

Andreas Kunze

*Automatisierte Montage von makromechatronischen  
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-  
Bordnetzsysteme*





Andreas Kunze

*Automatisierte Montage von makromechatronischen  
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-  
Bordnetzsysteme*

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: 26. November 2007  
Tag der Promotion: 05. Februar 2008  
Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Huber  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. G. W. Ehrenstein

### **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.

ISSN 1431-6226  
ISBN 978-3-87525-278-1

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 2008  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, Leiter dieses Lehrstuhls im Department Maschinenbau, danke ich herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die konstruktiven, wertvollen Anregungen und insbesondere für den wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ. Zudem bedanke ich mich bei ihm für die jahrelange, vertrauensvolle Zusammenarbeit in der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID. Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. Gottfried W. Ehrenstein, ehemaliger Leiter des Lehrstuhls für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferats. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert F. Singer, Leiter des Lehrstuhls Werkstoffkunde und Technologie der Metalle, als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Paul Steinmann, Leiter des Lehrstuhls für Technische Mechanik, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Diese Dissertation beruht auf den Ergebnissen verschiedener Forschungsprojekte, die durch die Bayerische Forschungstiftung (BFS), das Bayerische Kompetenznetzwerk für Mechatronik (BKM) sowie die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) unterstützt und in enger Kooperation mit Partnern aus Industrie und Forschung bearbeitet wurden. Allen beteiligten Projektpartnern spreche ich meinen herzlichen Dank für die anregenden Gespräche und die konstruktive Zusammenarbeit aus.

Den Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik sei an dieser Stelle herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit bei den gemeinsam durchgeführten Kooperationsprojekten mit zahlreichen fachlichen Diskussionen in einer stets angenehmen Arbeitsatmosphäre gedankt. Die außerordentlich gute lehrstuhlinterne Kooperation bildete eine wichtige Grundlage für den Erfolg der internationalen Kongresse, Seminare und Messebeteiligungen zur MID-Technologie, die ich in meiner Tätigkeit als Geschäftsführer der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. am Lehrstuhl FAPS organisierte. Ferner bedanke ich mich bei allen Studenten, die durch ihre engagierte Arbeit zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben.

Einen besonderen Dank richte ich an meine Eltern, die mich auf meinem Bildungsweg stets gefördert haben und die mir bei der Übersiedlung von der DDR in die BRD durch ihren Mut, für die persönliche Freiheit einzustehen, Gewohntes hinter sich zu lassen und sich tatkräftig ein neues Leben aufzubauen, entscheidende Wertvorstellungen mit auf den Weg gegeben haben. Ihnen widme ich diese Arbeit.

*„Für diejenigen,  
die immer nur warten,  
kommt alles zu spät.“*

Elbert Green Hubbard

amerikanischer Schriftsteller und Verleger

\* 19. Juni 1859 in Bloomington, Illinois

† 7. Mai 1915 auf der Lusitania im Nordatlantik

# **Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2</b>	<b>Technologischer Wandel in der Bordnetzfertigung bedingt Veränderungen in der Montage .....</b>	<b>5</b>
2.1	Marktgebundene Produkttrends in der Automobilproduktion .....	5
2.1.1	Zunahme elektronikgestützter Funktionen im Automobil .....	5
2.1.2	Gestiegene Anforderungen an Fahrzeugsicherheit und Zuverlässigkeit ....	6
2.1.3	Zunehmende Individualisierung des Fahrzeugs bestärkt Trend zur Modularisierung .....	7
2.1.4	Zunahme des Energiebedarfs im Automobil .....	8
2.1.5	Reduktion des Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge .....	9
2.2	Allgemeine Rahmenbedingungen der Bordnetzherstellung .....	10
2.2.1	Funktion und Umfang des Kabelsatzes im Automobil .....	10
2.2.2	Verringerung der Produktlebenszyklen .....	11
2.2.3	Fertigung von Kabelsätzen mit Losgröße 1 .....	12
2.2.4	Produktionsverlagerung in Niedriglohnländer .....	12
2.2.5	Rationalisierungsmaßnahmen in Deutschland .....	14
2.2.6	Gestiegene Energie- und Rohstoffkosten .....	15
2.2.7	Veränderung der Wertschöpfungsanteile zwischen Automobilzulieferern und OEMs .....	16
2.3	Konventionelle Fertigungsprozesse für Bordnetzsysteme .....	17
2.3.1	Entwicklung der Verlegebrett-Zeichnung .....	17
2.3.2	Klassifizierung von Kabelbaumstrukturen .....	18
2.3.3	Manuelle Arbeiten am Verlegetisch .....	19
2.3.4	Einordnung der Kabelsatzmontage in die Pkw-Produktionskette .....	20

<b>3 Verkürzung der Montageprozesskette durch den Einsatz makromechatronischer Module.....</b>	<b>21</b>
3.1 Alternative Verbindungstechnologien für makromechatronische Module.....	21
3.1.1 Begriffsdefinition makromechatronische Module .....	21
3.1.2 Entwicklung hybrider Bordnetzstrukturen .....	22
3.1.3 Flex-Wiring-Verbindungstechniken .....	22
3.1.4 Einsatz von Verfahren der MID-Technologie .....	23
3.1.5 Einsatz thermischer Spritzverfahren .....	28
3.2 Flexible Flachleiter für makromechatronische Module .....	30
3.2.1 Klassifizierung flexibler Flachleiter.....	30
3.2.2 Herstellung von flexiblen Flachleiterkabeln.....	30
3.2.3 Typische Werkstoffe für Flachkabel.....	33
3.2.4 Potenziale beim Einsatz flexibler Flachleiterkabel .....	34
3.2.5 Einsatzbeispiele für extrudierte flexible Flachleiterkabel.....	36
3.3 Konzepte zum Einsatz flexibler Flachleiter im Pkw-Türmodul.....	40
3.3.1 Anforderungen an die Verkabelung in der Pkw-Seitentür .....	40
3.3.2 Ersatz des konventionellen Kabelbaums durch Flachleiter.....	42
3.3.3 Verkürzung der Montageprozesskette durch Automatisierung .....	43
3.3.4 Gewichtsreduzierung beim Türmodul durch den Einsatz von Kunststoffen und Funktionsintegration .....	44
<b>4 Neue Handhabungskonzepte für die automatisierte Verlegung von flexiblen Flachleitern.....</b>	<b>45</b>
4.1 Robotergestützte flexible Montage elektrischer Flachkabel .....	45
4.1.1 Komponenten einer Montagezelle für die Flachkabelverlegung .....	45
4.1.2 Ablauf der vollautomatisierten Flachkabelmontage .....	46
4.2 Grundkonzepte für die Kabelbereitstellung .....	47
4.2.1 Externe Materialbereitstellung mit passivem Kabelspeicher.....	47
4.2.2 Integrierte Materialbereitstellung mit aktivem Kabelspeicher.....	48
4.2.3 Realisierung der Materialbereitstellung.....	50
4.3 Anforderungen an die Werkzeugentwicklung.....	55
4.4 Winkel-Mundstück-Konzepte .....	57
4.4.1 Winkel-Mundstück-Konzept .....	57
4.4.2 Schachtel-Winkel-Konzept.....	58
4.4.3 Zwei-Winkel-Mundstück-Konzept .....	59
4.4.4 Prototypische Realisierung des Winkel-Mundstück-Konzeptes .....	61

4.5 Rollen-Mundstück-Konzepte.....	63
4.5.1 Teleskoprollen-Konzept.....	63
4.5.2 Klemm-Rollen-Konzept.....	65
4.5.3 Prototypische Realisierung des Klemm-Rollen-Konzeptes.....	65
4.6 Zusammenführung von Winkel- und Rollenkonzepten .....	67
4.6.1 Realisierung von Flachkabelführung und -Faltung .....	67
4.6.2 Auslegung des Vorschubantriebs im Verlegewerkzeug.....	68
4.6.3 Integration eines Werkzeugwechselsystems.....	70
4.6.4 Vor- und Nachteile der realisierten Prototypen im Vergleich .....	71
<b>5 Aufbau einer durchgehenden CAD/CAM-Kette zur Steuerung von Robotern und der Systemperipherie .....</b>	<b>73</b>
5.1 Strukturierung der Montagezelle für eine Simulationsumgebung.....	74
5.1.1 Türmodul-Demonstratoren für die Flachleitermontage .....	74
5.1.2 Steuerungssystem für den Industrieroboter.....	75
5.1.3 Aufgaben des Montagezellenrechners .....	75
5.1.4 Installation einer Software-SPS als übergeordnete Instanz.....	76
5.2 Anbindung der Geräteperipherie über ein Feldbussystem.....	77
5.2.1 Aufbau des Interbussystems .....	77
5.2.2 Ansteuerung der Motoren über analoge Ausgänge .....	78
5.2.3 Kraftmesssystem zur Überwachung des Anpressdrucks.....	82
5.2.4 Weitere Interbuskomponenten .....	83
5.3 Simulation von Montageoperationen mit Verlegewerkzeugen .....	84
5.3.1 Modellierung des Montagesystems in einer Simulationsumgebung .....	84
5.3.2 Konfiguration des virtuellen Roboters.....	86
5.3.3 Offline-Programmierung von Montageoperationen.....	87
5.4 Generierung und Ableitung von spezifischen Fertigungsdaten aus der Simulationsumgebung .....	88
5.4.1 Überführung der Simulationsdaten in Fertigungsdaten .....	88
5.4.2 Effektives Management von Programmänderungen .....	89
<b>6 Konzeptalternativen zur Fixierung von flexiblen Flachkabeln auf Polymersubstraten .....</b>	<b>91</b>
6.1 Alternativen zum Aufbau des Türaggregateträgers aus Kunststoff.....	91
6.2 Einsatz von mechanischen Befestigungselementen .....	92
6.2.1 Fixierung von Flachkabel mittels Klemmbügel .....	92

6.2.2	Fixierung durch auf den Träger aufgebrachte Kunststoffklipse.....	93
6.2.3	Fixierung von Flachkabel durch Blindnieten .....	94
6.3	Einsatz von Klebverfahren .....	94
6.3.1	Fixierung der Flachkabel durch Klebebänder .....	94
6.3.2	Fixierung durch Auftragen von Schmelzklebstoff.....	96
6.4	Schweißverfahren zur Flachkabelfixierung .....	97
6.4.1	Laserstrahlschweißen .....	97
6.4.2	Alternative Schweißverfahren .....	99
6.5	Durchführung von Montageversuchen für flexible Flachkabel.....	100
6.5.1	Rahmenbedingungen der Verklebung von PP-Testplatten.....	100
6.5.2	Ergebnisse der Klebeuntersuchungen.....	101
<b>7</b>	<b>Einsatz innovativer elektrischer Kontaktierungslösungen zur Integration der Module ins Pkw-Bordnetz .....</b>	<b>105</b>
7.1	Konventionelle Kontaktierungslösungen für Flachleiter .....	105
7.1.1	Alternative Prozesse zum Abisolieren von Flachleitern .....	105
7.1.2	Direktes stoffschlüssiges Fügen von Flachleitern.....	106
7.1.3	Einsatz von zusätzlichen Kontaktierungselementen .....	107
7.2	Entwicklung neuer Konzepte zur elektrischen Kontaktierung der Flachkabel .	108
7.2.1	Elektrische Verbindung über Kontaktierungsmedien .....	108
7.2.2	Elektrische Kontaktierung durch Klemmen der Flachleiter .....	110
7.2.3	Zusammenfassender Vergleich der Konzepte .....	112
7.3	Funktionsprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung .....	113
7.3.1	Beschreibung des Kontaktierungskonzeptes .....	113
7.3.2	Betrachtung der Kräfteverteilung beim Fügeprozess.....	115
7.4	Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der Kontaktierungslösung .....	118
7.4.1	Festlegung der Untersuchungsparameter .....	118
7.4.2	Feder-Klammer-Direktkontaktierung in vier Phasen .....	119
7.4.3	Einfluss des Schrägenwinkels des Kontaktbergs .....	121
7.4.4	Einfluss der Geometrie der Federklammerbeine .....	122
7.4.5	Einfluss der Grenzflächenhaftung zwischen Leiter und Isolation .....	123
7.4.6	Zusammenfassende Betrachtung und Zuverlässigkeitstests.....	125
7.5	Anwendungsbeispiele für die Kontaktierungslösung im Pkw-Türmodul .....	127



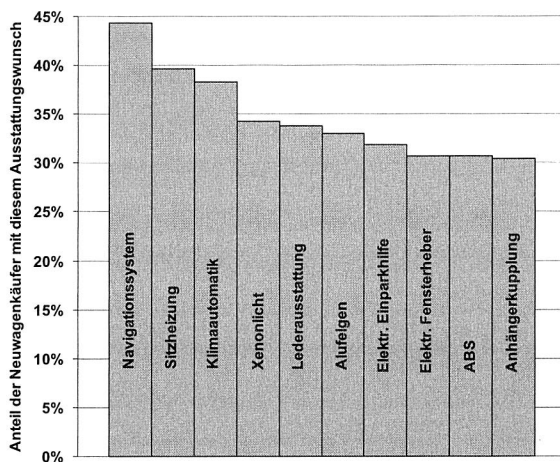
<b>8 Wirtschaftliche Betrachtung eines beispielhaften Automatisierungskonzeptes für die Flachleitermontage .....</b>	<b>131</b>
8.1 Erfassung von Rahmendaten für die Kostenvergleichsrechnung .....	131
8.1.1 Technologische Rahmendaten der Kostenanalyse .....	131
8.1.2 Ökonomische Rahmendaten der Kostenanalyse .....	133
8.2 Kostenvergleichsrechnung zwischen automatisierter und manueller Kabelsatzmontage in der Pkw-Seitentür .....	134
8.2.1 Betrachtung der konventionellen Kabelsatzmontage.....	134
8.2.2 Betrachtung der automatisierten Verlegung von Flachleiter-Meterware.	134
8.3 Zusammenfassende Beurteilung der Kostenvergleichsrechnung .....	135
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>Summary .....</b>	<b>143</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>157</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Automobilindustrie erfährt eine Phase des Wandels. In den nächsten Jahren wird sich das automobiler Interieur erheblich verändern. Die Entwicklung neuer Werkstoffe und Fertigungstechnologien ermöglicht Produktinnovationen und höherwertigere Fahrzeuge, die vom Kunden bei möglichst gleich bleibendem Preis eingefordert werden. Dabei kommt es für die Automobilhersteller darauf an, mit diesen Innovationen immer schneller auf den Markt zu kommen und dem anhaltenden Preisverfall durch fortwährende Reduktion der Produktionskosten zu begegnen. [69] Ein Ansatzpunkt der Hersteller für die weitere Rationalisierung im Automobilbereich ist die elektrische Verkabelung des Pkws, die bis heute überwiegend mit Hilfe von konventionellen Kabelbäumen realisiert wird. Das konventionelle Bordnetz ohne Verbraucher ist mit 30-50 kg eine der schwersten und mit ca. 12 % der Einkaufssumme eine der kostenintensivsten Komponenten in einem Mittelklasse-Pkw. Zudem erfordern die Herstellung und die manuelle Montage der Kabelbäume einen hohen Personaleinsatz. [31, 32, 46]



*Bild 1.1: Die zehn beliebtesten Ausstattungsdetails bei deutschen Neuwagenkäufern (nach [101])*

Sieben der zehn beliebtesten Ausstattungsdetails, die von Neuwagenkäufern hinzu gewählt werden, sind mit Elektronik realisierte Funktionen im Automobil, Bild 1.1. Durch die wachsenden Komfort- und Sicherheitsbedürfnisse der Automobilkäufer kennt das Bordnetz einschließlich elektrischer Verbraucher seit Jahrzehnten nur eine Entwicklungsrichtung – es nimmt an Masse und Volumen zu. Trotz zunehmendem Einsatz verschiedener Bussysteme setzt sich dieser Trend weiter fort.

Neben dem umweltpolitischen Aspekt der Gewichtsreduzierung spielen bei den Überlegungen, konventionelle Kabelbäume zu ersetzen, vor allem auch die Kostenreduzierung durch Vereinfachung der gesamten Logistik im Bereich Kabelbaummontage sowie die Erhöhung der Flexibilität eine entscheidende Rolle. Im Rahmen dieser Neugestaltung wurden bereits erste Serienanwendungen zum Einsatz flexibler Flachkabel im Automobil realisiert. Führende Hersteller entwickeln extrudierte und laminierte Flachleiterkabel, die im Gegensatz zu den flexiblen gedruckten Schaltungen größere Ströme übertragen können und damit vielseitig im Fahrzeugbau einsetzbar sind. Die bisherigen Montagekonzepte für diese Flachkabelstrukturen sind in ihrer Art und Ausprägung für eine variantenflexible Fertigung nicht wirtschaftlich automatisierbar. [31]

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Übergreifende Zielsetzung dieser Dissertation ist es, den technologischen Wandel in der Automobilindustrie im Bereich der Bordnetzfertigung und -montage beherrschbarer zu machen. Durch die angestrebte vollautomatisierte Kabelsatzmontage soll es den Automobilzulieferern zudem ermöglicht werden, die Prozessketten zu verkürzen, die Personalkosten zu senken und durch die daraus resultierende Produktivitätssteigerung hochwertige Arbeitsplätze in Deutschland zu sichern.

Zu diesem Zweck soll ein System zur automatisierten Montage von Flachkabeln entwickelt und prototypisch umgesetzt werden, das den Ansprüchen an eine flexible und wirtschaftliche Herstellung von makromechatronischen Modulen im Automobil gerecht wird. Dabei werden verschiedene Konzepte für die einzelnen Kabelsatzfunktionen erarbeitet und hinsichtlich der Erreichbarkeit der gesteckten Ziele bewertet, Bild 1.2.

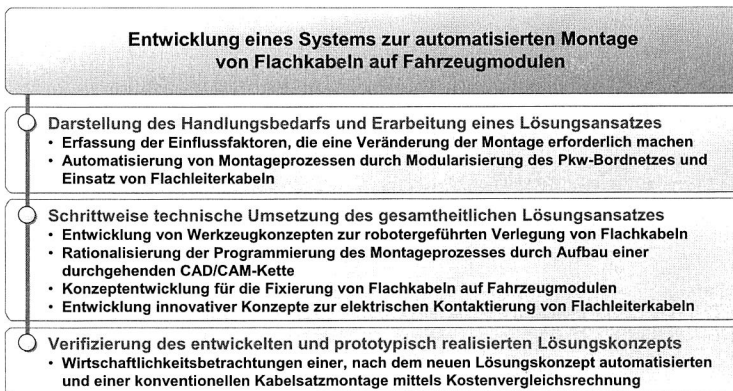


Bild 1.2: Strukturierung der Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Mit dieser Dissertation werden der Stand der Forschung und Entwicklung im Bereich der Kabelsatzmontage erfasst und dabei praxisrelevante Probleme aufgegriffen. Im ersten Kapitel wird in die Problemstellung eingeführt, die Zielsetzung der Arbeit erläutert und die forschungsmethodische Vorgehensweise dargestellt.

Im nächsten Kapitel wird erörtert, welche Einflussfaktoren eine Neugestaltung der Prozesskette zur Herstellung von Pkw-Bordnetzsystemen erforderlich machen. Dabei werden zunächst nachfrageinduzierte Produktrends dargestellt und die angebotsbasierten Rahmenbedingungen für die Bordnetzfertigung näher betrachtet. Zudem wird zum besseren Verständnis der zu entwickelnden Automatisierungskonzepte der konventionelle Produktionsprozess für das Pkw-Bordnetz geschildert.

Als Grundlage für die Montageautomatisierung dienen makromechatronische Module, die durch Integration mechanischer und elektrischer Funktionen eine konzeptionelle Alternative zur konventionellen Rundleiterverdrahtung darstellen und dabei dem technologischen Wandel in der Bordnetzfertigung besser gerecht werden. In diesem Zusammenhang werden im dritten Kapitel die Einsatzpotenziale flexibler Flachleiterkabel anhand verschiedener, bereits umgesetzter Anwendungsbeispiele dargelegt. Anschließend wird, ausgehend von den Anforderungen der Automobilindustrie, exemplarisch ein Grundkonzept zur automatisierten Verkabelung des Pkw-Türmoduls mittels flexibler Flachleiterkabel entwickelt, das eine Rationalisierung der Produktionsabläufe durch eine Verkürzung und Vereinfachung der Montageprozesskette beinhaltet. Auf Basis dieses Grundkonzepts werden in den darauf folgenden Kapiteln Alternativen für die einzelnen Schritte des Montageprozesses, wie z. B. die Handhabung und die Ankontaktierung des Flachkabels, erarbeitet.

Zunächst werden im vierten Kapitel eine Reihe von Handhabungskonzepten für die automatisierte Montage flexibler Flachkabel auf Basis robotergeführter Verlegewerkzeuge entwickelt und ausgewählte Konzepte zur Untersuchung ihrer Eignung für eine Serienfertigung von Pkw-Türmodulen prototypisch umgesetzt. Dabei ist festzuhalten, dass die hier erarbeiteten Montageprinzipien grundsätzlich auch auf andere Module und Einsatzfelder, z. B. im Flugzeug- oder Schienenfahrzeugbau, anwendbar sind.

Zur Sicherstellung eines effizienten Einsatzes der im vierten Kapitel prototypisch realisierten Verlegewerkzeuge wird im fünften Kapitel eine durchgängige CAD/CAM-Kette zur Steuerung der komplexen Bewegungsvorgänge des eingesetzten Roboters entlang räumlicher Bahngeometrien aufgebaut. Um bereits in der Entwurfsphase des Montagesystems die Lage der Peripheriegeräte sowie die Bewegungsabläufe des Roboters zu optimieren, werden die Montagevorgänge dabei mit Hilfe eines 3D-Simulationsprogramms vorab in einer virtuellen Welt geplant und simuliert.

Im sechsten Kapitel werden alternative Konzepte zur Fixierung der Flachkabel bei der Verlegung in neu gestalteten Pkw-Türmodulen aus Kunststoff entwickelt und vorgestellt. Neben mechanischen Befestigungselementen und Schweißverfahren kommen dabei auch Klebverfahren zum Einsatz. Anschließend wird der in einer Montagezelle realisierte Ansatz zum Auftragen von Schmelzklebstoff während der Kabelverlegung hinsichtlich der Haftfestigkeit der Kabel auf dem Kunststoffträger untersucht.

Nach der Montage der Flachkabel auf der Türmoduloberfläche müssen diese mit den Funktionselementen, wie z. B. Fensterheber oder Lautsprecher, elektrisch verbunden werden. Diese Ankontaktierung ist so zu gestalten, dass die elektrische Kontaktierung

mit dem Fügeprozess der Funktionselemente auf dem Türmodul einher geht, um eine weitere Verkürzung der Montageprozesskette zu erreichen. Im siebten Kapitel werden deshalb entsprechende neue Konzepte zur elektrischen Kontaktierung von Flachleiterkabeln entwickelt, die durch ihre Positionierung auf der Oberfläche nur einseitig zugänglich sind. Anschließend wird eine ausgewählte, konzeptionelle Alternative prototypisch umgesetzt und deren Funktionsfähigkeit sowie Anwendungsspektrum analysiert.

Mit der Kontaktierung der Funktionselemente ist die Erstellung eines gesamtheitlichen Konzepts für die automatisierte Montage des Pkw-Türmoduls abgeschlossen. Im achten Kapitel werden für die Montage von Flachleiterkabelsätzen in der Pkw-Seitentür Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt. Die für die Kostenvergleichsrechnung verwendeten Ausgangsdaten wurden zur Sicherstellung der Praxisrelevanz in Zusammenarbeit mit einschlägigen Automobilzulieferern festgelegt.

## 2 Technologischer Wandel in der Bordnetzfertigung bedingt Veränderungen in der Montage

Die Fertigung von Pkw-Bordnetzen ist von einem technologischen Wandel geprägt, der durch zahlreiche Faktoren ausgelöst wird. Diese Einflussfaktoren lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen: nachfrageinduzierte Produktrends und angebotsbasierte Rahmenbedingungen.

### 2.1 Marktgebundene Produktrends in der Automobilproduktion

#### 2.1.1 Zunahme elektronikgestützter Funktionen im Automobil

Einer der bedeutendsten Produktrends im Bereich der Automobilproduktion ist die stetige Zunahme elektronikgestützter Funktionen im Pkw. [40] Branchenexperten zufolge werden heutzutage ca. 90 % aller Innovationen im Automobil auf dem Gebiet der Elektronik erzielt. Diese Feststellung, die einen tief greifenden Wandel in der Automobilproduktion kennzeichnet, wird durch den fast exponentiell steigenden Verlauf des Wachstums elektronischer Funktionen im Pkw unterstrichen, die in Bild 2.1 exemplarisch zusammengestellt sind. [157]

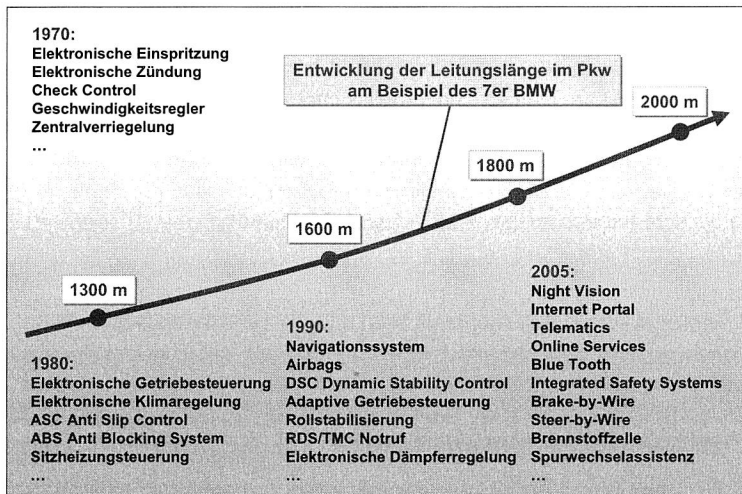


Bild 2.1: Zunahme der mit Elektronik realisierten Funktionen im Pkw führt zu stetiger Vergrößerung der Leitungslänge [149, 152]

Während die elektrischen und elektronischen Systeme in den 70er Jahren vor allem der Energieversorgung von Beleuchtungs- und Antriebselementen dienten, beeinflussen sie heutzutage praktisch jede der wenigen verbliebenen mechanischen Funktionen im Automobil, wie die Beispiele X-by-Wire zeigen.

Es ist absehbar, dass sich dieser Trend hin zu mehr elektronikgestützten Funktionen im Automobil fortsetzen wird. Die in der Automobilindustrie verbreitete JD Power European Automotive Emerging Technologies Study aus dem Jahr 2002 zeigt ein weiterhin wachsendes Kundeninteresse an elektronischen Hilfs- und Sicherheitsfunktionen im Automobil. [86]

Dem steigenden Interesse der Kunden an diesen Systemen folgend, wird für den Markt an Elektrik und Elektronik im Automobil zwischen 2005 und 2015 ein weltweites jährliches Wachstum von ca. 6 % prognostiziert, der damit auf 230 Milliarden Euro zunimmt. Das größte Potenzial für elektronikgestützte Systeme wird in den nächsten zehn Jahren in den Funktionsbereichen Fahrzeugsicherheit, effiziente Antriebe, Unterhaltung und Komfort erwartet.

Im Infotainment-Bereich werden Innovationen, wie beispielsweise Digital-TV, Internet, vernetzte Spielekonsolen oder intelligente Navigationssysteme, im Automobil Einzug halten. Im Bereich des Antriebsstrangs sind Niedrig-Emissions-Autos für den Massenmarkt, noch kompaktere Hochleistungsmotoren sowie das „Vier-Liter-Auto“ in Massenproduktion zu erwarten. Im Komfortbereich werden zum Beispiel die selbst reinigende Lackierung, physiologisch gesteuerte Klimaanlage, elektronisch anpassbare Fahreigenschaften und eine automatische Sitzeinstellung auf den Markt kommen. [69]

### **2.1.2 Gestiegene Anforderungen an Fahrzeugsicherheit und Zuverlässigkeit**

Besonders im Bereich der Fahrzeugsicherheit ist in den nächsten Jahren mit Neuerungen, wie beispielsweise aktiven Sicherheitssystemen, rückwärtigen Kameras, dem Windschutzscheibendisplay sowie einem aktiven Fußgängerschutz, zu rechnen. Roland Berger Consulting geht davon aus, dass der Elektronikanteil im Pkw in den nächsten Jahren bis auf ca. 32 % in 2015 ansteigen wird. Schon jetzt sind die Pkws serienmäßig mit sechs bis acht Airbags ausgestattet – Tendenz steigend.

Durch Sicherheitssysteme im Automobil, wie zum Beispiel Sicherheitsgurt, ASB, Airbag, Seitenaufprallschutz und ESC ist es gelungen, die Zahl der Unfalltoten zu reduzieren, während die Anzahl der Unfälle konstant blieb und die Zahl der bei Autounfällen verletzten Personen deutlich zunahm. Nach EU-Vorgaben soll die Zahl der Autounfälle mit tödlichem Ausgang bis zum Jahr 2010 auf unter 5000 pro Jahr verringert werden. Dies ist bei der weiterhin zunehmenden Straßenverkehrsaktivität nur durch den Einsatz neuer, leistungsfähigerer Sicherheitssysteme zu erreichen. [69]

Nicht nur die Sicherheit der Fahrzeuginsassen und anderer Straßenverkehrsteilnehmer sind für Pkw-Kunden relevant, auch die Zuverlässigkeit des Autos spielt bei der Kaufentscheidung eine immer größere Rolle. Nach einer statistischen Auswertung der Ursachen für Autopannen in 2006 durch den ADAC, wurde festgestellt, dass die allgemeine Fahrzeugelektrik als Baugruppe rund 39 % aller Pannen ausgelöst hat. Damit hat sich der Anteil im Vergleich zur Vorjahresanalyse noch einmal um ca. 4 % erhöht, Bild 2.2. Die drei Hauptursachen stellten hierbei defekte Batterien, durchgebrannte Sicherungen und sich lösende Kabelverbindungen dar. Gerade in diesen Bereichen haben die deutschen Automobilhersteller ihre Bemühungen verstärkt, die Ausfallrate der Fahrzeug-



elektrik zu reduzieren. Durch den Einsatz von makromechanischen Modulen mit neuen, integrierten Kontaktierungssystemen können Steckverbindungen eingespart und die Zuverlässigkeit der Fahrzeugelektrik verbessert werden.

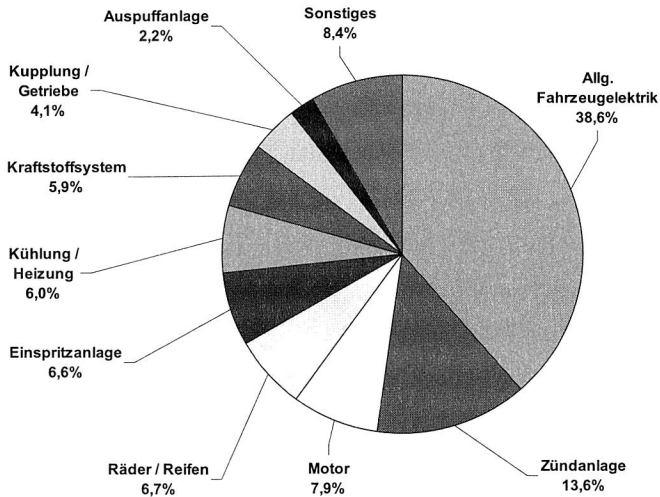


Bild 2.2: Ursachenforschung: Autopannen in 2006 nach Baugruppen unterteilt [14]

Die deutschen Automobilhersteller stehen nach wie vor im harten Wettbewerb mit japanischen Produzenten, die bislang in der ADAC-Pannenstatistik durch eine streng qualitätsbewusste Ausgestaltung ihrer Produktionsstrukturen sowie einer reduzierten Variantenvielfalt große Erfolge verbuchen konnten. [14, 59]

### 2.1.3 Zunehmende Individualisierung des Fahrzeugs bestärkt Trend zur Modularisierung

Die hohe Variantenvielfalt bei deutschen Automobilherstellern, die vor allem durch einen starken Wunsch nach Individualisierung des Fahrzeugs hervorgerufen wird, ist ein kundeninduzierter Markttrend, dem in der Automobilherstellung durch Flexibilisierung der Produktionsstrukturen und in der Automobilentwicklung durch eine zunehmende Modularisierung begegnet wird. Hinzu kommen weiter steigende Kundenansprüche an die Serienausstattung von Pkws. Eine Vielzahl von bisher nur in Ober- und Luxusklassefahrzeugen eingebauten Funktionen wird schrittweise auch für untere Fahrzeugklassen serienmäßig angeboten. Die sich daraus ergebende Erhöhung der Komplexität des Leitungssatzes wird immer schwerer beherrschbar. Eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen, ist die Aufteilung des Gesamtleitungssatzes in einzelne Module. Diese können separat vorgefertigt, geprüft und über standardisierte Schnittstellen an den Hauptleitungssatz angebunden werden. Die Vormontage von Fahrzeugmodulen und deren anschließende sequenzielle Einbindung in die normale Montagelinie führt zu einer Reduzierung der Komplexität der Fahrzeugendmontage sowie einer Verkürzung der

Montageprozessdauer. In Kapitel 3 werden Konzepte für makromechatronische Module im Automobil vorgestellt, die eine weitere Verkürzung der Montageprozessketten ermöglichen. [13, 44, 64, 153]

#### 2.1.4 Zunahme des Energiebedarfs im Automobil

Bedingt durch die rapide Zunahme an elektrischen Funktionen und der fortwährenden Substitution mechanischer Features durch elektrische Systeme im Pkw, steigt der Energiebedarf stetig, Bild 2.3.

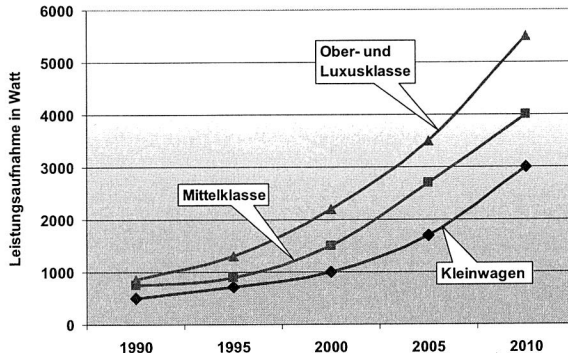


Bild 2.3: Erwartete Veränderung der Leistungsaufnahme im Automobil (nach [128])

Neue Systeme, wie zum Beispiel elektromechanische Bremsen, die elektrische Lenkung, elektrische Klimaanlage oder Hochleistungsheizsysteme, beheizter Katalysator, elektrischer Ventiltrieb oder Start/Stop-Betrieb mittels Startgenerator steigern den Bedarf an elektrischer Leistung im Automobil erheblich. Die bislang im Fahrzeug eingesetzte 12 V-Bordnetzspannung führt bei immer mehr Verbrauchern zwangsläufig zu immer größeren Kabelquerschnitten und höheren Strömen im Pkw. Auf lange Sicht ist aus Platz- und Kostengründen eine Erhöhung der Bordnetzspannung zwingend erforderlich. Seit Anfang der 90er Jahre wird deshalb bereits über die Einführung eines 42 V-Bordnetzes diskutiert. Die wichtigsten Vorteile dieser Technologie sind:

- Geringere Ströme für vergleichbare Leistungen
- Reduzierung ohmscher Verluste bzw. Einsatz geringerer Leiterquerschnitte
- Gewichtsreduzierung des Leitungssatzes
- Bessere Eignung für alternative Übertragungsmedien (z. B. Flachleiter)
- Voraussetzung für verschiedene neue Funktionen im Pkw.

Hochleistungskomponenten, wie beispielsweise ein elektrischer Ventiltrieb oder ein Kurbelwellenstarter-Generator machen den Einsatz von geschirmten Leitungen mit Leiterquerschnitten bis 35 mm<sup>2</sup> bei 42 V-Bordnetzspannung erforderlich. In Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen werden bereits Sonderleitungen mit großen Querschnitten

für Spannungen im Bereich von 200 V bis 500 V für die Versorgung des Fahrmotors eingesetzt. Marktanalysen [87] ergeben, dass die 42 V-Bordnetztechnologie spätestens im Jahre 2008 im Automobil integriert sein wird. Bis 2015 werden mehr als 40 % aller Neuwagen über eine 42 V-Bordnetzspannung verfügen. [75, 128, 129, 151]

### 2.1.5 Reduktion des Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge

Aufgrund der in den letzten Jahren sprunghaft gestiegenen Rohölpreise sowie verschiedener politischer Interventionen, wie beispielsweise mit der Einführung der Ökosteuer, haben sich die Kosten für den Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor deutlich erhöht. Die anhaltend starke Nachfrage nach Rohöl auf dem Weltmarkt und die Forderung der Öffentlichkeit nach Fahrzeugen mit geringem Schadstoffausstoß treibt die Industrie zu immer besseren Innovationen in der Automobilentwicklung, in einigen Bereichen sogar an den Rand des physikalisch Möglichen. So entwickelte VW beispielsweise ein Konzeptauto auf Basis eines Einzylinder-Dieselmotors mit Direkteinspritzung, das mit 6,5 l Tankvolumen 650 km weit fährt und dabei eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h erreicht. [84]

Eine dafür in der Automobilentwicklung häufig angewandte Methode ist das so genannte „Downsizing“. Der Begriff steht für Effizienzsteigerungen durch Synergieeffekte, die sich bei der Verkleinerung einzelner Bauteile innerhalb eines Systems ergeben, da infolge dessen häufig auch andere Bauteile verkleinert werden können. So ist es zum Beispiel möglich, beim Einsatz leichterer Fahrzeugmotoren mit weniger Hubraum gleichzeitig auch leichtere Motoraufhängungen, kleiner dimensionierte Getriebe und kleinere Tankvolumen zu realisieren, wodurch Gewicht und Platzbedarf für das gesamte Antriebssystem reduziert werden können. Das geringere Fahrzeuggewicht ermöglicht mit dem kleineren Motor bei gleichzeitig geringerem Kraftstoffverbrauch wiederum gleiche Fahrleistungen wie ein größerer Motor in einem entsprechend größeren Kraftfahrzeug. [45]

Neben dem Downsizing werden auch andere Methoden zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs untersucht und eingesetzt. Eine der wichtigsten Maßnahmen ist dabei die Verringerung des Gesamtgewichts des Fahrzeugs. So ist die Substitution von Stahl mit Aluminium inzwischen gängige Praxis. Haupteinsatzgebiete für den Leichtbau mit Aluminium sind sowohl Voll-Aluminium-Karosserien als auch Motoren, Antriebsstrang, Fahrwerk und Räder. Nachdem sich die Leichtbau-Potenziale in der automobilen Oberklasse bereits bewährt haben und dort inzwischen Stand der Technik geworden sind, sollen sie nun auch in der automobilen Mittelklasse Anwendung finden. [154] Der Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) geht demzufolge davon aus, dass sich der Anteil an Aluminiumwerkstoffen im Pkw auf durchschnittlich 130 kg im Jahr 2008 erhöhen wird, Bild 2.4. Weitere Bauteile im Automobil, die bislang aus Stahl gefertigt wurden, werden zukünftig durch Aluminium ersetzt. Dabei ist es jedoch wichtig, dass die vorgenommenen Änderungen unter Beibehaltung bzw. Verbesserung des Fahrkomforts, Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen und zu marktfähigen Preisen realisiert werden, um die erforderliche Kunden-Akzeptanz zu erhalten.

Eine weitere Maßnahme zur Gewichtsreduzierung ist der Einsatz von Kunststoff an Stelle von Glas. Fahrzeugscheiben aus Polycarbonat werden vor allem bei Dachscheibenmodulen sowie fest stehenden Seitenscheiben serienmäßig eingesetzt. Gerade bei Dachscheibenmodulen eröffnen sich für Kunststoff große Einsatzpotenziale, da hier nicht nur die Gewichtsreduzierung allein Motivation für diese Entwicklung ist, sondern weil durch den tieferen Schwerpunkt die Fahreigenschaften der Pkws nachhaltig verbessert werden können. [127]

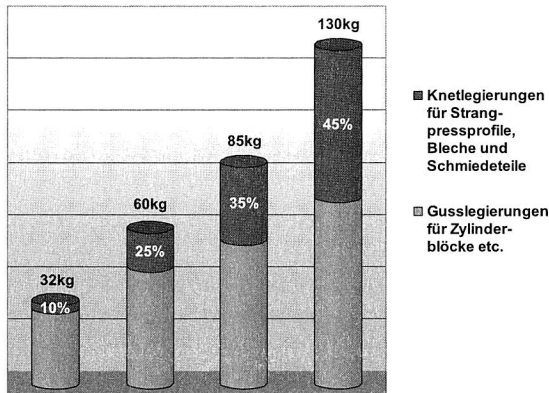


Bild 2.4: Zunehmender Einsatz von Aluminium im Pkw (nach [82])

Auch das Pkw-Bordnetz gerät bei der Suche nach Möglichkeiten, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren, zunehmend ins Visier. Führende Experten gehen davon aus, dass das Fahrzeuggewicht durch den konsequenten Einsatz von Flachleitern deutlich reduziert werden kann [151]. In Kapitel 3.2 werden Konzepte für einen entsprechenden Einsatz flexibler Flachleiter vorgestellt.

## 2.2 Allgemeine Rahmenbedingungen der Bordnetzherstellung

Die Produktion des Pkw-Bordnetzes steht vor großen Herausforderungen. Nicht nur auf kundeninduzierte Veränderungen im Produktportfolio muss reagiert werden, sondern auch auf verschiedene angebotsbasierte Rahmenbedingungen, die im Folgenden genauer charakterisiert werden.

### 2.2.1 Funktion und Umfang des Kabelsatzes im Automobil

Der Kabelsatz dient der Verbindung elektrischer und elektronischer Komponenten zur Sicherstellung der Energieversorgung der Verbraucher und zur Übertragung von Informationen von Sensoren zu entsprechenden Steuergeräten sowie zwischen Steuergeräten. Er ist durch eine Vielzahl von Einzelkomponenten, wie beispielsweise Leitungen, Steckkontakte, Steckergehäuse, Dichtungen, Ummantelungen für Leitungen, Befestigungselemente und Tüllen gekennzeichnet, die miteinander zu einem komplexen Netzwerk gefügt werden. [44]

Genau so vielfältig, wie die Komponenten des Leitungssatzes, sind auch die Stellgrößen zur Optimierung des Pkw-Bordnetzes:

- Variantenreduzierung
- Reduzierung von Gewicht, Volumen und Teileanzahl
- Querschnittsverminderung
- Versorgungskonzeption, Potenzialverteilung
- Kontaktierung/Trennstellen
- Fertigungstechnik
- Montage/Verlegung
- Kostenoptimierung, Verfügbarkeitssteigerung
- Logistik bei Lieferanten und Kunden
- Recycling.

Das Ziel einer Entwicklung modularer sowie gewichts- und kostenoptimierter Bordnetzkonzepte ist nur durch eine Minimierung der sich aus den Stellgrößen ergebenden wechselseitigen Einschränkungen möglich. [56]

### 2.2.2 Verringerung der Produktlebenszyklen

Die Entwicklung und Umsetzung der auf diese Weise optimierten Bordnetzkonzepte wird dadurch erschwert, dass die Produktwechsel immer schneller von statten gehen. Ursache hierfür ist die marktinduzierte Forderung nach einer beschleunigten Integration technischer Innovationen in bestehende Fahrzeugreihen bzw. einem immer schnelleren Wechsel des Fahrzeugdesigns. Dies führte in der Vergangenheit zu einer deutlichen Verkürzung der Modell-Lebenszyklen, wie in Bild 2.5 dargestellt.

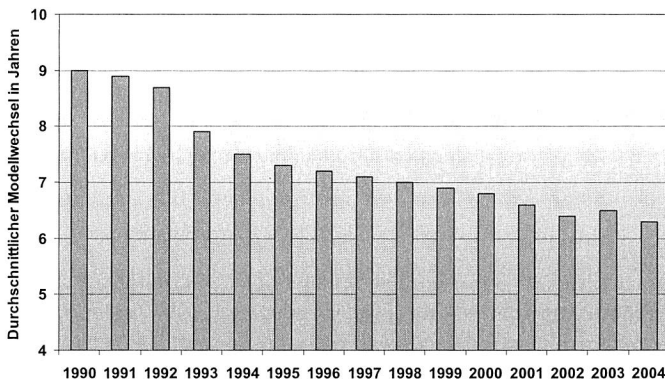


Bild 2.5: Verkürzung der Modell-Lebenszyklen bei europäischen OEMs (nach [88])

Zwischen 1990 und 2004 hat sich der durchschnittliche Modell-Lebenszyklus bei europäischen OEMs (Original Equipment Manufacturer) um 30 % reduziert. Automobilhersteller und –zulieferer sind dadurch gefordert, quasi parallel immer mehr Modelle in immer kürzerer Zeit gemeinsam zu entwickeln und zu produzieren. [88] Dies macht eine enge Verzahnung der Entwicklungsaktivitäten innerhalb der gesamten Prozesskette erforderlich. Dabei kommen zunehmend moderne, vernetzte CAD- und Workflow-Systeme zum Einsatz, die ein durchgängiges Datenmanagement ermöglichen.

### 2.2.3 Fertigung von Kabelsätzen mit Losgröße 1

Die Fertigung des Pkw-Bordnetzes erfolgt heutzutage annähernd bei Losgröße 1, d. h. es handelt sich bei jedem Kabelsatz quasi um ein Unikat. Für den Fahrzeugkabelsatz des Porsche Carrera GT existieren allein 2<sup>32</sup> Cockpitvarianten. Der Kabelsatzkonfektionär LEONI gibt an, dass in seiner Produktion nach 10 Monaten zufällig ein Kabelsatz in der gleichen Zusammenstellung nochmals gefertigt wurde. [46]

Beispiele wie diese zeigen, welcher Herausforderung sich die Bordnetzherstellung und –montage zu stellen haben. Die Forderung der Kunden nach individuellen und praktisch „maßgeschneiderten“ Modellen hat die Variantenanzahl innerhalb eines Fahrzeugmodells sowie die Anzahl der Nischenmodelle deutlich erhöht. Bei der Bestellung eines VW-Golf kann der Kunde derzeit durch die Auswahl spezifischer Module und Funktionen theoretisch zwischen 2,8 Milliarden herstellbaren Varianten wählen. [88]

Für Automobilhersteller bietet sich durch diesen kundeninduzierten Trend zur Individualisierung und Personalisierung des Fahrzeugs die Möglichkeit, durch Flexibilisierung der eigenen Produktion in den lukrativen und wachsenden Tuningmarkt einzusteigen. Nach einer aktuellen Studie des *Verbands Automobil tuning und -zubehör e.V.* geben 36 % der Befragten an, ihre Tuningprodukte bereits beim Pkw-Händler zu kaufen. [114]

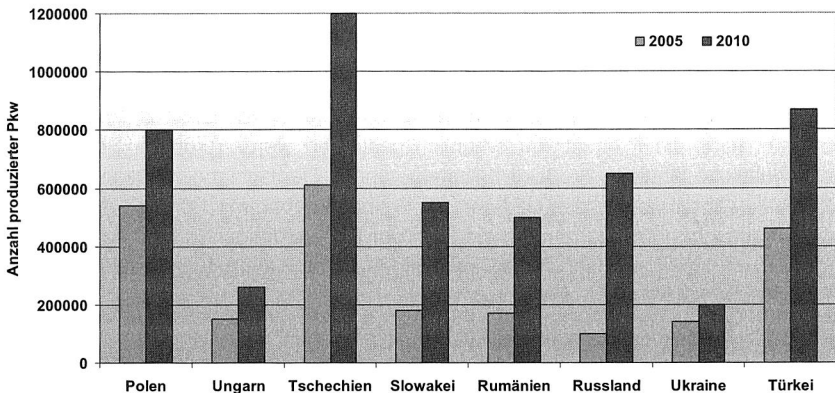
### 2.2.4 Produktionsverlagerung in Niedriglohnländer

Im Zuge der Globalisierung sehen sich deutsche Unternehmen einem zunehmenden Kostendruck ausgesetzt, der vor allem durch weltweit operierende Anbieter aus Niedriglohnländern ausgelöst wird. Diesem Kostendruck begegnen die deutschen Hersteller mit drei Maßnahmen-Paketen:

- Auslagerung von personalintensiven Produktionsprozessen in Niedriglohnländer,
- Rationalisierung der Produktions- und Vertriebsprozesse in Deutschland,
- Entwicklung innovativer Produkte und Dienstleistungen in Deutschland.

Die hohe Variantenvielfalt hat dazu beigetragen, dass eine durchgehende Automatisierung der Bordnetzfertigung und –montage bislang noch nicht realisiert werden konnte. Abgesehen von einzelnen Teilprozessen, wie zum Beispiel das Anschlagen der Rundleiterenden, ist die Fertigung des Kabelsatzes und dessen Montage in Fahrzeugmodulen bzw. im Gesamtfahrzeug durch reine Handarbeit gekennzeichnet. [46]

Die immer kürzeren Innovations- und Produktlebenszyklen sowie die dynamische Nachfrageentwicklung auf dem Weltmarkt erschweren ebenfalls die wirtschaftliche Automatisierung dieser komplexen Montageabläufe. Diese Tatsache sowie die hohen Personalkosten in Deutschland haben in der Vergangenheit zu einer massiven Auslagerung von manuellen Herstellungsprozessen in so genannte Niedriglohnländer geführt. Nach wie vor sehen sich Kabelkonfektionäre aus Kostengründen gezwungen, ihre Fertigung trotz des hohen logistischen Aufwands in Niedriglohnländer zu verlegen. [22, 32, 39]



*Bild 2.6: Fertigungskapazitäten internationaler Hersteller in Ost- und Zentraleuropa; Verdopplung des Fertigungsvolumens bis 2010 (nach [51])*

In zunehmendem Maße werden nicht nur personalintensive Produktionsprozesse, sondern auch die Fertigung und Montage ganzer Fahrzeugreihen von international agierenden OEMs in europäische Niedriglohnländer verlagert. Nach einer Studie des Marktforschungsinstituts B & D Forecast wird sich die Produktionskapazität in diesen Ländern von 2,4 Millionen Pkw auf ca. 5 Millionen mehr als verdoppeln, Bild 2.6.

