzepte für die flexible Automatisierung der Montage flächiger Leichtbauteile; wt Werkstatttechnik, 89 (1999) H. 9, S. 433-435
- [17] Feldmann, K.; Müller, B.; Haselmann, T.: Automated assembly of lightweight automotive components; CIRP-Journal of Manufacturing Systems Vol. 48/1 (1999); p. 9 - 12
- [18] Feldmann, K.; Müller, B.: Shortened Process Chains by Fault-tolerant Assembly Systems; Annals of the German Academic Society for Production Engineering (WGP); Production Engineering Vol. VI/1 (1999); p. 87-90
- [19] Feldmann, K.; Müller, B.; Fehlertolerante automatisierte Montage flächiger Leichtbauteile; Werkstatt und Betrieb; Jg. 133 (2000) 3; S. 62 - 64
- [20] Feldmann, K.; Müller, B., Slama, S.: Arbeits- und Ergebnisbericht 1999-2001 zum SFB 396 „Robuste, verkürzte Prozessketten für Flächige Leichtbauteile“, 25.4.2001, S. 109 - 134
- [21] Feldmann, K.: Montageplanung in CIM; Springer-Verlag, Berlin; 1992
- [22] Feldmann-K; Slama-S: Highly flexible assembly - scope and justification. Hochflexible Montage - Anwendungsbereich und Wirtschaftlichkeitsnachweis, Univ. Erlangen-Nürnberg, 2001
- [23] Fleischer, J.; Munzinger, C.; Kies, S.; Schmidt-Ewig, J.P.; Ruch, D.: Flexible Profilbearbeitung im Leichtbau; wt werkstattstechnik online; 94 (2004) H.9; S. 422 - 425
- [24] Fleischer, J.; Spath, D.; Lanza, G.: Quality Simulation for Fast Ramp Up; 36<sup>th</sup> CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems; Saarbruecken (Germany); June 2003
- [25] Göhringer, J.: Integrierte *Telediagnose* via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen; Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg; Meisenbach Verlag, Bamberg; 2001
- [26] Gossel, O.: Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern basierend auf einer durchgängigen Genauigkeitsanalyse; Dissertation, TU Hamburg-Harburg; 1996

- [27] Grewe, J.; Meusel, P.; Joerg, S.; Hirzinger, G.: Sensorgeführte Montage am bewegten Objekt mittels nachgiebigem Kraft-Momenten-Sensor; Robotik 2000, Leistungsstand-Anwendungen-Visionen; Berlin 29-30. Juni 2000; VDI-Berichte 1552 (2000) S. 151 – 157
- [28] Haffner, A.: Ein Modell zur Bestimmung der monetären Einsparungsmöglichkeiten bei der Durchführung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA); Dissertation, Univ. Stuttgart (IPA-IAO Forschung und Praxis 424), Josef-Jetter Verlag, Heimsheim; 2005
- [29] Hahn, O.: Mechanisches Fügen hochfester Stähle; Konferenz Dünoblechverarbeitung - Fügetechniken im Wettbewerb; SLV, München; 12-13.4.2000, S. 119 -126
- [30] Hahn, O.; Lappe, W.: Aufbau eines Systems zur Prozessüberwachung beim Stanzen mit Halbhohl Niet; Forschungsbericht, Univ. Paderborn; Shaker-Verlag, Aachen; 1996
- [31] Hahn, O; Timmermann, R.; et al.: Fügesystemoptimierung zur Herstellung von Mischbauweisen aus Kombinationen der Werkstoffe Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff; Abschlussbericht zu dem BMBF-Projekt; Juli 2003
- [32] Hahn, O.; Wibbke, T.M.: Optimierung der Fertigungsparameter des mechanischen Fügens für den Einsatz mit dem Kleben zum Verbinden dünner Bleche; EFB-Forschungsbericht Nr. 216; EFB, Hannover; 2004
- [33] Han, L; Young, K; Hewitt, R; Chrysanthou, A; OSullivan, J-M.: Fatigue failure modes in self-piercing riveted aluminium alloy joints. Konferenz Einzelbericht in: ESDA 2004, Engineering Systems Design and Analysis, 7th Biennial Conference, Vol. 3, Manchester, GB, Jul 19-22, 2004; S. 297 - 304
- [34] Hesse, S. (Hrsg.): Industrieroboterpraxis – Handhabung in der Fertigung; Vieweg-Verlag, Braunschweig; 1998
- [35] Hilgert, Th.; Hühner, Th.: Fließformschrauben – ein neues Befestigungsverfahren für Brems- und Kraftstoffleitungen; ATZ Automobiltechnische Zeitung, 102 (2000) 2, S. 137 - 141
- [36] Hofmann von Kap, K.; Grützner, R.; Mauermann, R.: IHU und Schraubtechnik – ein Duo mit Perspektive; Blech InForm, (2004) H. 5; S. 44 - 47
- [37] Hoppe, H.; Bales, P.; Mackel, J.: *Telediagnose*: State-of-the-Art der Anlagen und Prozessüberwachung in der Grundstoffindustrie ; VDI/VDEh-Forum Instandhaltung & AKIDA 2000, Aachen; 16-17.5.2000; VDI-Berichte, Band 1554 (2000); S. 291-305