Dabei drängen bis 2010 jährlich mindestens eine Million dieser Fahrzeuge auf den westeuropäischen Absatzmarkt. Das hier bereits vorhandene Problem der Überkapazität von allein ca. 3,5 Millionen Einheiten bei den fünf Volumenherstellern Ford-PAG, VW, Opel, Saab, Renault und Fiat wird dadurch noch verschärft. Beim Abbau dieser Überkapazität stehen laut der Studie von B & D Forecast in der westeuropäischen Automobilindustrie knapp 35000 Arbeitsplätze pro eine Million Einheiten Überkapazität zur Disposition. [51]

Trotz dieser negativen Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt ist der Aufbau von Produktionskapazitäten in europäischen Niedriglohnländern für die Automobilhersteller und deren Zulieferer zwingend erforderlich, die damit ihren Wachstumsmärkten folgen. Dieses internationale Engagement hat der deutschen Automobilindustrie bereits in der Vergangenheit geholfen, durch Mischkalkulation Arbeitsplätze an deutschen Produktionsstandorten zu sichern. [134]

### 2.2.5 Rationalisierungsmaßnahmen in Deutschland

Eine kostenorientierte Verlagerung von Produktionskapazitäten ins Ausland ist allerdings risikobehaftet, wie die Entwicklung von Produktionsverlagerungen ins Ausland im Vergleich zu Rückverlagerungen nach Deutschland zeigt. Eine Studie des Fraunhofer ISI - Institut Systemtechnik und Innovationsforschung kommt zu dem Ergebnis, dass beispielsweise im Jahr 2001 auf zwei verlagernde Firmen eine Firma kam, die ihre Produktion aus dem Ausland zurückholte. Hierbei hat sich gezeigt, dass es durch die Ausschöpfung der am heimischen Standort gegebenen Potenziale zur Leistungssteigerung ebenfalls möglich ist, auf dem globalen Markt wettbewerbsfähig aufzutreten. [62]

Die Rationalisierungsmaßnahmen in der deutschen Industrie, haben in den letzten Jahrzehnten besonders im Produktionsbereich verstärkt Arbeitsplätze gekostet, während gleichzeitig die Produktivität erheblich gesteigert werden konnte. So betrug die durchschnittliche jährliche Produktivitätssteigerung in Deutschland 2,5 % in den Jahren 1990-1997, während sie in den USA mit 1,2 % und in Japan mit 1,0 % deutlich geringer ausfiel. Im gleichen Zeitraum nahm die Zahl der Erwerbstätigen in Deutschland durchschnittlich um 1,2 % pro Jahr ab, während sie in den USA um 1,2 % und in Japan um 0,7 % anstieg. [66]

Der mit der Produktivitätssteigerung einher gegangene Beschäftigungsabbau führt zu einem erheblichen Zuwachs an Sozialausgaben und bindet Finanzmittel, die dem Staat für Investitionen in Bildung, Forschung und Entwicklung fehlen. Um auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig zu bleiben, ist die Steigerung der Produktivität für die deutschen Unternehmen unumgänglich. Nur wenn die Unternehmen wirtschaftlich arbeiten, sind sie in der Lage, zu expandieren und neue, hochwertige Arbeitsplätze in Deutschland zu schaffen. Besondere Anstrengungen, die Produktivität zu erhöhen, wurden in der deutschen Automobilindustrie unternommen. Hier wurde beispielsweise die Arbeitsproduktivität in den Jahren 1996-1999 um insgesamt 13 % gesteigert und damit die Wettbewerbsposition der deutschen Unternehmen vor allem gegenüber den bisherigen europäischen Niedriglohnländern Spanien und Italien ausgebaut. [80]

Diese Wettbewerbsbedingungen gelten für Automobilhersteller genauso wie für Zulieferer, die versuchen, mit eigenem Know-how innovative Produkte zu entwickeln, einen Kostenvorteil zu erzielen und damit den Marktanteil gegenüber den global operierenden Mitbewerbern zu vergrößern. Durch moderne Organisationskonzepte, wie beispielsweise der Einführung von Gruppenarbeit, der Dezentralisierung von Funktionen oder der Implementierung von Verfahren zur kontinuierlichen Verbesserung (KVP), erschließen sich neue Kostensenkungspotenziale. [62]

Auch im Bereich der so genannten Supply-Chain können Einsparungen vorgenommen werden, zum Beispiel durch die Verkürzung der Transportwege. So sind in der Nähe von Produktionsstätten der OEMs oft ganze Industrieparks mit Zulieferern angesiedelt. Zeitgesteuerte Logistikabläufe, wie die Just-In-Time- und Just-In-Sequence-Lieferung bzw. -produktion, die in der Automobilindustrie durch den Effizienzdruck auf Produktions- und Logistikprozesse Verbreitung gefunden haben, lassen sich dadurch einfacher



realisieren, tragen in erheblichem Maße zur Vermeidung von Lager- und Kapitalbindungskosten bei und erschließen damit weitere Einsparpotenziale. [88]

Diese lassen sich mit den in der Automobilindustrie zunehmend eingesetzten Supply-Chain-Monitoring-Systemen heben, die es möglich machen, durch unternehmensübergreifende Datenintegration Kosten weiter zu reduzieren und die Bestände sowie die Zuverlässigkeit der Lieferanten zu optimieren. Diese Systeme bieten heutzutage neben einer umfassenden, Ländergrenzen übergreifenden Kontrolle der Wertschöpfungskette bereits ein integriertes Frühwarnsystem für den Fall, dass Lieferabrufe nicht rechtzeitig bedient werden.

Die fortschreitende Internationalisierung der Beschaffungslogistik erfordert wirksame Steuerungsmechanismen und damit ein striktes Supply-Chain-Management, verbunden mit einem systematischen Messen und Bewerten von ausgewählten Prozessgrößen innerhalb der Lieferkette. Dadurch können Parameter, wie beispielsweise Termin- und Liefertreue, Durchlaufzeiten, Entwicklungszeiten sowie Prozess-Transparenz gegenüber Lieferanten und Kunden optimiert werden. [150]

## 2.2.6 Gestiegene Energie- und Rohstoffkosten

Die Automobilhersteller und –zulieferer sehen sich einem wachsenden Kostendruck ausgesetzt. Auf der einen Seite findet auf dem Automobilmarkt in Europa ein harter Preiswettbewerb statt. Dessen Ursache liegt unter anderem in der bereits angesprochenen Überproduktion von Pkw in Westeuropa begründet. Zudem hat die Transparenz des Marktes in Europa durch die Einführung des Euro als gemeinsame Währung sowie durch Nutzung des Mediums Internet und damit erheblich besser informierter Kunden zu einer Preisharmonisierung geführt. [88]

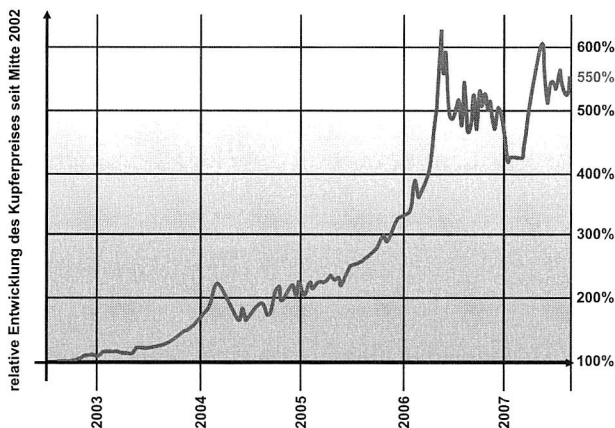


Bild 2.7: Entwicklung des Kupferpreises in den letzten 5 Jahren (nach [112])

Auf der anderen Seite haben sich die Energie- und Rohstoffpreise in den letzten Jahren deutlich erhöht. In Bild 2.7 ist die Entwicklung des Preises für Kupfer in den letzten fünf

Jahren dargestellt, der in diesem Zeitraum um mehr als 500 % zunahm. In der gleichen Zeit hat sich der Preis für Rohöl der Marke Brent Crude Oil auf dem Weltmarkt mehr als verdoppelt. Während das Kupfer im Automobil vorwiegend für die elektrische Verkabelung benötigt wird, ist das Rohöl Basiswerkstoff für alle eingesetzten Kunststoffe, deren Anteil im Pkw stetig zunimmt. Diese erheblichen Preissteigerungen bei den Rohstoffen können die Automobilhersteller und –zulieferer in dem bereits geschilderten Marktumfeld jedoch nicht ohne weiteres an ihre Kunden weitergeben, wodurch der bestehende Kostendruck noch zusätzlich verstärkt wird.

## 2.2.7 Veränderung der Wertschöpfungsanteile zwischen Automobilzulieferern und OEMs

Die Automobilzulieferer erfahren nicht nur einen steigenden Kostendruck durch die globalen Einkaufsstrategien der Automobilhersteller, sie werden durch deren zunehmende Konzentration auf Kernkompetenzen und der damit einher gehenden Verringerung der Fertigungstiefe gezwungen, sich durch eine intensive Verzahnung zu Entwicklungspartnern der OEMs weiterzuentwickeln. Die zunehmend internationale Ausrichtung der deutschen Fahrzeughersteller hat dazu geführt, dass fast 50 % der die OEMs direkt beliefernden *first tier supplier* eigene Auslandsproduktionen aufgebaut haben, um in der Nähe ihrer Großkunden präsent zu sein. [62] Im Jahre 2010 wird nach einer Studie von Roland Berger Strategy Consultants rund 95 % des Beschaffungsvolumens der Automobilindustrie von international agierenden Zulieferern bedient werden. [140]

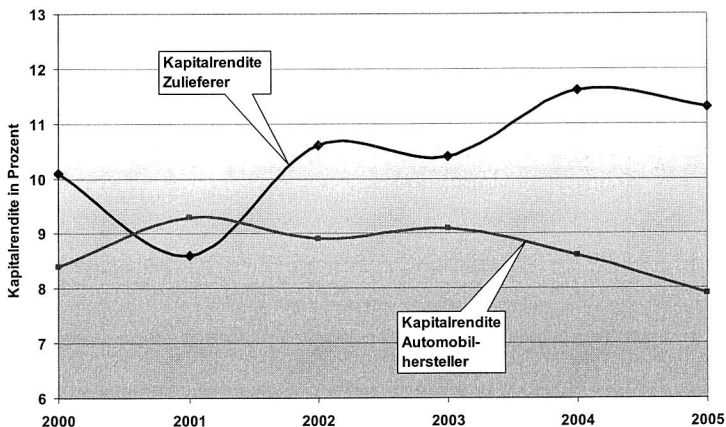


Bild 2.8: Automobilzulieferer arbeiten profitabler als die Hersteller (nach [100])

Gleichzeitig wird durch den Wandel der derzeit funktional orientierten Wertschöpfungsarchitektur hin zu einer kompetenzbasierten Aufgabenverteilung der Wertschöpfungsanteil der OEMs am Gesamtfahrzeug bis zum Jahr 2015 auf ca. 25 % zurückgehen. [1, 63] Auslöser für diesen Wandel ist die Aufteilung des Gesamtfahrzeugs in Fahrzeugmodule durch die OEMs und die Vergabe von Fertigungskompetenzen für einzelne Mo-

dule an große Automobilzulieferer. Dadurch können sich die Automobilhersteller auf die Fertigung der Module konzentrieren, die sie als eigene Kernkompetenz definieren. [91]

In Bild 2.8 ist die Entwicklung der Kapitalrendite, also dem Gewinn vor Zinsen und Steuern, im Verhältnis zum eingesetzten Kapital (in Prozent), von Automobilherstellern und –zulieferern dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die Zulieferer seit 2003 ihren Vorsprung vor den OEMs weiter ausbauen konnten. Mit der Konzentration auf ihre Kernkompetenzen verfolgen die Automobilhersteller das Ziel, sich von Prozessen mit geringem Wertschöpfungsanteil zu trennen und dabei selbst profitabler zu werden. Gleichzeitig sind sie dadurch in der Lage, den gestiegenen Kundenanforderungen nach individuellen Produkten, die mit immer kürzeren Lieferzeiten und niedrigeren Preisen angeboten werden sollen, gerecht zu werden.

Im Bereich der Bordnetzfertigung hat diese Entwicklung dazu geführt, dass Funktionsplattformen, wie zum Beispiel in der Pkw-Tür oder dem Dach, von einzelnen Modul Anbietern komplett mit integrierter elektrischer Verkabelung angeboten und Just-In-Sequence am Montageband des OEMs zur Verfügung gestellt werden. [93] Dabei haben Fahrzeughersteller und Kabelsatz-Zulieferer unterschiedliche Anforderungen an die Kabelbäume. Beim Konfektionär liegen diese vor allem im Herstellungsprozess bei einfachen Teilmodulen, einer insgesamt guten Modularisierbarkeit und einem wirtschaftlichen Variantenhandling. Dagegen setzen die Fahrzeughersteller in erster Linie Zielkriterien, wie einen minimalen Materialeinsatz, eine minimale Schnittstellenzahl und eine montagefreundliche Gestaltung des Leitungssatzes. [7]

## 2.3 Konventionelle Fertigungsprozesse für Bordnetzsysteme

Die Herstellung der Funktionsplattformen sowie die Herstellung des Bordnetz-Kabelsatzes insgesamt, sind zu fast 100 % durch manuelle Prozesse gekennzeichnet [22] und werden zum besseren Verständnis der in den nächsten Kapiteln vorgestellten Automatisierungskonzepte im Folgenden näher erläutert.

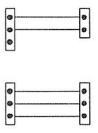
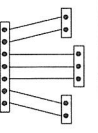
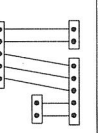
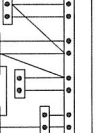
















### 2.3.1 Entwicklung der Verlegebrett-Zeichnung


Die Entwicklung und Fertigung von Kabelbäumen ist heutzutage in mehrere Stufen unterteilt. Zunächst werden die Einzelkomponenten und Verschaltungselemente definiert. Im Anschluss daran wird der Leitungssatz konstruiert. Dem folgt die Herstellung eines Musterkabelbaumes zur Bewertung und Optimierung der Konstruktion. Anschließend wird die Kabelbaum-Konstruktion in Montagemodule zerlegt. [7] Zur Umsetzung dieses Entwicklungsprozesses kommen zwei Software-Werkzeuge zum Einsatz, ein MCAD-System (Mechanical Computer Aided Design) und ein ECAD-System (Electronic Computer Aided Design). Während beim ECAD-System Aspekte wie Verbindungslogik, Übertragungstechnologie und Leitungsattribute im Mittelpunkt stehen, werden im MCAD-System vor allem räumliche Geometriedaten, die Komponentenplatzierung sowie die Vorgabe von Verlegewegen und Anschlusspositionen generiert und damit ein 3D-Modell erzeugt, das anschließend in ein digitales Versuchsmodell (Digital Mock-Up, DMU) des Fahrzeugs zur Analyse von Überschneidungen sowie Freiräumen für die

Montage eingeht. Aus dem kombinierten Einsatz beider Entwicklungswerkzeuge entstehen Fertigungsdaten, wie z. B. Stücklisten und Leitungslängen sowie die Verlegebrett-Zeichnung. Für die Erstellung der Verlegebrett-Zeichnung wird das 3D-Modell des Kabelsatzes in einer zweidimensionalen Abwicklung dargestellt, dem so genannten *Formboard*. Dieses besteht aus dem Kabelschaltplan zuzüglich aller Befestigungsteile, Schutzelemente, Dichtungen und Bandagierung. Auf dem Verlegebrett bzw. dem Verlegetisch erfolgen die manuelle Konfektionierung der Leitungen sowie die Bandagierung der Kabelbündel. [54, 109]

### 2.3.2 Klassifizierung von Kabelbaumstrukturen

Die zu konfektionierenden Leitungssätze lassen sich, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, in vier Klassen unterteilen. Die Hauptstruktur des Leitungssatzes entscheidet dabei über den Grad der Automatisierung bei der Konfektionierung des Kabelbaumes.

Klasse	I	II	III	IV
Beispiel				
Hauptstruktur-Merkmal	linear	verzweigt	verzweigt, offen verkettet	verzweigt, geschlossen verkettet
Steckerbeziehungen	1 : 1	1 : n	m : n	uneindeutig
Komplexität des Moduls				
Homogenität des Moduls				
Parallelität des Moduls				
Art der Konfektion / Bestückung	voll-automatisch	voll-automatisch	teil-, voll-automatisch	manuell, teil-automatisch
Verlege- und Bündelungsaufwand				



● hoch  
◐ mittel  
○ gering

Tabelle 2.1: Klassifizierung von Leitungssätzen für Pkw-Bordnetze [7]

Bei linearen und unverkettet verzweigten Strukturen kann die Konfektionierung aufgrund der großen Homogenität und der geringen Komplexität vollautomatisch erfolgen. Kabelbäume, deren Struktur verzweigt und verkettet sind, können nur bedingt oder gar nicht automatisch konfektioniert werden, da der große Verlege- und Bündelungsaufwand eine besonders hohe Flexibilität der Kabelbaummontage erfordert. Aus diesem Grund wird bei der konventionellen Montage stark verzweigter Kabelbäume mit komplexen Strukturen, wie sie im Pkw standardmäßig eingesetzt werden, die Konfektionierung der Leiter rein manuell am Verlegetisch realisiert.

### 2.3.3 Manuelle Arbeiten am Verlegetisch

In einem Vormontageschritt werden die Einzeladern des zukünftigen Kabelsatzes zugeschnitten und angeschlagen, d. h. mit Kontaktierungselementen versehen. Diese Vormontage erfolgt heutzutage weitestgehend automatisiert. Die vorgefertigten Leiter werden dann am Verlegetisch vorsortiert zur Verfügung gestellt. Auf dem Verlegetisch werden die Einzeladern gemäß der Verlegebrett-Zeichnung angeordnet und dabei über Umlenkstifte geführt, Bild 2.9. Dem folgt die Fixierung der angeschlagenen Pins der Einzeladern in Steckergehäusen. Anschließend werden die Leiter zu Kabelbündeln zusammengefasst und bandagiert. [109]

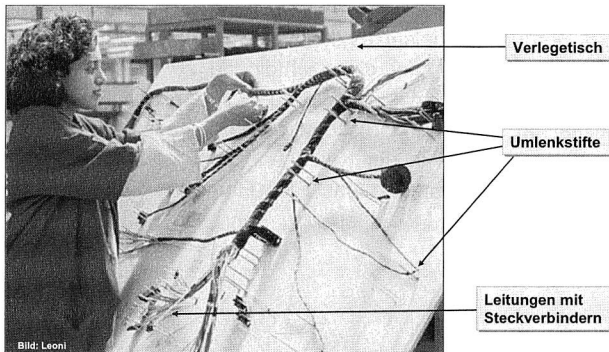


Bild 2.9: Manuelle Konfektionierung des Leitungssatzes auf dem Verlegetisch

Nicht nur die Konfektionierung, sondern auch das Bandagieren der zusammengestellten Leitungssätze, erfolgt noch fast ausschließlich manuell. Dabei ist das Bandagieren der Kabelbäume ein besonders zeitintensiver Arbeitsgang, der hohe Rationalisierungspotenziale birgt. Etwa 30 % der Montagezeit für einen Kabelbaum entfallen auf das Bandagieren. Aus diesem Grund werden bereits erste Bandagierwerkzeuge entwickelt, mit deren Hilfe die Leitungssätze automatisch mit Klebeband umwickelt werden können. Die Klebebandfolie, von der im Pkw durchschnittlich 1,4 m<sup>2</sup> verarbeitet werden, übernimmt dabei nicht nur die Funktion der Bündelung der Leitungen, sondern bietet auch einen Schutz vor Scheuern und Klappern des Leitungssatzes im Pkw.

Dabei kommen unterschiedliche Arten von Klebebändern zum Einsatz, wie PVC-Bänder, Gewebe- oder Vliesklebebänder. Ein beim Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) entwickeltes prototypisches Bandagiersystem, ermöglicht ein Bandagieren von Leitungssätzen und Teilleitungssätzen, bei dem sowohl der Umspulprozess als auch der Wechsel der Klebebandmagazine vollautomatisch erfolgen. [139]

Der fertig konfektionierte Kabelbaum wird abschließend einer automatisierten Prüfung unterzogen. Er ist nun mit zahlreichen Steckverbindern und Befestigungsklemmen versehen. Darüber hinaus sind an den Stellen, an denen Durchkontaktierungen bestehen, Dichtelemente angebracht. Der Zeitaufwand für die Konfektionierung und Bandagierung

eines Leitungssatzes ist dadurch sehr hoch. Zudem erhöht der Materialaufwand für die Bandagierung und Befestigung des Kabelsatzes das Gewicht des Fahrzeugs.

#### **2.3.4 Einordnung der Kabelsatzmontage in die Pkw-Produktionskette**

Die Produktion eines Automobils beginnt mit dem Karosseriebau. Die im Presswerk hergestellten Einzelteile werden dabei im so genannten Rohbau durch Schweißen, Nieten oder Kleben gefügt. Danach durchlaufen die Rohkarossen die Lackiererei, in der sie nach einer allgemeinen Grundierung die vom Kunden gewünschte Farbe erhalten. Anschließend fahren die lackierten Karossen über Fördersysteme in die Endmontage, in der sie schrittweise mit allen erforderlichen Fahrzeugmodulen versehen werden.

Die Montage des Bordnetz-Kabelsatzes steht am Anfang der Montageprozesskette, da sämtliche Bordnetz-Systemmodule, die nachfolgend zu montieren sind, mit diesem elektrisch kontaktiert werden und eine spätere Montage aus Platz- und damit einhergehend Komplexitätsgründen nicht wirtschaftlich wäre. Neben dem Hauptkabelsatz, der gleich zu Beginn der Montage in der Karosserie verlegt wird, gibt es Kabelsätze für Fahrzeugmodule, wie beispielsweise das Pkw-Türmodul oder den Dachhimmel, die direkt mit dem vormontierten Modul an das Fahrzeug und dessen Hauptkabelsatz angekoppelt werden. [16, 28]

### **3 Verkürzung der Montageprozesskette durch den Einsatz makromechatronischer Module**

Wie bereits in Kapitel 2.1 angesprochen, versuchen die Automobilhersteller, die stetig steigende Komplexität ihrer Fertigungs- und Montageprozesse in den Griff zu bekommen. Ein Ansatzpunkt, diese zu entzerren, ist die Aufteilung des Gesamtfahrzeugs in einzelne Fahrzeugmodule, wie zum Beispiel Motor, Motorraum, Cockpit, Rahmenbodenanlage, Dachhimmel, Türmodul und Stoßfängermodul. [16] Mit dieser Aufteilung wird zwangsläufig auch das Pkw-Bordnetz modularisiert.

Im Folgenden wird erläutert, wie spezifische Ausprägungen solcher Bordnetzmodule alternativ zur konventionellen Rundleiterverdrahtung gefertigt werden können. Anschließend werden exemplarisch Konzepte für die Verkabelung des Pkw-Türmoduls mittels flexibler Flachleiter entwickelt, die dem bereits beschriebenen technologischen Wandel in der Bordnetzfertigung gerecht werden.

#### **3.1 Alternative Verbindungstechnologien für makromechatronische Module**

##### **3.1.1 Begriffsdefinition makromechatronische Module**

Die Mechatronik ist gekennzeichnet durch eine Integration von Technologien aus den wissenschaftlichen Bereichen Mechanik, Elektrotechnik und Informatik bei der Entwicklung eines Produktes. Die technische Umsetzung dieser interdisziplinären Integration kann funktional, d. h. durch Realisierung der Produktfunktionen mittels technologieübergreifender Wirkprinzipien und/oder in einer Baueinheit (räumliche Integration) erfolgen. [157]

Während der Begriff „Mechatronik“ zunächst vor allem im Bereich Maschinenbau Anwendung fand, wurde im Bereich Elektrotechnik im selben Zusammenhang von „Elektromechanik“ gesprochen. Inzwischen hat sich die Mechatronik als eigenständige wissenschaftliche Disziplin etabliert. Das Aufgabengebiet der Mechatronik betrifft heute technische Systeme, deren Dimensionen mehr als 10 Größenordnungen umfassen. [19] Als Makromechatronik mit cm/m-Dimensionen wird auch die Technik der Geräte, Apparate, Maschinen und technischen Anlagen bezeichnet. [96]

Die im DIN-Normenwerk integrierten DIN IEC-Normen (IEC = International Electrotechnical Commission), lassen sich auf alle elektronischen, elektrotechnischen und elektromechanischen Systeme anwenden und gelten folglich auch für makromechatronische Systeme.

Als makromechatronische Module werden im Folgenden abgeschlossene Funktionseinheiten bezeichnet, die in ihrer Ausprägung sowohl funktionale als auch räumliche Integrationsmerkmale aufweisen und deren laterale oder vertikale Ausdehnung mindestens in einer Dimension 100 mm überschreiten. [90]

### 3.1.2 Entwicklung hybrider Bordnetzstrukturen

Das Pkw-Bordnetz wird in Zukunft, mehr noch als heute, eine hybride Struktur aufweisen, in der unterschiedliche, auf die jeweiligen Umgebungsbedingungen angepasste Verbindungstechniken Anwendung finden. [68] Für die Verkabelung von Pkw-Bordnetzmodulen stehen den Herstellern heutzutage eine Reihe verschiedener neuer Verbindungstechnologien zur Verfügung. Neben Flex-Wiring-Verkabelungen sind dies vor allem Prozesse aus dem Bereich der MID-Technologie sowie thermische Spritzverfahren, Bild 3.1.

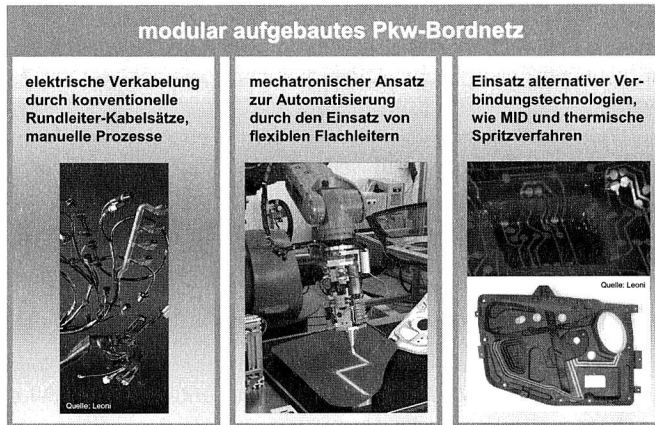


Bild 3.1: Hybride Bordnetzstruktur in modular aufgebauten Automobilen

Auch Lichtwellenleiter auf Basis von Kunststofffasern kommen vor allem zur Vernetzung von Informations- und Kommunikationssystemen sowie Sicherheitsmodulen im Pkw zum Einsatz. Sie bieten eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit für Daten, beispielsweise in Navigationsgeräten, Radios oder dem Schaltzentrum der Lenksäule. Zwar besitzen sie dank ihrer Resistenz gegenüber elektromagnetischen Störungen eine hohe Datenübertragungsqualität, fordern allerdings auch einen erheblichen Aufwand bei der Installation. Da sie unter Biegebeanspruchung leicht brechen oder einknicken, müssen sie in großen Mindestradien verlegt werden. Zudem ist die Verbindungstechnik für Lichtwellenleiter sehr aufwändig und teuer. Aufgrund ihres eingeschränkten Einsatzspektrums und des bislang eher zurückhaltenden und sparsamen Einsatzes zur Übertragung von Daten im Automobil, werden Lichtwellenleiter im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet. [10]

### 3.1.3 Flex-Wiring-Verbindungstechniken

Bei den Flex-Wiring-Verbindungstechnologien unterscheidet man im Allgemeinen zwischen flexiblen Flachleitern (FFC = Flexible Flat Cables) und folienbasierten Schaltungsträgern (FPC = Flexible Printed Circuits), wobei letztere sowohl ein reiner Kabelersatz in Form von gedruckten folienbasierten Verbindungen für dauernde Biege-



beanspruchung, z. B. in Tintenstrahldruckern, als auch eine flexible Alternative für starre Leiterplatten (PCB = Printed Circuit Board), z. B. auf Basis von Polyimid- oder Polyester-Folien, sein können. Die teureren Flex-Schaltungen sind sehr platzsparend und können durch Faltungen in engsten Bauräumen, z. B. in Mobiltelefonen und Videokameras, eingesetzt werden. Flexible Printed Circuits können aufgrund der genau kalkulierbaren Lage und Geometrie der Einzeladern leichter EMV-Berechnungen unterzogen werden, was in der Kommunikationstechnik von besonderer Bedeutung ist. [148] FPCs lassen sich mit einem hohen Automatisierungsgrad fertigen, konfektionieren und kontaktieren. Sie können in Nutzen mit einer Ausdehnung von bis zu 600 x 1.500 mm hergestellt und mit aktiven und passiven Bauelementen bestückt werden. Dabei besitzen sie aufgrund der biegeschlaffen Substrate eine sehr hohe Funktionsdichte und gegenüber Rundleitern das höchste Gewichtssenkungspotenzial aller elektrischen Verbindungstechniken. [13, 76, 137] Die Produktion von FPCs erfolgt, ähnlich den Prozessen zur Herstellung starrer Leiterplatten, durch Druck- und Ätzvorgänge aus einem vollflächigen Kupferlaminat. Die dabei erzeugten Leiterstrukturen, deren Schichtdicke in der Regel zwischen 35 µm und 70 µm liegt, werden abschließend mit einer Deckfolie versehen. Flexible Printed Circuits werden aufgrund der beschränkten Leiterschichtdicken von wenigen µm hauptsächlich zur Signalübertragung eingesetzt. Für Flachleiteranwendungen zur elektrischen Leistungsübertragung werden hingegen FFCs verwendet, deren Schichtdicke typischer Weise deutlich über 100 µm liegt und die in Kapitel 3.2 näher betrachtet werden. [13]

### 3.1.4 Einsatz von Verfahren der MID-Technologie

Als Molded Interconnect Devices (MIDs) werden allgemein spritzgegossene, thermoplastische Substrate bezeichnet, die mit Hilfe eines eingearbeiteten Schaltungslayouts mechanische und elektrische Funktionen in einer Baueinheit integrieren. Anders als konventionelle Leiterplatten sind sie in der Lage, elektrische Ströme entlang komplexer Raumkurven zu übertragen und ermöglichen somit die Herstellung funktionaler Elemente, deren Fertigung mit konventionellen Techniken nicht wirtschaftlich zu realisieren wäre. MIDs besitzen aus diesem Grund ein enormes technologisches Innovationspotenzial. [33, 35, 38, 57]

Die Palette möglicher Einsatzbereiche für MID-Baugruppen ist weit gefächert. Sie reicht von der Automobilelektronik über Telekommunikationsanwendungen und informationstechnische Applikationen bis hin zur Medizintechnik. [30] Durch den Einsatz von MID-Technologie lassen sich völlig neue Funktionen realisieren und die Miniaturisierung von Produkten weiter forcieren. Die Funktionsintegration ermöglicht eine Reduktion mechanischer Komponenten, verkürzt die Prozessketten, vereinfacht die Montage und verbessert somit die Verfügbarkeit. Durch die verringerte Zahl von Einzelteilen und der somit einfacheren Automatisierbarkeit des Montageprozesses, in Verbindung mit der effektiven Miniaturisierung der Komponenten, können durch den Einsatz der MID-Technologie erhebliche Kostensenkungspotenziale ausgeschöpft werden. Aus diesem Grund zeigt die Automobilindustrie einschließlich ihrer Zulieferer großes Interesse an der Weiterentwicklung der MID-Technologie. [71, 90]

Typische Vorteile und Kennzeichen von MID-Applikationen gegenüber durch konventionelle Fertigungstechnologien hergestellten Produkten sind:

- Reduzierte Anzahl der Bauteilkomponenten
- Kürzere Montagezeiten
- Höhere Zuverlässigkeit
- Geringeres Gewicht
- Integrierter Abstrahlungsschutz möglich
- Weitere Miniaturisierung möglich
- Erzeugung komplexer, 3-dimensionaler mechatronischer Funktionskomponenten
- Kompatibilität zu modernen Herstellungsmethoden
- Einsatz auch in rauer Umgebung möglich
- Recyclingfähigkeit. [57]

Zudem kann der Hersteller von MID-Produkten inzwischen auf eine Reihe verschiedener MID-Herstellungsverfahren zurückgreifen und damit die produktoptimale Verfahrensauswahl treffen. Im Folgenden werden die wichtigsten MID-Herstellungsverfahren kurz vorgestellt und deren möglicher Einsatz zur Herstellung makromechatronischer Module diskutiert.

#### Folienhinterspritzen

Durch den Einsatz von thermoplastischem Kunststoff als Trägermaterial, ist auch ein Hinterspritzen von Flexible Printed Circuits möglich. Bei dem als *Insert Molding* bezeichneten Verfahren, muss darauf geachtet werden, dass die vorstrukturierte Leiterbildfolie, sofern sie im Werkzeug nicht in einer Ebene liegt, vor dem Einlegen durch Warmumformen der Kontur der Werkzeugkavität angepasst wird, Bild 3.2.

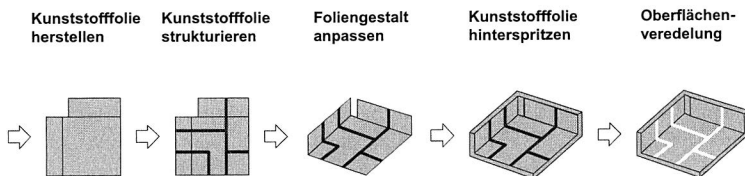


Bild 3.2: Prozessschritte bei der MID-Herstellung durch Folienhinterspritzen

Nach dem Spritzgussvorgang kann die vorstrukturierte Leiterbildfolie des MIDs galvanisiert werden, um die Metallschicht zu verstärken. Abschließend kann ein Oberflächenfinish abgeschieden werden, um die Metalloberfläche gegen chemische oder physikalische Störeinflüsse zu immunisieren. Die Verbindung zwischen Folie und hinterspritztem Kunststoff wird über einen Haftvermittler realisiert, der während des Hinterspritzens durch die Temperatur der Kunststoffschmelze aktiviert wird. Besteht die Leiterbildfolie

aus dem zum Hinterspritzen verwendeten Kunststoffmaterial oder aus einem zu diesem verträglichen Material, ergibt sich die Verbindung durch ein leichtes Anschmelzen und Verschweißen der Folie mit dem Kunststoff. [90] Die in der Regel großtechnisch hergestellten Leiterbildfolien erweisen sich mechanischen und thermischen Belastungen, wie z. B. Kratzern oder hohen Temperaturschwankungen, gegenüber sehr störanfällig. Für den Einsatz von *Insert Molding* zur Herstellung makromechatronischer Module sind zudem noch verfahrenstechnische Hindernisse, wie beispielsweise das Aufschmelzen der Folie beim Schmelzeintrag sowie das Abreißen von Leiterzügen durch Dehnbeanspruchung der Folie, zu beseitigen.

## Heißprägen

Beim Heißprägen handelt es sich um ein volladditives Herstellungsverfahren, das mit wenigen Arbeitsschritten auskommt. Der Kunststoffträger, der die geometrische Endform der MID-Applikation bereits besitzt, wird in eine Prägepresse eingelegt. Eine, an der Kontaktfläche zum Substrat mit Klebstoff oder Schwarzoxid beschichtete, Metallfolie wird darüber gelegt und die Leiterbildstruktur mit einem Prägewerkzeug gleichzeitig ausgestanzt und unter Verwendung von Druck und Wärme mit dem Kunststoffträger verpresst, Bild 3.3. Durchkontaktierungen können beim Heißprägen durch Einprägen der Folien in vorgeformte Bohrungen im Substrat realisiert werden. Diese Bohrungen können anschließend entweder durch Einspritzen von Leitpaste oder mit Hilfe eingepresster Pins gefüllt werden. Heißprägen ist ein sehr schnelles, sauberes und kostengünstiges Verfahren zum strukturierten Metallisieren. Das Heißprägeverfahren kommt ganz ohne nasschemische Metallisierung aus und kann bei einer Vielzahl von Kunststoffen angewendet werden, bietet jedoch aufgrund der eingeschränkten Prägegeometrie nur eine begrenzte Dreidimensionalität. [55]

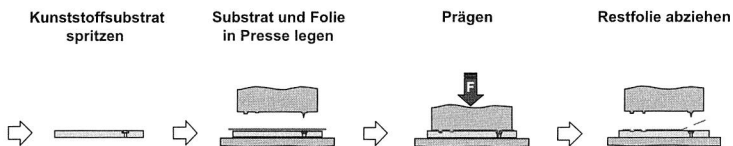


Bild 3.3: Herstellungsschritte beim Heißprägen (nach [55])

Für die Herstellung makromechatronischer Module ist das Verfahren nur bedingt geeignet, da eine gleichmäßige Verteilung des Prägedrucks bei großen Bauteilen derzeit noch eine große verfahrenstechnische Herausforderung darstellt. Durch den Einsatz kontinuierlicher linearer Prägeprozesse könnte dieses Problem umgangen werden.

## Zwei-Komponenten-Spritzguss

Beim Zweikomponenten-Spritzgussverfahren wird jeweils eine metallisierbare und eine nicht metallisierbare Kunststoffkomponente zu einem Bauteil auf die Weise verspritzt, dass die, durch die Geometrie der Spritzgusskavität strukturierten, zu metallisierenden Bereiche an der Oberfläche des 2K-Spritzlings liegen. Beim 2K-Spritzguss wird im All-

gemeinen zwischen zwei Verfahrensvarianten unterschieden, dem SKW-Verfahren (SKW = Sankyo Kasei Wiring Board) und dem PCK-Verfahren (PCK = Printed Circuit Board Kollmorgen), Bild 3.4.

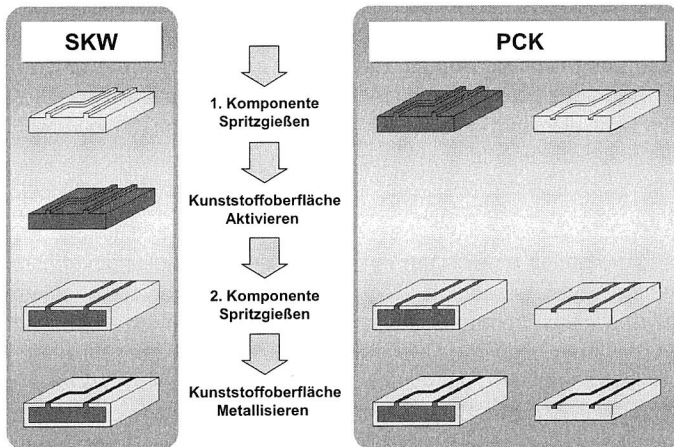


Bild 3.4: Verfahrensketten beim Zweikomponenten-Spritzguss

Beim SKW-Verfahren wird zunächst ein Vorspritzling aus nicht metallisierbarem thermoplastischem Kunststoffmaterial gespritzt. Er wird anschließend katalytisch vorbehandelt, um eine Anlagerung von Metall-Ionen an den Kunststoff in einem späteren Metallisierungsverfahren zu gewährleisten. Der vorbehandelte Vorspritzling wird in ein weiteres Spritzgusswerkzeug eingelegt und mit der zweiten, nicht metallisierbaren Kunststoffkomponente so umspritzt, dass die nicht zu überspritzenden Bereiche des Vorspritzlings, die später die Metallschicht tragen sollen, hierbei an der Werkzeugwand anliegen. Das katalytisch vorbehandelte Kunststoffmaterial ist nur an der Oberfläche metallisierbar. Der Vorbehandlungsschritt ermöglicht, dass für die erste und zweite Komponente das gleiche Kunststoffmaterial eingesetzt werden kann, was sich auf die Rezyklierbarkeit des MIDs positiv auswirkt. Durch die in dieser Verfahrensvariante notwendige Entnahme des Vorspritzlings, verlängert sich jedoch die Prozesskette. Das PCK-Verfahren verläuft im Gegensatz zum SKW-Verfahren ohne Zwischenentnahme. Die Vorbehandlung des Vorspritzlings wird dabei umgangen, indem als metallisierbare Kunststoffkomponente ein kernkatalytisches Material verwendet wird. Dadurch ist es auch möglich, einen metallisierbaren Vorspritzling mit einer nicht metallisierbaren Komponente zu umspritzen bzw. die metallisierbare Kunststoffkomponente in den nicht metallisierbaren Vorspritzling einzubetten. [90]

Das Zweikomponentenspritzgießen bietet die größte geometrische Gestaltungsfreiheit aller MID-Herstellverfahren und ist auch für die Herstellung von Makro-MID-Baugruppen geeignet. Allerdings erfordern 2K-Spritzgusswerkzeuge von einer Größe, mit der z. B. Pkw-Türmodule gespritzt werden können, erhebliche Investitionskosten. [34]

## Laserdirektstrukturierung

Bei der additiven Laserdirektstrukturierung nach dem LPKF-LDS-Verfahren erfolgt die Strukturierung mittels Laserstrahl durch Freilegen und Aktivieren spezieller Wirksubstanzen (Additive) im Kunststoffcompound. Diese Wirksubstanzen enthalten chemisch inaktive Metallkeime, die nur durch Laserstrahlung aktivierbar sind. Mittels strukturschreibenden Laserstrahls erfolgt ein geringfügiger Abtrag der Kunststoffmatrix bei gleichzeitiger Freisetzung von Metallkeimen. Der Aktivierung der Oberfläche folgen die chemische Metallisierung mit ggf. galvanischer Nachverstärkung sowie eine Oberflächenveredelung, das so genannte *Finish*. [55]

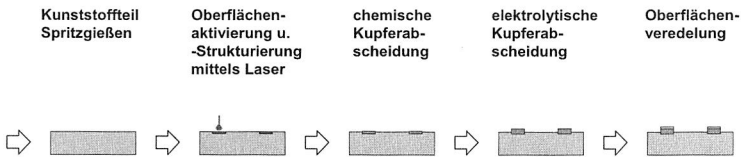


Bild 3.5: Prozessschritte bei der Laserdirektstrukturierung (nach [55])

Die Flexibilität hinsichtlich Layoutänderung ist im Gegensatz zum 2K-Spritzgießen sehr hoch und kostengünstig zu realisieren, da nur das Laserstrahl-Verfahrenprogramm umgeschrieben werden muss. Investitionskosten fallen für das 1K-Spritzgießwerkzeug und für die Laserstrahlbearbeitungsanlage an. Für den Einsatz des LDS-Verfahrens zur Signalübertragung in makromechatronischen Modulen sind, abgesehen vom größeren erforderlichen Arbeitsraum, keine speziellen Prozessanpassungen notwendig.

## Primerverfahren

Die Primertechnologie umfasst verschiedene Prozessketten, deren Gemeinsamkeit darin besteht, dass die jeweiligen Substrate mit einem Haftvermittler, dem so genannten *Primer*, strukturiert bedruckt werden. Bezogen auf die MID-Technik werden damit lackähnliche Materialien klassifiziert, die nach ihrem Aufdruck auf Kunststoffsubstrate als haftvermittelnde Schicht zwischen dem Basissubstrat und der Metallisierung wirken. Die Primertechnologie hält eine breite Palette technologischer Möglichkeiten zur Strukturierung von Schaltungsträgern bereit, Bild 3.6. Einerseits können Folien im konventionellen Siebdruckverfahren mit dem Primer bedruckt, dreidimensional verformt und anschließend durch spritzgusstechnische Hinterfütterung formstabilisiert werden. Andererseits kann im Tampondruckverfahren ein Schaltungslayout mit Primer direkt auf Kunststoff-Spritzgussteile aufgetragen werden. Dabei sind der Dreidimensionalität der zu bedruckenden Oberflächen durch die Geometrie des Tampons Grenzen gesetzt. [90]

Nach der Strukturierung und thermischen Konditionierung werden die Bauteile chemisch metallisiert und ggf. galvanisch nachverstärkt. Auch hier kann abschließend eine Oberflächenveredelung durch Zinn-, Ni/Au-Schichten oder auch organische Schutzbeschichtungen erfolgen. Vor allem das Tampondruckverfahren ließe sich auch für die

Herstellung von Makro-MID zur Signalübertragung nutzen, sofern die bereits beim Heißprägen thematisierte, gleichmäßige Verteilung des Prägedrucks bei großen Bauteilen verfahrenstechnisch beherrschbar wäre.

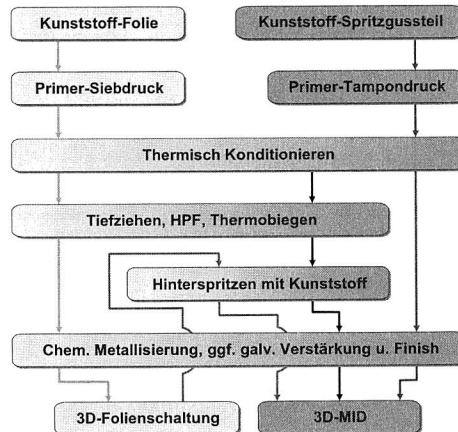


Bild 3.6: Prozessketten innerhalb der Primertechnologie (nach [90])

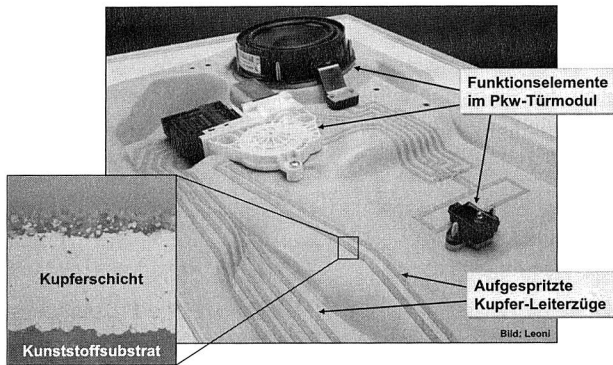
Die großtechnische Herstellung von Makro-MID mit Hilfe chemischer und galvanischer Verfahren ist schon aus Umweltgesichtspunkten nur mit additiven Metallisierungsprozessen realisierbar. Aufgrund der langen Prozessdauer werden MIDs primär zur Signalübertragung eingesetzt, da hierfür bereits Metallisierungsdicken von wenigen  $\mu\text{m}$  genügen. Zur Übertragung höherer elektrischer Ströme, wie sie beispielsweise im Pkw-Türmodul auftreten, werden deutlich größere Querschnitte benötigt, die bei MIDs bislang nur sehr unwirtschaftlich realisiert werden können.

### 3.1.5 Einsatz thermischer Spritzverfahren

Mit neuen Verfahren zur Herstellung elektrischer Verbindungen, wie zum Beispiel den thermischen Spritzverfahren FLAMECON® und Plasma Printing, kann die Leistungslücke zwischen oberflächen- und kabelbasierten elektrischen Verbindungstechniken geschlossen werden. Die Verfahrensvarianten und die Begriffsdefinition für thermische Spritzverfahren sind in der Norm DIN EN 657 festgehalten: „Das thermische Spritzen umfasst Verfahren, bei denen Spritzzusätze innerhalb und außerhalb von Spritzgeräten an-, auf- oder abgeschmolzen und auf vorbereitete Oberflächen aufgeschleudert werden. Die Oberflächen werden dabei nicht geschmolzen.“

Beim FLAMECON®-Verfahren wird der Zusatzwerkstoff in Drahtform oder als Pulver dem Düsensystem der Spritzpistole zugeführt, dabei mit Hilfe eines Brenngas/Sauerstoff-Gemischs geschmolzen und mit hoher Geschwindigkeit auf die Werkstückoberfläche geschleudert. Um eine fest haftende und leitfähige Schicht zu erzeugen, müssen die wichtigsten Einflussgrößen, wie zum Beispiel die Materialeigenschaften des Spritz-

mittels, der Wärmegehalt sowie die Geschwindigkeit des aufschlagenden Tropfens, in Abhängigkeit von der Partikelgröße optimiert werden. Entscheidend für die Anhaftung der Partikel an der Werkstückoberfläche ist eine dem Prozess vorangehende Strukturierung bzw. Vorbehandlung des Substrats, da sich eine definierte Rauheit positiv auf die mechanische Verklammerung der Metallpartikel in der Oberfläche auswirkt. Die Vorconditionierung kann mit Hilfe einer Laserstrahlbehandlung oder durch Aufrauen mittels alternativer Strahltechnologien erfolgen. [126]



*Bild 3.7: Prototypischer Einsatz des FLAMECON®-Verfahrens zur elektrischen Verbindung von Funktionselementen im Pkw-Türmodul (nach [126])*

Das FLAMECON®-Verfahren ermöglicht das Auftragen von Metallschichten mit einer Dicke von über 100 µm in einem Durchgang. Durch Wiederholung des Ablaufs lassen sich in kürzester Zeit Schichtdicken von mehr als 1000 µm aufbauen. Der in Bild 3.7 dargestellte Demonstrator zeigt die Anwendung des FLAMECON®-Verfahrens zum Aufbau einer elektrischen Verbindungsstruktur im Pkw-Türmodul. Erste Versuche haben ergeben, dass die, zum Beispiel bei der Betätigung des Fensterhebers auftretenden, hohen Anfangsströme von 30 bis 40 A durch die aufgespritzte Kupferschicht übertragen werden können. [21]

Im Gegensatz zum FLAMECON®-Verfahren wird beim Plasma-Printing-Verfahren als Zusatzwerkstoff sehr feines Metallpulver eingesetzt, das durch ein im Düsensystem der Spritzpistole gezündetes, thermisches Plasma geschmolzen und anschließend in einem engen, gerichteten Stahl mit hoher Geschwindigkeit auf die Werkstückoberfläche geblasen wird. Dabei ist eine Vorstrukturierung der Oberfläche nicht mehr erforderlich. Ziel eines BMBF-Forschungsvorhabens zum Plasma-Printing-Verfahren ist die Nutzung atmosphärischer Plasma-Quellen in Verbindung mit Nano-Technologie zur Erzeugung eines elektrischen Leiterbildes mit Strukturgrößen deutlich unter 1 mm. Wie die beiden beschriebenen Verfahren zeigen, kann das thermische Spritzen zur Herstellung von elektrischen Verbindungsstrukturen, die der Leistungsübertragung dienen, eine Lösung darstellen. Durch eine geeignete Kombination von MID- und thermischen Spritzverfahren ist es zudem möglich, ein Schaltungslayout zur Signalübertragung und einzelne

Leitungszüge zur Leistungsübertragung auf einem makromechatronischen Modul zu applizieren. Die Verfahren des thermischen Spritzens befinden sich derzeit allerdings noch im Entwicklungs- und Versuchsstadium. [147]

## 3.2 Flexible Flachleiter für makromechatronische Module

### 3.2.1 Klassifizierung flexibler Flachleiter

Flachleiter lassen sich grundsätzlich in Flexible Flat Cables (FFC) und Flexible Printed Circuits (FPC) einteilen. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 erläutert, handelt es sich bei FPCs um frei strukturierbare, kupferkaschierte Rollenware mit integriertem Leiterbild. Sie werden hauptsächlich zur Signalübertragung auf kurzen Strecken verwendet und eignen sich aus Kostengründen im Allgemeinen nicht für den Einsatz in makromechatronischen Modulen, die sich durch großflächige Schaltungslayouts auszeichnen.