- [38] Huang, W.; Ceglarek, D.: Tolerance Analysis for Design of Multistage Manufacturing Processes using Number-Theoretical Net Method (NT-net); International Journal of Flexible Manufacturing Systems; Vol. 16, No.1 (2004); p. 65 – 90
- [39] Iwanitz, F.; Lange, J.: OLE for Process Control, Grundlagen, Implementierung, Anwendung; Hüthig-Verlag, Heidelberg, 2001
- [40] Khan, A.; Ceglarek, D.: Sensor optimization for fault diagnosis in multi-fixture assembly systems with distributed sensing; Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Bd. 122 (2000) Heft 1, S. 215 – 226
- [41] Kieß, J.U.: Objektorientierte Modellierung von Automatisierungssystemen; Springer Verlag, Berlin; 1995
- [42] Klein, B; Mannewitz, F.: Statistische Tolerierung; Vieweg Verlag, Braunschweig;1993
- [43] Klos, M.; Klingel: *sonofast* – ein neues Anziehverfahren in Dresden; in: Fachkolloquium Fügetechnik und Montage am 11. Oktober 2001 an der TU-Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Produktionstechnik
- [44] Ko, J.; Hu, J.S.; Huang, T.: Reuseability Assessment for Manufacturing Systems; Annals of the CIRP Vol. 54/1/2005; p. 113 – 116
- [45] Köhrmann C.; Griffel N.; Brüggemann H.: Neue Kennwertansätze zur Verfügbarkeitssicherung; VDI-Z (1997) H. 4; S. 36-38
- [46] Kong, Z.; Ceglarek, D.: Rapid Deployment of Reconfigurable Assembly Fixtures using Workspace Synthesis and Visibility Analysis; Annals of CIRP, 52/1/2003; p. 13 – 16
- [47] Konold, P.; Reger, H.: Angewandte Montagetechnik; Vieweg-Verlag, Braunschweig; 1997
- [48] Koslow, B.A.; Uschakow, I.A.: Handbuch der Berechnung der Zuverlässigkeit für Ingenieure; Carl-Hanser Verlag, München; 1979
- [49] Kűfner P.: Robotergerechtes Konstruieren im PKW-Fahrzeugbau; In: Konstruieren mit Blech, VDI-Berichte 523, Tagung in Essen 8-9.11.1984, S. 245 ff
- [50] Kugelmann, F.: Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen; Forschungsberichte, TU München; Springer Verlag, München; 1993
- [51] Latombe, J.C.; Wilson, R.H.; Cazals, F.: Assembly Sequencing with Toleranced Parts; Computer-aided Design; Vol. 29 (1997) No.2; p. 159 - 174
- [52] Lay, G.; Schirrmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? - Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion; Fraunhofer-Institut für Systemtech-