	FFCI (laminiert)	FFCe (extrudiert)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Leitungsdicke</li> <li>• Hohe Flexibilität</li> <li>• Hohe Biegegewichsefestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bekannte Isolationswerkstoffe</li> <li>• Hohe Prozessgeschwindigkeit</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langsamer Produktionsprozess</li> <li>• Hydrolyseempfindlichkeit (Klebstoff)</li> <li>• Relativ hoher Preis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativ dicke Flachleitung</li> <li>• Werkzeugauslegung abhängig vom Isolationswerkstoff</li> </ul>

Tabelle 3.1: Vergleich der Vor- und Nachteile von FFCI und FFCe [75, 120]

Flexible Flat Cables werden in Ihren unterschiedlichen Ausprägungen bereits in einzelnen Pkw-Modulen serienmäßig eingesetzt. Sie besitzen aufgrund größerer Leitungsquerschnitte höhere Stromtragfähigkeiten und sind als Meterware besonders zur Überwindung großer Strecken mit 1:1-Verbindungen geeignet (siehe Tabelle 2.1). [10] Diese bestehen jeweils aus mehreren, parallel neben einander liegenden Leiterbahnen mit rechteckigem Querschnitt, die voneinander durch einsatzspezifische Polymer-Werkstoffe isoliert sind und können sowohl zur Leistungs- als auch zur Signalübertragung genutzt werden. FFCs lassen sich nach ihrem Herstellungsprozess in laminierte (FFCI) und extrudierte (FFCe) Flachleiter unterscheiden. In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der beiden Flachleitervarianten gegenübergestellt.

### 3.2.2 Herstellung von flexiblen Flachleiterkabeln

Für die FFC-Herstellung werden hauptsächlich drei Verfahren eingesetzt:

- das Laminierverfahren,
- die Extrusion im Querspritzkopf und
- die Extrusion mittels Ein-Walzen-Verfahren.



### Herstellung von Flexible Flat Cable laminated (FFCI)

Als FFCI werden im Allgemeinen Leiterbahnen aus geschnittener Kupferfolie oder flach gewalzten Runddrähten bezeichnet, die unter Druck und Temperatur zwischen zwei mit Klebstoff beschichteten Kunststoff-Folien (meist PET oder PEN) einlamiert werden, Bild 3.8. [12, 75]

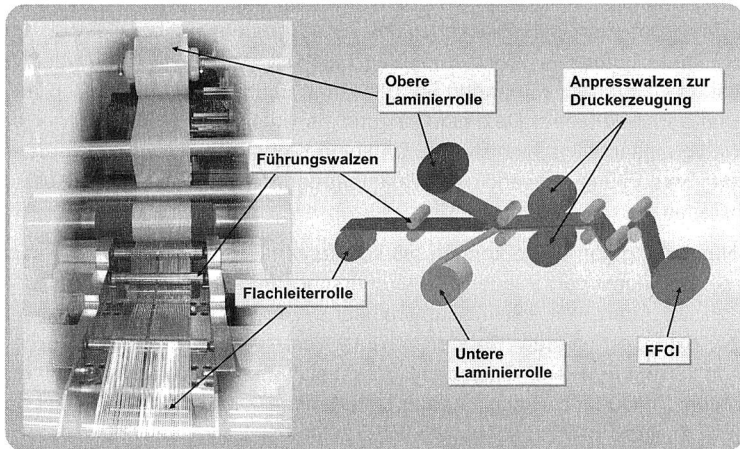


Bild 3.8: Schematische Darstellung des FFC-Laminierprozesses (nach [123])

Als vorteilhaft erweist sich bei der FFCI-Herstellung die geringe Leiterdicke, die hohe Flexibilität im Prozessablauf sowie in der Kombination der Einzelleiter und die hohe Biegegewichsefestigkeit der laminierten Leiter. Der Isolationswerkstoff des Kabels kann hierbei beanspruchungsgerecht ausgewählt werden. Der hohe, erreichbare Durchsatz bei gleichzeitig moderaten Investitionskosten begünstigt die Wirtschaftlichkeit dieses Herstellungsverfahrens. Problemfelder ergeben sich bei dieser Herstellungsmethode vor allem durch den notwendigen Klebstoffeinsatz. Die Basiswerkstoffe der angebotenen Klebstoffsysteme sind z. B. Polyester-, Acryl- und Fluorpolymere. Sie bedingen einen präzise gesteuerten und aufwändigen Produktionsprozess, der beispielsweise durch einen zusätzlich erforderlichen Aushärtungsschritt gekennzeichnet ist. Zudem muss die Hydrolyseempfindlichkeit des Klebstoffes bei der Wahl des späteren Einsatzorts des FFCIs berücksichtigt werden. Auch durch die eingeschränkte Werkstoffauswahl und die Gefahr der Delamination der FFCIs unter Beaufschlagung von Vibration können weitere Probleme entstehen. Für den Einsatz im Automobil müssen deshalb zunächst aufwändige Spezifikationstests und Dauerversuche unter dynamischer Last in wechselnden Klimaten sicher bestanden werden. [123]

### Herstellung von Flexible Flat Cable extruded (FFCe)

Die Herstellung von FFCe kann dagegen ohne Zusatz von Klebstoffen auskommen. Die Kupferdrähte werden zunächst flach gewalzt und über eine Leiterführung durch einen

Extrusionskopf geführt, in dem sie mit dem geschmolzenen Isolationsmaterial umspritzt werden. Hierbei wird der Leiter unter einer möglichst präzise kalibrierten Zugspannung im Extrusionswerkzeug gehalten und über das Abstreifen der Polymerschmelze am Extruder-Mundstück mit Kunststoff umhüllt. Nachfolgende wassergefüllte Kühlwannen oder Gebläse lassen die Schmelze im gewünschten Zustand erstarren.

Bei der FFC-Extrusion können die Hersteller auf eine breite Palette von der Automobilindustrie freigegebener Isolationswerkstoffe zurückgreifen, da bereits viel Know-how über das Eigenschaftsprofil von extrudierten Flachleiterkabeln sowohl in der Verarbeitung als auch im Einsatz vorhanden ist. Ein guter Haftsitz zwischen Leiter und Isolationsmaterial verhindert eine Delamination und es entsteht eine homogene Isolierung ohne schädigungsanfällige Nahtstellen. Da keine Klebstoffe verwendet werden, entfällt bei der zur Entsorgung notwendigen Werkstofftrennung die aufwändige Ablösung von Restklebstoffen.

Bei der Herstellung von FFCe können mit konstanten Rasterabständen unterschiedlich dicke Leiter und somit verschiedene Leiterquerschnitte verarbeitet werden. Derzeit können bis zu 32 Adern mit einem Rasterabstand von 2,54 mm gleichzeitig zu einem Flachkabel extrudiert werden. Bei der maximal verarbeiteten Breite der Kupferbahnen von derzeit 19 mm ( $\approx 4 \text{ mm}^2$  Querschnitt), lässt sich eine Stromtragfähigkeit von bis zu 50 A erzielen. [3] Durch die relativ hohen Leiterbreiten ist bei einem Wechsel des Isolationswerkstoffs eine neue, angepasste Werkzeugauslegung notwendig. Bei größeren Breitenunterschieden werden mehrere Spritzköpfe benötigt. Die damit verbundenen höheren Investitionskosten und die langen Rüstzeiten bei Produktwechseln können nur durch entsprechend große Auftragsvolumina amortisiert werden. [123]

Eine Alternative zur konventionellen FFCe-Herstellung stellt das Ein-Walzen-Kalander-Verfahren (EWK) dar, das bei der Fa. Troester entwickelt wurde. Dabei wird eine Kunststoffolie mit einem vorgewärmten, durch ein Kammsystem geführten, Leitungsatz über eine Walze geführt, Bild 3.9. Über die Erwärmung der Folie werden die Einzelleiter durch partielles Eintauchen in diese seitlich fixiert. Gleichzeitig wird durch einen Walzenbreitspritzkopf eine Kunststoffschmelzeschicht auf den Leitersatz aufgetragen. Der Werkstoffverbund wird mit Hilfe eines nachgeschalteten Glättwerks abgekühlt. [121]

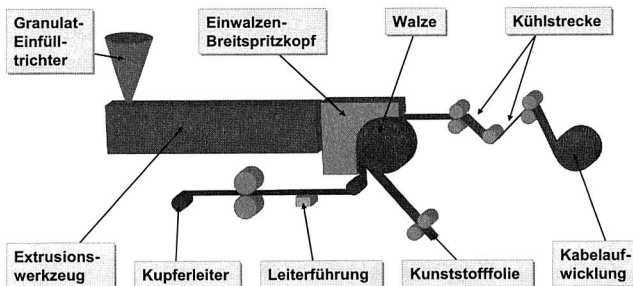


Bild 3.9: Schematische Darstellung des FFC-Extrusionsprozesses mittels Ein-Walzen-Kalander-Verfahren (nach[120])

Mit diesem Verfahren ist es möglich, verschiedene Leitungssatzbreiten unabhängig von der Anzahl und Breite der Einzelleiter herzustellen. Durch die einfache Fixierung der Leiter auf der Unterfolie kann die Produktionsgeschwindigkeit um einen Faktor >4 erhöht werden, wodurch die Herstellungskosten für FFCe reduziert und die Möglichkeiten für einen wirtschaftlichen Einsatz der Kabel im Pkw verbessert werden können. [123]

	FFCI (laminiert)	FFCe (extrudiert)
Materialauswahl	gering	groß
homogene Isolation	nein	ja
Verarbeitungs-Geschwindigkeit	5 – 12 m/min	> 20 m/min
Nachbehandlung	Aushärtung (10 h bei 120 °C)	keine
Haftsitz	sehr hoch	gering – hoch
typische Kupferdicke	35 – 200 µm	100 – 200 µm
typische Isolations-Wandstärke	25 – 50 µm (Folienstärke) 20 – 50 µm (Klebstoffdicke)	ca. 200 µm (abh. vom Isolationswerkstoff)

*Tabelle 3.2: Gegenüberstellung laminierter und extrudierter Flachleiterkabel hinsichtlich ihrer Verarbeitungseigenschaften (nach [131])*

In Tabelle 3.2 sind die wichtigsten Charakteristika der beiden Herstellungsverfahren für Flachleiterkabel gegenübergestellt. Insgesamt ist festzustellen, dass sich die extrudierten Kabel aufgrund des größeren Einsatzspektrums und der deutlich höheren Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen für den Einsatz im Pkw besser eignen. [74, 120]

### 3.2.3 Typische Werkstoffe für Flachkabel

Kupfer bildet mit über 90 % den Hauptanteil aller gängigen Leiterwerkstoffe. Es zeichnet sich durch eine hervorragende Leitfähigkeit ( $35 - 58 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ ), eine gute Verarbeitbarkeit (Schmelzpunkt:  $1084,4 \text{ °C}$ ; E-Modul:  $1,23 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ ) und somit hohe Wirtschaftlichkeit aus. [110] Bei der Wahl des Isolationsmaterials von Flachleiterkabeln kann man auf ein breites Spektrum von Basiswerkstoffen bis hin zu Spezialpolymerschichten zurückgreifen, um die entsprechenden Leitercharakteristika zu erzeugen. Um als Isolationswerkstoff in der Automobilindustrie Anwendung finden zu können, beispielsweise bei der Verkabelung des Türmoduls, muss der Kunststoff zahlreiche Anforderungen erfüllen, die in Kapitel 3.3 genauer beschrieben werden. [77] Während die in Tabelle 3.3 genannten Isolationswerkstoffe in erster Linie zur Herstellung von extrudierten FFCs eingesetzt werden, verwendet man bei laminierten Flachleiterkabeln fast ausschließlich PET, PEN und PI.

Die Kosten für Flachleiterkabel werden auf absehbare Zeit weiterhin höher sein als für Rundleiterkabel, da sowohl die Herstellung der Flachleiter selbst, als auch die geringeren Geschwindigkeiten beim Extrusionsprozess kostenintensiver ausfallen. [47, 131]

Material	PVC	TPE-U	TPE-E	PP-FR	ETFE	PVDF
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,32	1,27	1,23	1,20	1,73	1,79
Temperaturbereich [°C]	-40 bis +110	-40 bis +110	-40 bis +110	-40 bis +125	-65 bis +180	-50 bis +150
flammswidrig	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Hydrolysebeständig	ja	ja	bedingt	ja	ja	ja
halogenfrei	nein	ja/nein	ja	ja/nein	nein	nein
Härte (Shore)	97A	54D	72D	70D	70D	85D
Verarbeitbarkeit	++	o	o	+	+	+
Wandstärke [µm]	175	175	70	175	100	100
Preis [€/kg]	1,10	3,84	4,08	1,55	14,18	13,28

Tabelle 3.3: Eigenschaften typischer Isolationsmaterialien für Flachleiterkabel [5, 113, 117, 131]

Um die Herstellungskosten so niedrig wie möglich zu halten, muss in jedem Anwendungsfall neu entschieden und geprüft werden, welcher Kunststoff am ehesten den geforderten Leistungs- und Kostenmerkmalen entspricht.

### 3.2.4 Potenziale beim Einsatz flexibler Flachleiterkabel

Im Rahmen eines Forschungsprojektes ersetzte die Firma Kromberg und Schubert Ende der 90er Jahre nahezu 90 % des Leitungssatzes der Mercedes-Benz A-Klasse durch Flachleiterkabel. Für die übrigen 10 % der Verkabelung wurden aus sicherheitsrelevanten Gründen die Rundleiterkabel beibehalten, um die Straßenzulassung für dieses Fahrzeug zu erhalten. Da inzwischen beim Einsatz von Flachleiterkabeln in Pkws zahlreiche Erfahrungswerte vorliegen, werden auch deren technologiebedingte Problemfelder immer deutlicher. Neben der Notwendigkeit der Entwicklung völlig neuer Kontaktierungssysteme, müssen die im Verhältnis zu Rundleiterkabelsätzen hohen Fertigungskosten über Einsparungen an anderer Stelle, die sich beispielsweise durch neue konstruktive Möglichkeiten und Funktionsintegration ergeben, abgefegert werden.

Auch können elektromagnetische Felder zwar vergleichsweise leicht ermittelt werden, doch gestaltet sich deren Abschirmung oder Beseitigung oftmals sehr aufwändig. Bei Rundleiterkabeln kann die Abschirmung entweder coaxial erfolgen oder der Leiter wird durch Verdrillung und somit gegenseitiger Auslöschung induzierter Störströme elektromagnetisch verträglich gestaltet. Eine Verdrillung von Flachleiterkabeln ist bereits durch deren geometrischen Aufbau ineffektiv und eine coaxiale Abschirmung kann nur unter großem Aufwand realisiert werden. Dies kann vor allem bei sicherheitsrelevanten Systemen, deren uneingeschränkte Funktionalität jederzeit gewährleistet sein muss, zu Problemen führen. Als problematisch erweist sich diese Eigenschaft aber auch bei sig-

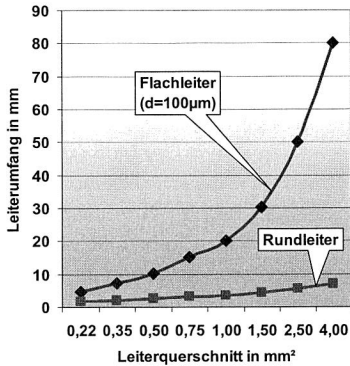
naltragenden Leitungen, wie zum Beispiel Lautsprecherkabeln, da induzierte Ströme das Klangbild verändern können.

Flachleiterkabel besitzen jedoch gegenüber Rundleiterkabeln auch zahlreiche Vorteile. So sind sie beispielsweise in der Lage, bei gleichzeitig hoher dynamischer Biegeweichselfähigkeit große mechanische Spannungen zu ertragen, da die Belastungen auf mehrere Adern verteilt werden. Über die genau definierte Position der einzelnen Adern zueinander können die, durch Interaktion elektrischer Felder entstehenden, elektromagnetischen Störungen leichter ermittelt und anschließend behoben werden. Flachleiterkabel lassen sich weitgehend automatisiert fertigen und erweisen sich in der Montage als polungssicher. Auch die für die automatisierte Montage wichtige maschinelle Abisolierung ist durch präzise Positionsbestimmung der Adern sehr viel leichter zu realisieren. Bei immer strikteren Umweltbestimmungen ist die vollständige Recycelbarkeit von Flachkabeln ein weiterer hervorzuhebender Aspekt. Die wichtigsten Vorteile dieser Kabel ergeben sich jedoch aus ihrer Geometrie. Sie lassen sich erheblich besser ins Fahrzeug integrieren als Rundleiterbündel und finden in flachen Durchbrüchen sowie in Räumen hinter Verkleidungselementen, wie beispielsweise dem Dachhimmel oder dem Türpanel, ausreichend Platz. Dadurch können Verlegewege realisiert werden, die so mit Rundleiterbündeln nicht zu erreichen sind, was eine Reduzierung der Kabelsatzlänge und ein damit verbundenes Einsparpotenzial im Gewicht von bis zu 60 % für einzelne Fahrzeugmodule ermöglicht. Bei einem konsequenten Einsatz von Flachleiterkabeln im Automobil ließen sich 10 bis 20 kg Masse pro Pkw einsparen. [3, 5, 20, 60, 68, 75, 151]

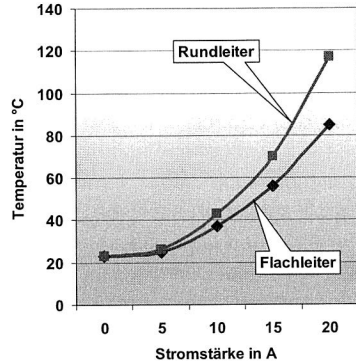
Flachleiter haben einen rechteckigen Querschnitt, der im Vergleich zum Rundleiter einen größeren Leiterumfang besitzt, Bild 3.10. Für die Stromtragfähigkeit des Leiters ist nicht nur der Querschnitt, sondern auch der Umfang von Bedeutung. Je größer dieser ausfällt, desto größer ist auch die Oberfläche des Leiters und damit seine Fähigkeit, durch Strombelastung entstandene Wärme, die den Stromfluss wiederum behindert, abzustrahlen, Bild 3.11. Bei Flachleitern können somit geringere Querschnitte die gleiche Strommenge tragen, wodurch Kupfer eingespart wird und sich das Gewicht der Leiter um ca. 10 % reduzieren lässt. [2]

Einen weiteren vorteilhaften Aspekt des größeren Umfangs von Flachleitern stellt die Stromverdrängung dar. Der Effekt der Stromverdrängung in von Wechselstrom durchflossenen elektrischen Leitern, auch *Skinneffekt* oder *Hauteffekt* genannt, wird durch das magnetische Feld im Leiter hervorgerufen. Bei wechselnder Polarität des Stromflusses im Leiter wird ein Magnetfeld aufgebaut, das nicht nur außen, sondern auch im Inneren des Leiters Wirbelströme induziert, die dem Erzeugerstrom entgegengerichtet sind und diesen in der Mittelachse des Leiters abschwächen. Dies bewirkt, dass im Inneren eines Leiters die Stromdichte niedriger ist als an dessen Oberfläche. [73] Da die Gegenspannung in der Leitungsmitte am größten ist, wird hier der Strom am stärksten verdrängt, was zu einer Verringerung des wirksamen Leiterquerschnitts und zu einer Vergrößerung der Impedanz des Leiters führt. Je höher die Frequenz ist, desto stärker wirkt sich dieser Effekt aus und desto kleiner wird der effektiv zum Stromfluss nutzbare Leitungsquerschnitt. Bei sehr hohen Frequenzen führt nur noch eine dünne Haut an der Ober-

fläche des Leiters den größten Teil des Stromes. Der flache, rechteckige Querschnitt der Flachleiter behindert die Ausbildung dieser Wirbelströme und erleichtert damit den Stromfluss. [73, 133]



**Bild 3.10:** Vergleich des Umfangs von Rundleitern und FFC in Abhängigkeit des Querschnitts (nach [65])



**Bild 3.11:** Gleichgewichtstemperatur von 0,5 mm² Rundleiter und FFC bei verschiedenen Strombelastungen (nach [75])

Obwohl flexible Flachleiterkabel heutzutage aufgrund ihres aufwändigen Herstellungsprozesses höhere Kosten als Rundleiterkabel verursachen, können sich diese durch vollständige Ausschöpfung der Potenziale schnell amortisieren. Sie ermöglichen einen kundenspezifischen Aufbau und bieten Einsparpotenziale bei der Konfektionierung und Montage. Extrudierte Flachleitungen erfüllen bereits heute die hohen Anforderungen der Automobilindustrie an serientaugliche Kabelsätze und wurden in verschiedenen Fahrzeugmodulen zum Einsatz gebracht. [9, 118]

### 3.2.5 Einsatzbeispiele für extrudierte flexible Flachleiterkabel

Hersteller, wie zum Beispiel Daimler, VW, Opel und Renault setzen Flachkabelsätze in aktuellen Fahrzeugmodellen serienmäßig ein. Schätzungen zufolge werden in den nächsten Jahren bis zu 25 % der konventionellen Rundleiterkabelsätze durch Flachkabel ersetzt. Im Folgenden werden hierfür typische Anwendungsfelder vorgestellt. [94]

#### Flachkabeleinsatz im Fahrzeughimmel

Ein besonders verbreitetes Anwendungsfeld für den Einsatz von Flachleiterkabeln ist das Pkw-Dachmodul. Der hier für die Leiter zur Verfügung stehende Hohlraum zwischen Deckenverkleidung und dem Fahrzeugdach selbst ist äußerst schmal, bietet aber Platz für sich lateral ausdehnende Verkabelungen und eignet sich aus diesem Grund optimal für die Verwendung von Flachleiterkabeln. Großzügige Hohlräume, wie sie beim Einsatz von Rundleiterkabeln geometriebedingt erforderlich sind, können auf ein

Minimum reduziert werden. Darüber hinaus erhält der Innenraumdesigner durch eine geringere Deckenstärke bei gleich bleibenden Fahrzeugabmessungen weiteren Gestaltungsfreiraum.

Im Dachmodul eines Pkw sind heute je nach Ausstattungsvariante eine Vielzahl von elektrischen und elektronischen Funktionen untergebracht. Zur Grundausstattung jedes Autos gehören Leseleuchten vorne und hinten, Innenraumbeleuchtung hinten, Schminkspiegelbeleuchtung vorne, eine dritte Bremsleuchte und nicht zuletzt die Dachantenne. Eine Insassenerkennung des Beifahrers, ein Multifunktionsdisplay und eine Diebstahlwarnanlage gehören oft ebenfalls zur Serienausstattung. Je höherwertiger das Fahrzeug ist, desto mehr elektrische und elektronische Systeme müssen mit Signal- und Leistungsströmen versorgt werden. Zusätzliche sicherheits- oder komfort-relevante Applikationen, wie z. B. Freisprechmikrophone, SOS-Pannenhilfen, beleuchtete Warnsymbole, Rückspiegelabblendung, Tageslicht- oder Regensensoren oder GPS- bzw. GSM-Antennen, müssen mit dem Bordnetz verdrahtet werden. [49, 64]

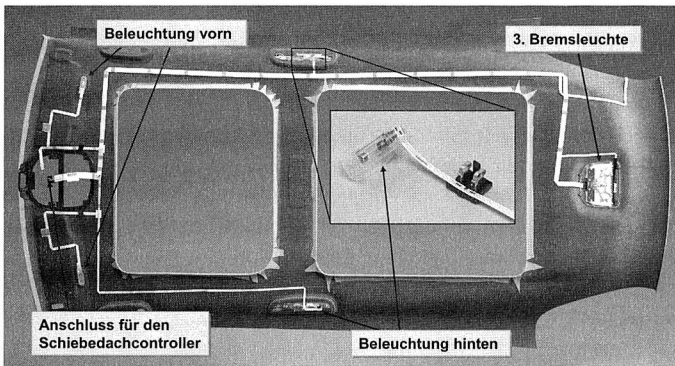


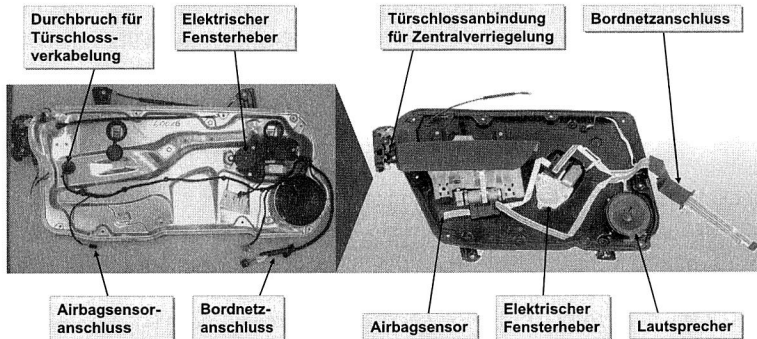
Bild 3.12: Dachhimmel eines Mercedes M-Klasse mit Flachleiterverkabelung [106]

In Bild 3.12 ist ein Dachhimmel eines M-Klasse Mercedes dargestellt, dessen Funktionselemente durch Flachleiter verkabelt sind. Die Herstellung der Flachkabelstruktur erfolgt durch Vorkonfektionierung der Leiter, Gehäusebestückung, Verbindungsschweißen der einzelnen Kontakte und Bandagieren. Im Anschluss an die Endmontage wird ein Funktionstest durchgeführt. [131] Bislang wurden Dachleitungssätze in Fahrzeugmodellen von Opel, VW, DaimlerChrysler, Renault und Nissan serienmäßig verbaut. Dabei wurden mit Flachleiterkabelsätzen in der Dachverkabelung bereits Gewichtseinsparungen von bis zu 15 % realisiert [17, 141]

### Einsatz von Flachleiterkabeln im Türmodul

Auch bei der Verkabelung von Aktuatoren und Sensoren in Pkw-Türmodulen finden Flachleiter bereits Verwendung. In Bild 3.13 ist auf der linken Seite der so genannte Türaggregateträger des VW Golf mit den wichtigsten Funktionskomponenten und konventioneller Rundleiterverdrahtung abgebildet.





**Bild 3.13:** Ersatz der konventionellen Rundleiterverkabelung durch Flachleiterkabel in der Pkw-Seitentür (nach [130])

Auf der rechten Seite ist ein Rapid-Prototyp-Türmodul aus Polyamid abgebildet, bei dem die Kontaktierung von Lautsprecher, Fensterheber, Airbagsensor und Zentralverriegelung durch Flachleiterkabel realisiert wurde. Abhängig vom Fahrzeugmodell können weitere Ausstattungsmerkmale, wie beispielsweise Einstiegsleuchte, Keyless Entry, Spiegel- und Sitzverstellschalter, in den Türkabelsatz integriert sein. Durch den Einsatz von Flachleiterkabeln lassen sich auch hier Rationalisierungspotenziale ausschöpfen, da die Handhabung und Montage im Vergleich zu Rundleiterkabelsätzen besser automatisierbar ist. Dies ist neben der Möglichkeit der Gewichtsreduktion ein weiterer ausschlaggebender Punkt für ihre immer stärkere Marktdurchdringung. Entsprechende Konzepte zum Einsatz extrudierter flexibler Flachleiterkabel im Pkw-Türmodul werden in Kapitel 3.3 vorgestellt.

#### Flachleiterverkabelung im Fahrzeugsitz

Die stetige Verbesserung des Komforts der Insassen hat dazu geführt, dass Fahrzeugsitze neben Sensoren und anderen mechatronischen Komponenten bereits mehr als 20 Elektromotoren besitzen und deswegen ein sehr attraktives Anwendungsgebiet für Volumen und Gewicht sparende Technologien darstellen. Konventionelle Sitzverkabelungen werden auch hier durch Rundleiterkabel realisiert, die mittels Befestigungselementen an der Stützstruktur des Sitzmoduls fixiert werden. Zu diesem Zweck wird die Stützstruktur mit Löchern versehen, was zum einen fertigungstechnisch aufwändig ist und zum anderen ihre Stabilität reduziert. Alternative Konzepte zur elektrischen Strom- und Signalführung in Sitzen müssen in der Lage sein, Gewichtsbelastungen durch die Insassen und dynamischen Belastungen durch häufiges Sitzverstellen ohne negative Beeinflussung des Sitzkomforts stand zu halten. Weitere Zielsetzungen sind eine optimierte Bauraumausnutzung, Gewichts- und Kostenreduktion und eine einfache Fertigung und Montage der Leitungen. [142]

In Bild 3.14 ist eine Möglichkeit der Kabellayoutgestaltung im Pkw-Sitzmodul dargestellt. Die hierbei verwendete Flachleiterverkabelung ist auf einer weißen Filzmatte durch



Klebstoffe oder Klettverbindungen fixiert. Die auf der Matte angeordneten Funktionskomponenten werden nach dem Befestigen der Verkabelung an der Filzmatte elektrisch kontaktiert. Beim Einbau der vormontierten Filzmatte in die Stützstruktur, werden die Motoren für die Sitzverstellung elektrisch angeschlossen. Aufgrund dieses modularen Aufbaus des Pkw-Sitzes, können diese Arbeitsgänge unabhängig von der Montage der Stützstruktur erfolgen. Dies ermöglicht ein sehr schnelles und folglich auch kostengünstiges Montieren des gesamten Sitzes. Im September 2004 sicherte sich die Firma Johnson Controls GmbH aus Burscheid durch Patentanmeldung die Rechte an dieser besonders vorteilhaften Variante der Verkabelung von Fahrzeugsitzen mittels Flachleiterkabel. [142]

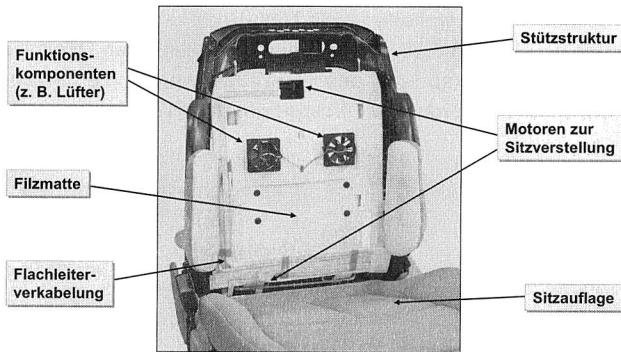


Bild 3.14: Einsatz von flexiblen Flachleiterkabeln zur Sitzmodulverkabelung [106]

Durch die hohe Elastizität und geringe Dicke der Leiter sowie die nun mögliche Nutzung der aus der Verwendung von Flachleiterkabeln resultierenden zusätzlichen Freiräume für weitere Polsterungen, kann der Komfort der Fahrzeuginsassen zusätzlich erhöht werden. Darüber hinaus ist die Realisierung von Schaltungskomponenten als direkter Bestandteil der Verkabelung denkbar. Aus der verringerten Teilezahl resultieren zudem deutliche Kostenvorteile.

### Weitere Automobilanwendungen für Flachleiterkabel

Neben den bereits geschilderten Anwendungsfeldern für flexible Flachleiterkabel, existieren weitere serienmäßige Verkabelungslösungen zum Beispiel für Lenkstockhebel bei VW, Audi, Skoda und SEAT, die in erster Linie auf die Nutzung der hohen Biege-wechselfestigkeit der Flachleiter abzielen. Auch für Wickelfedern zur Anbindung von Lenkrad-Airbags kommen sie bereits serienmäßig zum Einsatz. Darüber hinaus sind Anwendungen zur Verdrahtung von Einparkhilfen, Zigarettenanzündern oder Feuchtigkeitssensoren vorstellbar.

Ein weiteres Einsatzspektrum machen die Infotainment-Applikationen im Cockpitbereich des Automobils aus, da aufgrund der hohen Verkabelungsdichte hier zusätzlich gewonnenes Platzvolumen äußerst wertvoll ist. Durch die auf diese Weise geschaffenen Frei-

räume zur Verbesserung des Designs und der Funktionalitäten in Automobilen, können die höheren Kosten, die Flachleiterkabel in der Fertigung verursachen, relativiert werden. [13, 17, 106, 131]

### 3.3 Konzepte zum Einsatz flexibler Flachleiter im Pkw-Türmodul

#### 3.3.1 Anforderungen an die Verkabelung in der Pkw-Seitentür

Die Verkabelung in der Pkw-Seitentür dient der Versorgung der elektronischen Funktionen mit Signal- und Leistungsströmen. Neben Grundfunktionen, wie zum Beispiel Fensterheber, Rückspiegel, Zentralverriegelung, Beleuchtung, Seitenairbag und Lautsprecher, werden immer mehr erweiterte sowie High-End-Funktionen vom Türsteuergerät im Türmodul mitgesteuert, Bild 3.15. Anstelle der konventionellen Direktverdrahtung der Komponenten mit dem Hauptkabelsatz des Fahrzeugs, werden hierfür zunehmend Bus-Strukturen mit dezentral angeordneten Türsteuergeräten (TSG) eingesetzt. [83]

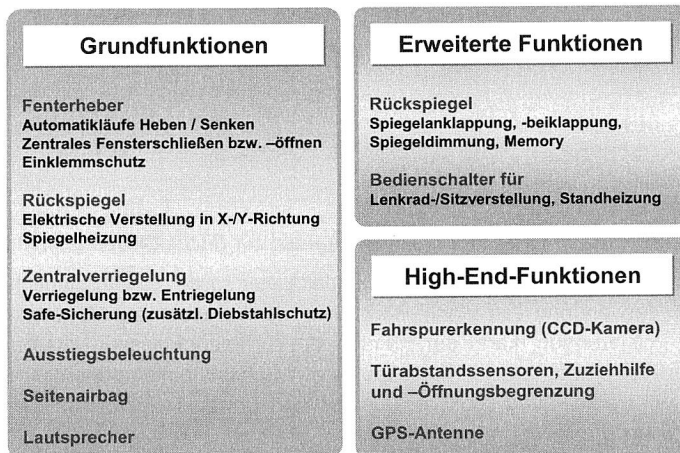


Bild 3.15: Elektrische und elektronische Funktionen in der Pkw-Seitentür (nach [143])

Das Türmodul trennt den außen liegenden *Nassraum* vom zum Fahrzeuginneren hin ausgerichteten *Trockenraum*, in dem die Mehrzahl der elektrischen Komponenten verbaut ist. Für Komponenten, die aufgrund des Türaufbaus im Nassraum montiert werden müssen, sind aufwändige Abdichtmaßnahmen erforderlich. Gerade im Automobil sind die mechanischen und elektronischen Systeme und Komponenten extremen Umgebungsbedingungen, wie Frost und korrosiven Medien, ausgesetzt. Um diesen hohen Ansprüchen bei der Konstruktion und Materialauswahl gerecht werden zu können, wird im Folgenden ein Überblick über die bei der Entwicklung von Türmodulen wichtigsten, zu berücksichtigenden Anforderungen der Automobilindustrie gegeben.

## **Thermische Belastbarkeit der Leitungsstruktur**

Die erforderliche thermische Belastbarkeit der elektrischen Leiter hängt sehr stark von deren Umgebungsbedingungen und damit von ihrem Einsatzort im Automobil ab. Aufgrund der zu garantierenden Wintertauglichkeit der Fahrzeuge, müssen alle elektrischen Leitungen im Automobil bis zu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperaturbeständig sein.

Im Motorraum werden im Pkw die höchsten Temperaturen erreicht, sodass die hier verwendeten Kabel und mechatronischen Systeme einer Temperatur von  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  dauerhaft standhalten müssen. Da sich vor allem im Sommer auch der Fahrzeuginnenraum erheblich aufheizen kann, wurden für elektronische Systeme an diesem Einsatzort Belastungsgrenzen von  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und festgelegt. Für den Fahrzeugaußenraum liegen die von der Elektrik und Elektronik mindestens zu ertragenden thermischen Belastungen aufgrund der möglichen starken Erhitzung der Karosserie bei  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Beim Nachlackieren der Karosserieaußenteile muss eine Temperatur von ca.  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei der Entwicklung elektronischer Systeme in diesem Bereich berücksichtigt werden. Innerhalb dieser Temperaturbereiche wird außerdem das Materialverhalten bei Temperaturwechselzyklen und Temperaturschocks mit gleichzeitiger Vibrationsbelastung getestet. [75, 89]

## **Anforderungen an die Automobilelektronik**

Die Betriebsspannung im Automobil beträgt derzeit  $12\text{ V}$ . Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit werden jedoch in der Regel Prüfspannungen von  $14\text{ V} \pm 0,2\text{ V}$  verwendet. Bauteile, die während des Startvorgangs des Fahrzeugs noch nicht aktiviert sind, müssen auf dem Prüfstand einen Spannungsbereich von  $9\text{ V}$  bis  $16\text{ V}$  mit beliebigem Spannungsverlauf unbeschadet überstehen. Zudem wird das Verhalten bei kurzzeitiger Über- oder Unterspannung sowie der Isolationswiderstand der elektrischen Leitungen getestet.

Darüber hinaus wird die Ruhestromaufnahme überprüft, um festzustellen, ob die Batterie bei längerem Stillstand des Fahrzeugs Gefahr läuft, zu versagen. Bei der Entwicklung und Konstruktion von mechatronischen und elektrischen Komponenten müssen außerdem die elektromagnetische Verträglichkeit, die Verpolsicherheit in der Montage sowie die Kurzschlussfestigkeit der Systeme Berücksichtigung finden. [90]

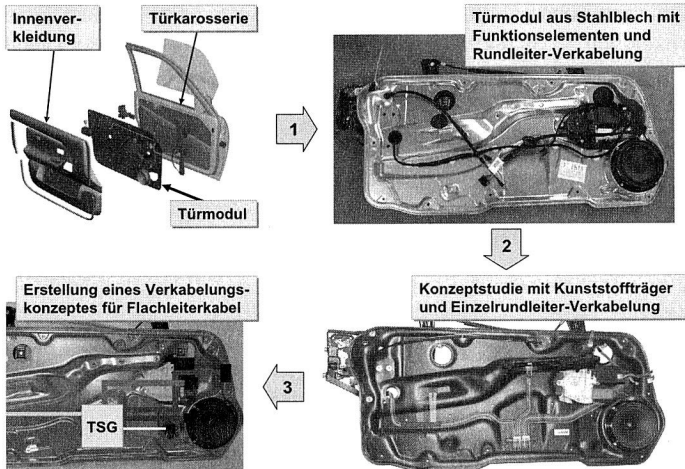
## **Weitere Anforderungen an die Verkabelung im Pkw**

Neben der thermischen Belastung muss die Fahrzeugelektrik noch weiteren Umweltanforderungen genügen. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Chemikalienbeständigkeit der elektrischen und elektronischen Systeme. Sofern das System durch seine Einbausituation oder durch geeignete Schutzvorrichtungen spritzwassergeschützt ist, werden verhältnismäßig geringe Anforderungen an dessen Mediendichtheit gestellt. Bei Systemen, die diesbezüglich jedoch großen Belastungen ausgesetzt sind, wie zum Beispiel dem Streusalznebel im Winter, werden hierfür intensive Tests durchgeführt. Zudem stehen eine Reihe weiterer Untersuchungen zur Verfügung, wie feuchte Wärme-

und Schadgasbeständigkeitstests sowie eine Lebensdauerprüfung, d. h. eine durch Intensivierung von Umwelteinflüssen simulierte, beschleunigte Alterung von Bauteilen und Modulen. [90]

#### 3.3.2 Ersatz des konventionellen Kabelbaums durch Flachleiter

Der konventionelle Kabelbaum des Türmoduls ist ein bandagiertes Rundleiterpaket mit zahlreichen Einzeladern. In einer Konzeptstudie wurden die Bandagierung aufgeschnitten und die Einzelrundleiter flächig auf dem Türmodul verlegt, Bild 3.16.



**Bild 3.16:** Erstellung eines Verkabelungskonzepts für die automatisierte Verlegung von flexiblen Flachleiterkabeln

Die so entstandene flächige Verdrahtungsstruktur wurde anschließend mit verschiedenen Flachleiterkabeln nachempfunden und zu einem optimierten Verkabelungskonzept für flexible Flachleiterkabel weiter entwickelt. Dabei verfügen die eingesetzten Flachkabel über mehrere, nebeneinander liegende und unterschiedlich breite Adern, so dass mit Hilfe eines Flachkabels ein ganzes Rundleiterpaket ersetzt werden kann.

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 angesprochen, kommt es durch den zunehmenden Einsatz von Bus-Systemen im Pkw-Türmodul zu einer Veränderung der Verkabelungsstruktur. Die bislang über den A-Säulen-Anschluss direkt mit dem Hauptkabelbaum verdrahteten Funktionskomponenten werden nun mit einem zentralen Türsteuergerät verkabelt, das direkt auf dem Türmodul installiert ist. Das TSG ist wiederum über einen, in der Adernzahl reduzierten, externen Bus-Anschluss zur A-Säule mit dem Pkw-Bordnetz verbunden. [143] Ein für diese Verdrahtungsstruktur zu entwickelnder Montageablauf muss demnach alle im Türmodul benötigten Funktionskomponenten über Flachleiterkabel mit dem TSG verbinden und das TSG wiederum über einen Außenanschluss im A-Säulen-Bereich mit dem Hauptkabelstrang kontaktieren.

### 3.3.3 Verkürzung der Montageprozesskette durch Automatisierung

Die automatisierte Montage von flexiblen Flachleiterkabeln ist eine komplexe Aufgabe, die verschiedene technologische Gebiete tangiert. Neben der Entwicklung und Konstruktion eines geeigneten Verlegewerkzeugs, ist eine weitgehend autarke Materialbereitstellung zu realisieren. Beide Teilsysteme sollten für unterschiedliche Kabelvarianten und Verkabelungs-Layouts einsetzbar sein. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Automatisierung der Montageprozesskette sind die Zerlegbarkeit des Gesamtablaufs in standardisierte Teilprozesse, eine einfache Wiederholbarkeit dieser Standardprozesse sowie eine automatisierte Handhabbarkeit der Werkzeuge und Werkstücke. [104, 145]



Bild 3.17: Automatisierte Flachkabelverlegung bewirkt Verkürzung der Montageprozesskette

Zwar existieren bereits Ansätze zur automatisierten Fertigung gefalteter Flachkabel, allerdings erfolgt die Montage dieser Kabelsätze wiederum manuell. [24] Ziel eines neuen Gesamtkonzeptes für die automatisierte Verlegung von flexiblen Flachleiterkabeln ist die Rationalisierung der Produktionsabläufe durch eine Verkürzung und Vereinfachung der Montageprozesskette, Bild 3.17. Für die automatisierte Flachkabelverlegung sind zunächst neue Handhabungsprozesse mit integrierter Kabelbereitstellung zu entwickeln, die in Kapitel 4 vorgestellt werden. Zudem werden in Kapitel 6 standardisierte Lösungen für eine prozessintegrierte Fixierung der Flachkabel während der Verlegung auf dem Türmodul erarbeitet. Gerade die Anzahl der Befestigungsteile hat aufgrund der steigenden Anforderungen an eine exakte und robuste Leitungsverlegung im Pkw-Bordnetz stark zugenommen. So hat sich beispielsweise die Anzahl der Kabelclips im VW Golf von 13 Stück im Jahre 1977 auf 267 Stück in 1996 erhöht. Insgesamt stieg die Anzahl an Befestigungselementen für Bordnetz-Komponenten von 115 Stück im Jahre 1977 auf 561 Stück in 1996. [41] Durch den Einsatz von Flachleiterkabeln und geeigneter Konzepte für ihre Fixierung im Fahrzeug, lässt sich diese Zahl erheblich

reduzieren, wodurch Kosten bei der Logistik und Montage der Einzelteile gespart und die Zuverlässigkeit der Produkte erhöht werden können. Für ein geschlossenes Gesamtkonzept ist es darüber hinaus wichtig, dass dazu passende Lösungen für die elektrische Kontaktierung der Flachleiter mit den Funktionskomponenten der Pkw-Seitentür entwickelt werden. Diese werden schließlich in Kapitel 6 vorgestellt.

#### **3.3.4 Gewichtsreduzierung beim Türmodul durch den Einsatz von Kunststoffen und Funktionsintegration**

Neben den bislang hauptsächlich verwendeten, so genannten *Türaggregateträgern* aus Stahlblech, Bild 3.16, kommen zunehmend Module aus Kunststoff in der Pkw-Seitentür zum Einsatz. Diese besitzen nicht nur ein niedrigeres Flächengewicht, sondern bieten in den meisten Fällen auch Kostenvorteile. [138] Außerdem lassen sich in Türmodule aus Kunststoff durch eine entsprechende Formgebung zusätzliche Funktionen, wie beispielsweise Montagehilfen für Kabel und Funktionskomponenten der Pkw-Seitentür, integrieren. Auch ein Anspritzen von Dichtlippen für Komponenten auf der Nassraumseite des Moduls sowie für die damit erforderlichen Durchbrüche zur Verkabelung auf der Trockenraumseite kann realisiert werden.

Bei den bisherigen Türmodulen aus Kunststoff wurde in erster Linie Polypropylen (PP) verwendet, dessen Bedeutung, vor allem wegen seines attraktiven Preis-/Volumen-Verhältnisses, im Automobil stetig zunimmt. Im Jahre 1975 lag der Anteil von PP noch bei 10 kg pro Fahrzeug, in 2005 lag er bei 55 kg und für 2010 wird er auf 60 kg pro Pkw geschätzt. Gründe hierfür sind auch die Vielseitigkeit im Einsatz und die Werkstoffeigenschaften von Polypropylen, wie zum Beispiel seine hohe Zähigkeit, gute Fließfähigkeit und Dämpfungseigenschaften. Verarbeitungsbedingte Probleme, wie beispielsweise Zerkratzen der Oberfläche, Schrumpfung und Haftung von Lacken, wurden in der Praxis beherrschbar gemacht. [99] Auch für die zur Abdeckung des Türaggregateträgers verwendete Tür-Innenverkleidung wird neben naturfaserverstärkten Presswerkstoffen als Basiswerkstoff auch talkumverstärktes PP eingesetzt. [61, 108] Aufgrund seines bereits geschilderten, nahezu konkurrenzlos günstigen Preis-/Volumen-Verhältnisses, wurde Polypropylen auch als Basiswerkstoff für die Pkw-Türmodule ausgewählt, zu denen in den folgenden Kapiteln geeignete Handhabungs- und Montage-Konzepte entwickelt werden.

## 4 Neue Handhabungskonzepte für die automatisierte Verlegung von flexiblen Flachleitern

In diesem Kapitel werden neue Handhabungskonzepte beschrieben, die den Anforderungen an eine effiziente, automatisierte Montage flexibler Flachkabel gerecht werden können. Außerdem werden ausgewählte Konzepte zur Feststellung ihrer Eignung für eine Serienfertigung von Pkw-Türmodulen prototypisch umgesetzt. Zur prototypischen Realisierung der Montagekonzepte wurde das Pkw-Türmodul ausgewählt, da hier die Anzahl der Funktionskomponenten und die Komplexität der Verdrahtungsstruktur im Vergleich zu anderen Fahrzeugmodulen geringer sind, wobei das Funktionsprinzip des jeweiligen Konzepts für makromechatronische Module deutlicher zu erkennen ist. Die vorgestellten Montageprinzipien sind grundsätzlich auch auf andere Module anwendbar.

### 4.1 Robotergestützte flexible Montage elektrischer Flachkabel

#### 4.1.1 Komponenten einer Montagezelle für die Flachkabelverlegung

Das Flachkabel-Montagesystem besteht aus zwei Hauptbestandteilen, einem Modul zur Kabelbereitstellung und einem Modul zur Flachkabelverlegung. Für die vollautomatisierte Montage von flexiblen Flachkabeln wird ein 6-Achs-Roboter eingesetzt, da dieses Handhabungsgerät aufgrund seiner hohen Anzahl an Freiheitsgraden sehr flexibel für die räumliche Verlegung von Kabeln verwendet werden kann.

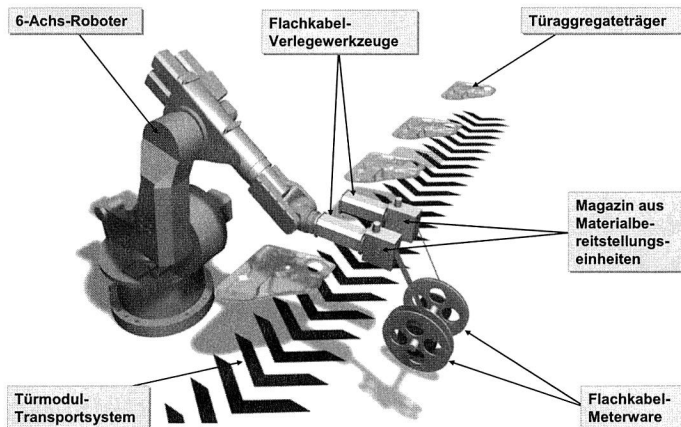


Bild 4.1: System zur vollautomatisierten Flachkabelmontage auf Türmodulen

Der Roboter ist mit einem Werkzeugwechseladapter ausgerüstet, an den verschiedene Verlegewerkzeuge angedockt werden können. Mit Hilfe dieser Verlegewerkzeuge werden extrudierte flexible Flachkabel auf einem Türaggregateträger, dem so genannten *Türmodul-Dummy* appliziert, Bild 4.1. Dieser, zur Analyse und Optimierung des Montagesystems, zunächst eben gestaltete, Produktdemonstrator soll in einem zweiten Schritt

durch einen räumlich geformten Kunststoffträger ersetzt werden, der direkt in eine bestehende Pkw-Seitentür eingebaut werden kann. Für den technischen Lösungsansatz zur FFC-Montage müssen dabei eine Vielzahl von Randbedingungen berücksichtigt werden. Mit dem geplanten Verlegesystem sollten Flachkabel unterschiedlichen Querschnitts und variierender Adernzahl montiert werden können. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Flachkabel mit dem Verlegeeffektor gefaltet werden müssen, um sie flexibel auf der Oberfläche des Türmoduls positionieren zu können. Weitere Rahmenbedingungen sind die Realisierung einer automatisierbaren, weitgehend autarken Kabelbereitstellung, die Verhinderung von Kabelbrüchen in den Falzonen der Flachkabel sowie die Optimierung von Taktzeiten durch Parallelisierung von Montageschritten.