- nik und Innovationsforschung -ISI-; Mitteilungen aus der Produktionsinnovationsforschung. PI-Mitteilungen, 22; Karlsruhe; 2000, 12 S.
- [53] Lettenbauer, H.: System zum Einsatz von Industrierobotern in der fertigungsnahe Qualitätsprüfung; Dissertation, Univ. der Bundeswehr Hamburg; Shaker Verlag, Aachen; 2002
- [54] Lotze, W.: Besteinpassung von geometrischen Formelementen und Bohrbildern mit definierten Toleranzonen; Technisches Messen, 67 (2000) H.2; S. 75
- [55] Mannar, K; Ceglarek, D.: Continuous Failure Diagnosis for Assembly Systems using Rough Set Approach; Annals of the CIRP, Vol. 53/1/2004; p. 39 – 42
- [56] Manz, K.; Dahmen, A: Investitionstheorie (Band 5), Kompaktstudium Wirtschaftswissenschaften; 2.Auflage; Vahlen-Verlag, München; 1999; S. 13 - 61
- [57] Meerkamm, H.: Design for X – Vielfalt der Anforderungen vs. Zielorientierung; In: H. Linde (Hrsg.): Tagungsband zum 4.WOIS-Symposium – The Hidden Pattern of Innovation; Coburg; 1999, S. 120 – 131
- [58] Meerkamm, H.; Hochmuth, R.: Integrated Product Development Based on the Design System mfk; In: Marjanovic, D. (Ed.): Proceedings of the 5th International Design Conference, Dubrovnik; 1998, S. 31 – 38
- [59] Meerkamm, H.; Koch, A.: *To/Vis* – Visualization of possible Shape Variations resulting from Shape and Position Tolerances. In: Proceedings of 15 th International Conference on Engineering Design (ICED 05), Melbourne (Australia), 15 – 18. August 2005
- [60] Meerkamm, H.; Rosemann, B.: Ökonomisch-ökologische Produktoptimierung durch recyclinggerechte Konstruktion; Industrie Management (GITO Verlag, Berlin), 1/2000; S. 14 – 18
- [61] Mertens, H.: DFG-Schwerpunktprogramm „Innovative, rechnergestützte Innovationsprozesse – Integration von Gestaltung und Berechnung“; VDI-Berichte Nr. 1487; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1999
- [62] Mertins, K.; Süssenguth, W.; Jochen, R.: Modellierungsmethoden für rechnerintegrierte Produktionsprozesse; Hanser Verlag, München; 1994
- [63] Mewes, D.: Der Informationsbedarf im konstruktiven Maschinenbau; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1973
- [64] Mogge, C.: Konzept für ein rechnerbasiertes System zur Unterstützung des verteilten methodischen Produktentwicklungsprozesses; Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg, 2001