#### 4.1.2 Ablauf der vollautomatisierten Flachkabelmontage

Der Ablauf der vollautomatisierten Flachkabelmontage ist wie folgt geplant: Die Flachkabel werden dem Verlegewerkzeug als Meterware, d. h. von der Rolle, über eine prozessintegrierte Kabelbereitstellungseinheit zugeführt, Bild 4.2. Anschließend wird die 3D-Verkabelungsstruktur mit Hilfe eines robotergeführten Verlegewerkzeugs auf dem Türaggregateträger erzeugt. Dabei werden die Kabel durch ein in Kapitel 6 näher definiertes, ausgewähltes Fixierungsprinzip auf der Oberfläche befestigt.

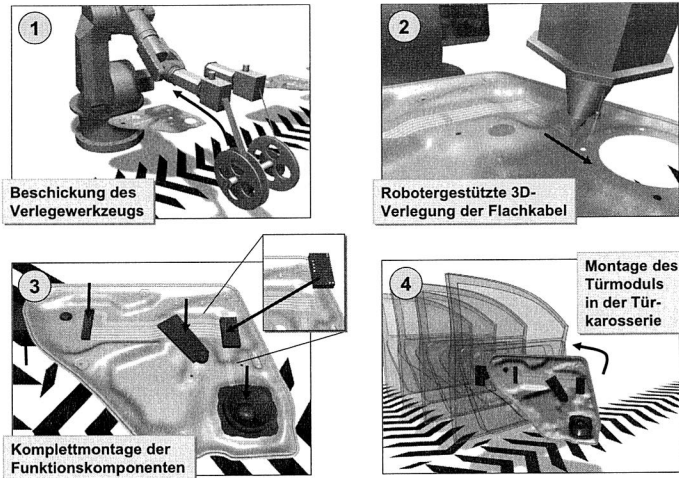


Bild 4.2: Vollautomatisierter Montageprozess für flexible Flachleiterkabel

Nachdem die Flachkabel auf der Oberfläche des Türträgers verlegt worden sind, werden die Funktionskomponenten, wie z. B. der Fensterheber und der Lautsprecher, montiert. Während der Montage der Funktionskomponenten werden diese über integrierte Kontaktelemente, die in Kapitel 6 genauer beschrieben werden, direkt mit den Flachleitern elektrisch kontaktiert, wodurch die Prozesskette zur Montage von Türmodulen erheblich verkürzt wird. Abschließend kann der komplett montierte Türaggregateträger in die Türkarosserie eingebaut werden.



## 4.2 Grundkonzepte für die Kabelbereitstellung

Die Materialbereitstellung in der Montagezelle umfasst drei Hauptaufgaben, die Beschickung des Verlegewerkzeugs mit Kabel an einer definierten Position innerhalb der Montagezelle, das maßgenaue Zuschneiden des Kabels sowie das Zwischenspeichern der Flachkabel im Verlegewerkzeug. Zudem kann das Abisolieren der Kabelenden bzw. von Kontaktstellen zwischen den Kabelenden in einer Materialbereitstellungseinheit realisiert werden, sofern dies für die Kontaktierung der Funktionselemente in der Pkw-Seitentür notwendig ist.

Funktion	Grundkonzept 1 („extern“)	Grundkonzept 2 („intern“)
Kabelvorschub	extern einfach und intern in beide Richtungen	extern einfach und intern in beide Richtungen
Zuschneiden der Kabel in definierter Länge	extern realisierte Funktion	ins Verlegewerkzeug integriert
Kabelspeicher	passiv, nur Kabelaufnahme	aktiv, mit Kabeleinzug
Abisolieren	extern realisierbar	intern schwer zu realisieren

Tabelle 4.1: Unterscheidung zweier Grundkonzepte hinsichtlich ihrer Funktionen

Bei der Umsetzung dieser Gestaltungsparameter ergeben sich zwei grundlegend unterschiedliche Lösungskonzepte, die externe und die im Verlegewerkzeug integrierte Materialbereitstellung, Tabelle 4.1. Die Ausgestaltung der Grundkonzepte wird im Folgenden detailliert beschrieben.

### 4.2.1 Externe Materialbereitstellung mit passivem Kabelspeicher

Bei der Materialbereitstellung durch ein externes System werden die Vermessung und das Zuschneiden des Kabels außerhalb des Verlegewerkzeugs vorgenommen. Die Bereitstellung unterschiedlicher Flachkabel wird mit Hilfe eines Magazins realisiert. Das Kabel wird von einer Materialbereitstellungseinheit auf die für die aktuelle Verlegeoperation erforderliche Länge zugeschnitten und in den Zwischenspeicher des Verlegewerkzeugs eingeschoben. Dabei ist zu beachten, dass die Länge des eingeschobenen Kabels, durch die beim Aufwickeln im Kabelspeicher entstehende Reibung, begrenzt ist. Versuche haben gezeigt, dass Flachkabel bis zu einer Länge von einem Meter mit dieser Methode problemlos zwischengespeichert werden können. Darüber hinaus kann es zum Verklemmen des Kabels beim Laden des Speichers kommen. Zum Laden des Kabelspeichers wird das in Bild 4.3 skizzierte Kabelführungsmundstück des Verlegewerkzeugs über eine Positionierhilfe an eine Materialbereitstellungseinheit des Kabelmagazins angekoppelt. Das Kabel wird nun durch einen Vorschubmechanismus in der Länge vermessen und in den Kabelspeicher des Verlegewerkzeugs eingeführt. Ist die vorgesehene Länge des zu verlegenden Kabelstranges erreicht, wird das Kabel mit Hilfe einer Abschneideeinrichtung am Ausgang der Materialbereitstellungseinheit abgetrennt. Nachdem das in die Kabelaufnahme eingeführte Kabelstück verlegt worden ist, wird der Vorgang mit dem nächsten zu verlegenden Kabelstrang wiederholt.

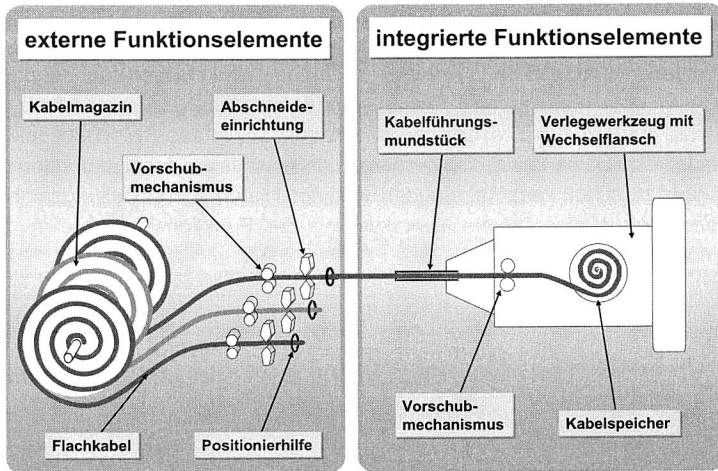


Bild 4.3: Externe und integrierte Funktionselemente beim Grundkonzept mit passivem Kabelspeicher

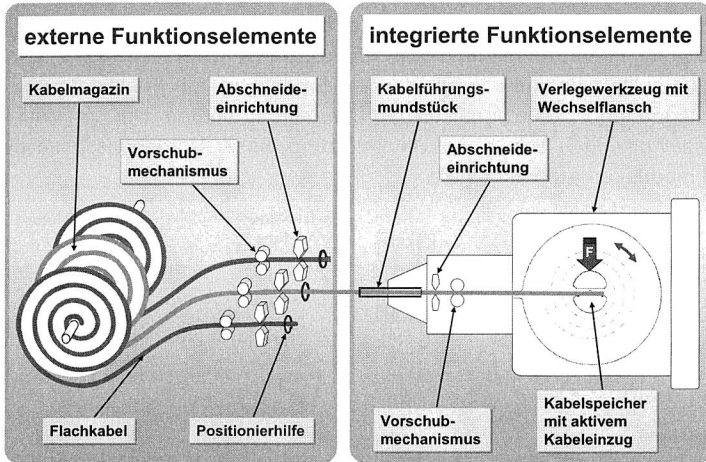
Die größten Vorteile dieses externen Grundkonzepts sind die aufgrund der reduzierten Funktionsdichte kleinere Baugröße des Verlegewerkzeugs sowie dessen geringes Gewicht, das den Einsatz kleinerer Roboter mit geringeren Investitionskosten für die Montage ermöglicht. Die Reduzierung der Aufgabenbreite durch die Auslagerung der Funktionen *Kabel-Vermessen* und *Kabel-Zuschneiden* verringert den Aufwand an mechanischen und elektrischen Komponenten im Verlegewerkzeug. Dies führt zu einer höheren Verfügbarkeit des Verlegewerkzeugs. Der Hauptnachteil dieses Konzeptes ist die Entstehung von langen Nebenzeiten durch die Verfahrbewegungen des Roboters zum Beladen des Kabelspeichers nach jeder Verlegeoperation. Falls für die Flachkabelmontage jedoch häufige Werkzeugwechsel vorgesehen sind, kann dieser Nachteil wieder aufgehoben werden, da sich durch den Einsatz des Kabelmagazins die Möglichkeit bietet, dass die im Magazin abgelegten Werkzeuge jeweils mit Kabel beschickt werden, während der Roboter einen anderen Kabeltyp verlegt.

#### 4.2.2 Integrierte Materialbereitstellung mit aktivem Kabelspeicher

Das Konzept der Materialbereitstellung mit aktivem Kabelspeicher folgt dem Integrationsprinzip, indem die Funktionen *Kabel-Vermessen* und *Kabel-Zuschneiden* vom Verlegewerkzeug übernommen werden. Zu diesem Zweck wird das Verlegewerkzeug mit einem drehzahlgesteuerten Vorschubmechanismus und einer zusätzlichen Abschneideeinrichtung ausgestattet. Das Kabel läuft bei der Verlegung ausgehend vom Kabelspeicher am Ende des Werkzeugkopfes über Vorschubrollen und durch ein Schneidwerkzeug in das Kabelführungsmundstück, Bild 4.4.

Im Gegensatz zum passiven Kabelspeicher wird das Kabel bei der hier skizzierten Lösung aktiv eingezogen. Dies kann beispielsweise durch ein rotierendes Backensystem

erfolgen, dass bei sensorgestützter Detektion des zwischen die Backen einfahrenden Kabels diese schließt, das Kabel dabei einklemmt und es anschließend durch rotatorische Bewegung aufwickelt. Durch den Einsatz von Kabelspeichern mit aktivem Einzug können auch Kabel mit einer Länge bis ca. 15 m verarbeitet werden, ohne das Verlegewerkzeug unnötig zu vergrößern.



**Bild 4.4** Externe und integrierte Funktionselemente beim Grundkonzept mit aktivem Kabelspeicher

Diese Integrationslösung hat den Vorteil, dass die Versorgung des Werkzeugs mit Kabel über mehrere Verlegeoperationen hinweg kontinuierlich erfolgt und in den Bearbeitungsprozess eingegliedert ist. Verfahrenszeit und -zeiten zum Aufnehmen von Kabelmaterial zwischen den einzelnen Verlegeoperationen entfallen. Sobald der Kabelspeicher leer ist, muss er neu gefüllt oder ausgetauscht werden. Je größer er dabei dimensioniert ist, desto weniger Nebenzeiten fallen beim Verlegeprozess an.

Auf der anderen Seite erhöhen große Kabelmagazine das Volumen und das Gewicht des Verlegewerkzeugs. Dadurch werden die Anforderungen an das Handling-Gerät, wie zum Beispiel ein 6-Achs-Roboter, deutlich erhöht, was zu gesteigerten Investitionskosten führt. Ein weiterer Nachteil der Integrationslösung ergibt sich aus der, durch die Einbeziehung der Funktionen *Kabel-Vermessen* und *Kabel-Zuschneiden* in das Verlegewerkzeug, erhöhten Komplexität der mechanischen Komponenten und des damit verbundenen größeren Steuerungsaufwands für die zahlreichen, hierfür erforderlichen, elektronischen Komponenten. Vor allem die Realisierung des hier skizzierten, aktiven Kabeleinzugs stellt eine große Herausforderung für die Gewährleistung einer in der Serienproduktion erforderlichen Verfügbarkeit dar. Im Gegensatz zu einer direkt am Verlegewerkzeug befestigten Kabelrolle, bleibt bei diesem Konzept allerdings die vollständige Automatisierbarkeit des Beschickungsprozesses aufgrund seiner Entkopplung vom Verlegeprozess des Werkzeugs erhalten.

### 4.2.3 Realisierung der Materialbereitstellung

#### Aufbau und Funktionsumfang der Kabelbereitstellungseinheiten

Die Versorgung des Verlegesystems mit Kabel als Meterware erfolgt mit Hilfe von standardisierten Kabelspulen, wie sie vom Hersteller direkt zu beziehen sind. Für die Realisierung der Kabelbereitstellung wurden beide, eingangs beschriebenen Grundkonzepte prototypisch umgesetzt. Ausgehend vom robusteren Konzept einer externen Materialbereitstellung sollte dieses durch schrittweise Ergänzung von Funktionen in das Konzept der integrierten Materialbereitstellung übergeführt werden. Die so genannten *Beschickungseinrichtungen* sollten zur Unterstützung dieser Vorgehensweise einen entsprechend modularen Aufbau besitzen.

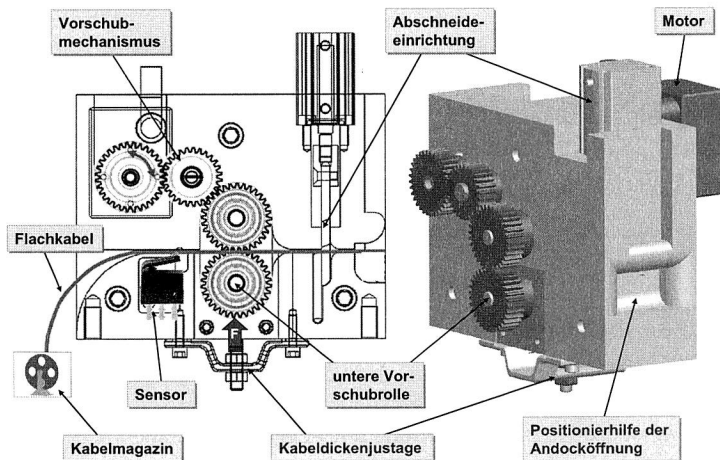


Bild 4.5: Aufbau und Funktionselemente der Materialbereitstellungseinheiten

Die Grundstruktur der Beschickungseinrichtung des Kabelverlegesystems besteht aus zwei Plattenelementen aus Aluminium, an die alle weiteren Konstruktionselemente angebunden sind. Bild 4.5 zeigt das Funktionsprinzip des Beschicksystems in der Frontansicht. Der mechanische Vorschub des Flachkabels wird durch zwei kugelgelagerte Vorschubrollen realisiert, die über Zahnräder von einem drehzahlgesteuerten Motor angetrieben werden. Während der Beschickung des Verlegewerkzeugs in der Materialbereitstellungseinheit, wird es vom Roboter über eine Positionierhilfe in der Andocköffnung der Beschickungseinrichtung positioniert. Die Positionierhilfe wird an die jeweilige Geometrie des Verlegewerkzeugkopfes angepasst, damit dieser über das Kabelführungsmundstück exakt in die Andocköffnung eintauchen kann. Trotz der hierfür geschaffenen Radien entlang der Kanten der Andocköffnung, muss das Verlegewerkzeug beim Ablegen im Magazin vom Roboter genau geführt werden. Eine weitere realisierte Funktion der Beschickungseinrichtung ist die Kabeldickenjustage. Mit Hilfe dieser Justageeinheit ist es möglich, fertigungsbedingte Toleranzen der Flachkabeldicke zu überwinden und

Flachkabel mit unterschiedlicher Dicke zu transportieren. Dabei ist die untere Vorschubrolle verschiebbar gelagert, so dass ihr Abstand zur oberen Vorschubrolle definiert eingestellt werden kann, Bild 4.6. Mit Hilfe z. B. von Federscheiben ist darüber hinaus eine bedingte Selbstjustage der unteren Vorschubrolle realisierbar.

### Auslegung des Vorschubantriebs im Beschicksystem

Während des Ablegens des Verlegewerkzeugs in der Materialbereitstellungseinheit, wird das Werkzeug durch die Beschickungseinrichtung mit Flachkabel einer definierten Länge versorgt. Dabei wird das Kabel von der Spule abgezogen und in das Kabelführungsmundstück des Verlegewerkzeugs eingeführt. Von dort aus wird es mit Hilfe des Vorschubsystems im Verlegewerkzeug weiter transportiert. Der Vorschub des Flachkabels in der Beschickereinheit wird mit Hilfe des in Bild 4.5 dargestellten, drehzahlgesteuerten Gleichstrommotors mit Planetengetriebe realisiert, der über ein Stirnradgetriebe die Vorschubrollen antreibt. Bei der Auslegung des Vorschubantriebs in der Beschickungseinrichtung wird davon ausgegangen, dass die für den Vorschub benötigte Kraft einen Wert von 25 N nicht überschreitet. Dieser Grenzwert ist in Tests, bei denen das Kabel von der Spule abgewickelt wurde, unter Berücksichtigung eines Sicherheitswertes von 200 %, empirisch ermittelt worden. Zur Auswahl einer geeigneten Motor-Getriebe-Kombination, wird eine Überschlagsrechnung durchgeführt, bei der die benötigte Leistung des Motors bestimmt wird. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beim Beschickvorgang wird dabei auf einen Meter Flachkabel in zwei Sekunden festgelegt.

*Vorgegebene Werte:*

- Vorschubgeschwindigkeit:  $v_v = 500 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
- Vorschubrollen-Radius:  $r_b = 15 \text{ mm}$
- Ermittelte Vorschubkraft:  $F_v = 25 \text{ N}$

*Berechnung der Motorleistung im Beschicksystem:*

- Drehzahl der Rollen: 
$$n_b = \frac{v_v}{2 \cdot r_b \cdot \pi} = 5,31 \frac{1}{\text{s}} = 318,31 \frac{1}{\text{min}} \quad (4.1)$$

- Vorschubmoment: 
$$M_b = F_v \cdot r_b = 375 \text{ mNm} \quad (4.2)$$

- Erforderliche Vorschubleistung: 
$$P_{\text{mech},b} = \frac{\pi}{30} \cdot M_b \cdot n_b = 12,50 \text{ W} \quad (4.3)$$

Bei dieser Leistungsberechnung muss berücksichtigt werden, dass beim Anfahren des Motors kurzfristig auch höhere Leistungen nötig sein können, um beispielsweise das Massenträgheitsmoment der Kabelspule zu überwinden. Werden zwei Vorschubsysteme zum Transport eines Flachkabels verwendet, wie zum Beispiel im Verlegewerkzeug und in der Beschickungseinrichtung, müssen sie gut aufeinander abgestimmt sein. So muss sichergestellt werden, dass die Vorschubgeschwindigkeit in beiden Vorschubsystemen exakt gleich groß ist, da es sonst zu Verspannungen oder Verwerfungen des Flachkabels in der Flachkabelführung kommen kann. [81]

Für die Beschickungseinrichtung wird ein bürstenloser Servomotor der Firma Faulhaber aus der Serie 3564 024 BC mit integrierter Steuerung eingesetzt. Die Drehzahl dieses Motors kann zwischen 10 und 10000 Umdrehungen pro Minute frei eingestellt werden. Die für die vorliegende Anwendung vollkommen ausreichende Typenleistung von 44 W, erreicht der Motor bei einer Drehzahl von  $8400 \frac{1}{\text{min}}$  und einem Dauerdrehmoment von maximal 50 mNm.

Da dieses empfohlene maximale Dauerdrehmoment deutlich geringer ist als das Vorschubmoment, muss bei diesem Motor ein Getriebe eingesetzt werden. Zu diesem Zweck wird ein Planetengetriebe der Serie 32/1 mit einem Übersetzungsverhältnis von 14 : 1 ausgewählt. Dieses Getriebe besitzt einen Wirkungsgrad von 75 %. Mit den empfohlenen Betriebsgrößen des Motors und den Vorgabegrößen des Getriebes wird eine Vergleichsrechnung zum übertragbaren Drehmoment angestellt.

*Vorgegebene Werte:*

- Empfohlenes max. Dauerdrehmoment:  $M_{e,\max} = 50 \text{ mNm}$
- Übersetzungsverhältnis des Getriebes:  $\ddot{U} = 14/1$
- Wirkungsgrad des Getriebes:  $\eta = 75 \%$

*Berechnung der maximalen Vorschubgeschwindigkeit:*

- Vorschublänge pro Umdrehung:  $l_b = 2 \cdot r_b \cdot \pi = 94,25 \text{ mm}$  (4.4)

- Drehzahl der Rollen im Werkzeug:  $n_{b,\max} = \frac{n_{e,\max}}{\ddot{U}} = 714,29 \frac{1}{\text{min}} = 11,90 \frac{1}{s}$  (4.5)

- max. Vorschubgeschwindigkeit:  $v_{b,\max} = l_b \cdot n_{b,\max} = 1122,00 \frac{\text{mm}}{s}$  (4.6)

es gilt somit:  $v_v < v_{b,\max}$  (4.7)

- Maximal übertragbares Antriebsmoment:  $M_{b,\max} = M_{e,\max} \cdot \ddot{U} \cdot \eta$  (4.8)

$$M_{b,\max} = 525 \text{ mNm} \quad (4.9)$$

es gilt somit:  $M_b < M_{b,\max}$  (4.10)

*Momentenvergleich:*

Die Vergleichsrechnungen ergeben, dass das Vorschubmoment geringer als das maximal übertragbare Antriebsmoment ist. Die ausgewählte Motor-Getriebe-Kombination kann somit eingesetzt werden. [81]

## Integration einer Abschnideeinrichtung für Flachkabel

Das Abschneiden des Flachkabels in der Materialbereitstellungseinheit wird mit Hilfe eines Schneidensystems nach dem Prinzip einer Tafelschere realisiert. In Bild 4.6 ist die Materialbereitstellungseinheit geöffnet dargestellt. Das System besteht aus einer unteren Schneide, die fest in die Beschickungseinrichtung integriert ist, und einer obo-

ren Schneide, die verschiebbar gelagert ist. Die Schneidkanten beider Schneiden besitzen einen stumpfen Winkel von  $70^\circ$  am Ende der Schneidplatten. Während die Schneidkante der unteren Schneide parallel zum Flachkabel verläuft, besitzt die obere Schneide eine Schneidkante, die in einem Winkel von ca.  $30^\circ$  zum Flachkabel geneigt ist. Auf diese Weise wird ein definierter, ebener Schnittverlauf entlang der unteren Schneidkante erreicht, ohne dass der jeweilige Anfang des Flachkabels verformt wird. Eine Verformung des Flachkabels an seinem vorderen Ende könnte das Einführen des Kabels in das Verlegewerkzeug behindern.

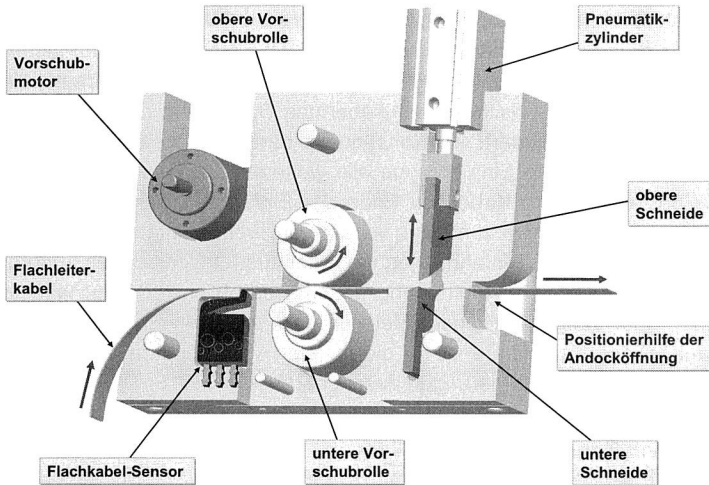


Bild 4.6: Frontansicht einer geöffneten Materialbereitstellungseinheit

Zur Sicherung der Verschleißfestigkeit und der damit verbundenen Verfügbarkeit der Abschnideeinrichtung, werden die Schneiden aus hoch legiertem Werkzeugstahl gefertigt. Außerdem werden sie im Anschluss an die Fertigung gehärtet. Die Auf- und Abwärtsbewegung der oberen Schneide wird mit Hilfe eines Pneumatikzylinders realisiert. Die Krafteinleitung erfolgt über ein Verbindungselement aus nicht rostendem Edelstahl, das mit Hilfe einer Bohrung in der oberen Schneide mit dieser verschraubt wird.

Für die Installation einer Funktion zur Erkennung des Kabelendes wurde ein mechanisches Erkennungssystem verwendet, da diese nicht nur leicht in die Beschickungseinrichtung zu integrieren sind, sondern auch eine hohe Prozesssicherheit bieten. Da sie auch bei nichtmetallischen Materialien ausgelöst werden, sind Fehlmeldungen, wie sie zum Beispiel aufgrund von unterschiedlichen Leiterkonfigurationen entstehen können, weitgehend ausgeschlossen. Außerdem ist damit ein direktes Ein- und Ausschalten von Systemkomponenten möglich, da diese Schalter auch Stromstärken von bis zu 10 A bei einer Spannung von 250 V übertragen können. Bei der Konstruktion der Beschickungseinrichtung wird deshalb ein Mikroschalter mit einer Kunststoffrolle am Hebelende als Sensor in das Konzept eingebunden. Das Einführen eines Flachkabels in die Besch-

ckungseinrichtung führt automatisch zu einer Auslösung des Mikroschalters. Durch den Einsatz eines Kabel-Ende-Sensors lässt sich programmtechnisch sicherstellen, dass das Verlegewerkzeug mit ausreichend Kabelmaterial versorgt wird.

### Entwicklung des Kabelspeichers im Verlegewerkzeug

Die Entwicklung und Umsetzung der Konzepte für den Kabelspeicher im Verlegewerkzeug sind in mehrere Stufen unterteilt. Zunächst wurde das bereits in Kapitel 4.2.1 beschriebene Konzept eines passiven Kabelspeichers umgesetzt. Wie in Bild 4.7 links unten dargestellt, handelt es sich dabei im einfachsten Fall um einen mit einer ausgefrästen Spiralführung versehenen Aluminiumblock. Das eingeschobene Flachkabel wird entlang der Spirale im Kabelspeicher geführt. Als problematisch hat sich bei dieser Version jedoch die Reibung zwischen Flachkabel und Spiralwand erwiesen, die das Einschieben des Kabels behindert. Als Konsequenz daraus wurden, wie in Bild 4.7 links oben skizziert, bis auf eine Einführzunge alle weiteren Spiralgänge entfernt. Dies bewirkt, dass das eingeführte Kabel am Ende der Einführzunge nach einem Durchlauf nicht mehr an der Speicherwand anliegt, sondern auf weiter einfahrendes Kabelmaterial trifft, das dieses nun in der Einfahrbewegung unterstützt. In Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Gesamtreibung dadurch erheblich reduziert wird und somit Kabel bis zu einer Länge von einem Meter in dem passiven Speicher aufgenommen werden kann. Diese Kabellänge ist für die meisten Verlegeoperationen in einer Pkw-Seitentür nach heutigen Anforderungen ausreichend.

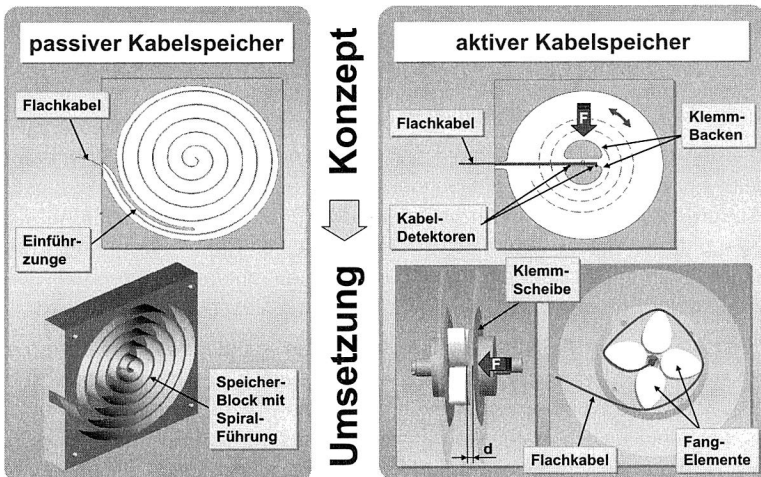


Bild 4.7: Konzeptionelle Alternativen für die Kabelspeicherfunktion

Für die Verlegung längerer Kabel bzw. die Hintereinanderschaltung von Verlegeoperationen ohne zwischenzeitliches Wiederbeladen des Verlegewerkzeugs, ist der Einsatz eines Kabelspeichers mit aktivem Kabeleinzug erforderlich. Um das Kabel aktiv ins Verlegewerkzeug einzuziehen, muss es an seinem vorderen Ende festgehalten und durch



rotierende Bewegung aufgewickelt werden. Dies kann beispielsweise mit Hilfe des bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben und in Bild 4.7 rechts oben skizzierten Backensystems erfolgen, dass über Kabeldetektoren das Vorhandensein von Kabel zwischen den Backen feststellen, diese schließen und das vordere Kabelende dabei festhalten kann. Dabei kommt es insbesondere darauf an, dass das Flachkabel zwischen dem Eingang des Kabelspeichers und dem Backensystem nicht aufgrund seiner biegeschlaffen Eigenschaften nach unten wegnickt, das es sonst nicht zwischen den Backen eingeklemmt werden kann. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wurde ein neues Konzept für einen aktiven Kabelspeicher entwickelt.

Das in Bild 4.7 rechts unten als CAD-Entwurf dargestellte Kabelspulensystem besteht aus einer fest stehenden Scheibe mit Fangelementen und einer Klemmscheibe die in einem Abstand  $d$  voneinander verfahren werden können. Die Fangelemente haben die Aufgabe, das einfahrende Kabel aufzufangen und in die Mitte der Kabelspule zu leiten. Sobald es dort angekommen ist, wird die Klemmscheibe über einen pneumatisch angetriebenen Zylinder gegen die fest stehende Scheibe mit den Fangelementen gedrückt. Die Fangelemente sind geometrisch so ausgelegt, dass Ihre Breite etwas geringer ausfällt als die Breite des Flachkabels. Durch die geringe Höhe der Öffnung zwischen den Fangelementen, kann das Kabel in seiner Breite nicht knicken, während es seitlich gespannt wird. Sobald das Flachkabel eingeklemmt ist, wird es durch Rotation der gesamten Spule aufgewickelt. Ergänzend zu dem Einsatz eines Kabelspeichers mit aktivem Kabeleinzug wurde eine Abschnideeinrichtung gemäß dem bereits in der Materialbereitstellungseinheit verwendeten Prinzip einer Tafelschere entwickelt und umgesetzt. Auf die einzelnen Funktionskomponenten der konzipierten und realisierten Verlegewerkzeuge wird im Folgenden genauer eingegangen.

### 4.3 Anforderungen an die Werkzeugentwicklung

Für die Entwicklung von Konzepten zur Handhabung und Montage von flexiblen Flachkabeln ist es erforderlich, dass zunächst die grundlegenden Aufgaben und Anforderungen an entsprechende Verlegewerkzeuge festgelegt werden. Sie sind in Bild 4.8 zusammenfassend dargestellt. Ausgehend von dem gewählten Konzept für die Materialbereitstellung, muss das Verlegewerkzeug die Integration eines aktiven Einzugs im Kabelspeicher, eines Systems zur Messung der Kabellänge sowie einer Abschnideeinrichtung ermöglichen. Dabei sollten die Baugröße und das Gewicht des Werkzeugs gering gehalten werden, um einen möglichst flexiblen Einsatz in engen Bauräumen zu gewährleisten. Außerdem ist bei der Werkzeugkonzeption auf einen modularen Aufbau zu achten, da mit dem Verlegekonzept Flachkabel unterschiedlicher Geometrie zu verlegen sind. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, einen schnellen und zuverlässigen Werkzeugwechsel zu ermöglichen, um Verlegeoperationen mit verschiedenen Flachkabeln über ein Montagesystem zu realisieren. Die dabei entstehenden Nebenzeiten sollten so kurz wie möglich gehalten oder durch eine Parallelisierung von Prozessen weitgehend vermieden werden können. Die Geschwindigkeit des Kabelvorschubs muss darüber hinaus an die Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters angepasst werden können.

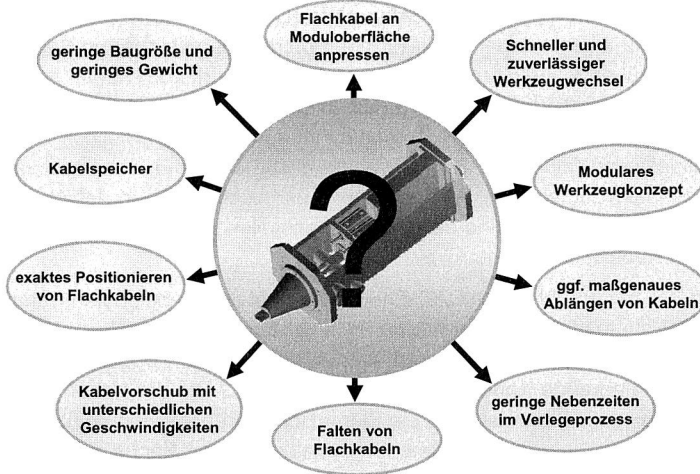


Bild 4.8: Anforderungen an die Entwicklung von Flachkabel-Verlegewerkzeugen

Zur Gewährleistung einer zuverlässigen elektrischen Kontaktierung der Flachkabel müssen diese vom Verlegewerkzeug exakt auf dem Türmodul positioniert werden. Zudem ist das Kabel zur Fixierung am Türmodul mit Hilfe eines geeigneten Systems an die Moduloberfläche anzupressen. Beim Verlegen der Flachkabel auf dem Modul können nicht nur direkte, geradlinige Verbindungswege gefahren werden. Das Kabel muss auch um Hindernisse herum verlegt werden können. Um dies zu Bewerkstelligen, wird das Kabel über einen bestimmten Winkel gefaltet. [72]

Bei der Erstellung eines Werkzeugkonzeptes muss insbesondere darauf geachtet werden, dass der Faltwinkel definiert eingestellt und das Flachkabel in beide Richtungen gefaltet werden kann. Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich das Werkzeug bei zwei Faltvorgängen in eine Richtung um  $360^\circ$  drehen können muss. Trotz ihrer flächigen Struktur können Flachkabel unter Beachtung eines Mindestwinkels von  $45^\circ$  und eines Grenzradius von  $r > 0,2 \text{ mm}$  in nahezu beliebiger Wegführung verlegt werden. [106] Diese Grenzwinkel bzw. -radien dürfen nicht unterschritten werden, da andernfalls aufgrund der an der Knickstelle entstehenden Querschnittsverjüngung der Widerstand erheblich ansteigt, was zum Durchglühen der Flachleiter führen kann.

Diese Zusammenstellung von Anforderungen ist Grundlage für die im weiteren Verlauf beschriebenen Werkzeugkonzepte. Die Struktur der robotergeführten Verlegewerkzeuge besteht aus folgenden drei Teilbereichen:

- passiver/aktiver Kabelspeicher ohne/mit Abschnideeinrichtung
- Werkzeugrumpf mit Vorschubeinheit und Pneumatiksystem
- Werkzeugkopf mit mechanischen Systemelementen zum Falten und Anpressen der Flachkabel

Die Betrachtung der unterschiedlichen Konzepte konzentriert sich zunächst auf den Werkzeugkopf, der die Hauptfunktionen der Flachkabelmontage, das Falten und Anpressen der Kabel auf einer dreidimensional geformten Oberfläche, bereitstellt. Ausgewählte Konzeptalternativen werden prototypisch umgesetzt, um ihre Tauglichkeit hinsichtlich der Erfüllung der genannten Anforderungen zu verifizieren. Das Ziel ist dabei die Entwicklung eines optimierten Werkzeugkonzepts für die vollautomatisierte Montage von flexiblen Flachkabeln, das in Kapitel 4.6 beschrieben wird.

## 4.4 Winkel-Mundstück-Konzepte

### 4.4.1 Winkel-Mundstück-Konzept

Bei dem in Bild 4.9 dargestellten *Winkel-Mundstück-Konzept* werden die Flachkabel zwischen zwei U-förmigen Kabelführungen hindurch geführt. Die Enden der U-Profile sind in einem definierten Winkel abgeschnitten. Über diesem Winkel kann das Flachkabel bei dessen Verlegung gefaltet werden. Bei einem Winkel von  $45^\circ$  am Ende der Kabelführung, knickt das verlegte Kabel somit um  $90^\circ$  von der bisherigen Richtung ab. Die beiden U-förmigen Kabelführungen sind so ineinander gelegt, dass das Flachkabel je nach axialer Verschiebung der Profile nach links oder nach rechts gefaltet werden kann. Diese Verschiebung der Profile wird mit Hilfe von Pneumatikzylindern realisiert.

Der Vorschub des Flachkabels zwischen den U-Profilen erfolgt über zwei Vorschubrollen, die in dafür vorgesehene Kabelführungsritzen eingreifen und so direkt auf das Kabel zugreifen können. Diese Rollen werden über ein Vorschubgetriebe von einem drehzahlgesteuerten Motor angetrieben. Zwischen den beiden U-Profilen liegen zudem Federstahlrippen, die das Kabel auf den Untergrund, zum Beispiel in ein dort aufgebrachttes Klebstoffdepot, drücken. Sie werden, wie bereits die Kabelführungen, durch zusätzliche Pneumatikzylinder in axialer Richtung verschoben und können dadurch je nach Bedarf ein- und ausgefahren werden.

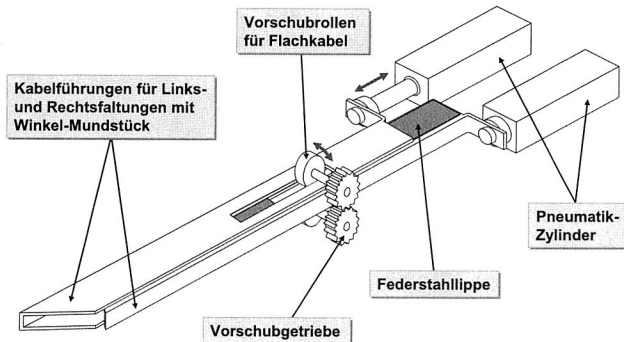


Bild 4.9: Kabelführung mit Winkelmund zum Falten des Flachkabels über einen definierten Winkel

Die wichtigsten Vorteile des Winkel-Mundstück-Konzeptes sind dessen robuste Konstruktion und der einfache Aufbau des Verlegewerkzeugs, was sich auf die Verfügbarkeit des Verlegekopfes positiv auswirkt. Auch der geringe Steuerungsaufwand für die Pneumatikzylinder und die Vorschubeinrichtung, erhöhen die Verfügbarkeit und reduzieren die Herstellkosten für das Verlegewerkzeug. Bei diesem Lösungskonzept bestimmt die Tiefe des U-Profiles die maximale Breite des Flachkabels. Da das Flachkabel in der Regel auf dem Untergrund exakt positioniert werden muss, ist von einer Differenzierung der Kabelbreite abzuzuraten, auch wenn bei dieser Konstruktion eine Verlegung inklusive Faltung von schmalere Kabeln durchaus möglich wäre. Das heißt, dass das Werkzeug an das jeweils zu verlegende Kabel geometrisch angepasst sein sollte. Ein Nachteil dieses Konzeptes ist somit dessen eingeschränkte Flexibilität in Bezug auf die Flachkabel-Varianten und die Faltwinkel des Flachkabels. Die Kabelführungen besitzen für jedes Werkzeug nicht nur eine definierte Schachtbreite, sondern auch eine definierte Schachthöhe. Die Enden der Kabelführungen haben einen unveränderlichen Winkel zum Falten des Flachkabels, was sich vor allem dann als problematisch erweisen kann, wenn das Kabelverlegungs-Layout ein Falten in einem bestimmten festen Winkel, z. B. aufgrund von Hindernissen, nicht zulässt. Allerdings ist es möglich, durch eine optimierte Staffellung sowie eine Parallelisierung der einzelnen Verlegeprozesse für die jeweils erforderlichen Faltwinkel je ein dafür gestaltetes Werkzeug einzusetzen.

#### 4.4.2 Schachtel-Winkel-Konzept

Eine Alternative hierzu bietet das in Bild 4.10 skizzierte *Schachtel-Winkel-Konzept*, das quasi eine Erweiterung des Winkel-Mundstück-Konzeptes darstellt. Bei diesem Konzept werden anstelle einer Kabelführung für jede Faltrichtung jeweils zwei ineinander geschachtelte Kabelführungen eingesetzt. Die geschachtelten Kabelführungen verfügen am Mundstück über unterschiedliche Winkel, z. B. 30 ° und 45 °. Jede der geschachtelten Kabelführungen verfügt über einen eigenen Pneumatikzylinder, um einzeln aus- und eingefahren werden zu können. Die beiden Federstahlrippen zum Andrücken des Kabels auf die Oberfläche des Türmoduls werden gemäß Bild 4.10 zwischen den geschachtelten U-Profilen eingefügt.

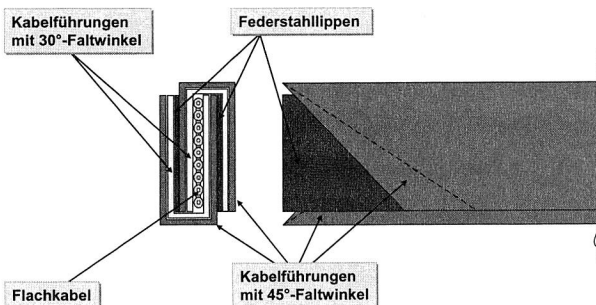


Bild 4.10: Schachtel-Winkel-Konzept mit je zwei Faltwinkeln pro Kabelführung

Bei der Realisierung der Kabelführungs-Schachtelung ist es erforderlich, dass die komplizierter zu faltenden kleinen Winkel im geschachtelten U-Profil weiter innen liegen und die Kabelführungen mit den leichter zu realisierenden großen Faltebenen weiter außen liegen. Dies ist deswegen von Bedeutung, weil das Flachkabel bei einer zum Falten vorgeschobenen Kabelführung innerhalb des U-Profils einen um die Profildicke größeren Spielraum hat. Da dieser Spielraum zur Gewährleistung einer hohen Positioniergenauigkeit möglichst gering gehalten werden soll und das Verlegewerkzeug beim Verlegen des Flachkabels wenig Platz in Anspruch nehmen darf, muss die U-Profildicke an die für die Kabelfaltung notwendige Krafteinleitung angepasst werden. Dabei spielen insbesondere die Geometrie sowie die Art des Ader- und Isolationswerkstoffs des Flachkabels eine Rolle, da diese Größen einen direkten Einfluss auf die zum Falten des Kabels benötigten Kräfte haben und die Festigkeit der Kabelführungen begrenzt ist. Die Festigkeit und Dicke der U-Profile der Kabelführungen muss aufgrund des engen Bau- raums genauer auf das Flachkabel abgestimmt sein als bei einem Werkzeugkonzept ohne Schachtelung. Das Schachtel-Winkel-Konzept bietet hinsichtlich der Faltung der Flachkabel eine erhöhte Flexibilität, da bei einer Verlegeoperation unterschiedliche Faltebenen realisierbar sind. Außerdem ist es dadurch möglich, Nebenzeiten, die zum Beispiel bei einem Werkzeugwechsel anfallen, einzusparen. Diese Vorteile gehen allerdings mit einer deutlichen Erhöhung der Komplexität des Werkzeugaufbaus einher.

#### 4.4.3 Zwei-Winkel-Mundstück-Konzept

Auch bei der zweiten Alternative, dem in Bild 4.11 skizzierten *Zwei-Winkel-Mundstück-Konzept*, handelt es sich um eine Abwandlung des Winkel-Mundstück-Konzepts. Das Mundstück der Kabelführungen ist hierbei durch zwei unterschiedliche, direkt hintereinander liegende Winkel gekennzeichnet.

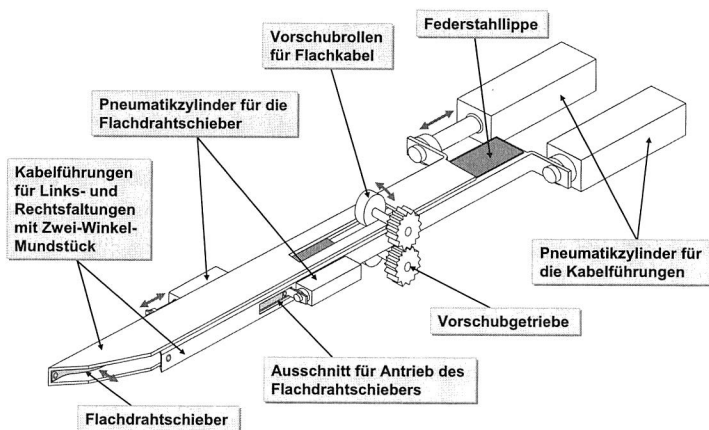
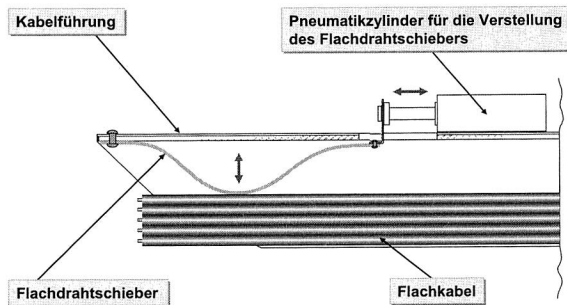


Bild 4.11: Zwei-Winkel-Mundstück-Konzept mit Flachdrahtschiebern zur seitlichen Positionierung des Flachkabels in den Kabelführungsschienen

Von der Kabelführungsspitze aus gesehen wird zunächst der größere Winkel bis zur Hälfte der U-Profilbreite gezogen und darüber hinaus der kleinere faltwinkel in die Kabelführung integriert. Dabei sind die beiden U-förmigen Kabelführungen wiederum so ineinander gelegt, dass das Flachkabel je nach axialer Verschiebung der Profile nach links oder nach rechts gefaltet werden kann. Diese axiale Verschiebung der Profile wird ebenfalls mit Hilfe von Pneumatikzylindern realisiert.

Auch der Vorschub des Kabels erfolgt wieder mit Hilfe von Vorschubrollen, die durch Kabelführungsnuten hindurch auf das Flachkabel zugreifen. Im Unterschied zum Winkel-Mundstück-Konzept, sind die Kabelführungen allerdings deutlich breiter ausgelegt. Zwischen den beiden U-Profilen liegen Federstahlrippen zum Anpressen des Kabels auf den Untergrund, die ebenfalls wieder durch zwei Pneumatikzylinder aus- und eingefahren werden können.



**Bild 4.12:** *Schnittdarstellung einer Kabelführung mit integriertem Flachdrahtschieber zur Kabel-Positionierung*

Im Gegensatz zum Winkel-Mundstück-Konzept sind am Ende der Kabelführungen jeweils am Boden des U-Profils flexible Flachdrähte angebracht, deren Breite der Höhe des Kabelschachtes entspricht. Sie sind an ihrem anderen Ende jeweils mit einem Pneumatikzylinder verbunden, der über einen Ausschnitt im Boden des U-Profils in den Kabelschacht hineingreift. Durch Betätigung des Pneumatikzylinders wird der Flachdrahtschieber gestaucht und bildet einen Knick, der das Flachkabel zur anderen Seite des Kabelschachtes hin verschiebt, Bild 4.12. Je nach dem, welcher Flachdrahtschieber aktiviert wird, kann das Flachkabel in der Kabelführung positioniert und an deren Mundstück im vordefinierten Winkel gefaltet werden.

Ein Vorteil dieses Konzeptes ist die wiederum erhöhte Flexibilität in Bezug auf die Realisierung unterschiedlicher faltwinkel mit einem Verlegewerkzeug. Auf diese Weise kann das Flachkabel bei dessen Verlegung mit beiden vordefinierten Winkeln gefaltet werden. Auch durch dieses Konzept lassen sich Nebenzeiten, die zum Beispiel bei einem Werkzeugwechsel anfallen, einzusparen. Zudem besteht durch den breiteren Kabelschacht auch eine geringfügig größere Variantenflexibilität hinsichtlich der Flachkabelbreite.

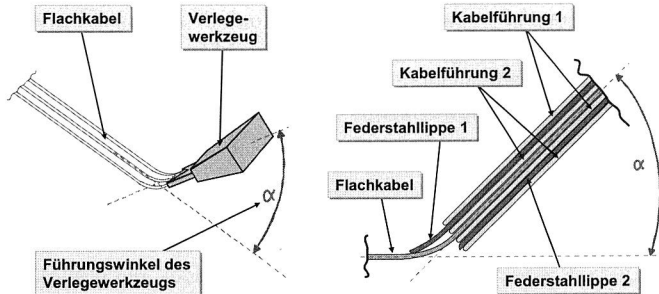
Ein Nachteil dieser Lösung ist die verhältnismäßig unpräzise Positionierung des Flachkabels unter seitlicher Belastung, da über die flexiblen Flachdrahtschieber nur eine begrenzte Seitenführungskraft aufgebracht werden kann. Um den Faltwinkel möglichst genau zu realisieren, sollte darüber hinaus die Breite des Flachkabels ungefähr der halben Breite der Kabelführung entsprechen, wodurch die Baugröße der Kabelführungen deutlich erhöht wird, Bild 4.11.