- [65] Müller, B.: Robuste Montagesysteme durch bereichsübergreifenden Datenaustausch und innovative Fügeverfahren; VDI Seminar: Auslegung und Betrieb flexibler Montagesysteme, Erlangen; 7. - 8.6.2000
- [66] Müller, F.F.: Internet Ferndiagnose;maschine + werkzeug (Heinrich Publikationen GmbH, Frankfurt); 4/1999; S. 62 - 64
- [67] Müller-Beilschmidt, A.: Erfolgsfaktor Wissens-Management; EDM-Report Nr.1; Dressler-Verlag, Heidelberg; 1999; S. 50-53
- [68] N.N.; Deutscher Normenausschuss (Hrsg.): Verpackungsmaschinen und Verpackungsanlagen - zeitbezogene Begriffe, Kenngrößen und Berechnungsgrundlagen, DIN 8743, Beuth-Verlag, Berlin; 2004
- [69] N.N.; Deutscher Normenausschuss (Hrsg.): DIN EN 485 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder, Bleche, Platten; Teil 4: Grenzabmaße und Formtoleranzen für kaltgewalzte Erzeugnisse; Beuth-Verlag, Berlin; 1993
- [70] N.N.: Kein Vorteil ohne Nachteil; Automobil-Produktion (mi-Verlag, Landsberg); April 2004
- [71] N.N.: Audis blaues Wunder; Automobil-Produktion; April 2004, S. 90 - 92
- [72] N.N.; VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (Hrsg.): Einsatz von Schraubsystemen in der Automobilindustrie – VDI 2862; Beuth Verlag, Berlin; 1999
- [73] N.N.: Handschrauben: Restrisiko Werker; Automobil-Produktion, April 2005, S. 96 - 97
- [74] N.N.: Montagesystemfähigkeit – Ermittlung, Darstellung und Nachweis der Systemfähigkeit von Montageautomatisierungssystemen; Abschlußbericht zu AiF Nr. 9176, Forschungsheft 3 – 1996; Maschinenbau-Verlag, Frankfurt/Main; 1996
- [75] N.N.: Wenn die Schraube am lautesten Schreit. Weltneuheit: Klemmkraftgesteuertes Schrauben auf Basis akustischer Emission; Produktion, Bd 39 (2000) H. 37 S. 22 - 23
- [76] N.N.: Robotik + Automation, Portrait der Branche 2001; VDMA, Frankfurt, 2001
- [77] N.N.: DIN 40041, Zuverlässigkeit, Begriffe; Beuth-Verlag, Berlin; 1990
- [78] N.N.: VDI-Richtlinie 4004, Zuverlässigkeitskenngrößen, Verfügbarkeitsgrößen, Blatt 4; Beuth-Verlag, Berlin; 1996
- [79] N.N.: VDI-Richtlinie 3423, Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen – Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung, Beuth-Verlag, Berlin; 2002
- [80] N.N.: Planung und Realisierung von Automatisierungsprojekten; [www.reisrobotics.com](http://www.reisrobotics.com); 2005

- [81] N.N.: 2. Jahresbericht zum SFB 384 " Verfügbareitssicherung reaktionsschneller Produktionssysteme", Universität Hannover, 2000
- [82] N.N.: ULSAB-AVC Engineering Summary; [www.stahl-info.de/stahl\\_im\\_automobil/](http://www.stahl-info.de/stahl_im_automobil/); 2005
- [83] N.N.: Kunststoff im Automobil – Einsatz und Verwertung, Hrsg.: VKE (Verband Kunststoffherzeugender Industrie e.V., Frankfurt am Main, 2001
- [84] N.N.: Produktbezogener Umweltschutz am Beispiel der neuen A-Klasse (W 169); Umwelterklärung 2004 – Mercedes, Standort Sindelfingen; 2004
- [85] N.N.: IGRIP Off-Line Programming User Manual; Benutzerhandbuch Fa. Deneb Robotics; Inc. Auburn Hills, Michigan, USA; 1997
- [86] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung; 4. Auflage; Springer – Verlag, Berlin; 1997
- [87] Petersen, H.: Selektion von statistischen Versuchsplänen: Selektionsschemata und klassische Versuchspläne, Bd. 3.1; ecomed Verlag, Landsberg, 1992
- [88] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken; Hanser-Verlag, München; 2001
- [89] Ramachandram, D.; Rajeswari, M.: Neural network-based robot visual positioning for intelligent assembly; Journal of Intelligent Manufacturing, Bd. 15 (2004) H. 2, p. 219 - 231
- [90] Rasch, D.; Verdooren, L.R.; Gowers, J.I.: Grundlagen der Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen; Oldenbourg Verlag, München; 1999
- [91] Reinhart, G.; Lindermaier, R.; Graser, R.G.; Eich, B.: Robust Assembly Processes as a Means of Achieving Systemability; Annals of the CIRP Vol. 45/1 (1996), p. 7-10
- [92] Reinhart, G.; Grunwald, S.; Stetter, R.: Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung; In: Bender, K. (Hrsg): Kolloquiumsband des SFB 336 an der TU-München; 2000
- [93] Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl J.: Qualitätsmanagement – Ein Kurs für Studium und Praxis; Springer-Verlag, Berlin; 1996
- [94] Reinhart, G., Praun, S.: Assembly design and tolerancing of rigid and compliant parts; Production Engineering - Research and Development; Bd 7 (2000) H. 1; S. 107 - 112
- [95] Rentschler, U.: Fehlertolerantes Präzisionsfügen; Dissertation, Univ. Stuttgart (ISW Forschung und Praxis); Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg; 1995