Zudem führt die konstruktive Einbindung der Pneumatikzylinder für die Flachdrahtschieber zu einer weiteren Vergrößerung der Geometrie des Gesamtwerkzeugs, wodurch sich auch die Mindestlänge der zu verlegenden Flachkabel erhöhen kann. Diese Mindestlänge ist durch den Abstand zwischen Kabelführungsmundstück und Vorschubrollen festgelegt, da zu kurze Kabel unter Verwendung des in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Grundprinzips der externen Materialbereitstellung auf dem Transportweg zwischen der Materialbereitstellungseinheit und dem Türmodul aus dem Kabelführungsschacht herausfallen können. Insgesamt ist festzustellen, dass das Zwei-Winkel-Mundstück-Konzept ebenfalls zu einer deutlichen Erhöhung der Komplexität des Werkzeugaufbaus führt.

#### 4.4.4 Prototypische Realisierung des Winkel-Mundstück-Konzeptes

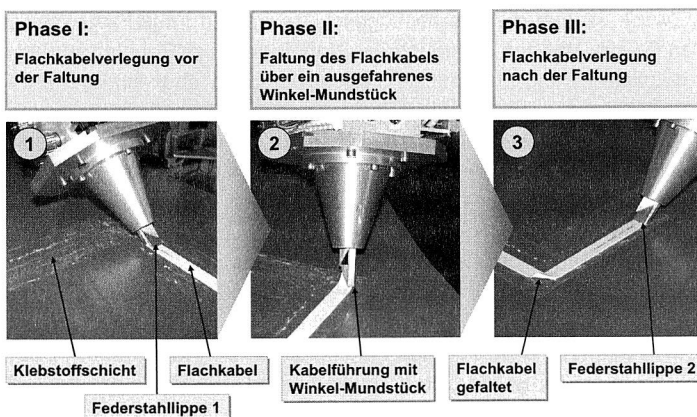
Bei der Auswahl eines geeigneten Konzeptes für das Verlegewerkzeug, wird ein besonderer Schwerpunkt auf eine hohe Verfügbarkeit gelegt, da diese gerade für eine vollautomatisierte Fertigung und Montage von Pkw-Türmodulen von Bedeutung ist. Im Sinne der Realisierung eines Werkzeugkonzeptes mit möglichst geringen Investitionskosten, wird zudem Wert auf eine geringe technische Komplexität gelegt. Diese Anforderungen werden insbesondere von dem in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Winkel-Mundstück-Konzept erfüllt, das demzufolge für die Realisierung eines ersten prototypischen Verlegewerkzeugs ausgewählt wurde. Bei der Umsetzung des Werkzeugkonzeptes muss dessen Funktionsumfang zunächst genau definiert werden.

Zu diesem Zweck werden die Bearbeitungsschritte während des Prozesses der Kabelverlegung analysiert. Vor der Verlegung des Kabels wird der Roboter an das mit einem Kabel von definierter Länge beschickte Verlegewerkzeug über ein Greiferwechselsystem der Firma Schunk angekoppelt. Mit der automatischen Aufnahme des Verlegewerkzeugs durch den Roboter beginnt der Verlegeprozess des Flachkabels. Während der Kabelverlegung wird das Werkzeug in einem bestimmten *Führungswinkel* zur Türmoduloberfläche gehalten, Bild 4.13. Um das Kabel auf die zum Beispiel mit Klebstoff versehene Oberfläche zu drücken, wird die jeweils oben liegende *Federstahllippe* ausgefahren. Das Flachkabel rutscht bei der Verlegung durch den aus der Zusammensetzung der beiden U-förmigen Kabelführungen entstehenden Kabelschacht und verlässt das Werkzeug knapp über der Türmoduloberfläche. Je geringer der Führungswinkel dabei ist, desto genauer lässt sich das Flachkabel seitlich führen. Je größer der Führungswinkel, desto größer ist die Gefahr, dass die Federstahllippe auf der Isolation entlang schabt und diese dabei beschädigt.



**Bild 4.13:** Führung des Flachkabels während dessen Verlegung auf dem Türmodul

Die mit Hilfe von Pneumatikzylindern in axialer Richtung verschiebbaren Kabelführungen sind am Kabelauslass mit einem Winkel von  $45^\circ$  abgeschnitten. Zwischen den beiden zusammengesetzten U-Profilen liegt, wie in Bild 4.13 dargestellt, oberhalb und unterhalb des Kabelschachtes jeweils eine Federstahlippe. Sowohl die U-Profile als auch die Federstahlippe besitzen eine geringe Materialdicke von maximal einem Millimeter. Bei der Materialauswahl muss deshalb darauf geachtet werden, dass die eingesetzten Materialien deutlich fester sind als das mit beispielsweise 0,6 mm nicht wesentlich dünnere Flachkabel, da die Werkzeugkomponenten sonst den mechanischen Beanspruchungen während des Verlegeprozesses nicht gewachsen sein könnten. Das Kabel sollte während des Verlegeprozesses vor fett- oder ölhaltigen Substanzen geschützt werden, da sonst eine Befestigung auf dem Untergrund zum Beispiel mit Hilfe eines, in Bild 4.14 dargestellten, doppelseitigen, transparenten Klebebandes erschwert wird. Aus diesem Grund wurden die Komponenten des Verlegewerkzeugs, die mit dem Flachkabel unmittelbar in Kontakt kommen, auf eine Trockenschmierung hin ausgelegt. Die Kabelführungen wurden aus Messing gefertigt, da dieses Material gegenüber Stahl gute Gleiteigenschaften aufweist.



**Bild 4.14:** Faltprozess für flexible Flachkabel in drei Phasen



Die Verlegung und Faltung des Flachkabels lässt sich in drei Schritten darstellen. Zunächst wird die geradlinige Vorschubbewegung des Verlegewerkzeugs gestoppt und die zum Anpressen des Flachkabels auf den Untergrund ausgefahrne Federstahlhilfe eingezogen, Bild 4.14. Anschließend vollzieht das Werkzeug eine kurze Rückwärtsbewegung, um der für die jeweilige Faltrichtung passenden Kabelführung beim Ausfahren Platz zu machen. Nun wird das Verlegewerkzeug vom 6-Achs-Roboter so bewegt, dass das Flachkabel über die abgewinkelte Kante des Kabelführungsmundes gefaltet wird. Sobald der Faltvorgang abgeschlossen ist, wird die ausgefahrne Kabelführung wieder eingezogen und die nun oben liegende Federstahlhilfe ausgefahren. Die Verlegung des Flachkabels wird mit einer geradlinigen Vorschubbewegung fortgesetzt.

## 4.5 Rollen-Mundstück-Konzepte

### 4.5.1 Teleskoprollen-Konzept

Bei den bislang entwickelten Winkel-Mundstück-Konzepten werden jeweils zwei unterschiedliche Einheiten für das Falten und das Anpressen des Flachkabels eingesetzt. Aufgrund der bereits erwähnten Gefahr einer Beschädigung der dünnen Flachkabelisolation durch die Federlippen vor allem bei großen Führungswinkeln, wie sie zum Beispiel in Senken des Türmoduls auftreten, musste hierfür eine Alternative entwickelt werden. Das in Bild 4.15 dargestellte Teleskoprollen-Konzept besitzt für diese Funktion zwei Rollen zwischen denen das Flachkabel hindurch geführt und außerdem auf das Pkw-Türmodul gepresst werden kann. Diese Rollen sind über ein bewegliches Stangensystem, das in den Werkzeugkopf eingebettet ist, mit der Steuerungsmechanik verbunden. Die in Bild 4.15 dargestellten Drehschieber verfügen jeweils über eine einseitige Außenverzahnung. Mit Hilfe eines Schrittmotors werden sie in die gewünschte Position gebracht.

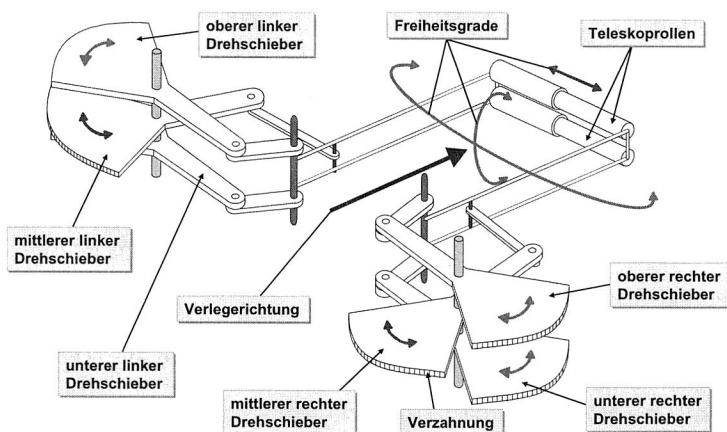


Bild 4.15: Prinzipschaubild des Teleskoprollen-Konzeptes zur Integration von Anpress- und Faltfunktion

Beim Drehen der oberen Drehschieber bewegt sich die obere Teleskoprolle in Abhängigkeit von der Drehrichtung nach vorn oder hinten. Dies gilt ebenso für die untere Teleskoprolle, wenn die unteren Drehschieber bewegt werden. Werden die Drehschieber auf der rechten Seite in eine und die Drehschieber auf der linken Seite in die andere Richtung gedreht, können beide Teleskoprollen in einen bestimmten Winkel zur Verlegerichtung positioniert werden. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn das Kabel in einem definierten Winkel zur Verlegerichtung gefaltet werden muss.

Auch hier lässt sich die Verlegung und Faltung des Flachkabels in drei Schritten darstellen. Während der geradlinigen Verlegung von Flachkabel wird die obere Teleskoprolle durch die beiden oben liegenden Drehschieber nach vorn geschoben. Das Kabel läuft zwischen den Teleskoprollen hindurch und wird über die ausgefahrene Rolle auf die Oberfläche des Türmoduls gedrückt. In der zweiten Phase wird das Verlegewerkzeug für eine 90 °-Faltung des Kabels um 45 ° zum Falteninneren gedreht. Gleichzeitig werden die Rollen mit Hilfe der Drehschieber auf einer Seite nach außen gedrückt und auf der anderen Seite nach innen gezogen, so dass sie in einem Winkel von 45 ° zur bisherigen Verlegerichtung und parallel zur Moduloberfläche liegen. Dabei verlängern sich die Teleskoprollen. Nun wird das Werkzeug erneut um 45 ° gedreht, allerdings diesmal auf der Außenseite der Falte. Die Rollen werden über die Drehschieber wieder so angeordnet, dass die vormals unten liegende Rolle oben liegt und zum Anpressen des Kabels etwas weiter ausgefahren ist. Die Verlegung des Flachkabels kann nun mit einer geradlinigen Vorschubbewegung fortgesetzt werden.

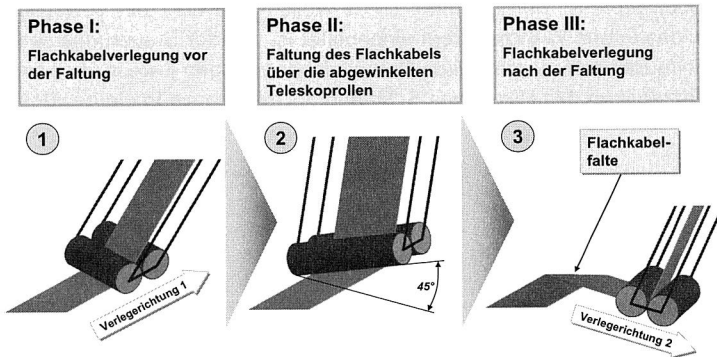


Bild 4.16: Teleskoprollenverfahren zur Flachkabelverlegung in drei Phasen

Mit diesem Konzept ist es möglich, die Funktionen Anpressen des Kabels und Falten des Kabels in ein flexibles System zu integrieren. Durch die kugelgelagerten Teleskoprollen können zudem sehr leicht Flachkabel in Senken verlegt und dabei angepresst werden, ohne die Gefahr einer Beschädigung der Isolation. Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes ist die Möglichkeit, dass die Flachkabelbreite mit Hilfe der mittleren Drehschieber stufenlos verändert und dabei die seitliche Positionierung des Flachkabels auf dem Türmodul in engen Toleranzen gehalten werden kann.

Ein Nachteil dieses Konzeptes ist der verhältnismäßig filigrane Aufbau der mechanischen Komponenten. Besonders das Stangensystem zur Positionierung der Teleskoprollen dürfte auf äußere mechanische Störeinflüsse sehr empfindlich reagieren. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die Verfügbarkeit dieses Verlegewerkzeugs eingeschränkt ist.

#### 4.5.2 Klemm-Rollen-Konzept

Das Klemm-Rollen-Konzept stellt eine deutlich robustere Variante eines Rollen-Mundstück-Konzeptes dar. Dabei wird das Flachkabel zwischen zwei massiven Rollengabeln geführt, Bild 4.17. Der Vorschub des Kabels erfolgt, wie schon beim Winkel-Mundstück-Konzept über Vorschubrollen, die mittels drehzahlgesteuertem Motor angetrieben werden. Mit Hilfe der Rollengabeln kann das Flachkabel sowohl auf die Türmodul-Oberfläche, zum Beispiel in ein dort vorher aufgebrachtes Klebstoffdepot, gepresst, als auch unter Festklemmen des Kabels zwischen den beiden Rollen gefaltet werden. Somit können auch bei diesem Konzept die Funktionen Anpressen des Kabels und Falten des Kabels in einem System integriert werden.

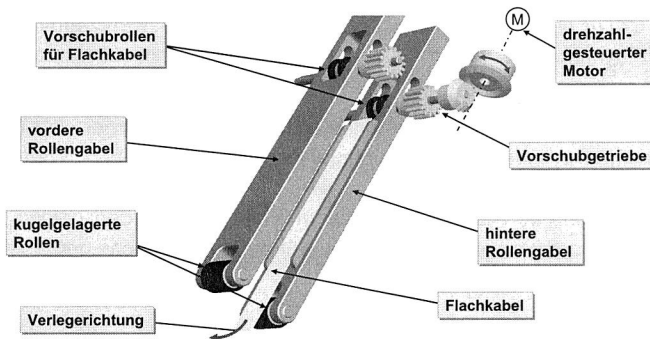


Bild 4.17: Prinzipdarstellung des Gabelsystems beim Klemm-Rollen-Konzept

Durch die feste Verankerung der kugelgelagerten Rollen in den Gabelspitzen, können diese nicht, wie beispielsweise beim Teleskoprollen-Konzept, während des seitlichen Kippens des Werkzeugs parallel zur Moduloberfläche gehalten werden. Aus diesem Grund ist eine Anpassung des Faltprozesses an die neue Geometrie erforderlich. Im Folgenden wird die prototypische Umsetzung dieses Konzeptes eingehender erläutert und dabei ein entsprechend angepasster Faltprozess beschrieben.

#### 4.5.3 Prototypische Realisierung des Klemm-Rollen-Konzeptes

Für die Umsetzung des Klemm-Rollen-Konzeptes wurde ein zweites prototypisches Verlegewerkzeug aufgebaut. Bild 4.18 zeigt den CAD-Entwurf dieses Werkzeugs mit seinen wichtigsten Bestandteilen. Dabei wurde das in Bild 4.17 dargestellte Prinzip vollständig in das Verlegesystem integriert. Die Funktion des Fixierens des Kabel auf der

Türmodul-Oberfläche, die in Kapitel 6 eingehender betrachtet wird, wurde hier bereits durch Klebstoff-Auftragsköpfe konzeptionell ergänzt.

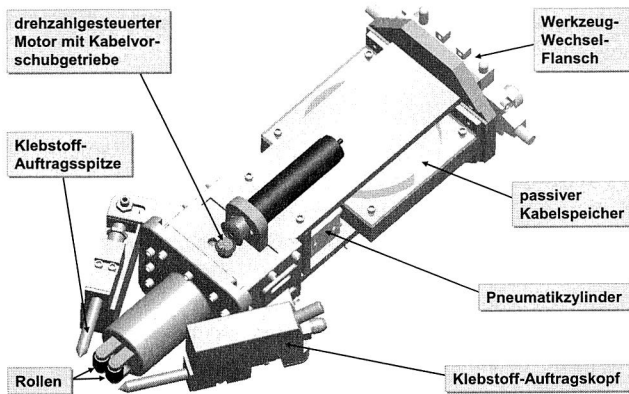


Bild 4.18: CAD-Entwurf des zweiten prototypischen Verlegewerkzeugs für flexible Flachkabel basierend auf dem Klemm-Rollen-Konzept

Das Falten des Flachkabels erfolgt unter Einsatz der beiden massiven Rollengabeln, die am Kopf des Verlegewerkzeugs parallel zueinander angeordnet sind und mit Hilfe von zwei Pneumatikzylindern aus- und eingefahren werden können. Während der geradlinigen Verlegung des Kabels ist die vordere Gabel im Werkzeug versenkt und die hintere Gabel ausgefahren. Das Kabel bewegt sich zwischen den beiden Rollen hindurch und wird von der hinteren Gabel auf die Türmodul-Oberfläche gepresst, Bild 4.19.

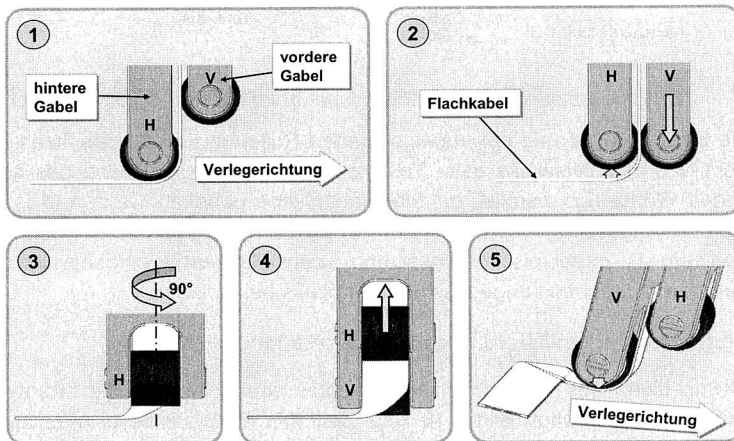


Bild 4.19: Prozessschritte zum Falten des Flachkabels beim Klemm-Rollen-Konzept

Zur Einleitung des Faltprozesses wird das Werkzeug leicht angehoben und gleichzeitig die vordere Gabel ausgefahren. Die Geometrie des Werkzeugs ist so ausgelegt, dass bei diesem Vorgang das Flachkabel zwischen den beiden Rollen eingeklemmt ist. Nach der Fixierung des Flachkabels wird das Verlegewerkzeug senkrecht zur Oberfläche in einem bestimmten Winkel, z. B. um 90°, gedreht und das Kabel dabei gefaltet. Anschließend wird die ehemals hintere Gabel angehoben, das Werkzeug wieder abgesenkt und dadurch das Flachkabel mit der ehemals vorderen Gabel zur weiteren Verlegung auf die Türmodul-Oberfläche gedrückt. Die Montage des Kabels kann nun geradlinig in der neuen Verlegerichtung erfolgen.

Wie sich in verschiedenen Verlegeversuchen mit diesem Werkzeug gezeigt hat, eignet sich dieses Faltprinzip in erster Linie für schmale Flachkabel. Dadurch, dass für die Faltung des Kabels keine angepasste Geometrie im Werkzeug vorgesehen ist, bildet sich entlang der Faltkante eine kegelförmige Aufweitung der Falte, Bild 4.19. Diese Aufweitung fällt umso größer aus, je breiter das Flachkabel ist und kann bei einem 50 mm breiten Kabel bereits eine Höhe von bis zu 10 mm erreichen. Zudem erfährt das Kabel beim Drehen des Werkzeugs senkrecht zur Türmodul-Oberfläche keine reine Biegebelastung, sondern eine zusätzliche Zugbelastung. Diese Belastungsart, die auf der Außenseite der kegelförmigen Aufweitung intensiv wirkt, kann zu einer Reduzierung der Querschnittsfläche und damit auch der Strombelastbarkeit der Flachleiter führen.

## 4.6 Zusammenführung von Winkel- und Rollenkonzepten

### 4.6.1 Realisierung von Flachkabelführung und -Faltung

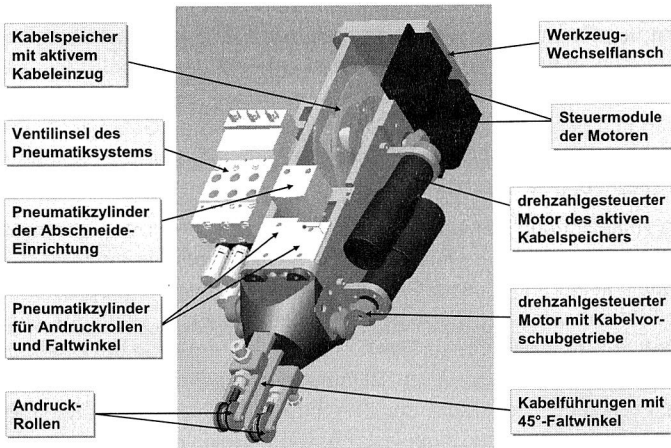
Die Zusammenführung der in Kapitel 4.4 und 4.5 beschriebenen und prototypisch umgesetzten Konzepte zielt auf die Entwicklung eines optimierten Werkzeugkonzeptes für die Montage von flexiblen Flachkabeln auf Pkw-Türmodulen und dessen Umsetzung in einem dritten prototypischen Verlegewerkzeug.

Werkzeuggeneration	Funktionsträger		
	1. Prototyp: Winkel-Mundstück-Konzept	2. Prototyp: Klemm-Rollen-Konzept	3. Prototyp: Winkel-Rollen-Konzept
Anpressen des Flachkabels an die Türmodul-Oberfläche	Federlippe	Rolle	Rolle
Falten des Flachkabels	Kabelführung mit Winkel-Mundstück	Rolle	Kabelführung mit Winkel-Mundstück

Tabelle 4.2: Funktionsträger des Flachkabel-Montageprozesses

In Tabelle 4.2 sind die, für die beiden wichtigsten Funktionen des Werkzeugkopfes, verwendeten Funktionsträger gegenübergestellt. Für eine zuverlässige Faltung der Flachkabel hat sich das Winkel-Mundstück-Prinzip in verschiedenen Praxisversuchen

bewährt. Aus diesem Grund wird die Kabelführung mit Winkel-Mundstück für diese Funktion im dritten prototypischen Aufbau wieder eingesetzt.



*Bild 4.20: CAD-Entwurf des dritten prototypischen Verlegewerkzeugs nach dem Winkel-Rollen-Konzept*

Zum Anpressen des Flachkabels auf die Türmodul-Oberfläche eignet sich die Federlippe aufgrund der Gefahr einer Beschädigung der Isolation nicht. Zur Realisierung dieser Funktion im dritten prototypischen Verlegewerkzeug kommt daher ein Rollensystem zum Einsatz. In Bild 4.20 ist zunächst ein CAD-Entwurf des aus diesen Vorgaben entwickelten Verlegewerkzeugs nach dem integrierten *Winkel-Rollen-Konzept* dargestellt. Bei der Verlegung der Flachkabel gleiten diese durch den Kabelführungsschacht hindurch und werden mit Hilfe der jeweiligen, pneumatisch ausgefahrenen Andruckrolle auf die Türmodul-Oberfläche gepresst.

Neben dem neu entwickelten Werkzeugkopf wurden bei diesem Prototyp der bereits in Kapitel 4.2.3 beschriebene Kabelspeicher mit aktivem Kabeleinzug sowie eine dazu gehörige Abschnideeinrichtung nach dem Prinzip einer Tafelschere in das Werkzeugkonzept aufgenommen. Zudem wurden zwei drehzahlgesteuerte Motoren appliziert, eine Antriebseinheit für den Kabelvorschub und einen Motor für den Antrieb des Kabelspeichers mit aktivem Kabeleinzug.

#### 4.6.2 Auslegung des Vorschubantriebs im Verlegewerkzeug

Nach erfolgter Montage des Kabels wird das Verlegewerkzeug durch die Materialbereitstellungseinheit mit neuem Flachkabel beschickt. Aufgrund der im Kabelschacht und im Kabelspeicher des Verlegewerkzeugs auftretenden Reibungskräfte, muss dessen Beschickung sowie die Verlegung des Flachkabels durch einen werkzeuginternen Vorschub unterstützt werden.

Der Vorschub des Flachkabels wird gemäß dem in Bild 4.9 skizzierten Prinzip mit Hilfe eines drehzahlgesteuerten Gleichstrommotors mit Planetengetriebe realisiert, der wiederum über ein Kegelradgetriebe die Vorschubrollen antreibt. Es wird, wie bereits bei der Auslegung des Vorschubantriebs im Beschicksystem, davon ausgegangen, dass die für den Kabelvorschub und die Überwindung der Reibungskräfte im Verlegewerkzeug benötigte Kraft einen Wert von 25 N nicht überschreitet.

Zur Auswahl einer geeigneten Motor-Getriebe-Kombination, wird auch hier eine Überschlagsrechnung vorgenommen, bei der die benötigte Leistung des Motors bestimmt wird. Die Entwicklung des Prototypen für die Flachkabelverlegung wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der Bayerischen Forschungstiftung durchgeführt. In Zusammenarbeit mit potenziellen industriellen Anwendern wurde dabei als Prozessanforderung eine Verlegegeschwindigkeit von  $250 \text{ mm/s}$  festgelegt. Aufgrund der bereits in Kapitel 4.2.3 definierten, möglichst schnellen Beschickung des Verlegewerkzeugs durch die Materialbereitstellungseinheit ist jedoch auch hier eine Festlegung der maximalen Vorschubgeschwindigkeit auf  $500 \text{ mm/s}$  erforderlich.

*Vorgegebene Werte:*

- Vorschubgeschwindigkeit:  $v_v = 500 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
- Vorschubrollen-Radius:  $r_w = 10 \text{ mm}$
- Ermittelte Vorschubkraft:  $F_v = 25 \text{ N}$

*Berechnung der Motorleistung im Werkzeug:*

- Drehzahl der Rollen:  $n_w = \frac{v_v}{2 \cdot r_w \cdot \pi} = 7,96 \frac{1}{\text{s}} = 477,46 \frac{1}{\text{min}}$  (4.11)

- Vorschubmoment:  $M_w = F_v \cdot r_w = 250 \text{ mNm}$  (4.12)

- Erforderliche Vorschubleistung:  $P_{\text{mech},w} = \frac{\pi}{30} \cdot M_w \cdot n_w = 12,50 \text{ W}$  (4.13)

Bei der Motorleistung ist zu berücksichtigen, dass beispielsweise beim Anfahren des Motors kurzfristig auch höhere Leistungen nötig sein können. Außerdem ist wiederum der Einsatz eines Getriebes erforderlich, um das berechnete Vorschubmoment zu liefern. Für den Vorschubantrieb wird ein bürstenloser Servomotor aus der Serie 3564 B ausgewählt. Als Nennspannung werden 24 V verwendet, da diese bereits durch eine Speicherprogrammierbare Steuerung in der Montagezelle und über die Ausgänge der Robotersteuerung angeboten wird. Der Antriebsmotor besitzt eine Leerlaufdrehzahl von  $11300 \text{ min}^{-1}$ . Um die maximale Vorschubgeschwindigkeit nicht zu überschreiten, wird ein Planetengetriebe mit einer Übersetzung von 43 : 1 eingesetzt. Dieses Getriebe besitzt laut Herstellerangaben einen Wirkungsgrad von 70 %. Mit den empfohlenen Betriebsgrößen des Motors und den Vorgabegrößen des Planetengetriebes werden Vergleichsrechnungen zur maximal erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit und dem maximal übertragbaren Antriebsmoment angestellt. [81]

*Vorgegebene Werte:*

- Empfohlene Maximaldrehzahl:  $n_{e,\max} = 27000 \frac{1}{\min}$
- Empfohlenes max. Dauerdrehmoment:  $M_{e,\max} = 44 \text{ mNm}$
- Übersetzungsverhältnis des Getriebes:  $\dot{U} = 43/1$
- Wirkungsgrad des Getriebes:  $\eta = 70 \%$

*Berechnung der maximalen Vorschubgeschwindigkeit:*

- Vorschublänge pro Umdrehung:  $l_w = 2 \cdot r_w \cdot \pi = 62,83 \text{ mm}$  (4.14)

- Drehzahl der Rollen im Werkzeug:  $n_{w,\max} = \frac{n_{e,\max}}{\dot{U}} = 628 \frac{1}{\min} = 10,47 \frac{1}{s}$  (4.15)

- max. Vorschubgeschwindigkeit:  $v_{w,\max} = l_w \cdot n_{w,\max} = 657,54 \frac{\text{mm}}{s}$  (4.16)

$$\text{es gilt somit: } v_v < v_{w,\max} \quad (4.17)$$

*Momentenvergleich:*

- Maximal übertragbares Antriebsmoment:  $M_{w,\max} = M_{e,\max} \cdot \dot{U} \cdot \eta$  (4.18)

$$M_{w,\max} = 1324,4 \text{ mNm} \quad (4.19)$$

$$\text{es gilt somit: } M_w < M_{w,\max} \quad (4.20)$$

Die Vergleichsrechnungen ergeben, dass die maximale Vorschubgeschwindigkeit nicht überschritten wird und dass das Vorschubmoment geringer als das maximal übertragbare Antriebsmoment ist. Die ausgewählte Motor-Getriebe-Kombination kann somit eingesetzt werden.

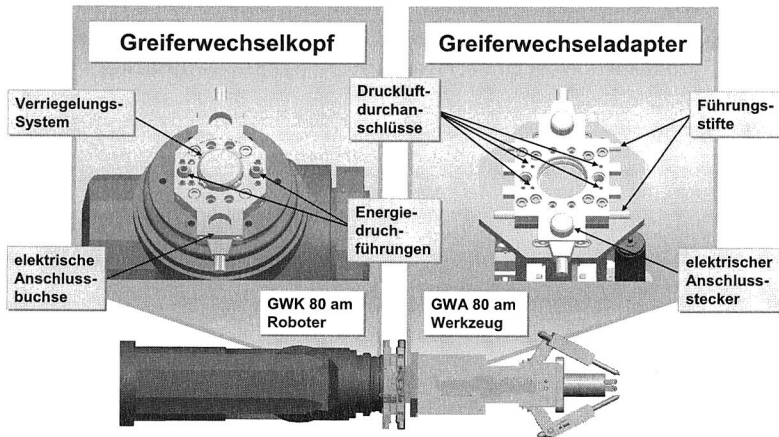
### 4.6.3 Integration eines Werkzeugwechselsystems

Der Roboter und die Verlegewerkzeuge werden jeweils mit standardisiertem Koppelungselement ausgerüstet, um, je nach Ausgestaltung der Montageprozesskette, einen schnellen und zuverlässigen Werkzeugwechsel zu gewährleisten. Als Koppelungselement wird auf der Roboterseite der Greiferwechselkopf GWK 80 der Firma Schunk eingesetzt, Bild 4.21. Auf der Werkzeugseite wird der zu diesem Greiferwechselkopf passende Greiferwechseladapter GWA 80 appliziert. Für die Versorgung des Werkzeugs mit Druckluft stehen 6 Anschlüsse mit einem Durchmesser von je 3 mm zur Verfügung. Durch diese Anschlüsse kann Druckluft mit 0,5 bis 10 bar geleitet werden. Darüber hinaus sind in das Werkzeugwechselsystem zwei so genannte Energiedurchführungen mit einem Durchmesser von je 6 mm integriert, durch die Luft, Wasser oder Öl mit einem Druck von 0,5 bis 50 bar geleitet werden können.

Für die Übertragung von elektrischer Energie können zwei 18-polige Anschlüsse mit einem Pin-Querschnitt von je 0,14 mm<sup>2</sup> genutzt werden, über die laut Herstellervorgabe bei einer Wechselspannung von 60 V jeweils maximal 1 A Strom fließen kann. Wahl-



weise können auch 3-polige bzw. 4-polige Steckverbindungen mit einem Querschnitt von 1,5 mm<sup>2</sup> bzw. 2,5 mm<sup>2</sup> und einer maximalen Stromstärke von 15 A bzw. 25 A gemäß den VDE-Richtlinien eingesetzt werden. [107]



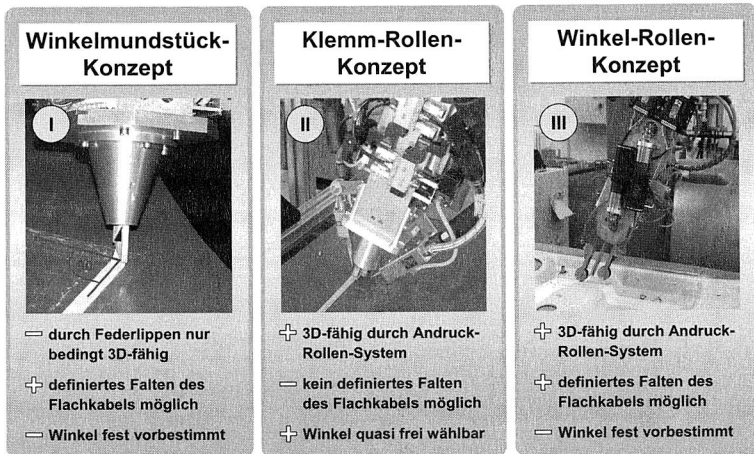
**Bild 4.21:** Greiferwechselkopf GWK 80 am Roboter und Greiferwechseladapter GWA 80 als Kopplungselement am Verlegewerkzeug

Der Greiferwechselkopf bietet durch einen integrierten Druckschalter zudem die Möglichkeit, die Verriegelung zu überwachen, wodurch die Verfügbarkeit des Werkzeugwechselsystems zusätzlich gesteigert werden kann. Das System verfügt außerdem über eine Sicherheitseinrichtung, die bei einem Energieausfall die Selbsthaltung des Systems bis zu einer Losbrechkraft von ca. 1500 N in axialer Richtung gewährleistet. Zum Entriegeln der Sicherheitseinrichtung wird ein Luftdruck von mindestens 4,5 bar benötigt.

#### 4.6.4 Vor- und Nachteile der realisierten Prototypen im Vergleich

Für den Vergleich der unterschiedlichen Werkzeugkonzepte sind vor allem die Hauptfunktionen der Flachkabelmontage, das Falten und Anpressen der Kabel auf einer dreidimensional geformten Oberfläche relevant. In Bild 4.22 werden die drei realisierten Prototypen, die sich in Größe und Gewicht kaum unterscheiden, noch einmal gegenübergestellt. Ein schneller und zuverlässiger Werkzeugwechsel wurde bei allen drei Prototypen durch das beschriebene Werkzeugwechselsystem ermöglicht. Auch die Funktion des Kabelvorschubs im Verlegewerkzeug wurde bei den drei Konzepten quasi identisch umgesetzt, indem das Flachkabel zwischen zwei Vorschubrollen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegt werden kann. Alle drei Werkzeugkonzepte bieten zudem die Möglichkeit, Flachkabel mit unterschiedlichen Geometrien zu Verlegen. Durch den modularen Aufbau der Verlegewerkzeuge können Funktionsträger, wie beispielsweise ein Kabelspeicher mit aktivem Kabeleinzug und Abschneideeinrichtung, je nach Anforderungsprofil hinzugefügt werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass

eine Erweiterung der Werkzeugfunktionen die Komplexität des Werkzeugaufbaus erhöht und sich dabei negativ auf die Zuverlässigkeit des Handhabungssystems auswirken kann.



**Bild 4.22:** Vergleich der drei prototypischen Werkzeuge für die vollautomatisierte Verlegung flexibler Flachkabel im Pkw

Die im ersten und dritten Prototyp eingesetzten Kabelführungen mit Winkel-Mundstück ermöglichen im Gegensatz zu dem, im zweiten prototypischen Verlegewerkzeug realisierten, Klemm-Rollen-Konzept ein definiertes und zuverlässiges Falten des Flachkabels. Die Vorfestlegung auf einen bestimmten Faltwinkel stellt hierbei zwar eine Einschränkung der Flexibilität dar, wäre jedoch in einer automatisierten Serienfertigung mit parallelisierten Verlegeoperationen unproblematisch, da hier ohnehin mehrere unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz kämen. Der Aufbau einer entsprechenden Montagelinie wird in Kapitel 8.1 beschrieben. Die im ersten Verlegewerkzeug umgesetzten Federlippen zum Anpressen des Kabels auf die Türmoduloberfläche sind aufgrund der bereits erläuterten Gefahr der Beschädigung des Isolationsmaterials nur sehr eingeschränkt für räumlich geformte Oberflächen nutzbar. Das im zweiten und dritten Prototyp realisierte Andruck-Rollen-System hat sich hingegen in den durchgeführten Verlegeversuchen bewährt und ist somit für eine vollautomatisierte dreidimensionale Flachkabelmontage geeignet.

## 5 Aufbau einer durchgehenden CAD/CAM-Kette zur Steuerung von Robotern und der Systemperipherie

Bei der Handhabung und Montage von flexiblen Flachkabeln auf den dreidimensional geformten Pkw-Türmodulen mittels 6-Achs-Industrierobotern handelt es sich um komplexe Bewegungsvorgänge entlang räumlicher Bahngeometrien. Diese Bewegungen müssen dem Roboter durch entsprechende Verfahrrprogramme vorgegeben werden. In diesen Programmen werden neben der reinen Roboterbewegung auch Sensorinformationen verarbeitet, Aktoren angesteuert und unter Einbindung der Roboterperipherie vielschichtige Produktionsabläufe generiert.

Die Programmierung des Roboters kann dabei *online* oder *offline* erfolgen. Bei der Online-Programmierung werden dem Roboter die verschiedenen anzufahrenden Positionen und die dazu gehörigen Bewegungsparameter schrittweise per Eingabegerät, z. B. KUKA Control Panel (KCP), vorgegeben. Neben der sehr zeitaufwändigen und durch lange Stillstandszeiten der Produktionsanlagen auch kostenintensiven Online-Programmierung werden immer häufiger Offline-Verfahren eingesetzt. [29] Für den Einsatz von Offline-Programmiersystemen ist neben einem leistungsfähigen PC mit 3D-Graphikunterstützung vor allem Expertenwissen für eine effiziente Programmerstellung notwendig. Mit Hilfe von 3D-Simulationsprogrammen werden Produktionsabläufe in einer virtuellen Welt geplant und simuliert. So können bereits in der Entwurfsphase Arrangements der Peripheriegeräte oder Bewegungsabläufe optimiert werden. Dabei unterscheidet man zwischen *impliziten* und *expliziten* Offline-Programmierverfahren.

Die explizite Programmierung erfolgt durch textuelle Erstellung des Programmcodes inklusive der Peripherieansteuerung in einem Editor. Für diese Programmiermethode ist eine genaue Kenntnis der Roboterkinematik und der Ansteuerung der Systemperipherie erforderlich. Als implizit werden Programmierverfahren bezeichnet, bei denen der Programmcode durch Compiler bzw. Postprozessoren erstellt wird, die die Simulationsdaten automatisch in ein lauffähiges Roboterprogramm umwandeln. Dabei werden die einzelnen Verfabrbewegungen zunächst in 3D-Simulationssystemen erzeugt und die Informationen anschließend an nachgeschaltete Prozessoren weitergeleitet, die daraus ein lauffähiges Roboterprogramm entwickeln. Der Aufbau dieser durchgängigen CAD/CAM-Kette ermöglicht eine Verkürzung von Rüst- und Anlaufzeiten, eine Steigerung der Variantenflexibilität sowie eine vorgeschaltete Kollisionsprüfung. [70]

Zur Erstellung der für die Flachkabelmontage notwendigen Bahngeometrien wurde die 3D-Simulationssoftware Delmia V5 eingesetzt. Die Geometriedaten des verwendeten Roboters KUKA KR 30/2 können direkt vom Hersteller bezogen und in die Simulationsumgebung eingefügt werden. Um die diversen Peripheriegeräte betreiben zu können, wurden diese in Betrieb genommen und über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und ein Feldbussystem an die reale Montagezelle angebunden. Die Montagezellen-Elemente wurden anschließend unmittelbar in der Simulationsumgebung von Delmia V5 erstellt oder aus 3D-CAD-Systemen, wie beispielsweise Pro/ENGINEER, als CATIA-V5-Datei importiert. Nach dem vollständigen Aufbau der Montagezelle wurde der

Ablauf der Flachkabelverlegung am Rechner simuliert und die Gesamtkonfiguration des Systems anhand verschiedener Montageoperationen verifiziert.

## 5.1 Strukturierung der Montagezelle für eine Simulationsumgebung

### 5.1.1 Türmodul-Demonstratoren für die Flachleitermontage

Die einzelnen Elemente eines Montagesystems für Flachkabel sowie deren Einbindung in das Simulationssystem werden im Folgenden kurz beschrieben. Dabei sind zunächst die Hauptbestandteile des in Bild 5.1 strukturiert dargestellten Montagesystems in die Simulationsumgebung zu integrieren.

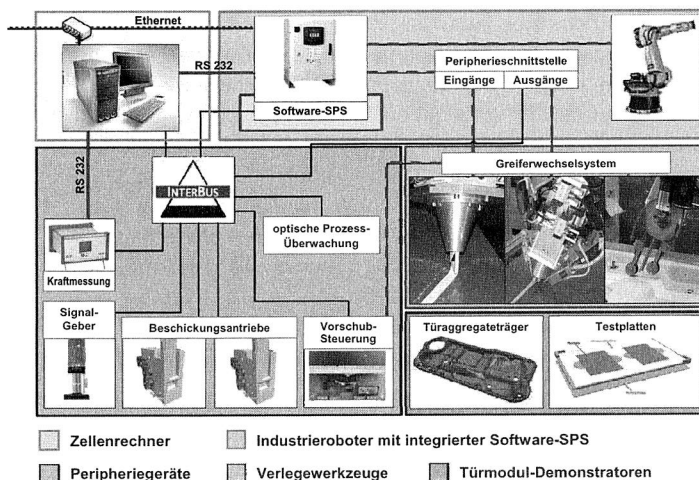


Bild 5.1: Elemente des realen Montagesystems für flexible Flachkabel

Mit Hilfe des im Labormaßstab konzipierten Montagesystems werden Flachkabel auf Türmodul-Demonstratoren verlegt, um die Einsatzfähigkeit der Werkzeugkonzepte zu verifizieren. Diese Montageuntersuchungen erfolgen in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Verlegung des Kabels mit Faltvorgängen auf einer planaren Vorrichtung durchgeführt, bei der zwei Kunststoffplatten mittels einer Metallschablone in Position gehalten werden. Auf diesen so genannten *Testplatten* werden Prozesskennwerte, die auf das Montageergebnis Einfluss haben, wie z. B. der Anpressdruck, untersucht und dabei die optimale Einstellung des Verlegeprozesses ermittelt.

Im zweiten Schritt werden diese optimalen Prozesseinstellungen auf die Montage von Flachkabeln auf räumlich geformten *Pkw-Türaggagateträgern* übertragen. Der Aggregateträger wird von einer formangepassten Halterung aufgenommen, die wiederum fest auf dem Werkstückträger verankert ist. Der im Arbeitsraum der Montagezelle eingesetzte Werkstückträger ist damit so konzipiert, dass darauf beide Türmodul-Demonstratoren aufgespannt werden können. Da diese als Konstruktionselemente bereits in elektroni-

scher Form vorliegen, können sie direkt in die Simulationsumgebung von Delmia V5 integriert werden.

### 5.1.2 Steuerungssystem für den Industrieroboter

Die Verlegewerkzeuge werden von einem 6-Achs-Knickarmroboter der Firma KUKA geführt. Der Roboter verfügt über eine Traglast von 30 kg und wird mit der Steuerung KRC1 betrieben, auf der zwei verschiedene Betriebssysteme parallel ausgeführt werden. Das Echtzeitbetriebssystem VxWorks dient dabei der Steuerung des Roboters und der Abarbeitung der Roboterprogramme über ein Basissystem. Das nicht echtzeitfähige Betriebssystem Windows 95 übernimmt die Bedienung dieses Basissystems und bildet die Schnittstelle zum Programmierer, Bild 5.2. Während des Betriebs kommunizieren die beiden Betriebssysteme über eine TCP/IP-Verbindung miteinander.

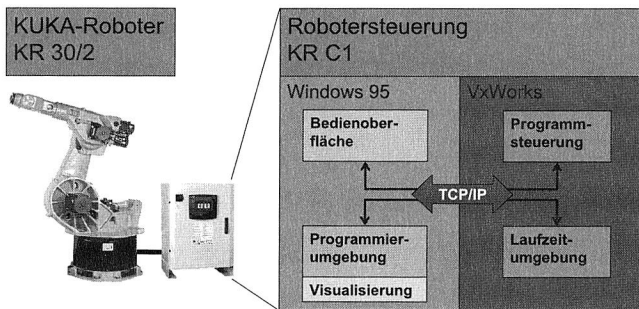


Bild 5.2: Steuerungsarchitektur der Robotersteuerung KR C1

Die Robotersteuerung ist mit dem *Peripheriestecker X11* ausgerüstet, der den direkten Empfang von Eingangssignalen sowie die Ansteuerung von RoboterAusgängen ermöglicht. Mit diesem Anschluss stehen insgesamt 16 digitale Eingänge sowie 16 digitale Ausgänge mit einer maximalen Strombelastbarkeit von 100 mA und vier Ausgänge mit 2 A zur Verfügung. [79]

### 5.1.3 Aufgaben des Montagezellenrechners

Der Montagezellenrechner, der über eine Netzwerkverbindung mit der Robotersteuerung kommuniziert, übernimmt unter anderem die Funktion einer Offline-Programmierungstation. Mit Hilfe der hier installierten CIM-Software Delmia V5 R17 können Roboterprogramme generiert und anschließend über Ethernet an die Robotersteuerung übertragen werden. Außerdem wird der Montagezellenrechner zur Konfiguration, Überwachung und Diagnose der in Kapitel 5.2 beschriebenen Geräteperipherie verwendet. Durch das ebenfalls auf dem Rechner installierte Programm *IBS-CMD* von Phoenix Contact, ist es dem Anwender möglich, direkt vom PC aus, der über eine RS232-Schnittstelle mit dem Interbusmaster verbunden ist, auf den Interbus zuzugreifen und hier Diagnosefunktionen auszuführen. Schließlich ist der Computer noch als Aufzeichnungs- und Auswertungsstation für ein Kraftmesssystem der Firma Kistler im Einsatz,

das im Programm *DynoWare* über eine spezielle Einsteckkarte und über eine serielle RS232-Schnittstelle mit den Peripheriekomponenten des Kraftmesssystems kommuniziert.

#### 5.1.4 Installation einer Software-SPS als übergeordnete Instanz

Als übergeordnete Steuerung der Montagezelle wird die Software-SPS *CoDeSys 2.0* der Firma 3S eingesetzt. Die Software-SPS besteht zum einen aus der für den Bediener sichtbaren Programmieroberfläche, die unter dem Betriebssystem Windows 95 läuft, und zum anderen aus der für den Anwender nur über die Programmieroberfläche ansprechbaren Laufzeitumgebung der Software-SPS, die die eigentlichen Steuerungsaufgaben abarbeitet und deren echtzeitfähige Betriebsumgebung von VxWorks bereitgestellt wird, Bild 5.3. Die Kommunikation zwischen der Programmierumgebung und dem Laufzeitsystem über die steuerungsinterne TCP/IP-Verbindung ist bei der Installation des Steuerungsprogramms manuell in der Datei *vxwin.ini* einzurichten.

Für die Steuerung der Roboters über die Software-SPS, wird dieser im Modus *Automatik Extern* betrieben. Die für den Programmablauf erforderlichen Informationen erhält er von CoDeSys. Dies geschieht in einer standardisierten Initialisierungssequenz mit einer Reihe von Ein- und Ausgangsvariablen, die in Anhang A aufgelistet sind. Über die Bedienoberfläche des Roboters kann jedem dieser Ein- bzw. Ausgänge eine spezifische Speicheradresse zugeordnet werden, mit Hilfe derer CoDeSys auf die, in der Systemdatei *codesys.ini* des Roboters entsprechend gemappten, Variablen zugreifen kann.

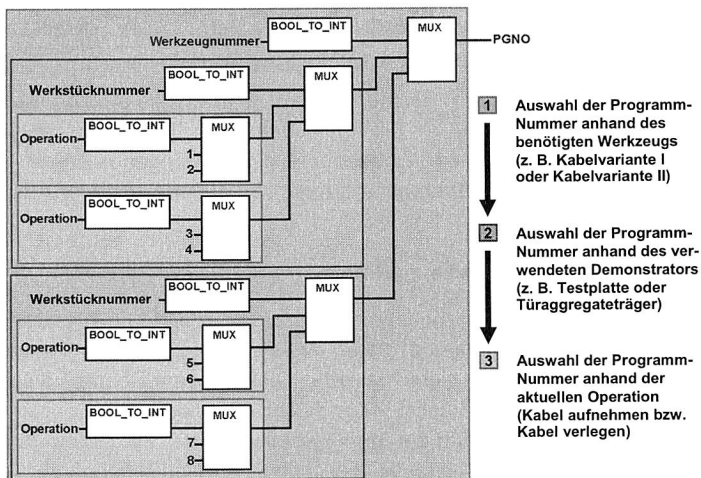


Bild 5.3: Ermittlung der Programmnummer für je zwei Verlegewerkzeuge, Werkstücke und Operationen in der Software-SPS

Zur Ausführung externer Verfahrenprogramme wird das Programm *cell.scr* auf der Robotersteuerung angewählt. Hier werden das auszuführende Verfahrenprogramm im Pro-

grammkopf mit dem Befehl *EXT PROGRAMMNAME ()* deklariert und in der CASE-Anweisung ein Programmaufruf eingetragen, der der Programmnummer entspricht, die dem Roboter vorher übergeben wurde. Welche Programmnummer während des Betriebs übergeben wird, hängt von der jeweiligen Benutzereingabe ab. Der Benutzer entscheidet dabei, welches Verlegewerkzeug zum Einsatz kommt und auf welchem Türmodul-Demonstrator das Flachkabel verlegt werden soll. Die vom Roboter durchzuführenden Verlegeoperationen bestehen aus zwei Programmteilen, dem Aufnehmen und dem Verlegen des Kabels. Um diese zu unterscheiden, wird mit der Variablen *Operation*, Bild 5.3, der aktuell auszuführende Programmteil gekennzeichnet und zusammen mit den Informationen über das Verlegewerkzeug und den Türmodul-Demonstrator durch Multiplexer die entsprechende Programmnummer (1-8) ausgewählt und der Variablen *PGNO* zugewiesen. Neben der Auswahl und Übergabe der Programmnummer an die Robotersteuerung werden von der Software-SPS auch Sensor- und Zustandsdaten der Montagezellenperipherie, deren Komponenten im Folgenden beschrieben werden, verarbeitet.