- [96] Röder, A.: Ein Beitrag zur passgenauen Montage von Klappen in der Automobilindustrie am Beispiel der Türmontage; Dissertation, TU Braunschweig; Vulkan Verlag, Essen; 2000
- [97] Rückel, V.; Koch, A.; Hauck, C.; Ernst, R.: Verkürzung der Prozesskette „Konstruktion – Qualitätsmanagement – Montage“ durch Rückkopplung von Prozesswissen. In: Geiger, M.; Ehrenstein, G.W. (Hrsg.): Tagungsband zum „Berichts- und Industriekolloquium des SFB 396“; Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003, S. 105 – 130
- [98] Schatz, V.: Schraubverläufe messen und interpretieren; VDI-Z Integrierte Produktion, Bd 141 (1999) H. 9/10, Seite 56 - 57
- [99] Schuller, R.; Trossin, H.: Alternative Dichtsysteme im Überblick; In: Reinhart G.; Milberg J.: Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag; Herbert Utz Verlag, München; 1997, S. 5-24
- [100] Spingler, J.C.; Beumelburg, K.: Automatisierungspotentialanalyse; wt Werkstattstechnik online; 92 (2002) H.3; S. 62- 64
- [101] Spur G.: Die Genauigkeit von Maschinen – Eine Konstruktionslehre; Carl-Hanser Verlag, München; 1996
- [102] Steber, M: Prozessoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage; Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg; Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
- [103] Suzuki, T.; Ohashi, T.; Asano, M.: Assembly Reliability Evaluation Method (AREM); Annals of the CIRP Vol. 52/1/2003; p. 9 – 12
- [104] Tidd, J.: Key Characteristics of Assembly Automation Systems. In: Shimokawa, K.; Jürgens, U.; Fujimoto, T. (Eds.), Transforming Automobile Assembly; Springer Verlag, Berlin; 1997; p. 46 – 60
- [105] Tumpold, H.; Beck, Ch.; Richter, G.: Toleranzsysteme und Toleranzdesign – Qualität im Austauschbau; Hanser Verlag, München; 1997
- [106] Voelkner, W.; Hahn, O.: Untersuchungen zum Fügen von Feinblechen mittels Durchsetzfügen - Kleben und Stanznieten - Kleben; EFB-Forschungsberichte Nr. 102 (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.); EFB-Verlag, Hannover; 1997
- [107] Vukobratovic, M.: Introduction to Robotics; Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg; 1989
- [108] Wang, H.; Ceglarek: Quality-driven Sequence Planing and Line Configuration Selection for Compliant Structure Assemblies; of the CIRP Vol. 54/1/2005; p. 31 – 35