## 5.2 Anbindung der Geräteperipherie über ein Feldbussystem

### 5.2.1 Aufbau des Interbussystems

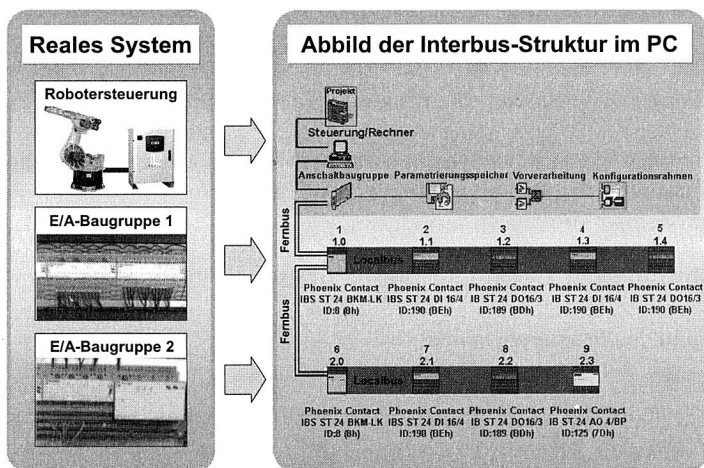
Für die Anbindung der Peripheriegeräte an das Steuerungssystem der Montagezelle wurde ein Feldbussystem der Firma Phoenix Contact, der so genannte *Interbus*, installiert. Der Interbus hat die Aufgabe, die Anzahl der, durch den Peripheriestecker X11 auf 16 Ein- bzw. 20 Ausgänge begrenzten, verfügbaren digitalen Ein-/Ausgangssignale der Robotersteuerung zu vergrößern. Darüber hinaus sollen bislang nicht vorhandene, analoge Ausgänge zur Verfügung gestellt werden, die beispielsweise für die Ansteuerung der Motoren für den Kabelvorschub im Werkzeug erforderlich sind.

Zum Aufbau der Interbusstruktur wird zunächst die Interbuskarte IBS ISA SC/RI-LK als *Anschaltbaugruppe* in die Robotersteuerung eingebaut. Sie wird dabei als Interbusmaster angeschlossen, um alle Vorgänge in der Interbusstruktur von diesem Interbusteilnehmer aus steuern und überwachen zu können, Bild 5.4. Die Anschaltbaugruppe ist über Lichtwellenleiter (LWL) mit den *Buskopplern* zweier dezentral angeordneter Ein-/Ausgangsbaugruppen verbunden. Die beiden Buskoppler verbinden den Fernbus mit dem Lokalbus, indem sie die Signale der Lichtwellenleiter im Fernbus in elektrische Signale im Lokalbus umwandeln. Die Steuerungsschnittstellen werden dadurch um 48 digitale Ein- und Ausgänge sowie vier analoge Ausgänge erweitert. Das hierbei verwendete analoge Ausgangsmodul kann an seinen vier Anschlüssen Spannungswerte im Bereich von -10 V bis +10 V liefern. [85]

Über eine serielle Direktverbindung der Robotersteuerung mit dem Montagezellenrechner kann der Anwender mit Hilfe der Software IBS-CMD das Interbussystem konfigurieren. Dabei wird der in Bild 5.4 dargestellte, reale Aufbau der Interbus-Struktur in ein Systemabbild überführt. Die einzelnen Systemkomponenten können in diesem Abbild diagnostiziert und konfiguriert werden.



Die Ein- und Ausgänge des Interbusses sind nicht direkt für die Software-SPS verfügbar. Sie müssen zunächst durch ein Mapping auf die Ein-/Ausgangsliste des Roboters „projiziert“ werden. Dazu sind in den Dateien *iosys.ini* und *codesys.ini* entsprechende Eintragungen vorzunehmen. Damit die verschiedenen Aus- und Eingänge später mit der Software-SPS gezielt angesprochen werden können, werden den Schnittstellen entsprechend der Reihenfolge, in der sie an den Interbus angeschlossen sind, Adressen automatisch zugewiesen.



**Bild 5.4:** Überführung des realen Peripherieaufbaus in ein steuerungstechnisches Abbild der Interbus-Struktur

Dabei bestimmen die ersten zwei Zeichen der Adresse, ob es sich um einen Ein- oder einen Ausgang handelt. Für Eingang lauten die Zeichen %I, für Ausgang %Q. Darauf folgt die Größe der Adresse. Ein X reserviert hierbei ein Bit, B ein Byte, W ein Wort, D ein doppeltes Wort und L ein langes Wort. Am Ende steht die durch einen Punkt getrennte, eigentliche Schnittstellen-Adresse. Jeder digitale Ein- bzw. Ausgang hat die Größe eines Bits, jeder analoge Ausgang, die eines doppelten Wortes (2 Byte). Die vollständige Adresszuordnung des Interbus der Montagezelle befindet sich im Anhang B.

### 5.2.2 Ansteuerung der Motoren über analoge Ausgänge

Für die Untersuchungen zur Flachkabelmontage werden die drei, in Kapitel 4 beschriebenen, prototypischen Verlegewerkzeuge eingesetzt. Außerdem kommt in den ersten Montagedurchläufen ein Testwerkzeug zum Einsatz, um die Beschädigungsgefahr an den Verlegewerkzeugen bei gegebenenfalls fehlerhafter Programmierung der Verlegeoperationen zu reduzieren. Bei den Verlegeprozessen wird das Flachkabel dem robotergeführten Werkzeug zunächst durch eine Materialbereitstellungseinheit zugeführt und anschließend auf der Oberfläche des jeweiligen Türmodul-Demonstrators verlegt.



Beim ersten prototypischen Verlegewerkzeug erfolgt die Befestigung des Kabels auf der Werkstückoberfläche durch ein doppelseitiges Klebeband, das vor dem Verlegen auf das Werkstück aufgebracht wird. Um die mit der Offline-Programmierung einher gehende Flexibilität bei der Montageprozessgestaltung in vollem Umfang nutzen zu können, muss eine variable Drehzahlsteuerung sowohl des Vorschubmotors im Werkzeug, als auch des Motors in der Materialbereitstellungseinheit realisiert werden. Dabei wird über die in der Robotersteuerung verankerte Software-SPS für jeden Motor eine definierte Sollgeschwindigkeit vorgegeben. Um eine variable Drehzahlsteuerung während des Betriebs zu ermöglichen, kommt ein Motortreiber zum Einsatz, der an den analogen Ausgang des Interbusses angeschlossen wird und selbst eine Eingangsspannung zwischen 0 V und 10 V DC verarbeiten kann. Der Motortreiber setzt diese Spannung linear in die Motorspannung um, sodass bei einer maximalen Ausgangsspannung des analogen Interbus-Ausgangs von 10 V die Nennspannung der Motoren von jeweils 24 V bei maximal 2 A Stromstärke geliefert wird. Die Richtungsumkehr wird mit Hilfe eines Relais realisiert, das über einen digitalen Ausgang des Interbusses geschaltet wird.

Die Ausgangsspannung der Motoren am Interbus wird durch die Software-SPS vorgegeben. Für jeden der vier analogen Ausgänge stehen dabei von 2 Byte bzw. 16 Bit zur Verfügung. Das letzte Bit bestimmt das Vorzeichen der Ausgangsspannung und damit die Drehrichtung des Motors. Für die Festlegung der Höhe der Spannung verbleiben demnach 15 Bit. Wird der Wert nun nicht binär codiert, sondern in Dezimalzahlen vorgegeben, ergibt sich ein Wertebereich von 0 bis  $2^{15}$  bzw. 32768. Da die Geschwindigkeit in  $\text{m/s}$  vorgegeben werden soll, muss der Wertebereich noch entsprechend umgerechnet werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die beispielsweise durch Reibung der Flachkabel in den Kabelführungen auftretenden, schwer kalkulierbaren Reibkräfte prozessbedingte Schwankungen des Drehmoments bewirken, die zu Abweichungen der geplanten von der tatsächlichen Drehzahl und damit der Vorschubgeschwindigkeit des Kabels führen.

Aus diesem Grund wird für den Vorschub in den Materialbereitstellungseinheiten und den Verlegewerkzeugen je eine Messreihe erstellt, durch die ein arithmetischer Zusammenhang aus dem vorgegebenen Dezimalwert für den Analogausgang und der tatsächlich gemessenen Vorschubgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Dabei wird zu verschiedenen dezimalen Vorgabewerten des Analogausgangs die Zeit gemessen, die benötigt wird, um ein 0,5 m langes Flachkabel durch die Materialbereitstellungseinheit zu befördern bzw. in das jeweilige Verlegewerkzeug einzuziehen und auszustoßen. Jede Messung wird fünfmal durchgeführt, um mit Hilfe der Streubreite der Werte eine qualitative Aussage über die Ergebnisse zu erhalten. Aus den Messwerten wird die Vorschubgeschwindigkeit errechnet und in ein Diagramm eingetragen. Mit einer linearen Einfachregression nach der *Methode der kleinsten Quadrate* wird eine Gerade ermittelt, die das lineare Verhältnis zwischen dem dezimalen Vorgabewert des Analogausgangs (0 - 32768) respektive des Spannungswertes am Motor und der Vorschubgeschwindigkeit darstellt. Da beim Einzug und beim Ausstoß des Kabels unterschiedliche Gegebenheiten herrschen, sind für die Verlegewerkzeuge beide Fälle getrennt zu betrachten.

Für die Ermittlung der Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit des Flachkabels in der Materialbereitstellungseinheit vom dezimalen Vorgabewert für den analogen Ausgang wird die Regressionsanalyse nach der *Methode der kleinsten Quadrate* wie folgt exemplarisch durchgeführt. [11] Zunächst sind die Regressionskoeffizienten  $b_1$  und  $b_2$  der linearen Einfachregression  $\hat{y}_i = b_1 + b_2 \cdot x_i$  so zu bestimmen, dass folgende Funktion ein Minimum annimmt:

$$SAQ(b_1, b_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.1)$$

$$= \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 - b_2 x_i)^2 \quad (5.2)$$

Voraussetzung für das Vorhandensein eines Minimums ist, dass die beiden ersten partiellen Ableitungen Null werden:

$$\frac{\partial SAQ}{\partial b_1} = \frac{\partial SAQ}{\partial b_2} = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial SAQ}{\partial b_1} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 - b_2 x_i) \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial SAQ}{\partial b_2} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i (y_i - b_1 - b_2 x_i) \quad (5.5)$$

Durch Nullsetzen der partiellen Ableitungen erhält man das folgende Normalgleichungssystem, das anschließend nach den Regressionskoeffizienten  $b_1$  und  $b_2$  aufgelöst werden kann:

$$n \cdot b_1 + b_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.6)$$

$$b_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (5.7)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5.8)$$

$$b_2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5.9)$$

Im vorliegenden Fall ergibt sich nach Berechnung der Regressionskoeffizienten die folgende Abhängigkeitsfunktion:

$$\hat{y} = 3,1973 \cdot 10^{-5} \cdot x - 0,0688. \quad (5.10)$$

Dieser arithmetische Zusammenhang ist gemeinsam mit den experimentell ermittelten Messwerten in Bild 5.5 als Gerade dargestellt. Für die vorgegebene maximale Vorschubgeschwindigkeit von  $500 \text{ mm/s}$  ergibt sich rechnerisch ein dezimaler Vorgabewert für den analogen Ausgang von 17791.

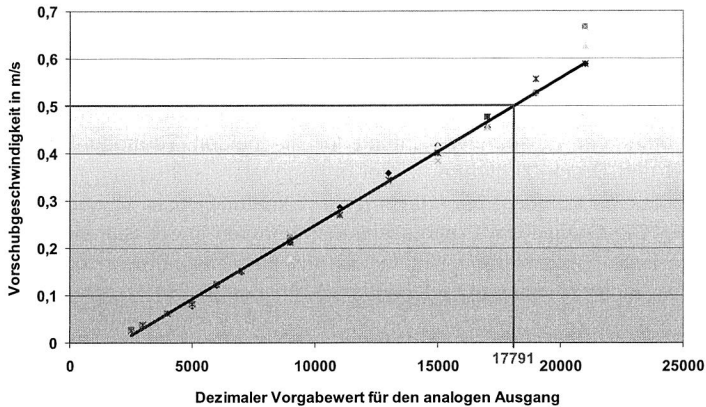


Bild 5.5: Vorschubgeschwindigkeit des Flachkabels in der Materialbereitstellungseinheit in Abhängigkeit vom dezimalen Vorgabewert des Analogausgangs

Die Abhängigkeitsfunktion  $\hat{y}$  wird umgeformt, um den dezimalen Vorgabewert für eine vom Programmierer vorgegebene Sollgeschwindigkeit *Speed* für den Vorschub des Flachkabels an den analogen Ausgang AO1 weiterzuleiten:

$$AO1 = (Speed + 0,0688) / (3,1973 \cdot 10^{-5}) \quad (5.11)$$

Die umgeformte Gleichung wird anschließend in das SPS-Programm als Funktion integriert. Dadurch können die Vorschubgeschwindigkeiten fortan softwareseitig an die Prozessgeschwindigkeit angepasst werden:

```
IF Speed=0 THEN
```

```
    IB9_AO1:=0;
```

```
ELSE
```

```
    IB9_AO1:=LREAL_TO_DWORD((Speed + 0.0688)/(0.000031973));
```

```
END_IF;
```

Dabei wird zunächst sichergestellt, dass bei einer Sollgeschwindigkeit gleich Null kein Ausgangssignal vorliegt. Unterscheidet sich der Geschwindigkeitswert von Null, wird ein Wert entsprechend der angegebenen Funktion ermittelt. Das Ergebnis, das als LREAL-Wert vorliegt, muss noch in einen DWORD-Wert umgewandelt werden, bevor es an den Analogausgang AO1 weitergegeben wird.

### 5.2.3 Kraftmesssystem zur Überwachung des Anpressdrucks

Zur Überwachung der Kabel-Verlegeprozesse wurde ein Kraftmesssystem der Firma Kistler in der Montagezelle installiert. Es soll den Anpressdruck des Flachkabels während der Verlegung auf dem Türmodul-Demonstrator messen und bei einer Über- bzw. Unterschreitung der Grenzwerte eine Rückmeldung geben. Diese Messung ist vor allem bei dem in Kapitel 6.3 erläuterten Einsatz von Klebstoffen zur Fixierung des Flachkabels auf dem Türmodul-Demonstrator von Bedeutung.

Das Kraftmesssystem besteht aus vier 3-Komponenten-Kraftmesselementen des Typs 9347B, die unter der Einspannvorrichtung für die beiden Türmodul-Demonstratoren montiert sind und Druck-/Zugkräfte in drei orthogonalen Richtungen messen können, Bild 5.6. Ihr Messbereich liegt bei -10 kN bis +10 kN für  $F_x$  bzw.  $F_y$  und bei -20 kN bis +20 kN für  $F_z$ . Die Signale der Kraftmesselemente laufen in der Summierbox 5431 zusammen, die einen Gesamtkraftvektor für die von der Einspannvorrichtung aufgenommen Kräfte an einen Mehrkanal-Ladungsverstärker der Bauart 5070A weiterleitet, der bereits eine Darstellung und Auswertung der einzelnen Kräfte ermöglicht. Zur weiteren Analyse der Messergebnisse, wird der Ladungsverstärker mit dem Montagezellenrechner verbunden, auf dem die Software DynoWare zur Datenerfassung und -auswertung installiert ist. Die Kommunikation erfolgt sowohl über eine RS232-Schnittstelle, durch die der Ladungsverstärker ferngesteuert werden kann, als auch über ein spezielles Anschlusskabel der Firma Kistler, durch das die Messwerte zum Montagezellenrechner übertragen werden.

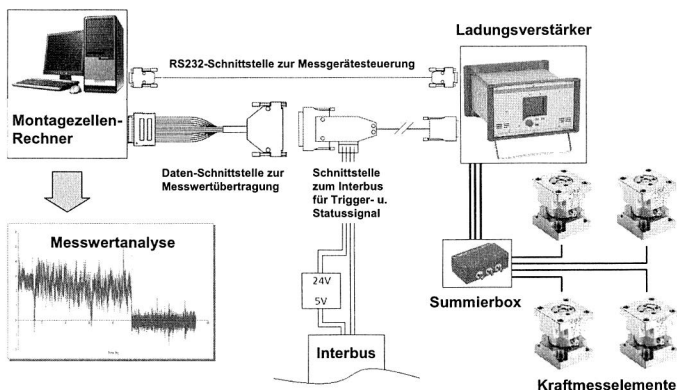


Bild 5.6: Aufbau des Systems zur Messung der Anpresskraft bei der Verlegung des Flachkabels auf dem Türmodul-Demonstrator

Dieses Anschlusskabel verfügt darüber hinaus über Klemmen für die Anbindung des Messsystems an den Interbus, durch den ein externes Startsignal (*Trigger*) für die Messung sowie ein Statussignal übermittelt werden kann, das angibt, ob die Messwerte innerhalb oder außerhalb der vorab festgesetzten Grenzwerte liegen.

Mit Hilfe der auf dem Montagezellenrechner installierten Software DynoWare können die Messwerte des Ladungsverstärkers schließlich aufgenommen und verarbeitet werden. Im so genannten Triggermodus wartet die Software auf das von der Software-SPS zu Beginn der Flachkabel-Verlegeoperation übermittelte Triggersignal und startet bei jeder steigenden Flanke des Trigger-H-Signals einen Messzyklus. Nach jeder Messung wird ein Diagramm mit den vorab ausgewählten Kraftverläufen angezeigt.

#### 5.2.4 Weitere Interbuskomponenten

Um den aktuellen Status der Montagezelle optisch anzuzeigen, wird ein Signalgeber eingesetzt, Bild 5.7. Mit der grünen Lampe wird der ordnungsgemäße Betrieb der Anlage angezeigt. Grün-rot signalisiert einen Fehler, der allerdings nicht zu einem sofortigen Stillstand führt. Der aktuelle Bearbeitungszyklus wird dann bis zum Ende durchlaufen und die Montageanlage anschließend angehalten. Brennt ausschließlich die rote Lampe, liegt ein schwerwiegendes Problem vor, das alle Vorgänge in der Zelle augenblicklich stoppt. Diese Funktion muss beispielsweise bei der Betätigung des Not-Aus-Schalters nicht nur für den Roboter, sondern auch für die Systemperipherie gewährleistet sein.

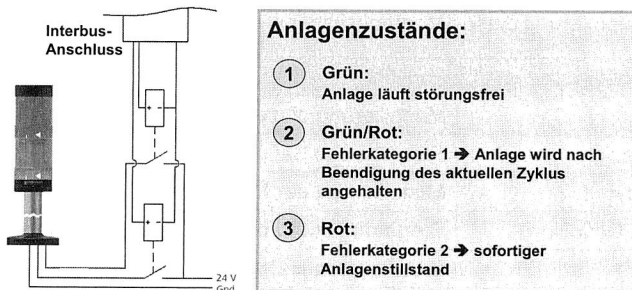


Bild 5.7: Signalgeber für die Statusanzeige der Roboterzelle

Das ebenfalls an den Interbus gekoppelte Kamerasystem *Netsight II* dient der optischen Prozessüberwachung. Es besteht aus einem IPD-Netsight-II-Kompakt-PC-System, auf dem die Bildverarbeitungssoftware *I-tution* installiert ist, zwei CCD-Kameras und einem Ein-/Ausgangs-Modul als Kommunikationsschnittstelle, dessen acht Eingänge mit Interbusausgängen und acht Ausgänge entsprechend mit Interbuseingängen verbunden sind. Damit das Kamerasystem erkennt, wann die Lage des Kabels überprüft werden muss, wird dessen E/A-Modul von der Software-SPS nach der Verlegeoperation ein High-Signal übermittelt. Nach erfolgter optischer Überprüfung des verlegten Flachkabels meldet das Kameramodul an die Software-SPS, ob die beiden angeschlossenen Kameras die ordnungsgemäße Lage des Kabels erkannt haben. Meldet das Kamerasystem eine Unregelmäßigkeit, wird die Fehlerkategorie auf Stufe 1 gesetzt, es sei denn, sie ist bereits auf einer höheren Stufe.

### 5.3 Simulation von Montageoperationen mit Verlegewerkzeugen

Nachdem alle erforderlichen Peripheriegeräte der Montagezelle durch eine entsprechende Ein-/Ausgangskonfiguration mit der auf der Robotersteuerung installierten Software-SPS kommunikativ verbunden sind, können nun Montageoperationen unter Einbeziehung der Systemperipherie mit einer CAD-basierten Offline-Programmierungsumgebung erstellt werden. Die Bewegungskoordination und die Steuerung der unmittelbaren Prozesssignale werden dabei trotz Einsatz einer Software-SPS vom Roboter übernommen. Die Programmabläufe sowie das Setzen diverser globaler Prozessvariablen koordiniert die Speicherprogrammierbare Steuerung. Zudem steuert sie die Geschwindigkeit der in den Werkzeugen und den Materialbereitstellungseinheiten vorhandenen Motoren, sobald sie eine entsprechende Anforderung vom Roboter erhält.

#### 5.3.1 Modellierung des Montagesystems in einer Simulationsumgebung

Mit Hilfe der Offline-Programmierungsumgebung Delmia V5R17 vom Hersteller Dassault Systems lässt sich für das vorliegende Montagesystem eine durchgehende CAD/CAM-Kette aufbauen. Sie besteht aus zahlreichen Programmmodulen, die neben den CAD-Daten noch PLM- und PDM-Daten erfassen, speichern und verarbeiten können. Für die Offline-Programmierung dieses Montagesystems werden folgende Module benötigt:

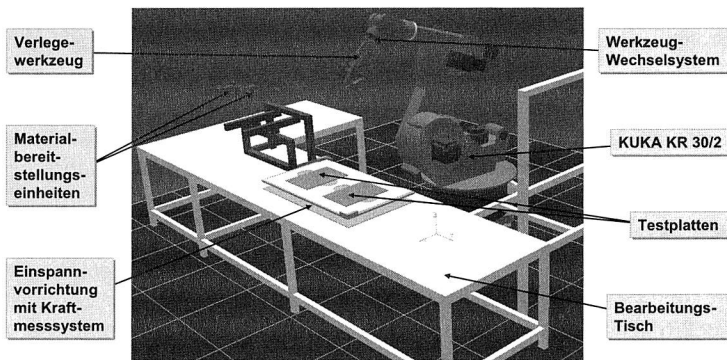
Programmmodul	Funktion
Part Design	Modellierung einzelner Bauteile
Assembly Design	Erstellen von Baugruppen
Resource Layout	Modellierung der Montagezelle
Device Task Definition	Programmierung der Bewegungsabläufe des Roboters
Arc Welding	Erstellen von Referenzpunkten auf einer Oberfläche
Robot Offline Programming	Generierung des roboterspezifischen Programmcodes

*Tabelle 5.1: Programmmodule in Delmia V5 für den Aufbau einer durchgehenden CAD/CAM-Kette*

Die Modellierung des Montagesystems erfolgt in den Programmmodulen *Part Design*, *Assembly Design* und *Resource Layout*. Die Programmierungsumgebung Delmia V5 arbeitet auf Basis von CAD-Daten des MCAD-Systems Catia V5 und unterscheidet dabei folgende Dateiformate:

- \*.CATPart – Wird im Modul Part Design ein Bauteil erstellt und/oder gespeichert, bekommt es diese Datei-Erweiterung.
- \*.CATProduct – Dieses Format findet bei Baugruppen Verwendung, die im Modus Assembly Design zusammengestellt wurden.
- \*.CATProcess – Mit dieser Erweiterung werden Dateien versehen, die das Layout einer Roboterzelle und alle für die Roboterbewegungen notwendigen Informationen enthalten.

Über softwareinhärente Schnittstellen ist es möglich, 3D-CAD-Daten, z. B. von Werkzeugen, Werkstücken oder Kabelzuführeinrichtungen, in Delmia V5 zu importieren, auch wenn sie in anderen MCAD-Systemen, wie beispielsweise Pro/ENGINEER, erstellt wurden. Nach dem Einrichten eines neuen Produktes in Delmia V5, können diese vorhandenen Modelle in den vorliegenden Produktbaum eingefügt werden. Nach dem Speichern des neuen Produktes steht das Modell als \*.CATProduct zur Verfügung. Beim Datenimport können, abhängig vom ursprünglichen Datenformat, allerdings Informationen verloren gehen, die die Funktionalitäten der Produkte in manchen Bereichen einschränken. Die Daten des in Kapitel 5.1.1 erwähnten Pkw-Türaggregateträgers wurden vom Hersteller, der Firma BROSE, im Format Catia V4 bereitgestellt. Da Catia V4 der direkte Vorgänger von Catia V5 ist, konnten diese Objekte beispielsweise nahezu ohne Informationsverluste importiert werden.



**Bild 5.8:** *Rechnergestützte Modellierung des Montagesystems in der Offline-Programmierungsumgebung Delmia V5*

Bestandteile der Roboterzelle, wie beispielsweise der Bearbeitungstisch, die noch nicht in digitaler Form vorliegen, werden im Software-Modul Part Design erstellt und ebenfalls in Product Design zu Produkten zusammengefügt. Dabei sollte vorher geprüft werden, ob die Produkte u. U. bereits in der umfangreichen CAD-Modellbibliothek von Delmia V5 zur Verfügung stehen. Sie enthält beispielsweise die Datenmodelle zahlreicher Robotertypen einschließlich deren Kinematik, die vollständig in ein virtuelles Montagesystem importiert werden können. Dies geschieht mit Hilfe des Programmmoduls Resource Layout, in dem schließlich die einzelnen Produkte zu einer virtuellen Roboterzelle zusammengefügt werden, Bild 5.8. Dabei gibt es zwei Kategorien im Produktbaum, der eine Übersicht aller in die virtuelle Umgebung eingebundenen Objekte darstellt, denen diese Objekte zugeordnet werden können. In der Kategorie Produkt-Liste werden alle zu bearbeitenden Werkstücke abgelegt, wogegen in der Kategorie Ressourcen-Liste alle Werkzeuge und Montagehilfsmittel gespeichert werden. Zunächst wird der Roboter, der bereits in der Produktbibliothek von Delmia V5 vorhanden ist, über den Befehl Katalogbrowser in die Zellenumgebung eingefügt und positioniert. Anschließend werden die vorher erstellten Bestandteile der virtuellen Montagezelle integriert.

### 5.3.2 Konfiguration des virtuellen Roboters

Beim Einsatz mehrachsiger Roboter mit einer kinematischen Kette müssen bereits in der Simulationsumgebung für die Bewegungsplanung, die von der Robotersteuerung übernommen wird, Richtlinien definiert werden, nach denen die Roboterbahnen erstellt werden sollen. Dies geschieht im Unterpunkt *Controller* des in der Ressourcenliste eingefügten Roboters.

Konfigurationsmenü	Beschreibung
Accuracy Profile	Bahntoleranzparameter für die Genauigkeit beim Anfahren von Eckpunkten
Motion Profile	Festlegung der Roboter Geschwindigkeit bei den jeweiligen Verfahrbewegungen
Object Profile	Festlegung der Koordinatensysteme für die in der Montagezelle eingesetzten Türmodul-Demonstratoren
Tool Profile	Festlegung der Arbeitspunktkoordinaten der verwendeten Werkzeuge

*Tabelle 5.2 Konfigurationsmerkmale für die Bewegungsplanung von mehrachsigen Robotern in Demia V5*

Aufgrund der Massenträgheit der Industrieroboter ist ein exaktes Anfahren von Eckpunkten im Bahnverlauf nur sehr langsam möglich. Dies führt zu erheblichen Verzögerungen im Montageablauf. Durch das so genannte *Überschleifen* der Eckpunkte ist es jedoch möglich, eine kontinuierliche Bewegung zu erzeugen, die ohne diese Verzögerungen auskommt. Hierfür kann im Menüpunkt *Accuracy Profile* eine Bahntoleranz, mit der der Roboter die Eckpunkte überschleift, eingestellt werden. In den Verlegeversuchen für Flachkabel auf räumlich geformten Türaggregateträgern, bei denen der kontinuierliche Kabelvorschub möglichst geschwindigkeitstreu erfolgen muss, wurde die Bahntoleranz auf 3 mm gesetzt. Die im Menüpunkt *Motion Profile* programmierbaren Geschwindigkeiten können im Montageablaufprogramm den jeweiligen Verfahrbewegungen des Roboters zugeordnet werden. Für die Verlegeoperationen im Labormaßstab wurde hier zunächst eine Geschwindigkeit von  $0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  definiert.

Da die reale und die virtuelle Montageumgebung immer in gewissen Toleranzen voneinander abweichen, müssen verschiedene Referenzkoordinatensysteme, die so genannten *Frames*, unter dem Menüpunkt *Object Profile* definiert werden, anhand derer ein Abgleich zwischen den beiden Welten stattfindet. Die einem bestimmten Frame zugeordnete Roboterbahn bezieht sich dann nicht mehr z. B. auf das Basis-Koordinatensystem des virtuellen Roboters, sondern auf das Frame-Koordinatensystem, das sich beispielsweise an einem Werkstück oder einer Montagezellenkomponente orientiert. In der realen Montagezelle werden diese Frame-Koordinatensysteme geteached und somit alle geometrischen Abweichungen zwischen der Roboterbasis und dem jeweiligen Frame-Koordinatensystem eliminiert. Für die Verlegung von Flachkabeln wurden vier



verschiedene Frames erstellt: jeweils ein Frame an den Materialbereitstellungseinheiten, einer auf der Testplatte und einer für den Pkw-Türaggregateträger.

Die Positionen der verschiedenen Arbeitspunkte (*Tool Center Points* – TCPs) der realisierten Verlegewerkzeuge werden dem Programm im Menüpunkt *Tool Profile* vorgegeben. Für das in Kapitel 4.4.4 beschriebene Werkzeug nach dem Winkel-Mundstück-Konzept sind vier verschiedene TCPs zu definieren, je einen für die beiden Mundwinkel und je einen für die beiden Federlippen. Der in Kapitel 4.5.3 realisierte, zweite Prototyp kommt mit je einem TCP an jeder Rollengabel aus, während das in Kapitel 4.6 entwickelte Werkzeug nach dem Winkel-Rollen-Konzept wieder vier verschiedene TCPs, je einen für die beiden Mundwinkel und je einen für die beiden Anpressrollen, besitzt.

### 5.3.3 Offline-Programmierung von Montageoperationen

Die in der Montagezelle auszuführenden Operationen, wie z. B. die Bewegung des Roboters oder das Steuern von Ein- und Ausgängen, werden in der Simulationsumgebung von Delmia V5 in so genannten *Tasks* zusammengefasst, die in ihrer Struktur in etwa dem Programmablauf einer realen Robotersteuerung entsprechen. Alle in dem Programmmodul *Device Task Definition* erstellten Tasks werden im Unterpunkt *Programm* des in der Ressourcenliste eingefügten Roboters angezeigt.

Für jede Montageoperation wird zunächst die vom Roboter auszuführende Bewegung programmiert. Dies geschieht mit Hilfe der so genannten *Tag-Points*. Diese haben dieselbe Funktion wie die Punkte, die bei der Online-Programmierung nach dem Teach-In-Verfahren manuell erstellt werden. Anhand dieser Punkte werden die Verfahrbewegungen des Roboters ausgeführt. Die einzelnen Tag-Points können frei im Raum, am TCP der aktuellen Roboterposition oder direkt auf Bauteilen erstellt und in Tag-Lists zusammengefasst werden. Nach der Platzierung eines neuen Tag-Points in der Simulationsumgebung kann dessen Position und Orientierung jederzeit im Programm verändert werden. Bei dreidimensionalen Oberflächen ist das einzelne Platzieren und Ausrichten der Tag-Points allerdings sehr aufwändig. Da der Prozess des Kabelverlegens in seinen technologischen Anforderungen an die Roboterbewegung dem Lichtbogenschweißen ähnelt, wird für die Erstellung der räumlich angeordneten Tag-Points auf dem Pkw-Türaggregateträger das Programmmodul *Arc Welding* eingesetzt, das ursprünglich dem Generieren von Roboterbahnen für Schweißprozesse dient. Es bietet die Möglichkeit, Tag-Points entlang einer Schnittkante zweier Bauteile oder zweier Flächen automatisch zu erstellen. Da es auf dem Pkw-Türaggregateträger keine Schnittkante entlang des gewünschten Verlegewegs gibt, wird ein Hilfsobjekt eingefügt, das den Aggregateträger senkrecht zum Verlegepfad schneidet. Entlang der Schnittkante werden daraufhin automatisch Tag-Points erzeugt, deren Dichte und Ausrichtung noch einzustellen sind. Dabei wird die Orientierung der Tag-Points an das Frame-Koordinatensystem des in diesem Abschnitt verwendeten Arbeitspunktes des Verlegewerkzeugs angepasst.

Nachdem die Tag-Points für die Roboterbewegung erstellt wurden, kann der Bewegungsablauf zwischen den einzelnen Tag-Points noch gesondert konfiguriert werden. Für die vorliegende Aufgabe wird als Bewegungstyp der Modus *lineare Verschiebung*

gewählt, in dem der Roboter immer eine gerade Verbindungslinie zwischen den Punkten abfährt, da bei anderen Einstellungen ein ungewolltes Eintauchen des Werkzeugs in das Werkstück möglich ist. Für jede Bewegung sind zudem die Profile Accuracy, Motion, Object und Tool zu definieren. Das Setzen von Ausgängen sowie weitere Aktionen des Roboters und der Systemperipherie können den einzelnen Prozessschritten ebenfalls zugewiesen werden. Auf diese Weise wird in dem Roboter-Task ein vollständiger Montageablauf generiert. Anschließend können der Programmablauf simuliert und eventuelle Änderungen durchgeführt werden. Treten beispielsweise Kollisionen auf, werden diese hierbei erkannt und die Position und/oder die Orientierung einzelner Tag-Points entsprechend angepasst.

## **5.4 Generierung und Ableitung von spezifischen Fertigungsdaten aus der Simulationsumgebung**

### **5.4.1 Überführung der Simulationsdaten in Fertigungsdaten**

Nachdem der Montageablauf in der Simulationsumgebung erfolgreich geplant und simuliert wurde, soll er nun im realen Montagesystem umgesetzt werden. Hierfür muss der Roboter-Task in ein KUKA-Steuerungsprogramm umgewandelt und in die Robotersteuerung transferiert werden. Die Übersetzung des Roboter-Tasks in ein maschinen-spezifisches Programm wird in Delmia V5 im Programmmodul *Offline-Programmierung* von einem Postprozessor übernommen. Die Roboter-Steuerungsprogramme bestehen aus drei Programmsegmenten: dem Programmkopf, dem Vereinbarungsteil und dem Anweisungsteil. Im Programmkopf, den der Programmeditor für neue Programme automatisch erstellt, wird der Name des Roboterprogramms definiert. Im daran angeschlossenen Vereinbarungsteil werden die im Programm verwendeten Variablen deklariert. Der Anweisungsteil enthält das eigentliche Roboterprogramm.

Mit der Einstellung *Robot/Device Task Data Readout* wird angegeben, dass der Task zur Offline-Programmierung genutzt wird. Außerdem wird beim Datenexport über *Robot/Device Base Coordinates* definiert, dass die Koordinaten der Tag-Points in Bezug auf das Basis-Koordinatensystem des Roboters und nicht auf das Koordinatensystem der Türmodul-Demonstratoren, denen sie zugeordnet wurden, angegeben sind. Da die Roboterprogramme von Delmia V5 für verschiedene Roboterhersteller ausgegeben werden können, muss anschließend unter *Downloader* noch KUKA ausgewählt werden. Die Übersetzung des Tasks liefert zwei Dateien, die für die Ausführung des Programms an der Steuerung notwendig sind und die Erweiterungen \*.src und \*.dat besitzen. Die Dateinamen entsprechen dem Namen des exportierten Roboter-Tasks und müssen ggf. für die Robotersteuerung geändert werden. In dem vom Postprozessor von Delmia V5 erstellten Programmkopf müssen nachträglich noch die maximalen Orientierungsgeschwindigkeiten des Roboters in Grad pro Sekunde über das Einfügen der Befehle *\$VEL.ORI1 = 100* und *\$VEL.ORI2 = 100* programmiert werden. Dieser Einfügevorgang kann durch eine entsprechende Programmierung des Postprozessors auch automatisiert erfolgen.

Anschließend werden die Programme z. B. über das lokale Netzwerk auf die Robotersteuerung kopiert und anschließend über die KUKA-Benutzeroberfläche (BOF) in die Betriebsumgebung des realen Roboters geladen. Bevor das Roboterprogramm gestartet werden kann, müssen dem Roboter noch die Informationen über die Tool-Center-Points der verwendeten Werkzeuge und die Position der Frames, in der Robotersteuerung *Basis-Koordinatensysteme* genannt, für die Türmodul-Demonstratoren und die Materialbereitstellungseinheiten übergeben werden. [53] Da hier oft die Realität von der Simulation abweicht, können die Daten nicht ohne direkten Vergleich mit dem realen System aus der Simulation übernommen werden. Bei der Eingabe der Daten, die nur nach einer Änderung des geometrischen Aufbaus in der Montagezelle erforderlich ist, muss darauf geachtet werden, dass die Reihenfolge der Werkzeugprofile und Frames in der Robotersteuerung der Reihenfolge in der Simulation entspricht. Nun kann das Roboterprogramm mit dem KUKA-Control-Panel (KCP) angewählt und ausgeführt werden.

#### 5.4.2 Effektives Management von Programmänderungen

Durch das hier eingesetzte Offline-Programmierverfahren kann der Anwender flexibel und zügig auf Änderungen an Werkzeugen, Werkstücken, Prozessen und des geometrischen Aufbaus der Montagezelle sowie auf die Integration weiterer Sensoren und Peripheriegeräte mit entsprechenden Anpassungen der Roboterprogramme reagieren. Bereits in der Simulationsumgebung können verschiedene Notwendigkeiten für Änderungen identifiziert werden. So sind beispielsweise Kollisionen zwischen Werkstück und Roboter bzw. Werkstück und Werkzeug durch die Visualisierung in der 3D-Umgebung frühzeitig zu erkennen. Auch fehlerhafte Bewegungsabläufe, die z. B. durch falsche Bahnplanung entstehen, können durch die Simulation entdeckt und korrigiert werden. Die Darstellung der in der Simulation programmierten Zustände der Ein- und Ausgänge in einer zeitbasierten Tabelle ermöglicht zudem die frühzeitige Identifikation falsch gesetzter Ein- und Ausgänge. Solche Änderungen sind meist auf eine unzureichende Definition der Randbedingungen oder eine ungenügende Sorgfalt bei der Programmierung zurückzuführen.

Auch durch Fertigungstoleranzen z. B. der Werkstücke, Werkzeuge oder durch einen fehlerhaften Aufbau der realen Montagezelle können Abweichungen zu der simulierten Roboterbahn entstehen, die behoben werden müssen. Besonders bei prozessbedingten, hohen Genauigkeitsanforderungen, wie bei der Verlegung von Flachkabeln, treten bei den Tests der Roboterprogramme in der realen Montagezelle nicht zu tolerierende Differenzen auf. Die Ursache für diese Abweichungen der geplanten von der realen Roboterbahn ist dabei entscheidend für die anzuwendende Änderungsmethodik, da sie sich auf die Position oder Orientierung der ganzen Bahn oder nur auf einzelne Bereiche bzw. einzelne Punkte beziehen können, deren Ursache dann entweder in der Lage der Frames, der einzelnen Tag-Points oder der ganzen Bahn zu suchen ist. Eine falsche Orientierung oder Position der einzelnen TCPs an den eingesetzten Verlegewerkzeugen kann das Bewegungsverhalten des Roboters maßgeblich beeinflussen, was sich in einer konstanten translatorischen oder rotatorischen Fehlstellung des Werkzeugs widerspiegelt und damit einen systematischen Fehler anzeigt. Eine weitere mögliche Feh-

Ursache liegt in der vorgegebenen Bahngeschwindigkeit, die vor allem bei sehr engen Kurvenfahrten bzw. schnellen Orientierungsänderungen aufgrund der Massenträgheit und der damit zusammenhängenden begrenzten Orientierungsgeschwindigkeit ein Problem darstellen kann. Wie bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben, muss hier ein Optimum zwischen Bahngeschwindigkeit und -genauigkeit gefunden werden, da sonst an diesen Stellen große Geschwindigkeits- bzw. Positionsabweichungen entstehen.

Nachdem der Abweichung anhand des Fehlerbildes ein oder mehrere der eben genannten Fehlerursachen zugewiesen wurden, können diese durch die Auswahl und Anwendung einer geeigneten Änderungsmethodik behoben werden. Die notwendigen Änderungen können sich dabei auf das Roboterprogramm alleine beschränken oder Modifikationen am SPS-Programm erforderlich machen. Muss das Roboterprogramm abgeändert werden, kann das sowohl in der Simulationsumgebung von Delmia V5 als auch direkt in der Robotersteuerung erfolgen. Grundsätzlich sollten die Änderungen der Bahngeometrien, der Ein- und Ausgänge und der Geschwindigkeits- bzw. Bewegungseinstellungen in Delmia V5 vorgenommen werden, um alle Änderungen automatisch dokumentieren zu können. Andere Änderungseinstellungen, wie beispielsweise die Konfiguration der realen Werkzeug- und Frame-Daten, müssen direkt am Roboter eingestellt werden, da sie dem Simulationsprogramm zu keiner Zeit bekannt sind. Das gilt in Sonderfällen auch für einzelne kritische Prozesspunkte, bei denen eine extrem hohe Genauigkeit erforderlich ist. Die Anpassung des Programms in der Software-SPS kann nur durch eine Änderung des Programmcodes vorgenommen werden. Die Änderungen der Solldrehzahlen der Motoren erfolgt, wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, über die Veränderung der Anfangswerte der entsprechenden Konstanten in der Programmierumgebung der SPS. Werden neue Komponenten in die Zelle integriert, können die neuen Funktionen dank der zyklischen Abarbeitung des Programms unabhängig vom bisherigen Programm eingebettet werden.

## 6 Konzeptalternativen zur Fixierung von flexiblen Flachkabeln auf Polymersubstraten

Beim Verlegen des Flachleiterkabels auf dem Untergrund, muss gewährleistet sein, dass das Kabel möglichst sofort auf der Oberfläche fixiert wird, damit es während des Montageprozesses seine Lage nicht mehr verändert. Außerdem muss sichergestellt sein, dass sich das Kabel im späteren Einsatz nicht vom Türaggregateträger löst. Um dies zu realisieren, werden im Folgenden verschiedene Konzeptalternativen entwickelt und vorgestellt, von denen ein ausgewähltes Verfahren hinsichtlich seiner Einsatzfähigkeit für Pkw-Türaggregateträger aus Kunststoff näher untersucht wird.

### 6.1 Alternativen zum Aufbau des Türaggregateträgers aus Kunststoff

Aufgrund ihres großen Potenzials zur Gewichtseinsparung im Automobil, werden die Versuche zur automatisierten Verlegung von Flachleiterkabel auf neu entwickelten Pkw-Türaggregateträgern aus Kunststoff durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Innovative Montage- und Produktkonzepte für mechatronische Systeme im Pkw“ (IMPkw) der Bayerischen Forschungsstiftung wurden diese Kunststoffträger von der Fa. ALCAN entwickelt, Bild 6.1. Aufgrund des bereits in Kapitel 3.3.4 erläuterten, günstigen Preis-/Volumen-Verhältnisses wurde von der Herstellerfirma Polypropylen (PP) als Basiswerkstoff für alle gefertigten Pkw-Türaggregateträger ausgewählt.

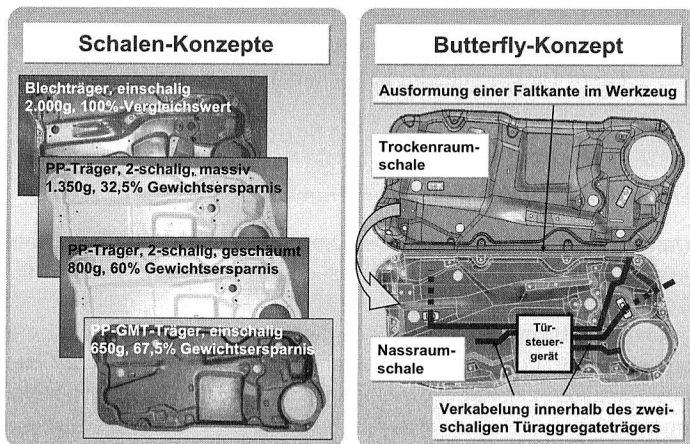


Bild 6.1: Konzeptalternativen für Pkw-Türaggregateträger aus Kunststoff (nach[102])

Nach Konstruktion und Aufbau eines geeigneten Werkzeugs zur Herstellung der PP-Träger im Thermoform-Verfahren wurden zunächst zweischalige Türaggregateträger aus geschäumtem und massivem Polypropylen produziert. Der doppelwandige Aufbau war zur Gewährleistung der Stabilität bei mechanischer Beanspruchung notwendig

geworden, da die Geometrie des Türmoduls für die späteren Einsatztests der mit Flachkabeln bestückten PP-Träger nur geringfügig verändert werden durfte. Anschließend wurden einschalige PP-GMT-Träger durch Thermoformpressen hergestellt. Dabei wurde ein Mischgelege aus Polypropylen- und Glasfaser mit PP-Deckfolien verpresst. Im Gegensatz zum Tiefziehprozess konnte hierbei die Dicke des PP-GMT-Trägers in einem Bereich von 2-5 mm variiert werden. [102]

Der Flachleiterkabelsatz kann sowohl direkt auf der Trockenraumseite des Türmoduls als auch zwischen den beiden Schalen der PP-Träger installiert sein, die anschließend z. B. durch einen Schweißprozess fest miteinander verbunden werden. Auf diese Weise ist bereits eine dauerhafte Fixierung der Flachkabel gewährleistet, die lediglich für den Zeitraum der Montage zwischen den Schalen in ihrer Position gehalten werden müssen. Für eine großtechnische Umsetzung dieses Prinzips wurde das in Bild 6.1 rechts dargestellte *Butterfly-Konzept* von der Fa. ALCAN entwickelt, bei dem die beiden Schalen des PP-Trägers an einer Faltkante miteinander verbunden sind, die als Scharnier dient. Dabei werden die Flachleiterkabel auf der Innenseite der Nassraumschale verlegt. Anschließend wird die Trockenraumschale darüber geklappt und mit der Nassraumschale verschweißt. Ein Nachteil dieses Konzepts ist die Notwendigkeit von Kabeldurchbrüchen zur Nass- und zur Trockenraumseite, um eine elektrische Kontaktierung der Funktionskomponenten des Türmoduls zu gewährleisten. Diese Durchbrüche müssen aufwändig abgedichtet werden, damit sich keine Feuchtigkeit zwischen den Schalen ansammelt. Außerdem ist die wechselseitige Ankontaktierung der Kabel nur eingeschränkt automatisierbar. Wird der Kabelsatz jedoch nicht zwischen den Schalen festgehalten, müssen alternative Methoden angewendet werden, um die Flachleiterkabel während der Verlegung auf dem Türaggregateträger dauerhaft zu fixieren.

## **6.2 Einsatz von mechanischen Befestigungselementen**

### **6.2.1 Fixierung von Flachkabel mittels Klemmbügel**

Zur Befestigung von konventionellen Kabeln befinden sich bereits zahlreiche Produkte auf dem Markt. Für die Fixierung von Flachleiterkabeln fällt das Produktportfolio jedoch schon deutlich geringer aus. Berücksichtigt man noch die, durch das vorgestellte Automatisierungskonzept bedingte, einseitige Zugänglichkeit der Kabel, wird die Auswahl einer geeigneten Befestigungsmethode erheblich eingeschränkt. Aus diesem Grund mussten neue Konzepte zur Kabelfixierung mit mechanischen Befestigungselementen entwickelt werden.

Eine konzeptionelle Alternative ist das in Bild 6.2 links dargestellte Fixieren der Flachkabel mittels Klemmbügel. Hier werden bei der Herstellung des Kunststoffträgers Löcher entlang der Verlegewege eingebracht. Nach erfolgter automatischer Verlegung der Flachleiterkabel, werden Klemmbügel mit Hakenstiften oder Schnapphaken in die Löcher gesteckt. Über flexible Andruckelemente werden dabei die Flachkabel auf die Oberfläche des Pkw-Türträgers gedrückt. Ein Vorteil dieses Prinzips ist dessen große Lagetoleranz des Klemmbügels gegenüber dem Flachkabel. Durch eine entsprechende

Ausgestaltung der Andruckelemente kann hierbei zudem ein Zentrierungseffekt erzielt werden. Eine bereits auf dem Markt verfügbare Alternative ist der Flachkabelhalter der Firma HellermannTyton, der in erster Linie der Befestigung von Flachkabeln in PCs dient. Im Vergleich zum Klemmbügelkonzept ist hierbei jedoch die Fügebewegung deutlich komplexer und damit aufwändiger zu automatisieren.

### 6.2.2 Fixierung durch auf den Träger aufgebrachte Kunststoffklipse

Eine weitere Möglichkeit, Flachkabel auf der Oberfläche des Pkw-Türaggregateträgers zu fixieren, bietet das in der Mitte von Bild 6.2 dargestellte Montageprinzip mittels Kunststoffclipsen. Dabei wird das Flachkabel vorab in bestimmten Abständen mit Langlöchern versehen, die bei der Kabelverlegung über auf dem Träger befindliche Hakenstifte gestülpt werden. Abschließend werden scheibenförmige Clipse auf die Hakenstifte gedrückt und das Flachkabel dabei fixiert. Besteht der Träger aus Kunststoff, ist darüber hinaus eine konstruktive Integration der Hakenstifte in den Träger möglich. Alternativ können die Clipse auch mit Hakenstiften oder Schnapphaken versehen sein, die wiederum in Löchern des Trägers verankert werden.