- [109] Warnecke, H.-J.; Dutschke, W. (Hrsg.): Fertigungsmesstechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft; Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg; 1984
- [110] Warnecke, H.-J.: Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb (SFB 158); Springer-Verlag, Berlin; 1996
- [111] Wartzack, S.: Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktionskonzepte; Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg; Meisenbach Verlag, Bamberg; 2000
- [112] Watanabe, A.; Sakakibara, S.; Ban, K.; Yamada, M.; Shen, G.: Autonomous Visual Measurement for Accurate Setting of Workpieces in Robotic Cells; Annals of the CIRP Vol. 54/1/2005; p. 13 – 18
- [113] Webbink, R.F.; Hu, S.-J.: Automated Generation of Assembly Systems-Design Solutions; IEEE Transactions on Automation Science and Engineering; 2/1/2005; p. 32-39
- [114] Wenk, M.: Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern; Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg; Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [115] Westkämper, E.: Null-Fehler-Produktion in Prozessketten; Springer-Verlag, Berlin; 1996, S. 10 ff
- [116] Westkämper, E.: Modulare Produkte – Modulare Montage; wt Werkstattstechnik online; 91 (2001) H.8; S.10 ff
- [117] Westkämper, E.: Bewertung flexibler Endmontagesysteme für die Automobilindustrie durch Simulation des Realbetriebs; wt Werkstattstechnik online; 95 (2005) H.4; S. 181 – 185
- [118] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion; Springer Verlag, Berlin; 2006
- [119] Wiendahl, H.-P.: Variantenbeherrschung in der Montage – Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe; Springer Verlag, Berlin; 2004
- [120] Wiendahl, H.P.; Garlichs, R.; Zeugträger, K.: Modeling and Simulation of Assembly Systems; Annals of CIRP Vol. 40/2/1991; p. 577-585
- [121] Wiendahl, H.P. Koehrmann, C.: Verfügbarkeit komplexer Systeme. Ergebnisse einer internationalen Umfrage; Zeitschrift Instandhaltung, Bd 27 (2000), Heft „Europäischer Markt 2000“, Seite 24 ff
- [122] Wollnack, J.; Stepanek, P.: Formkorrektur und Lageführung für eine flexible und automatisierte Großbauteilmontage; wt werkstattstechnik online; 94 (2004) H.9; S. 415 - 421

- [123] Wulfsberg, J.; Ludwig, R.: Robotergeführte Bauteilvermessung mit intelligenter Sensortechnik; wt werkstattstechnik online; 94 (2004) H.9; S. 422 – 425
- [124] Zäh, M.F.; Schlickerrieder, K.; Mosandl, T.: Konturverfolgung beim Klebstoffauftrag; wt werkstattstechnik online; 94 (2004) H.9; S. 433 – 437
- [125] Zöllner, B.: *Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion*; Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg; Meisenbach Verlag, Bamberg, 1995, S. 36 ff

## Glossar

AV	Arbeitsvorbereitung
CAD/ CAM	Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing
CRM	Customer Relationship Management
DCOM	Distributet COM
DfA	Design for Assembly
DLL	Dynamic Link Library
DOE	Design of Experiments
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ERP	Enterprise Resource Planing
FDS	Flow Drill Schraube
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FTS	Fahrerloses Transportsystem
I/O	Inputs/ Outputs (Ein-/ Ausgänge)
IPC	Industrie-PC
IR	Industrieroboter
IT	Informationstechnologie
MES	Manufacturing Execution Systems
NC	Numeric Control
ODBC	Open Database Connectivity
OPC	OLE for Process Control
PDM/EDM	Produktdaten-Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QS/ QM	Qualitätssicherung/ Qualitätsmanagement
RC	Robot Control
Rol	Return on Invest
SCM	Supply Chain Management
SPC	Statistical Process Control (Statistische Prozesskontrolle)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ULSAB	UltraLight Steel Auto Body
VPN	Virtual Private Network



## Summary

The assembly of complex products, for example in automotive manufacturing makes special demands on automated assembly systems. Flexible automation of assembly processes offers a great potential for rationalisation and cost saving. Additional reduction of costs is possible by enlargement of part tolerances in preliminary processes such as manufacture of components. Afterwards these tolerances have to be handled safely in automated assembly with robots. The aim of the dissertation is to make the assembly processes robust against variable disturbances and to shorten the entire process chain. The deficits of the known proactive and reactive solutions to ensure assembly machines availability are its proprietary and low modularity. Therefore a new, holistic solution to create robust process chains with two complementary concepts was developed.