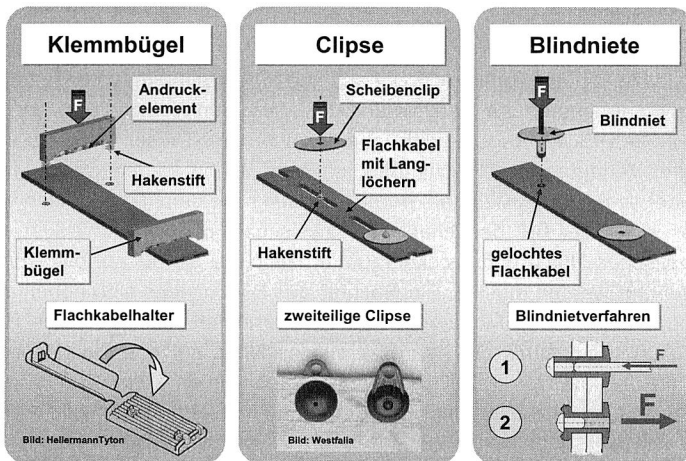


Bild 6.2: Exemplarische Auswahl mechanischer Befestigungsmethoden für flexible Flachkabel bei einseitiger Zugänglichkeit

Ein Vorteil der Scheibenclips-Lösung ist die, durch die Hakenstifte erzielte, Vorfixierung des verlegten Flachkabels. Das Aufsetzen der Scheibenclipsen kann zudem durch eine lineare Fügebewegung sehr einfach realisiert werden. Auch die aufgrund der Lösbarkeit der Verbindung mögliche Demontage der Kabel, z. B. für Reparaturzwecke, stellt, wie bereits bei der Klemmbügelbefestigung, einen wichtigen Vorteil des Konzepts dar. Nachteile der Kabelfixierung mit Clipsen liegen in dem erhöhten konstruktiven Aufwand bei der Herstellung des Pkw-Türaggregateträgers bzw. im erforderlichen, zusätzlichen Bearbeitungsschritt zur Montage der Clipse auf dem Träger. Zudem erhöhen die Clipse, wie

auch die Klemmbügel, das Gesamtgewicht des Türmoduls. Darüber hinaus entstehen bei diesen Lösungen neue Fehlerquellen, z. B. durch das Abbrechen von Hakenstiften, vor, während oder nach der Kabelverlegung. Schließlich würde die Herstellung spezieller Kabelgeometrien die Kosten für die Flachleiterkabel erhöhen.

### **6.2.3 Fixierung von Flachkabel durch Blindnieten**

Das Blindnietverfahren, dessen Ablauf ist in Bild 6.2 rechts dargestellt ist, stellt eine weitere Alternative zur Fixierung der Flachkabel bei einseitiger Zugänglichkeit dar, die durch den Einsatz einer speziellen Nietform erzeugt wird. Der Blindniet besitzt einen hohlen Nietkörper, in dem ein Dorn mit Kopf an der Vorderseite liegt, der über eine Sollbruchstelle verfügt. Das, auch dem Markennamen Pop des Herstellers Emhart folgend, als *Popnieten* bekannte Verfahren, wird mit Hilfe einer speziellen Blindnietzange durchgeführt. Der Niet wird dabei durch eine Bohrung in die zu verbindenden Werkstücke eingeführt. Beim Herausziehen des Dorns weitet dessen Kopf den hohlen Niet hinter der Bohrung auf, bis der Dorn an der Sollbruchstelle innerhalb des Nietkörpers bricht. Während der Kopf des Dorns in der Nietverbindung verbleibt, wird der Rest des Dorns als Abfall entsorgt. [103]

Das Blindnieten ist eine schnelle und effektive Methode, Verbindungen von Fügepartnern herzustellen, die nur von einer Seite aus zugänglich sind. Im vorliegenden Fall der Flachkabelmontage wären zur Realisierung des Verfahrens lediglich Löcher ins Flachkabel und in den Pkw-Türaggregateträger einzubringen. Dieser Vorgang kann auch nach erfolgter Verlegung des Flachkabels in einem Schritt vorgenommen werden, sofern die Kabel, z. B. durch Klebstoff, bereits vorläufig auf dem Träger fixiert sind. Beim Einsatz der in Kapitel 6.1 beschriebenen, zweischaligen Kunststoffträger, bleibt die Trennung zwischen Nass- und Trockenraum erhalten, da hierbei nur die Trockenraumschale angebohrt werden müsste. Ein Nachteil des Blindnietens sind neben den hierfür erforderlichen, zusätzlichen Montageschritten die erhöhten Kosten für den Einsatz der Blindniete. Außerdem muss die Anpresskraft des Niets auf das Flachkabel sehr gut kontrolliert werden, da das Kabel sonst beschädigt werden kann. Aufgrund der nicht lösbaren Verbindung ist zudem eine Reparatur nur eingeschränkt möglich.

## **6.3 Einsatz von Klebverfahren**

### **6.3.1 Fixierung der Flachkabel durch Klebebänder**

Eine in der Automobilindustrie bereits gebräuchliche Alternative zur Fixierung von Flachleiterkabeln auf Fahrzeugmodulen, wie z. B. dem Dachhimmel, ist der Einsatz von Klebebändern. [3] Dabei handelt es sich um ein- oder beidseitig mit einer Haftschrift versehene Trägermaterialien, die u. a. in weichen, geschäumten Ausführungen verfügbar sind, mit denen auch unebene Flächen verklebt bzw. abgedichtet werden können. Zur Erreichung einer zuverlässigen Verklebung ist es erforderlich, dass die Klebeflächen fett- und schmutzfrei sind und möglichst große Flächen für die Verklebung zur Verfügung stehen.



Die in Bild 6.3 rechts dargestellte Montage von Flachleiter-Kabelsätzen im Pkw-Dachhimmel, erfolgt zunächst durch manuelle Verlegung des Kabelsatzes und Fügen der Steckverbindungen. Anschließend wird ein einseitiges Klebeband ebenfalls manuell über das Flachkabel gelegt und dieses damit auf der Oberfläche fixiert. [98] Aufgrund des hierbei gegebenen, hohen manuellen Bearbeitungsaufwands und der Beibehaltung der konventionellen Montageprozesskette, kann das durch den Einsatz flexibler Flachleiterkabel gegebene Potenzial einer Produktivitätssteigerung nicht ausgeschöpft werden. Eine automatisierte Verlegung der Flachleiterkabel nach dem in Kapitel 4.6 erläuterten Prinzip ist wegen der nachträglichen Fixierung der Kabel beim Einsatz einseitiger Klebebänder nicht möglich.

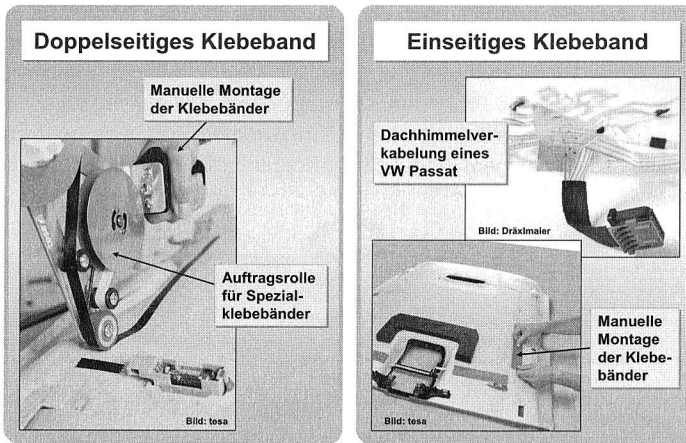


Bild 6.3: Einsatz von Klebebändern zur Fixierung von Flachkabeln

Durch die in Bild 6.3 links dargestellte Methode, können doppelseitige Klebebänder auf räumlich geformte Oberflächen aufgebracht werden. Die Firma tesa entwickelte hierfür Spezialklebebänder, die in konstanten Abständen über Perforationen verfügen und auf diese Weise beim Abheben der Auftragsrolle von der Oberfläche durchtrennt werden, ohne dass ein Schneidprozess integriert werden muss. Der hier gezeigte Prozess des manuellen Auftrags der Haftschrift lässt sich mit Hilfe eines geeigneten Handlingsystems auch automatisiert durchführen. Das Verlegen des Flachkabels kann anschließend über das neu entwickelte Montageprinzip ebenfalls automatisiert erfolgen.

Ein Vorteil dieses Haftschrift-Auftragsystems ist die schnelle und saubere Verarbeitung, durch die Verklebungen von unterschiedlichsten Werkstoffen, wie beispielsweise Metall, Glas, Keramik, Kunststoff, Holz, Papier, Textilien und Leder, möglich sind. Für eine zuverlässige Verklebung von Fahrzeugmodulen aus Kunststoffen, wie z. B. Polypropylen, müssen deren Oberflächen jedoch vorbehandelt werden. [94] Bei erhöhten Anforderungen an die Anhaftung des Flachkabels, kann es zudem erforderlich sein, dieses noch mit einem einseitigen Klebeband zu überkleben. [92] Die Realisierung einer solchen Sandwich-Verklebung und die Vorbehandlung der Oberfläche des Pkw-

Türmoduls führen zu einer deutlichen Steigerung des Montageaufwands hinsichtlich der hierfür benötigten Prozessschritte, der Gesamtprozessdauer und der Materialkosten.

### 6.3.2 Fixierung durch Auftragen von Schmelzklebstoff

Eine Alternative zum Einsatz von Klebebändern, die bereits bei dem in Kapitel 4.5.3 beschriebenen Prototypen eingesetzt wurde, ist das Auftragen von lösemittelfreien Schmelzklebstoffen während des Flachkabel-Verlegeprozesses. Dabei wird der Klebstoff mittels spezieller Auftragsspitzen, die direkt am Werkzeugkopf in V-Form installiert sind, auf dem Verlegeweg des Kabels aufgebracht, Bild 6.4. Dies kann sowohl in einem Sprühprozess als auch durch einen Auftrag in Raupenform erfolgen. [36] Anschließend wird das Kabel über die Andruckrollen des Werkzeugs in das Klebstoffdepot gedrückt und somit auf der Oberfläche fixiert. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde ein Klebstoffauftrag in Raupenform realisiert, da diese die Wärme besser speichert, dadurch später erstarrt und somit das Prozessfenster vergrößert. Die auf der Ober- und Unterseite des Verlegewerkzeugs installierten Auftragsköpfe sind über beheizte Versorgungsschläuche direkt mit einem Klebstoffschmelzgerät mit Zahnrادpumpe verbunden.

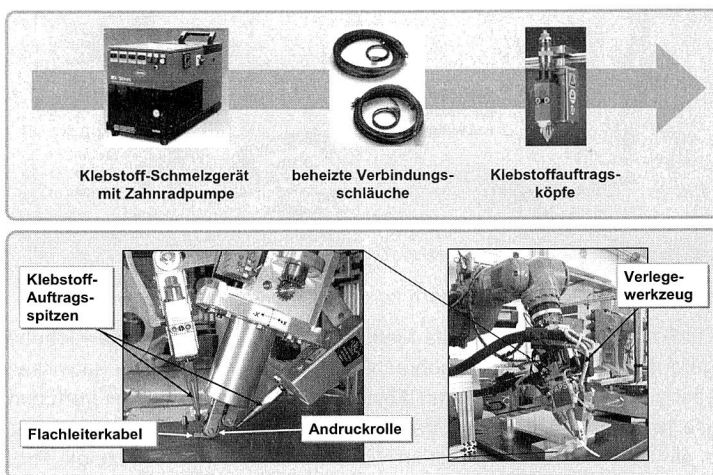


Bild 6.4: Auftragen von Schmelzklebstoffen bei der automatisierten Verlegung von Flachkabeln

Diese Fixierungslösung ermöglicht eine schnelle Kabelverlegung, da der Klebstoff beim Aufdrücken des Kabels in die heiße Klebstoffraupe auf einer verhältnismäßig großen Fläche verteilt wird und dabei sehr schnell erstarrt. Außerdem ist kein zusätzlicher konstruktiver Aufwand notwendig, um die Flachkabel auf dem Pkw-Türaggregateträger zu befestigen. Einen weiteren Vorteil dieser Fixierungsmethode bildet die Tatsache, dass das Kabel, z. B. durch Heißluft, erwärmt und dabei wieder von der Oberfläche zustörungsfrei abgelöst werden kann, was eine nachträgliche Veränderung des Layouts bzw. Reparaturen ermöglicht.

Ein Nachteil dieses Klebverfahrens ergibt sich aus dem zusätzlichen steuerungstechnischen Aufwand, der z. B. für die Regulierung des Klebstoffvolumenstroms, der sich in Abhängigkeit von der Robotergeschwindigkeit, vom Staudruck und der Klebstofftemperatur im Auftragskopf ändert, erforderlich ist. Wird der Volumenstrom nicht korrekt eingestellt, besteht die Gefahr, dass entweder zu wenig Klebstoff aufgetragen wird und die Klebstoffraupe dadurch zu früh abkühlt oder dass sich zuviel Klebstoff im Verlegeweg befindet, der dann an den Seiten des Flachkabels Klebewülste bildet, die die Mechanik des Kabelführungsmundstücks beeinträchtigen können. In verschiedenen Montageversuchen hat sich gezeigt, dass die Bildung von Klebewülsten an den Rändern der Flachkabel nur sehr schwer zu vermeiden ist. Von der Firma Brose wurde in 2003 eine Variante für extrudierte Flachkabel zum Patent [135] angemeldet, bei der an den beiden Rändern längs des Kabels eine Erhebung verläuft, mit deren Hilfe die Klebstoffschmelze unter dem Kabel gehalten und eine Wulstbildung damit vermieden werden soll.

## 6.4 Schweißverfahren zur Flachkabelfixierung

### 6.4.1 Laserstrahlschweißen

Schweißverfahren eignen sich im Allgemeinen sehr gut für das Verbinden von werkstofflich ähnlichen Fügepartnern. Neben konventionellen Verfahren, wie Vibrations-, Heizelement- und Ultraschallschweißen hat sich das Laserstrahlschweißen durch seine lokal begrenzte, berührungslose Energieeinbringung etabliert. [122] Mit Hilfe der in Bild 6.5 veranschaulichten Durchstrahlmethode lassen sich thermoplastische Fügepartner mit einer geringen thermischen und mechanischen Belastung verschweißen.

Beim *Durchstrahlschweißen* ist es erforderlich, dass die beiden Fügepartner unterschiedliche Absorptionseigenschaften besitzen, da hierbei ein für den Laserstrahl transparenter und ein Laserstrahl absorbierender Fügepartner vorhanden sein müssen. Für Kunststoffverschweißungen bedeutet dies, dass entweder verschiedene Kunststoffe verwendet werden oder die Polymermatrix durch unterschiedliche Füllstoffcharakteristika entsprechend angepasst wird. [42] Im Fall der Flachkabelfixierung auf dem Kunststoff-Türträger kann die Isolationschicht des Flachkabels mit der Oberfläche des Pkw-Türaggregatträgers verschweißt werden, wenn die Flachkabelisolierung als transmissiver und das Türmodul als absorbierender Fügepartner eingestellt werden, wie in Bild 6.5 rechts dargestellt. [36] Während des Schweißprozesses wird der Fokus des Laserstrahls auf die Oberfläche des absorbierenden Fügepartners gelegt, der dadurch lokal aufgeschmolzen wird. Dabei müssen die Fügepartner zur Erzeugung eines so genannten *Nullspalts* miteinander verpresst werden. Über Wärmeleitung wird daraufhin auch die Oberfläche des transmissiven Fügepartners aufgeschmolzen. Durch eine Verlagerung der Fügezone bildet sich nach dem Erstarren der Schmelze eine Schweißnaht unter dem Flachkabel.

Die Untersuchung und Einstellung dieses Laserstrahlschweißprozesses wurde am Bayrischen Laserzentrum in Erlangen durchgeführt. Hier wurde auch eine Methode zur Erzeugung des erforderlichen Nullspalts untersucht, die so genannte *Luftspanntechnik*.

Dabei wird ein Luftstrahl über eine oberflächennah positionierte, schmale Druckluftdüse auf die Fügezone gerichtet und die Fügepartner dadurch miteinander verpresst. Zudem wurde der Einfluss verschiedener Prozessparameter, wie z. B. des Durchmessers der Druckluftdüsenöffnung, des Auftreffwinkels des gerichteten Luftstrahls sowie des Abstands der Düse von der Flachkabeloberfläche, auf die Schweißnahtfestigkeit experimentell untersucht. Außerdem wurde die Verschweißung verschiedener Werkstoffkombinationen bei den Fügepartnern getestet. [125]

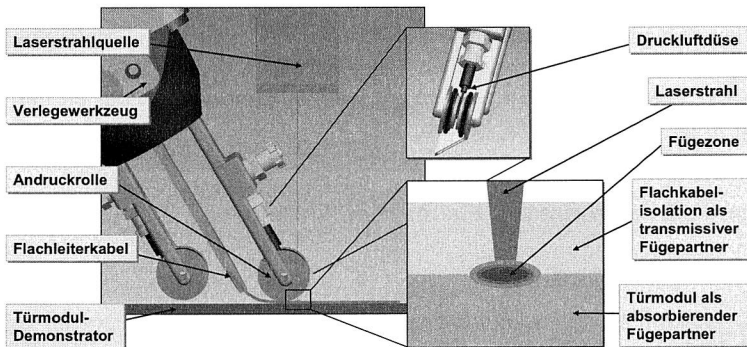


Bild 6.5: Integration eines Laserstrahlschweißprozesses in das dritte prototypische Verlegewerkzeug für Flachleiterkabel

Auf Basis von Temperaturfeldberechnungen wurden experimentelle Schweißuntersuchungen an Versuchsplatten aus Polypropylen auf PP-Probekörpern mit 1 Gew.-% Ruß als absorbierendem Fügepartner durchgeführt. Dabei hat sich für den Schweißprozess ein vergleichsweise großes Prozessfenster ergeben, in dem für die Schweißverbindung Scherfestigkeiten von im Mittel  $27 \text{ N/mm}^2$  gemessen wurden. [42] Dies ist für den Einsatz der Fixierungslösung bei Flachkabeln, die auf räumlich geformten, makroskopischen Oberflächen verlegt werden, aufgrund der hierbei erforderlichen, großen Toleranzfelder von besonderer Bedeutung.

Um den Laserstrahl-Schweißprozess in geeigneter Weise in den Verlegeprozess des Flachkabels zu integrieren, wurde das Verlegewerkzeug konstruktiv angepasst. Die in Bild 6.5 dargestellten Andruckrollen des Verlegewerkzeugs sind zweiteilig aufgebaut, sodass je eine Druckluftdüse in dem Spalt zwischen den beiden Teilrollen installiert und der Laserstrahl zur Fügezone hindurch geleitet werden kann. Die Laserstrahlquellen sind direkt auf dem Verlegewerkzeug montiert und dabei in V-Form zum Werkzeugkopf angeordnet. Ein Vorteil dieser Lösung ist die schnelle Fixierung des Flachleiterkabels ohne, dass zusätzliche Befestigungselemente erforderlich sind. Nachteilig wirken sich dagegen die nicht unerheblichen Investitionskosten für die Lasersysteme, die schließlich in jedes Werkzeug zweifach eingebaut werden müssten, und die Kosten für die Installation von entsprechenden Strahlenschutzvorrichtungen aus. Eine Reparatur der, mit dieser nicht lösbaren Laserstrahl-Schweißverbindung befestigten, Flachkabelstruktur ist darüber hinaus nur bedingt möglich.

### 6.4.2 Alternative Schweißverfahren

Während sich das Laserstrahlschweißverfahren durch die gut realisierbare Verlagerung der Fügezone direkt in den Verlegeprozess der Flachkabel integrieren lässt, ist dies beim Einsatz von Heizelement-, Vibrations- oder Ultraschallschweißverfahren aufgrund der meist ortsfesten Fügezone nur bedingt möglich. Diese Verfahren ließen sich allerdings in einem, der Flachkabelverlegung nachgeschalteten, Prozessschritt anwenden. Um eine ausreichende Bearbeitungsfläche an den Flachkabeln zu erhalten, ist es möglich, im Extrusionsprozess einzelne Leiterzüge auszulassen. Dadurch erhält man ein Flachleiterkabel mit Kunststoffahne, an der das Kabel, z. B. mittels Ultraschallschweißpunkten mit dem Pkw-Türaggregateträger verbunden werden kann.

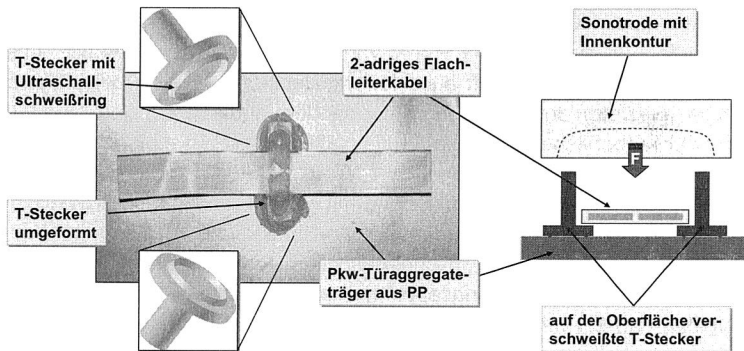


Bild 6.6: Fixierung von Flachkabeln durch Ultraschallumformung aufgeschweißter T-Stecker (nach [102])

Im Rahmen des bereits in Kapitel 6.1 erläuterten Forschungsprojekts „IMPkw“ hat die Fa. LEONI ein System zur Fixierung von Flachleiterkabeln entwickelt, bei dem T-Stecker als Befestigungselemente in einem vorgelagerten Ultraschallschweißprozess auf die Oberfläche des Pkw-Türaggregateträgers aufgebracht werden, Bild 6.6. Anschließend wird das Flachkabel zwischen den beiden Stiften der T-Stecker verlegt. Schließlich werden die Stifte über eine Sonotrode mit Innenkontur mittels Ultraschall derart umgeformt, dass sie sich über das Flachleiterkabel legen und dieses dabei mechanisch klammern. [102]

Ein Vorteil dieses Verfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass es sich sehr gut in eine automatisierte Montageprozesskette integrieren lässt. Der zusätzliche Prozessschritt zum Aufbringen der T-Stecker mittels Ultraschallschweißen kann zudem durch eine konstruktive Einbindung dieser Befestigungselemente in die Oberfläche des Pkw-Türaggregateträgers eingespart werden. Bei der Anwendung des Verfahrens muss durch eine entsprechende Prozessüberwachung sichergestellt werden, dass die Flachkabelisolation durch die Sonotrode nicht beschädigt wird und der Befestigungsaufbau insgesamt nicht zu hoch ausfällt, da der durch den Einsatz von Flachkabeln gewonnene Raum sonst wieder verloren ginge.

## 6.5 Durchführung von Montageversuchen für flexible Flachkabel

Für die automatisierte Verlegung von Flachkabeln wurden am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) Untersuchungen zum Fixieren der Kabel mittels lösemittelfreien Schmelzklebstoffs (Hotmelt) durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der in Kapitel 6.3.2 beschriebene Anlagenaufbau realisiert. Außerdem erfolgten Vorversuche zur Montage von Flachkabeln auf doppelseitigem Klebeband mit dem in Kapitel 4.4.4. prototypisch umgesetzten, ersten Verlegewerkzeug.

### 6.5.1 Rahmenbedingungen der Verklebung von PP-Testplatten

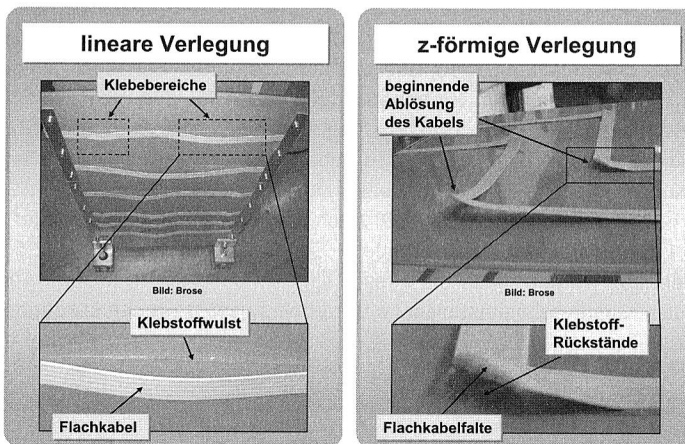
Aufgrund des unpolaren, niederenergetischen Charakters von Polypropylen und der Tatsache, dass dieser Kunststoff in den meisten Lösungsmitteln nicht löslich ist, müssen die Klebeflächen hierbei in der Regel vorbehandelt werden. Dies gilt neben dem hier eingesetzten Schmelzklebstoff auch für Haftklebstoffe, wie sie beispielsweise auf den ebenfalls getesteten doppelseitigen Klebebändern aufgetragen sind. Durch die Vorbehandlung der Klebeflächen kann die für die Haftfestigkeit ausschlaggebende Oberflächenenergie des Kunststoffs verdoppelt werden. [119] Aus diesem Grund wurde eine Serie von PP-Testplatten vor der Verklebung mit einem Atmosphärendruckplasma vorbehandelt. Dabei kam eine so genannte Corona-Behandlung zum Einsatz, bei der die Kunststoffoberfläche einem starken Ionenbeschuss ausgesetzt und auf diese Weise polarisiert wird. Da der Polarisierungseffekt mit der Zeit nachlässt, wurden die Testplatten unmittelbar danach mit Flachkabeln beklebt. Neben vorbehandelten PP-Platten wurden auch unvorbehandelte Platten untersucht.

Schmelzklebstoffe befinden sich bei Raumtemperatur im festen hochmolekularen Zustand und werden als Granulat dem Klebstoffschmelzgerät zugeführt. Durch stufenweises Erhitzen werden sie verflüssigt und über eine Zahnradpumpe durch beheizte Schläuche und Klebstoffauftragsköpfe auf die zu verklebenden Oberflächen aufgetragen. Nach dem Abkühlen können sie sofort Kräfte übertragen. Da Schmelzklebstoffe aus Feststoffen bestehen und keine Lösungsmittel enthalten, verursachen sie keinen Schwund. Aufgrund ihrer thermoplastischen Eigenschaften ist die Warmfestigkeit der Verklebung nur begrenzt, weshalb sich Hotmelt-Verklebungen durch Wärmeeinwirkung auch wieder lösen lassen. Bei dem für die Klebeuntersuchungen verwendeten Einkomponentensystem, handelt es sich um einen lösemittelfreien, thermoplastischen Schmelzklebstoff auf Basis von Polyolefinen, der von der Fa. Henkel als neues Versuchsprodukt speziell auf Montageanwendungen mit Klebpartnern aus Polypropylen zugeschnitten wurde. Die genaue Produktbezeichnung dieses Klebstoffs, der für PP/PP-Verklebungen laut Hersteller einen Winkelschälwiderstand von  $25 \text{ N/cm}$  bei einer Temperatur von  $22 \text{ °C}$  besitzt, lautet *MACROMELT Q 5375-22*. Die für den Einsatztemperaturbereich ausschlaggebende Wärmestandfestigkeit wird mit  $90 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  und die Kälteflexibilität mit  $\leq -30 \text{ °C}$  angegeben. Der Verarbeitungstemperaturbereich des Schmelzklebstoffs liegt zwischen  $160 \text{ °C}$  und  $200 \text{ °C}$ . Aufgrund seiner Lösungsmittelfreiheit birgt der Klebstoff keine gesundheitlichen Gefahren und kann ohne zusätzlichen Abzug verarbeitet werden. [95]

Für die Klebeuntersuchungen wurden darüber hinaus Flachleiterkabel der Fa. LEONI verwendet, deren blanke Kupferleiter mit Polypropylen als Isolationswerkstoff ummantelt wurden. Das Spezialkabel mit der Bezeichnung *exFC-9Y 4x1,67/0,2 BL RM2,54* besitzt ein Rastermaß von 2,54 mm und vier Kupferleiter mit einer Breite von 1,67 mm sowie einer Dicke von 200 µm. Die Dauergebrauchstemperatur für dieses Kabel wurde vom Hersteller auf einen Bereich von -40 °C bis 110 °C festgelegt. [97]

## 6.5.2 Ergebnisse der Klebeuntersuchungen

Für die Untersuchung der Klebeverbindung wurden bei der Fa. BROSE Klimawechseltests an PP-Testplatten mit definiertem Probenaufbau durchgeführt. Für diese Tests wurden Platten mit linearer und mit Z-förmiger Flachkabelverlegung hergestellt, Bild 6.7. Während die Verklebung bei den Testplatten mit Z-förmiger Verlegung auf dem gesamten Verlegeweg mit Ausnahme der Faltbereiche erfolgte, wurde der Schmelzklebstoff bei der linearen Verlegung nur in bestimmten, in Bild 6.7 gekennzeichneten, Klebereichen aufgetragen. Die Montage der Kabel erfolgte dabei mit einer Verlegegeschwindigkeit von 25 cm/s.



**Bild 6.7:** *Ablösung des mit Schmelzklebstoff fixierten, PP-ummantelten Flachkabels von der PP-Testplatte beim Klimawechseltest*

Bei dem Klimawechseltest wurde die Temperatur zwischen -40 °C und 80 °C variiert. Bereits nach einem Zyklus zeigte sich bei den Flachkabeln eine beginnende Ablösung von der Klebstoffschicht, unabhängig davon, ob die PP-Platten mit Atmosphärendruckplasma vorbehandelt waren oder nicht. Auch eine weitere Testreihe mit einer höheren Temperatur des Schmelzklebstoffes beim Auftragen erbrachte keine wesentliche Verbesserung im Klimawechseltest. Zur Ermittlung der Ursachen für diese Ausfallerscheinungen wurden in Anlehnung an die Prüfnorm DIN 53282 [78] für verschiedene Proben Schältests durchgeführt. Neben der Verklebung von PP-Flachkabeln mittels Schmelz-



klebstoffs wurden zu Vergleichszwecken noch Verklebungsproben mit doppelseitigem Klebeband auf unvorbehandelten PP-Testplatten geprüft.

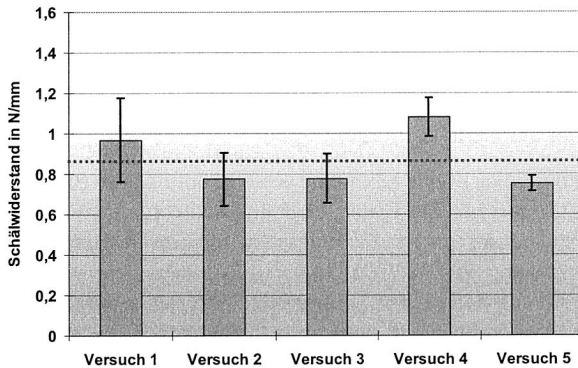


Bild 6.8: Ergebnisse der Schältests einer Versuchsreihe von PP/PP-Verklebungen mittels doppelseitigem Klebeband

Die in Bild 6.8 dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Schältests zeigen für die Verklebung mit doppelseitigem Klebeband gute Werte für den Schälwiderstand, der hierbei im Bereich von 0,75 bis 1,05  $\text{N}/\text{mm}$  liegt und einen Mittelwert von 0,87  $\text{N}/\text{mm}$  aufweist. Mit einem Mittelwert von 1,06  $\text{N}/\text{mm}$  ergeben sich für den Schälwiderstand bei den beiden Versuchsreihen zum PP/PP-Verklebung mit dem Schmelzklebstoff MACROMELT Q 5375-22 noch bessere Werte, Bild 6.9. Auch wenn diese deutlich geringer ausfallen, als der im Labor der Fa. Henkel ermittelte Schälwiderstandswert von 2,5  $\text{N}/\text{mm}$  [95], muss festgehalten werden, dass die ausschlaggebende Ursache für das Ablösen des Flachkabels im Klimawechseltest nicht im Verarbeitungsprozess selbst liegen kann.

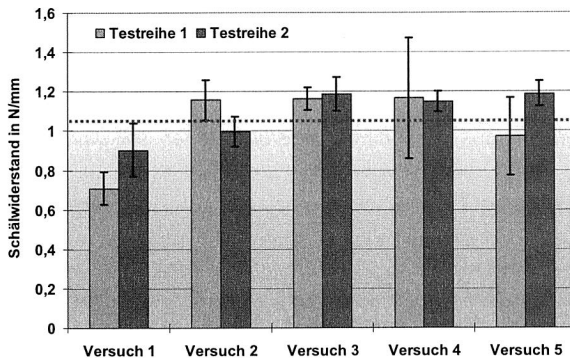


Bild 6.9: Schältests entlang verlegter Flachkabel zur Analyse von PP/PP-Verklebungen mit Schmelzklebstoff MACROMELT Q 5375-22



Bei genauerer Betrachtung des in Bild 6.7 gezeigten Fehlerbildes bei der PP-Testplatte mit linearer Flachkabelverlegung, ist zu erkennen, dass die weiter unten gelegenen Kabel im Bereich der Klebestellen noch anhaften, während sie zwischen den Klebereichen verwölbt sind. Auch zwischen den Rändern der Testplatte, an denen die Flachkabelenden fixiert wurden, und den Klebereichen haben sich die Kabel nach außen gewölbt. Da die Flachkabel bei der Verklebung auf die Oberfläche der Testplatten eben aufgebracht wurden, kann als Ursache für diese Verwölungen nur eine unterschiedliche Längenausdehnung der PP-Platten und der Flachkabel beim Klimawechseltest in Frage kommen.

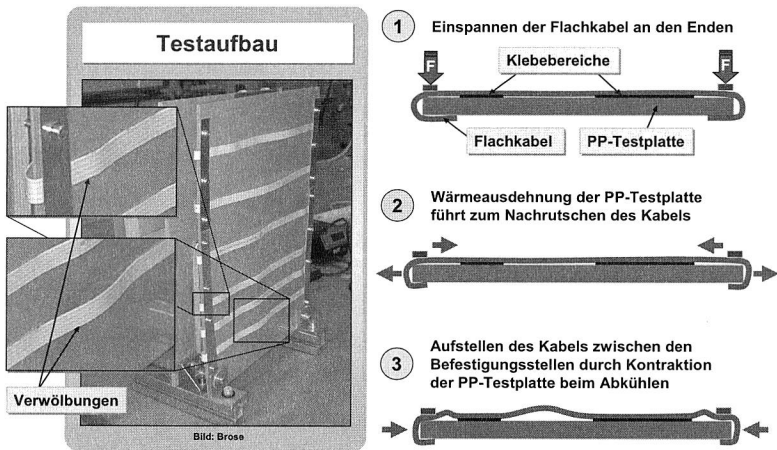


Bild 6.10: Analyse des Ablösungsmechanismus der Flachkabel beim Klimawechseltest

Aufgrund des, für das Flachkabel relevanten und gegenüber Polypropylen um knapp eine Potenz geringeren, Längenausdehnungskoeffizienten von Kupfer, rutscht das Kabel bei der Wärmeausdehnung der Platte unter der Randfixierung hindurch und auf den erweichten Klebereichen entlang, Bild 6.10. Durch die Kontraktion der PP-Testplatte beim Abkühlen sind die Flachkabelstücke zwischen den Befestigungspunkten Scherspannungen ausgesetzt, die durch die Ausbildung von Verwölungen abgebaut werden. Die infolge der Verwölungen entstehenden Querkkräfte führen daraufhin zu einer Schälwirkung der Kabel an den Befestigungsstellen, die wiederum das Ablösen des Flachkabels bewirkt. Um diesen thermomechanischen Belastungen, die prinzipiell auch bei anderen Kabelfixierungslösungen auftreten, zu begegnen, sollte eine Modifikation des Substratmaterials hinsichtlich des Ausdehnungskoeffizienten, z. B. mittels Füllstoffen, wie beispielsweise Glasfasern, vorgenommen werden. [26] Dies vorausgesetzt kann festgehalten werden, dass die Fixierung der Flachkabel mittels Schmelzklebstoff eine schnelle Montage der Kabel auf dem Pkw-Türaggregateträger parallel zum Verlegeprozess und ohne zusätzliche Befestigungselemente zulässt und damit am wahrscheinlichsten wirtschaftlich umgesetzt werden kann.



## **7 Einsatz innovativer elektrischer Kontaktierungslösungen zur Integration der Module ins Pkw-Bordnetz**

Für eine automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen sind neben der Entwicklung von Konzepten zur Handhabung der Flachkabel auch neue elektrische Verbindungskonzepte zu erarbeiten. Dabei werden, ausgehend von bereits in Serienprodukten umgesetzten Kontaktierungslösungen, neue Konzepte zur elektrischen Kontaktierung von Flachleiterkabeln entwickelt. Anschließend wird ein, für die Anwendung im Pkw-Türmodul, Erfolg versprechendes Konzept prototypisch umgesetzt und dessen Funktionsfähigkeit untersucht. Zudem werden Beispiele für mögliche Einsatzgebiete der Kontaktierungslösung aufgezeigt.

### **7.1 Konventionelle Kontaktierungslösungen für Flachleiter**

#### **7.1.1 Alternative Prozesse zum Abisolieren von Flachleitern**

Für alle Kontaktierungslösungen gilt gleichermaßen, dass zur Schaffung einer geeigneten elektrischen Kontaktzone die Isolierung vom Flachleiter getrennt werden muss. Dies kann während des Kontaktierungsprozesses geschehen, wie es beispielsweise beim Crimpen oder Piercen der Fall ist. Beim Einsatz stoffschlüssiger Fügeverfahren muss die Isolierung jedoch vorab entfernt werden. Für die vorgelagerte Abisolierung von Flachleitern werden mechanische und thermische Verfahren verwendet. Die chemische Abisolierung mit Säuren oder Laugen hat sich in Praxistests für Flachleiterkabel als ungeeignet herausgestellt. Durch den Einsatz von Säuren können die Esterketten im polymeren Isolationsmaterial zwar aufgelöst und damit die Kupferleiterbahnen freigelegt werden, allerdings reagieren die Säuren auch mit der Kupferoberfläche und bilden, wie auch bei den Laugen, aufgrund der Kapillarwirkung zwischen Leiter und Isolation keine definierte Abisolierkante. [124]

Zu mechanischen Abisolierv Verfahren werden Schleifen, Fräsen und Schneiden gezählt. Beim Schleifen erfolgt der Materialabtrag mittels Schleifscheiben die längs oder quer zur Leitungsrichtung angeordnet sein können. Die Flachleiter-Enden werden vollständig von der Isolation befreit, jedoch besteht bei unzureichender Prozesskontrolle die Gefahr, dass entweder die Kupferadern angeschliffen und deren Querschnitt dadurch verringert oder das Isolationsmaterial unvollständig entfernt wird. Diese Problematik stellt sich auch beim mechanischen Abisolieren mittels Scheiben-, Schaft- oder Walzenfräser. Hierbei bietet sich allerdings die Möglichkeit, an unterschiedlichen Stellen eines Flachleiterkabels Isolationsfenster einzubringen. Beim Einsatz eines Stößelsystems wird das Flachkabel an vordefinierten Stellen gegen einen stationären Fräser gedrückt und somit punktuell abisoliert. Mit Walzenfräsern lassen sich darüber hinaus sehr genaue, rechteckige Abisolierfenster erzeugen, deren Ränder rund auslaufen, wodurch die Gefahr der Delamination reduziert wird. Mit Hilfe von Schaftfräsern können Fenster sehr flexibel in Hinblick auf ihre Geometrie in die Kabelisolation eingebracht werden. Ein weiteres, bereits automatisiertes Abisolierv Verfahren ist das Schneiden, bei dem ein oder

mehrere Schneid- oder Formmesser in einem bestimmten Schnittwinkel in das unter ihnen laufende Kabel eindringen und über ihre Schneidkante die Isolation vom Kupferleiter abschälen. Das Abschneiden des auf diese Weise erzeugten Polymerspans erfolgt durch leichtes Anheben der Schneidkante. [15]

Bei thermischen Abisolieretechniken hat sich aufgrund der geforderten hohen Präzision und Wirtschaftlichkeit das CO<sub>2</sub>-Laserstrahlverfahren durchgesetzt, bei dem die Laserlicht absorbierende Isolation des Kabels in einer Tiefe von ca. 5-10 µm schlagartig erhitzt wird, quasi verdampft und sich damit von der Kupferschicht löst. [6, 15] Das Laserstrahl-Abisolieren bietet als selektives Abtragsverfahren eine sehr schnelle und flexible Bearbeitung der Flachleiterkabel, ohne diese unnötig zu beschädigen. Eine Oxidation der Oberfläche der Kupferleiter oder eine Delamination im Umfeld der Isolationsfenster können somit vermieden werden. Zudem ist das Verfahren durch hohe Abtragsraten im Bereich von 0,25 – 0,50 m<sup>2</sup>/min und damit kurze Prozesszeiten gekennzeichnet. Allerdings können beim Verdampfen des Materials toxische Dämpfe entstehen, für die eine entsprechende Absaugeinrichtung vorgesehen werden muss. [12]

### 7.1.2 Direktes stoffschlüssiges Fügen von Flachleitern

Nach dem Entfernen des Isolationswerkstoffs aus den Kontaktzonen der Flachleiterkabel, kann hier eine elektrische Verbindung z. B. durch stoffschlüssiges Fügen erfolgen. Der Fügepartner des Flachleiterkabels kann dabei sowohl ein weiteres Kabel als auch ein Kontaktelement für eine konventionelle Anschlussstruktur sein, Bild 7.1. [116] Auch ein direktes Fügen von Flexleitern auf Leiterplatten ist denkbar. Während für die Leistungsübertragung vor allem Schweiß- und Lötverfahren großtechnisch als Fügeprozesse zum Einsatz kommen, sind zur Signalübertragung auch elektrische Verbindungen mittels Leitkleben möglich. [18, 155]

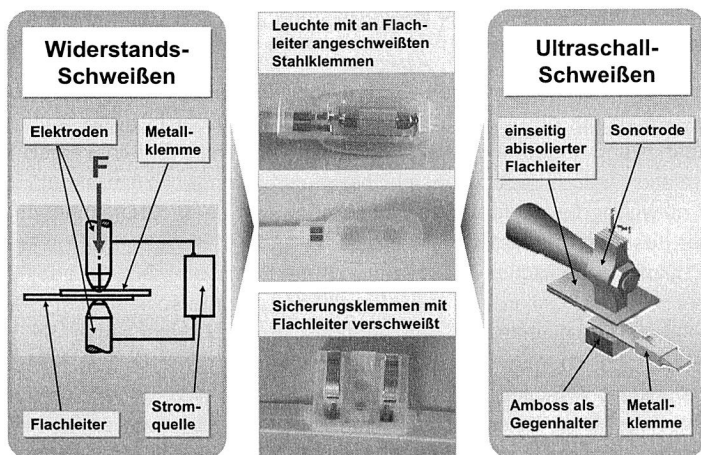


Bild 7.1: Direkte Kontaktierung von Leuchten- und Sicherungsklemmen an Flachleiterkabeln durch Schweißverbindungen (nach [3])

Schweißverbindungen weisen eine hohe mechanische Festigkeit auf. In Versuchen konnten an Verbindungen, die im Widerstandsschweißverfahren hergestellt wurden, Zugfestigkeiten von bis zu 45 N pro Kontakt gemessen werden. [4] Bei den in Bild 7.1 realisierten Kontaktierungslösungen konnte auf Stecker zudem gänzlich verzichtet werden. Während das Kabel beim Widerstandsschweißen beidseitig abisoliert werden muss, ist dies für das Ultraschallverfahren, bei dem die Kontaktflächen unter Druck in einer oszillierenden Bewegung kalt verschweißt werden, nicht zwingend erforderlich. Die Vorteile der Schweißverfahren liegen in der hohen erzielbaren Prozesssicherheit, einer konstanten Fertigungsqualität, einem stabilen Langzeitverhalten sowie einer schnell zu fertigenden elektrischen und mechanischen Verbindung. [65] Durch die Verbindung zweier Flachleiter an freigelegten Kontaktzonen im Überlappungsbereich, können zudem sehr flexibel codierbare Matrixverschaltungen realisiert werden. [146]

Auch das Löten bietet aufgrund des geringen elektrischen Übergangswiderstands an der Kontaktstelle die Möglichkeit, höhere Ströme zu übertragen. Weitere Vorteile sind die mechanisch feste und gasdichte Verbindung, die sich in der Serienproduktion reproduzierbar herstellen lässt. Durch den Einsatz des Geometrie ausgleichenden, formbaren Verbindungsmediums Lotwerkstoff ist es außerdem möglich, eine Kontaktierung von Litzen und Rundleitern mit Flachleitern zu realisieren. [132] Die Fügepartner müssen jeweils an den Kontaktstellen abisoliert sein. Zudem muss der Lotwerkstoff vorab in die Kontaktzone eingebracht werden. Während des Lötprozesses sind Schädigungen der Fügepartner aufgrund des erheblichen Wärmeeintrags möglich. [156]

### **7.1.3 Einsatz von zusätzlichen Kontaktierungselementen**

Die elektrischen Verbindungsverfahren, bei denen zusätzliche Kontaktierungselemente zum Einsatz kommen, sind durch eine große Vielfalt an Ausprägungen gekennzeichnet und schwerpunktmäßig in den Normen DIN 41611 und DIN 60352 sowie in zahlreichen Patentschriften beschrieben. [58, 136] Für die Ankontaktierung von Flachleitern an Kontaktierungselementen werden großtechnisch in erster Linie das Crimpen und Piercen von Leiterzügen eingesetzt. [115] Beim Crimp-Verfahren werden sowohl der Flachleiter als auch das Kontaktierungselement plastisch verformt und dadurch eine nicht lösbare, gasdichte Verbindung zwischen Leiter und Verbindungselement geschaffen. Dabei werden die Einzelleiter durch Kontaktkralen von außen umschlossen und zwischen diesen zusammengepresst. Dies erfolgt in der Regel in vollautomatischen Crimp-pressen mit integrierter Prozessüberwachung. Im Gegensatz dazu Durchstechen die Kontaktkralen beim Piercen die Leiter an verschiedenen Stellen und werden auf der Rückseite umgebogen. [41, 111] Mit Hilfe dieser beiden Fügeverfahren werden die Flachleiterkabel mit standardisierten Verbindungselementen versehen, die anschließend umspritzt oder beispielsweise in einem konventionellen Steckerkorb ähnlich wie Rundleiter fixiert werden können. Problematisch für den vorliegenden Anwendungsfall eines bereits auf dem Türmodul verlegten Flachkabels sind die hohen Prozesskräfte, die zur Umformung der Kontaktelemente notwendig sind, sowie die hierfür erforderliche, beidseitige Zugänglichkeit des Kabels. Aus diesem Grund sind neue Konzepte zur elektrischen Kontaktierung der Flachkabel zu entwickeln.

## 7.2 Entwicklung neuer Konzepte zur elektrischen Kontaktierung der Flachkabel

Bei der Entwicklung neuer Möglichkeiten zur Ankontaktierung flexibler Flachleiterkabel an elektrische Anschlüsselemente, muss die spezielle Geometrie der Flachleiter berücksichtigt werden, da ihr rechteckiger Querschnitt dem Anwender zusätzliche Kontaktierungsoptionen eröffnet. [37] Dabei sind u. a. folgende technische und wirtschaftliche Anforderungen von einem neuen elektrischen Verbindungssystem zu erfüllen:

- Materialauswahl ausgerichtet an Einsatzbedingungen, wie z. B. thermische Einflüsse, mechanische Belastung, Lösungsmittel, Chemikalien
- Platz- und Gewicht sparende Dimensionierung des Verbindungssystems
- Fertigungsgerechtes Design orientiert an automatisierten Prozessschritten [48]

Die im Folgenden erörterten Kontaktierungslösungen enthalten jeweils eine Beschreibung des an das Konzept angepassten Montageprozesses.

### 7.2.1 Elektrische Verbindung über Kontaktierungsmedien

#### Kontaktierung von Flachleitern durch Lochen und Lötén

Verschiedene Möglichkeiten der Kontaktierung von Flachleiterkabeln mit elektronischen Funktionselementen, erschließen sich beim Einsatz eines Lötprozesses.

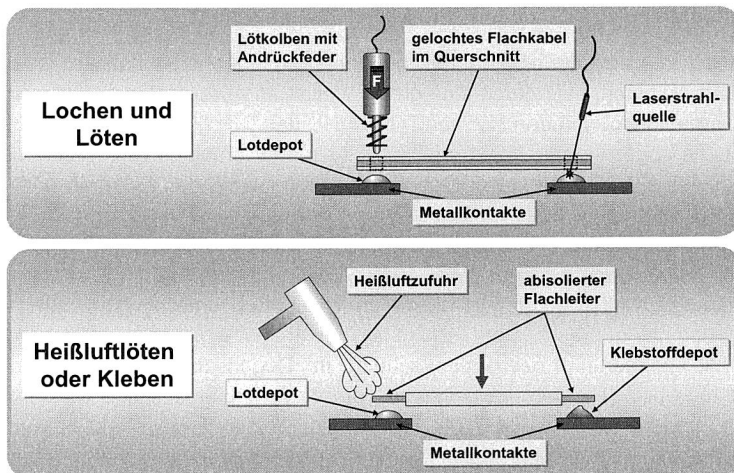


Bild 7.2: Konzepte zur elektrischen Kontaktierung der Flachleiter mittels Lötprozessen oder Leitkleben

Bei der Kontaktierungslösung mittels *Lochen und Lötén* werden in die Kupferbahnen der Einzelleiter Löcher eingebracht, Bild 7.2. Auf der Oberfläche des Kontaktpartners,

der z. B. eine Leiterplatte sein kann, werden Lotdepots in den betreffenden Kontaktzonen platziert. Anschließend wird das Flachkabel mit Hilfe einer Schablone auf die Kontaktoberfläche aufgedrückt. Dabei werden die Lotdepots durch die Öffnungen in der Schablone hindurch z. B. mit Hilfe eines LötKolbens oder eines Laserstrahls aufgeschmolzen und dadurch mit den Kupferleitern elektrisch kontaktiert. Ein entsprechendes „Verfahren zum Verbinden eines flexiblen Flachleiters mit einer Leiterplatte“ wurde von der Firma Conti Temic microelectronic GmbH in 2004 zum Patent angemeldet. [52]

Für die alternativen Lötverfahren mit LötKolben oder Single-Point-Laserstrahl ist jeweils ein zweites Handhabungsgerät zur Positionierung der Wärmequelle erforderlich. Beide Verfahrensvarianten eignen sich nur bedingt für den wirtschaftlichen Einsatz bei einer großen Anzahl zu kontaktierender Lötstellen, da eine Parallelisierung der Lötvorgänge für die einzelnen Kontaktstellen insbesondere beim Laserstrahllöten mit großen Investitionskosten verbunden ist. Ein Vorteil des Laserstrahl löten als berührungsloses Bearbeitungsverfahren ist die geringe und gezielte Wärmeeinbringung, die Beschädigungen oder einen Verzug des Flachkabels erheblich reduziert und gleichzeitig eine deutlich höhere Bearbeitungsgenauigkeit bietet. Allerdings werden dabei aufgrund der sehr geringen Fokusgröße des Laserstrahls auch hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Kabelverlegesystems gestellt.