One important aspect of this solution is the adaptive operation of assembly processes. First experiments with short process chains like direct screw-driving into sandwich-parts and punch riveting into aluminium metal sheets are carried out to analyse the process sensitivity. The results show, that it is possible to adjust process control parameters to enlarge partially the tolerances. Because of non-existence of adaptive control function in current buyable programmable logic controls (PLCs) the communication interface *MOTION* was developed. This is the linking part between conventional Soft-PLC, process parameter database and robot control or joining device control by reference modules.

The second aspect of the holistic solution is the better connection of assembly with other work areas such as design department and production. Today networks are mostly realized by server architecture, which allows workers the access to part drawings, quality data etc. There is no preparation of this data for direct use in automated assembly systems. Hence in the dissertation a data network based on a PDM system was realized which contains information about target data and actual data of joining parts. Furthermore additional functions are implemented which allow workers to store assembly information as construction notes in the PDM system. Because of free access to this assembly knowledge failure in the design department can be prevented.

The described holistic concept to achieve robust process chains in assembly was exemplary realized in a robot cell at the University of Erlangen. It has been shown that the developed internal and division spanning control loops enable enlargement of part tolerances in manufacturing. Finally a cost analysis showed by example of punch riveting of car door bodies that the holistic solution is economical favourable.



# Lebenslauf

Bernd Michael Müller

geboren am 15.01.1969 in Nürnberg

verheiratet mit Claudia Müller, geb. Trautnitz; 2 Kinder

09/75 – 08/80

Grund- und Hauptschule in Schwanstetten

09/80 – 05/89

Adam-Kraft-Gymnasium in Schwabach

06/89 – 08/90

Grundwehrdienst in Kötzing

10/90 – 06/96

Studium der Fertigungstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg mit den Schwerpunkten: Rechner-integrierte Produktionssysteme, Konstruktionstechnik

Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)

08/96 – 08/02

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fertigungs-automatisierung und Produktionssystematik (FAPS) in der Arbeitsgruppe *Handhabungs- und Montagetechnik*

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

04/00 – 09/04

Berufsbegleitendes Zweitstudium der Betriebs- und Volkswirtschaftslehre an der Fernuniversität Hagen mit den Schwerpunkten: Personalführung & Organisation, Produktionswirtschaft

Abschluss: Dipl.-Kfm. und Dipl.-Volksw.

02/03 – 12/04

Traineeprogramm bei der Maschinenfabrik Niehoff in Schwabach

seit 01/05

Gruppenleiter im Bereich Konstruktion und Entwicklung von Flechtmaschinen bei der Maschinenfabrik Niehoff



# Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

[www.mb.uni-erlangen.de/diss](http://www.mb.uni-erlangen.de/diss)

**Band 1 - 52**  
Carl Hanser Verlag, München

**ab Band 53**  
Meisenbach Verlag, Bamberg  
45,- Euro

Band 1: Andreas Hemberger  
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme**  
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe  
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**  
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
**Projektiertung von Montagesystemen**  
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter  
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik**  
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**  
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss  
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**  
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz  
**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen**  
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**  
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele  
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion**  
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik**  
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**  
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer  
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**  
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer  
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**  
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr  
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**  
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief  
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**  
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim  
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**  
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller  
**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**  
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer  
**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**  
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann  
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**  
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann  
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :  
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung  
von Blechformteilen**  
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel  
**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**  
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch  
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**  
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther  
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless  
**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel  
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**  
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt-Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp  
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung  
mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem  
zur Optimierung der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechbiegeteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgeossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung  
in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer  
**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser  
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber  
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**  
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf  
**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**  
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke  
**Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**  
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller  
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meßner  
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**  
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8
- Band 76: Mathias Glasmacher  
**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind  
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften  
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**  
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard  
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Lötten komplexer Baugruppen**  
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh  
**Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**  
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn  
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung  
bei umformtechnischen Prozessen**  
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schuberth  
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**  
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo  
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures  
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**  
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt  
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling  
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**  
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz  
**Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
128 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs  
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**  
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau  
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals  
**Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes**  
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn  
**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion**  
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger  
**Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen**  
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher  
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**  
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet  
**Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung**  
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart  
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung**  
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler  
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**  
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker  
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**  
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein  
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**  
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren  
für thermoplastische Schaltungsträger**  
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach

**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von  
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**  
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach

**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie  
elektronischer SMT-Bauelemente**  
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk

**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage  
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**  
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl

**Integriertes Simulationsdaten-Management  
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**  
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel

**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter  
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**  
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert

**Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**  
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer

**Modulares Planungswerkzeug  
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**  
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige

**Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen**  
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel

**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**  
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckl

**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene  
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**  
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter

**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen  
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**  
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli

**Integration lokaler CAP-Systeme  
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**  
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller  
**Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion**  
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001  
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer  
**Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen**  
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein  
**Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung**  
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger  
**Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)**  
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber  
**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren**  
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi  
**Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion**  
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein  
**Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften**  
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi  
**Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten**  
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch  
**Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik**  
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt  
**Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion**  
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler  
**Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile**  
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche  
**Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung**  
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
**Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen**  
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**  
135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**  
148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte**  
159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlgefügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**  
159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung**  
143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**  
113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen  
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

**3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik**  
129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**  
133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002  
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern**  
167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen**  
116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen  
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –  
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**  
167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen  
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**  
179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher  
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung  
komplexer Produktionssysteme**  
202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und  
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**  
132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter  
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**  
158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik  
für mechatronische Baugruppen**  
207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von  
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**  
187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden  
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**  
131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –  
Materialeinfluss und Materialverhalten**  
148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien  
mit homogener Lichtlinie**  
138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen**  
139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit  
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**  
124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-  
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**  
166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

**Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze**  
132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

**Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestructuren und erweiterte Mitarbeiterkompetenz**  
188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

**Laserstrahljustieren mittels Aktoren –  
Entwickler von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik**  
122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

**Wirkmedienbasierte Blechumformung:  
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie**  
146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

**Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung**  
282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

**Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse**  
149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

**Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur**  
158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

**Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen**  
186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

**Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen**  
Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

**Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlintern metallischer Bauteile**  
148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

**Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk**  
Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche  
104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-221-7

- Band 158: Agus Sutanto  
**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments**  
169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-220-9
- Band 159: Matthias Boiger  
**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger**  
175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-222-5
- Band 160: Matthias Pitz  
**Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle**  
120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-223-3
- Band 161: Meik Vahl  
**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**  
165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-224-1
- Band 162: Peter K. Kraus  
**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung**  
181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-226-8
- Band 163: Adrienn Cser  
**Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung**  
146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6
- Band 164: Markus C. Hahn  
**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**  
143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4
- Band 165: Gordana Michos  
**Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen**  
146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6
- Band 166: Markus Stark  
**Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays**  
158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4
- Band 167: Yurong Zhou  
**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**  
156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2
- Band 168: Werner Enser  
**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**  
190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0
- Band 169: Katrin Melzer  
**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**  
155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9
- Band 170: Alexander Putz  
**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**  
137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl  
**Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien –  
System- und Prozesstechnik**  
154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.  
ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert  
**Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung  
von Werkzeugen der Kaltmassivumformung**  
131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.  
ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller  
**Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung  
und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**  
147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.  
ISBN 3-87525-240-3