### **Flachleiter-Kontaktierung durch Heißluftlöten**

Neben den Lötverfahren mit gezieltem Wärmeeintrag ist auch ein Verlöten der Flachleiter-Enden mit Heißluft möglich. Ähnlich wie beim Lochen und Löten wird hierbei vorab ein Lotdepot auf die Oberfläche des Kontaktierungspartners aufgebracht, Bild 7.2. Das Flachkabel wird mit seinem abisolierten Ende auf das Lotdepot gedrückt, während dieses durch Heißluft aufgeschmolzen wird und sich dadurch mit dem abisolierten Flachleiter elektrisch verbindet. Auf diese Weise ist es durch eine entsprechende Handhabung des Heißluftkopfes möglich, mehrere Adern gleichzeitig zu verlöten. Durch die, im Verhältnis zum Laserstrahl löten, weit gestreute, starke Wärmeeinwirkung, ist dieses Verfahren in erster Linie für die Kontaktierung wärmeunempfindlicher Werkstücke geeignet. Ein weiterer Nachteil dieser Verbindungsalternative ist die Tatsache, dass der Flachleiter zur Erzeugung einer möglichst großen, Wärme absorbierenden Kontaktzone abisoliert werden muss, was neben der erhöhten Prozessdauer auch zu einer Verringerung der Verfügbarkeit des gesamten Verlegeprozesses führt. Schließlich führt der erforderliche Einsatz eines zweiten Handhabungsgerätes für die Positionierung der Heißluftdüse zu gesteigerten Investitionskosten und einem erhöhten Steuerungsaufwand.

### **Kontaktierung von Flachleitern mittels Leitkleben**

Die elektrische Verbindung der abisolierten Flachleiter mit einem Kontaktierungspartner kann darüber hinaus durch Leitkleben realisiert werden. Hierfür werden elektrisch leitende Klebstoffe eingesetzt, für die als Basischarze Epoxide, Silikone oder Polyimide zur Anwendung kommen und die im ungefüllten Zustand Nichtleiter sind. Zur Herstellung

einer elektrischen Leitfähigkeit werden als metallische Füllstoffe im Allgemeinen Palladium, Gold, Silber, Kupfer, Nickel und Graphit verwendet. [105] Bei der Kontaktierung mittels Leitkleben wird, ähnlich den Lötprozessen, in einem, dem eigentlichen Kabelverlegeprozess vorgelagerten, Verfahrensschritt auf die Oberfläche des Kontaktpartners mit Hilfe eines Dispensers ein Klebstoffdepot aufdosiert. Das Flachkabel wird beim Verlegen mit seinen vorher abisolierten Flachleiter-Enden bis zur Aushärtung in den Klebstoff gedrückt. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die große Einsatzflexibilität in Bezug auf die Leiterbahngeometrie. Ein großer Nachteil ist die im Vergleich zum Lötprozess sehr lange Aushärtedauer von mehreren Minuten bei hoher Temperatur, durch die die Wirtschaftlichkeit der Kontaktierungsmethode erheblich eingeschränkt wird.

## 7.2.2 Elektrische Kontaktierung durch Klemmen der Flachleiter

### Kontaktierung mittels Bogenklemmverfahren

Die Kontaktierung der Flachleiterkabel nach dem *Bogenklemmverfahren* verläuft unter Ausnutzung der Freiheitsgrade des 6-Achs-Roboters. Zunächst wird das Flachleiterkabel durch ein geeignetes, in die Materialbereitstellungseinheit integriertes, Abisolierverfahren am vorderen Ende des Verlegewerkzeugs abisoliert. Dieses Flachkabelende, das leicht aus dem Verlegewerkzeug heraussteht, wird in einem ersten Schritt in die Metallklemmen einer Kontaktbuchse geschoben, Bild 7.3.

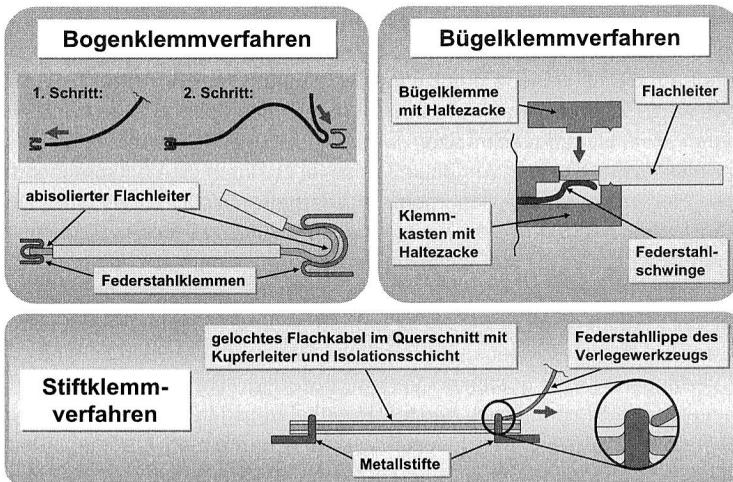


Bild 7.3: Konzepte für die Kontaktierung von Flachleitern durch Klemmen

Nachdem das Kabel flach auf der Oberfläche des Türmoduls verlegt wurde, vollzieht das Verlegewerkzeug mit Hilfe des Roboters kurz vor der zweiten Kontaktbuchse eine bogenförmige Verfahrbewegung, an deren Ende das Kabel um ca. 180° zurückgefaltet wird. Die Falte, des an dieser Stelle abisolierten Flachleiters, wird in einem zweiten Montageschritt in die Metallklemmen der Kontaktbuchse gedrückt.



Ein Vorteil dieser Kontaktierungslösung ist die Tatsache, dass für deren Realisierung lediglich ein Handhabungsgerät benötigt wird, wodurch sich die Investitionskosten für das Verlegesystem gering gehalten werden können. Außerdem stellt die Kontaktierung der Flachleiter mittels Metallklappen eine verbreitete elektrische Verbindungstechnik dar. Ein Nachteil dieser Verbindungslösung ist der erhöhte Materialbedarf, der durch das Vorhandensein eines längeren, freien Flachleiter-Endes entsteht. Außerdem kann die Ausbildung eines Flachleiterbogens während des Verlegeprozesses zu einem späteren Abheben des Kabels vom Untergrund führen. Die sehr komplizierte, bogenförmige Verfahrbewegung führt zudem zu einer verlängerten Prozessdauer, einer geringen Reproduzierbarkeit des Fügeprozesses und einer deutlich reduzierten Verfügbarkeit.

### **Kontaktierung von Flachleitern im Bügelklemmverfahren**

Beim *Bügelklemmverfahren* besteht die Verbindung aus einem Klemmkasten mit integrierten Metallschwingen und der Bügelklemme als Gegenhalter, zwischen denen das vorher an seinem Ende abisolierte Flachkabel gehalten wird, Bild 7.3. Der Klemmkasten muss bei dieser Kontaktierungslösung auf dem Layoutträger vorkonfektioniert werden. Nach der Verlegung des Flachkabels werden die Bügelklappen durch ein zweites Handhabungsgerät zugeführt und zum Beispiel mit Hilfe von zwei seitlich angebrachten Schnapphaken gefügt. Zur Unterstützung der Fixierung des Flachkabels am Klemmkasten sind daran und an der Bügelklemme Haltezacken angebracht, die sich während des Fügevorgangs in die Isolation des Flachkabels drücken.

Vorteilhaft erweisen sich für das Bügelklemmverfahren die solide Bauweise der Verbindungselemente und die hohe Verfügbarkeit dieser Verbindungstechnik, die sich an bereits auf dem Markt befindliche Kontaktierungssysteme anlehnt. Das Prinzip der Kontaktierung von Flachleitern durch Verpressen der Kontaktzonen mit quasi federnd gelagerten Klappen wird in unterschiedlichen Ausprägungen für zahlreiche serienmäßige Verbindungssysteme eingesetzt und findet sich auch in verschiedenen aktuellen Patentanmeldungen, wie beispielsweise der „Lösbaren elektrischen Kontaktierung dreidimensionaler spritzgegossener Schaltungsträger“, wieder. [8, 43] Nachteile des Bügelklemmverfahrens sind die Notwendigkeit des Vorhandenseins eines zweiten Handhabungsgerätes, das die Investitionskosten für das Gesamtsystem erhöht, sowie Mehrkosten für die Lagerung und den Transport der Bügelklappen, die beim Fügeprozess separat vorgehalten werden müssen. Außerdem führt der Einsatz zusätzlicher Verbindungselemente zu einer Erhöhung des Gesamtgewichts des Pkw-Türmoduls. Auch diesem Verfahren ist der Verfahrensschritt des Abisolierens vorgelagert, der die Gesamtprozessdauer erhöht und eine Verringerung der Verfügbarkeit des Verlegeprozesses mit sich bringt, da ein unsauberes Abisolieren der vorderen Flachleiter-Enden zum Verhaken des Kabels beim Einführen in das Verlegewerkzeug führen kann.

### **Flachleiter-Kontaktierung durch Stiftklemmverfahren**

Bei der Kontaktierung der Flachleiterkabel mittels *Stiftklemmverfahren*, wird der Flachleiter nicht abisoliert, sondern, wie beim Verbindungsverfahren Lochen und Löten, in

einem vorgelagerten Prozessschritt in der Beschickereinheit an den späteren Kontaktstellen gelocht. Die Löcher werden dabei in der Mitte der flachen Leiter platziert, um eine zylindrische Kontaktfläche zu erzeugen. Auf dem Pkw-Türmodul werden an den Kontaktstellen entsprechende Metallstifte angebracht. Bei der Flachkabelverlegung werden die Löcher in den Flachleitern über den Metallstiften positioniert und mit Hilfe eines Andruck-Mechanismus, z. B. geformte Federlippen oder Rollen, auf die Stifte geschoben.

Ein Vorteil dieses Verbindungsverfahrens ist die gute Reproduzierbarkeit des Lochens des Flachleiters zum Beispiel im Vergleich zum Abisolieren mit Hilfe eines Walzenfräserpaares. Auch die Abfuhr des Bearbeitungsabfalls gestaltet sich beim Lochen erheblich einfacher als beim Fräsen. Zudem wird das Verhaken des Flachkabels beim Einzug in das Verlegewerkzeug, wie es bei einem unsauberen Abisolieren des Flachkabelanfangs entstehen kann, durch die glatte Schnittfläche am Flachleiteranfang vermieden. Ein weiterer Vorteil dieser Verbindungslösung ist deren geringes Gewicht, da auf zusätzliche Verbindungselemente verzichtet wird. Ein Nachteil der Kontaktierung durch Stiftklemmen ist die geringe Widerstandsfähigkeit der Verbindung gegenüber Erschütterungen und Schwingungen, die über plastische Verformungen zu einem Ausschlagen der Presspassungen und damit einer Verringerung der Kontaktfläche führen können. Im Extremfall ist dadurch auch ein Loslösen des Flachleiterkabels möglich. Außerdem kann beim Aufdrücken des Flachleiters auf die Metallstifte ein Teil der Isolation auf der Flachkabel-Unterseite mit in den Pressverband geschoben werden. Dadurch wird wiederum die Kontaktfläche und somit die Größe der maximal übertragbaren Stromstärke reduziert.

### 7.2.3 Zusammenfassender Vergleich der Konzepte

Bei einem Vergleich der drei vorgestellten Konzepte zur elektrischen Kontaktierung unter Einsatz von Verbindungsmedien erweist sich das Verfahren Lochen und Löten mittels LötKolben zunächst als zielführendste Alternative, da es sich z. B. durch die Entkoppelung des Verlegeprozesses vom Lötprozess in den bereits vorgestellten Montageprozess am zuverlässigsten integrieren lässt. Es wurden deshalb Versuchsreihen zum Kontaktieren mittels Lochen und Löten durchgeführt, bei denen Flachleiter mit unterschiedlich großen Löchern versehen und auf Versuchsplatinen mit verschieden großen LötKolbenspitzen verlötet wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass für die Herstellung einer zuverlässigen elektrischen Verbindung die Löcher in den Flachleitern auf der Ober- und der Unterseite kreisrund abisoliert werden müssen, so dass  $r_{\text{Abisolierung}} \gg r_{\text{Loch}}$  gilt. Das um den Abisolierprozess erweiterte Kontaktierungsverfahren *Lochen, Abisolieren und Löten* hat sich bei den Versuchen als realisierbare Kontaktierungsmöglichkeit erwiesen, die allerdings durch den Verfahrensschritt des Abisolierens einen erheblichen zusätzlichen Vorbereitungsaufwand mit sich bringt.

Bei einer näheren Betrachtung der Alternativen zur elektrischen Kontaktierung durch Klemmen der Flachleiter, erweist sich das Bügelklemmverfahren am ehesten für den Einsatz in der Automobiltür geeignet, da diese Verbindungsart derartig ausgelegt werden kann, dass sie den hohen dynamischen Belastungen an diesem Einsatzort ge-

wachsen ist. Das dahinter liegende Grundprinzip der Kontaktierung findet sich auch in verschiedenen konventionellen, lösbaren Steckverbindingssystemen auf Seiten der Buchse wieder, die als männliches Gegenstück allerdings in der Regel nicht den blanken Leiter, sondern eines der in Kapitel 7.1.3 genannten Kontaktierungselemente besitzt. Diese Tatsache hat verschiedene Ursachen. Zum einen lassen sich mit Hilfe der Kontaktierungselemente definierte Kontaktgeometrien zur optimalen elektrischen Verbindung von Stecker und Buchse erzeugen. Zum anderen ist es dadurch möglich, die Kontaktpartner auf einfache Weise mit speziellen Oberflächenmetallisierungen zur weiteren Verbesserung der Verbindungsqualität zu versehen.

Für die nicht lösbare Verbindung zwischen Flachleiter und Kontaktierungselement bieten die hier eingesetzten Verfahren Crimpen oder Piercen eine hohe Verbindungsqualität. Die Integration dieser Verfahren in den neu entwickelten Prozess einer automatisierten Verlegung von Flachleiter-Meterware auf Pkw-Türaggregateträgern ist jedoch aus verschiedenen Gründen nicht zielführend. Zum einen wäre es in diesem Fall erforderlich, diese Verfahren der Flachkabelverlegung vorzulagern, da das nachträgliche Fügen der Kontaktierungselemente am verlegten Kabel einen erheblichen Steuerungsaufwand bedeuten würde, sofern diese massive Fügetechnik hierfür überhaupt mobilisiert werden könnte. Zum anderen müssten die Kontaktierungselemente anschließend exakt in das Gegenstück der elektrischen Verbindung gesteckt werden. Auch dies würde einen sehr großen, steuerungstechnischen Aufwand mit sich bringen, der die automatisierte Flachkabelverlegung schnell unwirtschaftlich macht. Somit bleibt festzuhalten, dass keines der vorgestellten konventionellen und neuen Verfahren in der Lage ist, die aus dem neu entwickelten Flachkabel-Verlegeprozess erwachsenden Anforderungen zu erfüllen. Aus diesem Grund wurde ein neues elektrisches Verbindungsprinzip entwickelt, das eine Kontaktierung der auf der Türmodul-Oberfläche verlegten Flachkabel ohne vorheriges Abisolieren und parallel zum Fügeprozess der Funktionskomponenten des Türmoduls ermöglicht, die so genannte *Federklammer-Direktkontaktierung*, die im Folgenden näher erläutert wird.

## 7.3 Funktionsprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

### 7.3.1 Beschreibung des Kontaktierungskonzeptes

Hinter dem Konzept der Federklammer-Direktkontaktierung steht die Grundidee, ein federndes Kontaktierungselement einzusetzen, mit dessen Hilfe die Isolationsschicht durchstoßen und eine direkte elektrische Kontaktierung mit dem Flachleiter realisiert werden kann. In Bild 7.4 ist der prinzipielle Ablauf des Verfahrens der Federklammer-Direktkontaktierung dargestellt. Die Kontaktfeder besitzt an ihrer Spitze eine Schneidkante, die unter Krafteinwirkung die Isolationsschicht des Flachkabels durchsticht, auf dessen Metalloberfläche abgleitet und die Kontaktfeder dabei verformt. Die Krafteinleitung in die Kontaktfeder sowie deren Geometrie müssen dahingehend angepasst werden, dass einerseits die Metallschicht beim Kontaktierungsvorgang nicht durchstoßen wird, andererseits die Kontaktfeder nicht auf der Isolationsschicht abgleitet. Um

diesen Kontaktierungsvorgang parallel zum Fügeprozess der Funktionskomponenten realisieren zu können, sollte die Krafteinleitung nach Möglichkeit in der selben Richtung erfolgen wie die Fügebewegung.

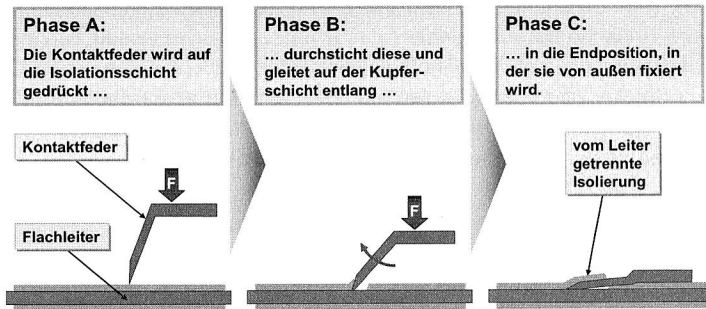


Bild 7.4: Grundprinzip des Federklammer-Direktkontaktierungsverfahrens

Damit die Kontaktfeder zuverlässig auf der Metalloberfläche abgeleitet, muss beim Aufdrücken der Feder eine Kraftkomponente längs zum Flachleiter generiert werden. Diese Situation wird dadurch erzeugt, dass das Federbein von vorn herein in einem bestimmten Winkel zur Leiteroberfläche geneigt ist. Dieses Prinzip der einseitigen Kontaktierung mittels Federelement birgt allerdings die Gefahr, dass das Flachkabel beim Aufdrücken der Feder in seiner Längsachse verschoben wird. Zudem besteht die Gefahr eines lateralen Verschiebens der Feder aufgrund der asymmetrischen Kraftverteilung. Um die Zuverlässigkeit der Kontaktierungslösung zu verbessern, wird deshalb das in Bild 7.4 dargestellte Grundprinzip gespiegelt und die Kontaktfeder durch eine Kontakt-Federklammer ersetzt, Bild 7.5. Gleichzeitig wird die Erzeugung der Kraftkomponente längs zum Flachleiter fortan durch eine U-förmige Federklammer erzeugt, die auf die in einem bestimmten Winkel geneigte Oberfläche des über *Kontaktberge* bzw. in *Kontakttäler* verlegten Flachkabels trifft.

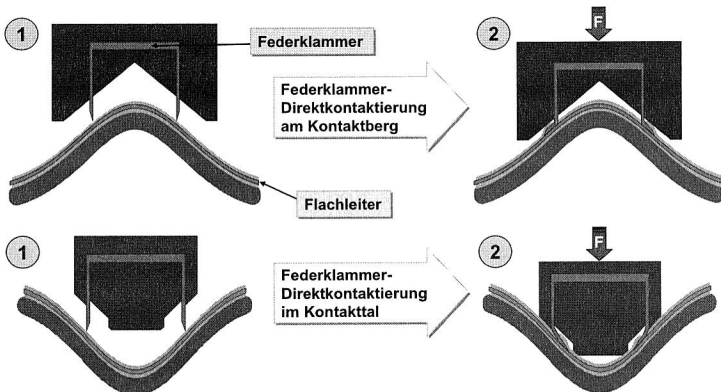


Bild 7.5: Federklammer-Direktkontaktierung am Kontaktberg und im Kontakttal

Durch die Ausführung des federnden Kontaktelements als Klammer wird jeder Flachleiter an je zwei Stellen kontaktiert. Die dadurch erreichte Redundanz und die vergrößerte Kontaktfläche verringern den elektrischen Übergangswiderstand und erhöhen die Zuverlässigkeit der Kontaktierung. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus wirken die während der Kontaktierung an den beiden Klammerbeinen auftretenden Biegekräfte einander entgegen und bewirken einen Selbstzentrierungseffekt der Kontaktierungseinheit auf dem Kontaktberg bzw. im Kontakttal, der die Zuverlässigkeit dieser elektrischen Verbindung zusätzlich erhöht. Die Kontaktberge und -täler können bei der Fertigung des räumlich geformten Pkw-Türaggregateträgers mit eingebracht werden und stellen somit keinen Mehraufwand bei dessen Herstellung dar. Die Verlegung des Flachkabels über diese Kontaktelemente ist mit Hilfe des vorgestellten Werkzeugprinzips problemlos durchführbar. Besonders vorteilhaft ist die große Flexibilität dieses Kontaktierungsverfahrens, die es möglich macht, nicht nur an den Kabelenden zu kontaktieren, sondern auch Kontaktstellen auf dem gesamten Verlegeweg zu realisieren. Entsprechende Optionen werden in verschiedenen Anwendungsbeispielen in Kapitel 7.5 aufgezeigt.

### 7.3.2 Betrachtung der Kräfteverteilung beim Fügeprozess

Damit der Kontaktierungsvorgang wie beschrieben verläuft, müssen verschiedene geometrische Randbedingungen bei der Auslegung des in Bild 7.5 dargestellten Kontaktierungssystems beachtet werden. Diese Randbedingungen werden im Folgenden exemplarisch durch die Betrachtung der Kräfteverteilung in der Kontaktzone einer Federklammer-Direktkontaktierung am Kontaktberg in den unterschiedlichen Phasen des Fügeprozesses aufgestellt, Bild 7.6. Zunächst wird eine Kräftebetrachtung zum Zeitpunkt des Auftreffens des Klammerbeins auf der Isolationsschicht des Flachleiterkabels durchgeführt. Am Klammerbein entstehen folgende Kräftegleichgewichte:

$$\uparrow: \quad F_A = F_R \cdot \sin \alpha + F_N \cdot \cos \alpha \quad (7.1)$$

$$\rightarrow: \quad F_R \cdot \cos \alpha = F_N \cdot \sin \alpha \quad (7.2)$$

Nach Auflösung des Gleichungssystems erhält man einen Zusammenhang zwischen der Anpresskraft  $F_A$  des Klammerbeins und der Reibwirkung  $F_R$  der Kabeloberfläche:

$$F_A = F_R \cdot \left( \sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) = \frac{F_R}{\sin \alpha} \quad (7.3)$$

Dieser Zusammenhang gilt für das Auftreffen des Klammerbeins sowohl auf der Isolationsschicht als auch auf dem Flachleiter. Allerdings soll sichergestellt sein, dass zwar die Isolationsschicht, nicht aber der Leiter durchtrennt wird. Diese Situation wird erreicht, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

$$F_{\text{trenn, Leiter}} > F_A > F_{\text{trenn, Isolation}} = \frac{F_{R \text{ max, Isolation}}}{\sin \alpha} \quad (7.4)$$

mit

$$F_{R \text{ max, Isolation}} = F_N \cdot \mu_0 (\text{Werkstoffpaarung; Oberflächenbeschaffenheit}) \quad [50]$$

In der, in Bild 7.6 links dargestellten, Phase A des Fügeprozesses darf die Anpresskraft  $F_A$  nicht kleiner sein als die zum *Durchstechen der Isolationsschicht erforderliche Kraft*  $F_{trenn, Isolation}$ , da sonst die maximal zwischen Schneide und Kunststoffisolation auftretende *Haftreibung*  $F_{Rmax, Isolation}$  überschritten wird und die Schneide an der Isolationsschicht abgleitet. Auf der anderen Seite darf  $F_A$  aber auch nicht die zum *Durchstechen des Flachleiters erforderliche Kraft*  $F_{trenn, Leiter}$  überschreiten, da dieser sonst beschädigt wird. Um dies zu gewährleisten, können verschieden Größen des Kontaktierungssystems entsprechend angepasst werden. So können beispielsweise Werkstoff und Dicke der Isolationsschicht des Leiters sowie deren Oberflächenrauheit vorab zur Erzeugung des gewünschten Reibbeiwerts in Kombination mit der Federklammerschneide festgelegt werden. Auch über die Einstellung des *Schrägenwinkels*  $\alpha$  können die beschriebenen Kontaktierungsfehler vermieden werden. Schließlich lässt sich über die Anpassung der Federbeingeometrie, zum Beispiel durch eine scharfe Schneide, ein definierter Kontaktierungsvorgang herbeiführen.

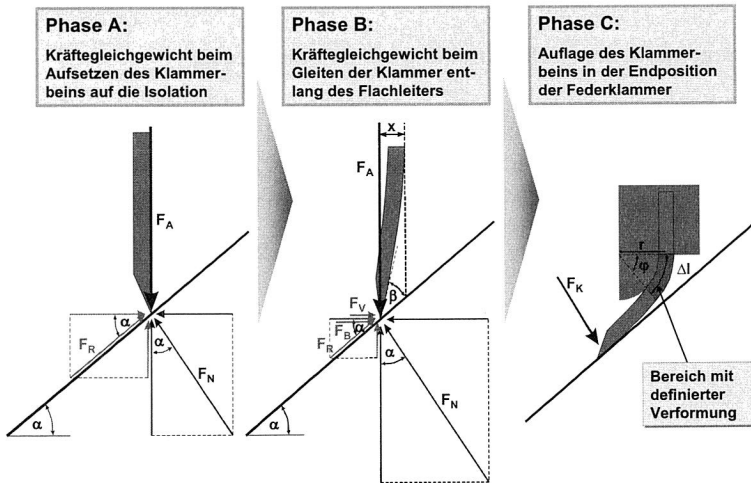


Bild 7.6: Kräftegleichgewichte am Federklammerbein während des Fügeprozesses

In Phase B des Fügeprozesses soll das Klammerbein auf dem Flachleiter abgleiten. Beim Einsetzen des Gleitvorgangs der Schneide auf dem Leiter müssen die aus der *Federauslenkung*  $x$  des Klammerbeins resultierende *Biegekraft*  $F_B$  und die *Kraft*  $F_V$  zum *Verdrängen der Isolation* zusätzlich aufgebracht werden. Die Biegekraft eines freien Federbeins mit der *Länge*  $l$  wird für einen rechteckigen Querschnitt wie folgt bestimmt:

$$F_B = \frac{3EI}{l^3} \cdot x \quad \text{mit} \quad I = \frac{bd^3}{12} \quad (7.5)$$

Die Kraft zur Verdrängung des Isolationsmaterials  $F_V$  ist eine komplexe Funktion, die unter anderem von folgenden Größen abhängt:

$$F_V = f(\text{Grenzflächenhaftung}; \text{Isolationswerkstoff}; \text{Federbeingeometrie}; x; \alpha)$$

Ausgehend von der in Bild 7.6 mittig dargestellten Kräfteverteilung beim Gleitvorgang der Federklammer entlang des Flachleiters ergeben sich am Klammerbein folgende Kräftegleichgewichte:

$$\uparrow : \quad F_A = F_R \cdot \sin \alpha + F_N \cdot \cos \alpha \quad (7.6)$$

$$\rightarrow : \quad F_R \cdot \cos \alpha + F_B + F_V = F_N \cdot \sin \alpha \quad (7.7)$$

Nach Auflösung dieses Gleichungssystems ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen der Anpresskraft  $F_A$  des Klammerbeins und der Reibwirkung  $F_R$  auf der Flachleiteroberfläche in Phase B des Fügeprozesses:

$$F_A = F_R \cdot \left( \sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) + \frac{F_B + F_V}{\tan \alpha} = \frac{F_R}{\sin \alpha} + \frac{F_B + F_V}{\tan \alpha} \quad (7.8)$$

Damit überhaupt ein Gleiten des Klammerbeins auf dem Flachleiter stattfindet, aber die Schneide des Federkammerbeins auch nicht in den Leiter eindringt, muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$F_{\text{trenn, Leiter}} > F_{A, \text{Gleitvorgang}} > \frac{F_{R \text{ max, Leiter}}}{\sin \alpha} + \frac{F_B + F_V}{\tan \alpha} \quad (7.9)$$

mit

$$F_{R \text{ max, Leiter}} = F_N \cdot \mu(\text{Werkstoffpaarung; Oberflächenbeschaffenheit}) \quad [50]$$

Je weiter der Gleitvorgang des Federklammerbeins voranschreitet, desto größer wird die Federbeinauslenkung  $x$  und desto kleiner wird der *Kontaktwinkel*  $\beta$ . Durch gezielte Veränderungen der Werkstoffpaarung und der Oberflächenbeschaffenheit des Leiters sowie dem Einsatz einer steileren Schräge  $\alpha$  des Kontaktberges, kann wiederum die Zuverlässigkeit des Kontaktierungsvorgangs erhöht werden. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Grenzflächenhaftung zwischen Isolationswerkstoff und Leiteroberfläche möglichst klein ist.

In Phase C des in Bild 7.6 dargestellten Fügeprozesses liegt das Ende des Federklammerbeins in seiner Endposition glatt auf der Flachleiteroberfläche und wird auf diese mit einer bestimmten Kontaktkraft gedrückt. Diese Kontaktkraft ergibt sich aus der elastischen Verformung des freien Federbeinendes. Da der Übergangswiderstand mit größer werdender Kontaktkraft abnimmt, muss die Kontaktierung so ausgelegt werden, dass die Kontaktkraft möglichst groß wird. Die maximal erreichbare *Federkontaktkraft*  $F_{K \text{ max}}$  ist durch die Elastizitätsgrenze festgelegt, die hier mit der *0,2 %-Dehngrenze*  $R_{p0,2}$  gleichgesetzt werden kann: [23]

$$F_{K \text{ max}} = \frac{3EI}{l^3} \cdot x_{\text{max}} \quad \text{mit} \quad I = \frac{bd^3}{12} \quad \text{und} \quad x_{\text{max}} = \frac{2l^2 \cdot R_{p0,2}}{3d \cdot E} \quad (7.10)$$

$$F_{K \text{ max}} = \frac{bd^2 \cdot R_{p0,2}}{6l} \quad (7.11)$$

Bei der Auswahl des Klammerwerkstoffs ist eine hohe Elastizitäts- bzw. Dehngrenze demzufolge von Vorteil. Durch eine Veränderung der Klammerbeingeometrie kann die Federkraft zudem optimiert werden. Dabei sollte die Feder allerdings nicht zu steif ausgelegt werden, da sonst die Gefahr einer Beschädigung der Flachleiteroberfläche besteht.

$$\Delta l = r \cdot \varphi \quad (7.12)$$

Durch eine gezielte Verkürzung der *freien Federbeinlänge*  $l$  um  $\Delta l$  während der Biegephase, beispielsweise mittels der, in Bild 7.6 rechts dargestellten, ausgeformten Rundung, kann eine definierte Verformung des Klammerbeins erreicht werden.

## 7.4 Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der Kontaktierungslösung

### 7.4.1 Festlegung der Untersuchungsparameter

Zur Bestimmung optimaler Prozessbedingungen für die Feder-Klammer-Direktkontaktierung, werden Kontaktierungsversuche mit sich verändernden Parametern durchgeführt. Neben der Identifikation wichtiger Einflussgrößen sind Bewertungskriterien aufzustellen, mit denen die Kontaktierungsergebnisse beurteilt werden können. Wie sich bereits aus der Betrachtung der Kräfteverteilung herausstellte, hat der Schrägenwinkel  $\alpha$  des Kontaktbergs einen großen Einfluss auf den Fügeprozess. Wird er zu groß gewählt, besteht die Gefahr des Abgleitens auf der Isolation. Wird er hingegen zu klein gewählt, kann dies zum Beschädigen des Leiters führen. Auch das Federverhalten des Federklammerbeins wird in diesem Zusammenhang über die Dicke  $d$  und die freie Klammerbeinlänge  $l$  variiert, um den Einfluss der Federkraft auf das Kontaktierungsergebnis zu prüfen. Aufgrund der Abhängigkeit der Federwirkung vom Klammerwerkstoff, insbesondere in Hinblick auf deren Langzeitverhalten, werden in den Versuchen zudem unterschiedliche Klammerwerkstoffe eingesetzt. Da die Kraft zur Verdrängung des Isolationsmaterials  $F_V$  unter anderem von der Grenzflächenhaftung zwischen Isolationsschicht und Leiter des Flachleiterkabels abhängt, werden darüber hinaus Tests an Kabeln mit niedrigem und hohem Haftsitz durchgeführt.

Die Untersuchungen zu den jeweiligen Kontaktierungsprozessen erfolgen mit Hilfe von Kontaktierungseinheiten, die an einer Materialprüfmaschine zur Zug-/Druck-Kraftmessung installiert sind. In dieser Prüfeinrichtung wird der Fügeprozess bei der Federklammer-Direktkontaktierung nachgestellt, indem eine mit Federklammern bestückte Kontaktierungseinheit gegen einen Kontaktberg gefahren wird, auf dem vorab ein Flachleiter appliziert wurde, Bild 7.7. Dabei werden gleichzeitig zwei Messwerte aufgenommen; die während des Fügeprozesses von der Zug-/Druck-Prüfmaschine aufzubringende Vertikalkraft sowie der elektrische Übergangswiderstand zwischen Federklammer und Flachleiter. Am Prüf-PC können die beiden Werte mit Hilfe der Software *Zwick testXpert* aufgezeichnet und verarbeitet werden. Die Messung des Übergangswiderstands erfolgt in konventioneller Vierleitertechnik direkt an der Kontaktierungseinheit und am Flachleiter mit einer Messeinrichtung, die Widerstände im Milliohm-Bereich erfassen kann und die mit der Steuerung der Materialprüfmaschine verbunden ist.



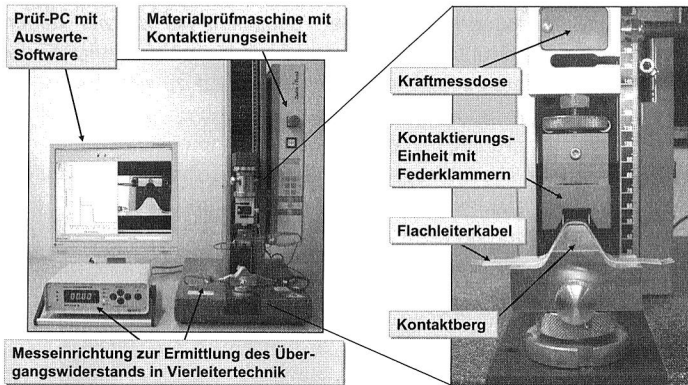


Bild 7.7: Prüfeinrichtung zur Untersuchung des Fügeprozesses bei der Federklammer-Direktkontaktierung

Während des Fügeprozesses kann die Kontaktzone zudem mittels Videoaufzeichnung überwacht werden, die ebenfalls in der Auswerte-Software gespeichert wird, sodass einzelne Videobilder, beispielsweise für Ausreißer im Kurvenverlauf, auch nachträglich analysiert werden können. Die Proben werden anschließend jeweils einer visuellen Prüfung unterzogen, um zusätzliche Informationen zum Fügeprozess, wie z. B. ob ein Bein auf der Isolation abgeglitten ist oder ob Reste der Isolation auf dem Leiter zurückgeblieben sind, zu erhalten.

#### 7.4.2 Feder-Klammer-Direktkontaktierung in vier Phasen

Für den eigentlichen elektrischen Kontaktierungsprozess, der während der in Bild 7.6 dargestellten Phase B stattfindet, wurde ein charakteristischer Kurvenverlauf für beide Messgrößen ermittelt, der sich wiederum in vier Phasen gliedern lässt, Bild 7.8.

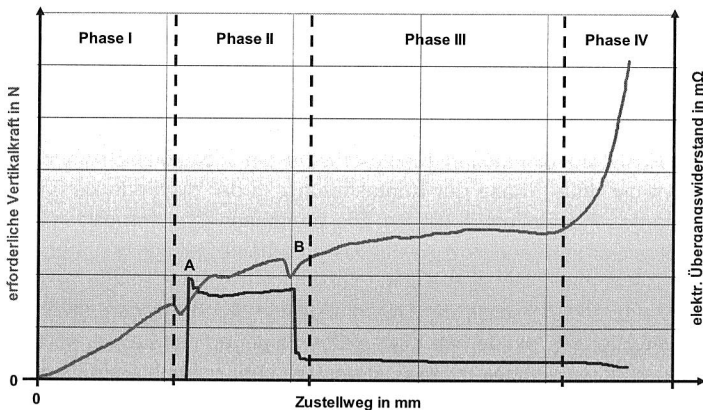


Bild 7.8: Charakteristisches Messdiagramm mit vier Kontaktierungsphasen

Zunächst werden die Messungen, bei denen prinzipiell bis zu vier nebeneinander liegende Flachleiter im Kabel untersucht werden können, mit nur einer Federklammer durchgeführt, um ein genaueres Bild vom Prozessverlauf zu erhalten. Mit dem Aufsetzen des Federklammerbeins auf der Isolationsschicht beginnt die in Bild 7.9 dargestellte Phase I des Kontaktierungsprozesses, in der die Anpresskraft auf die Flachkabelisolation stetig zunimmt. In dieser Phase ist die Isolationsschicht noch nicht durchtrennt, weshalb auch noch kein elektrischer Übergangswiderstand zwischen Federklammer und Flachleiter gemessen werden kann.  $\Omega$

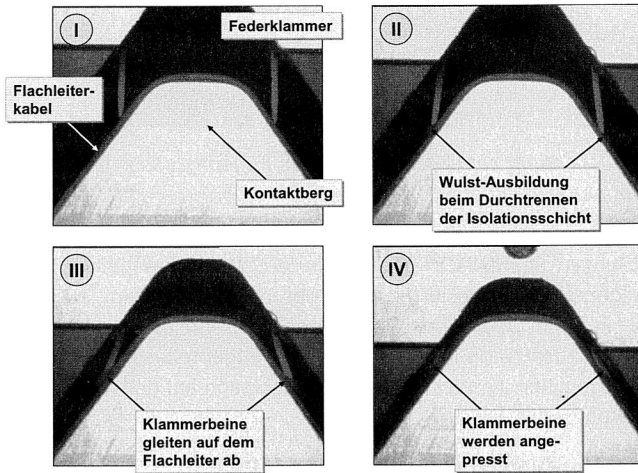


Bild 7.9: Vier Phasen der elektrischen Kontaktierung von Flachleiterkabeln mittels Federklammer

In der zweiten Phase überschreitet die Anpresskraft  $F_A$  den Wert  $F_{\text{trenn, Isolation}}$ , bei dem die Kunststoffschicht durchtrennt wird, wodurch die Anpresskraft kurzzeitig abfällt. An *Punkt A* setzt das erste Klammerbein auf dem Flachleiter auf und bildet eine, durch die Widerstandsmesskurve belegte, erste elektrische Verbindung. Kurze Zeit später durchbricht auch das zweite Klammerbein die Isolationsschicht und berührt ebenfalls den Leiter. Dies führt an *Punkt B* zu einem markanten Abfall des Gesamtübergangswiderstands. Nachdem die beiden Klammerbeine die Isolationsschicht durchstoßen haben, beginnt die dritte Phase der Kontaktierung, in der die Federklammerbeine auf der Oberfläche des Flachleiters abgleiten. Die Gleitphase ist durch den in Kapitel 7.3.2 bereits charakterisierten Biegeprozess der Klammerbeine gekennzeichnet, die sich dabei unter die Isolationsschicht des Kabels schieben. In dieser Phase ändern sich die gemessene Krafterleitung sowie der Übergangswiderstand nur geringfügig. Die vierte Phase der Kontaktierung, bei der die Klammerbeine gegen den Leiter gepresst werden, ist durch einen starken Anstieg im Kraftverlauf gekennzeichnet. Gemäß der in Kapitel 7.3.2 beschriebenen Gesetzmäßigkeit, nimmt der Übergangswiderstand an dieser Stelle noch einmal geringfügig ab.

Für die Realisierung einer zuverlässigen Kontaktierung ist es erforderlich, dass die Fügebewegung vor Erreichen der vierten Phase gestoppt wird, da die Federklammerbeine durch die hier auftretenden hohen Anpresskräfte noch einmal plastisch verformt werden und sich damit der Rückfederweg des Klammerbeins verkürzt. Da ein Kriechen in den polymeren Komponenten der Kontaktierungseinheit und die damit verbundene Verringerung der Anpresskraft auf Dauer kaum vermeidbar sind, könnte dabei die elastische Rückfederwirkung und damit die Kontaktkraft herabgesetzt werden. [25, 27]

### 7.4.3 Einfluss des Schrägenwinkels des Kontaktbergs

Zur Untersuchung des Einflusses des Schrägenwinkels  $\alpha$  am Kontaktberg auf das Kontaktierungsverhalten, werden Versuchsreihen mit Federklammern aus Kupferberyllium und Stahl auf Kontaktbergen mit verschiedenen Schrägenwinkeln durchgeführt, Bild 7.10. Die Federklammerbeine besitzen eine standardmäßige Breite  $b = 1,25 \text{ mm}$  sowie unterschiedliche freie Beinlängen  $l$  und -dicken  $d$ .

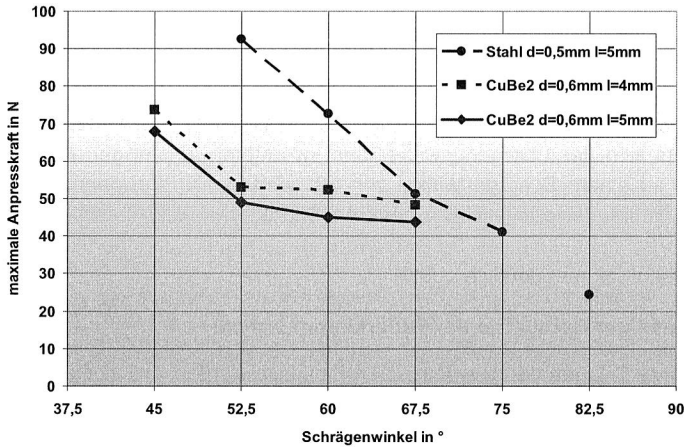


Bild 7.10: Einfluss des Schrägenwinkels auf die Anpresskraft  $F_{Amax}$  in der Gleitphase

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich festhalten, dass sich die hier eingesetzten Federklammern in einem breiten Spektrum an Schrägenwinkeln fügen lassen, wobei sich der Einsatzbereich bei den deutlich festeren Stahlklammern zu höheren Schrägenwinkeln hin erstreckt. Unterhalb dieses Einsatzbereiches besteht die Gefahr, dass die Klammer den Leiter durchsticht. Oberhalb des Bereiches kann es zum Abrutschen der Klammer auf der Isolationsschicht kommen. Eine Verkürzung der freien Federbeinlänge führt aufgrund der dritten Potenz zu einer deutlichen Erhöhung der Biegekraft und damit zu einer Anhebung der maximalen Anpresskraft. Für die Untersuchung einer Kontaktierung auf einem Schrägenwinkel von  $82,5^\circ$  mit Stahlklammern, wurden deren Federbeinenden angespitzt, damit sie leichter in die Isolationsschicht eindringen können. Aus diesem Grund wird dieser Fall gesondert betrachtet.

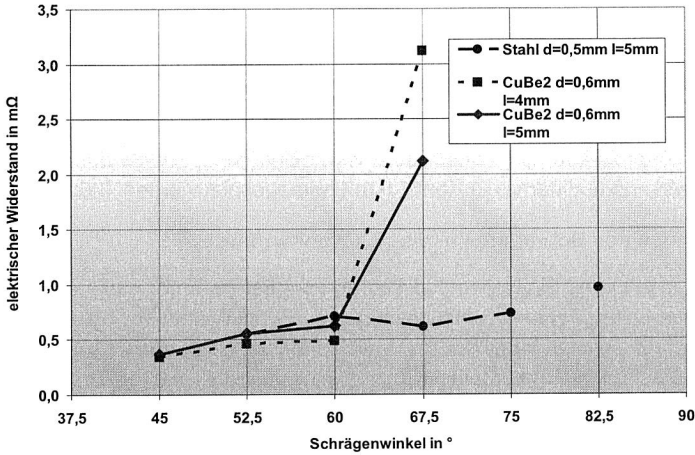


Bild 7.11: Einfluss des Schrägenwinkels auf den elektrischen Übergangswiderstand

Neben dem Kraftverlauf wurden auch die Übergangswiderstandsverläufe für die unterschiedlichen Schrägen ausgewertet, Bild 7.11. Insgesamt kann dabei festgehalten werden, dass sich der Übergangswiderstand im unteren einstelligen Milliohm-Bereich bewegt. Bis zu einem Schrägenwinkel von 60° weisen alle drei geprüften Werkstoffe ähnliche Widerstandswerte auf. Bei höheren Schrägenwinkeln macht sich jedoch die deutlich höhere Festigkeit der Stahlklammer gegenüber Kupferberyllium bemerkbar, dessen Kontaktkraft hier deutlich abfällt.

#### 7.4.4 Einfluss der Geometrie der Federklammerbeine

Für die Untersuchungen der geometrischen Einflüsse wurden CuBe2-Federklammern in einer Kontaktierungseinheit mit einem Schrägenwinkel von 52,5° getestet. Die *Federbeindicke*  $d$  wurde zwischen 0,5 mm und 0,6 mm variiert, für die Variation der *freien Federbeinlänge*  $l$  wurden Klammern mit 4 mm und 5 mm freier Länge hergestellt. Bei den durchgeführten Versuchen wurden für alle vier Federklammer-Geometrien elektrische Übergangswiderstände in einem Bereich von 0,45 mΩ bis 0,60 mΩ gemessen. Da die Abweichungen innerhalb der Messreihen bereits im Bereich des Parametereinflusses liegen, kann für die untersuchten Geometrien kein wesentlicher Einfluss auf den Übergangswiderstand festgestellt werden.

Demgegenüber zeigt der in Bild 7.12 dargestellte Vergleich der Kraftverläufe für CuBe2-Federklammern teilweise erhebliche Unterschiede. Die Federklammern mit einer freien Beinlänge von 5 mm weisen in der dritten Phase des Kontaktierungsprozesses ein ausgeprägtes Kraftplateau auf, wohingegen die Klammern mit 4 mm freier Federbeinlänge in Phase III aufgrund der hohen Biegekraft ein Kraftmaximum ausbilden. Anschließend fällt die Kraft bis zum Beginn der vierten Phase auf einen Wert von ca. 50 N ab.

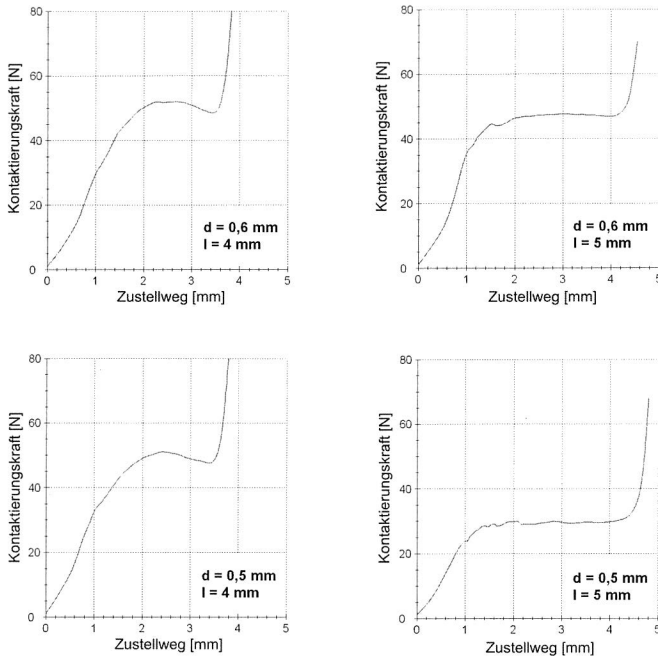


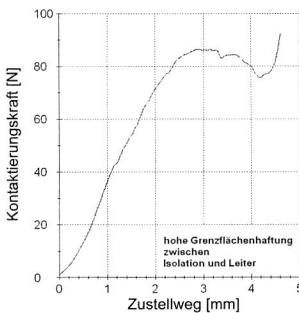
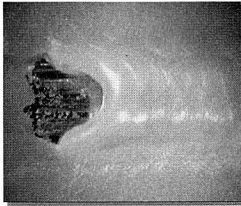
Bild 7.12: Vergleich der Kraftverläufe für CuBe<sub>2</sub>-Federklammern mit unterschiedlichen Geometrien

Die Differenz im Zustellweg beträgt entsprechend der eingesetzten unterschiedlichen Federbeinlängen ca. 1 mm, weshalb auch die Biegephase, während der die Federbeine auf dem Leiter abgleiten, deutlich länger ausfällt. Die Kraftverläufe zeigen zudem, dass die maximale Anpresskraft bei den Klammern mit längerer freier Federbeinlänge geringer ist. Gerade in Hinblick auf eine Mehrfachkontaktierung des Flachleiterkabels sollte die Federklammer-Direktkontaktierung auf eine möglichst geringe erforderliche Anpresskraft und ein vorzugsweise breites Kraftplateau ausgelegt werden, das die Zuverlässigkeit der Kontaktierung, z. B. aufgrund des dadurch gegebenen Ausgleichs von Fertigungstoleranzen, erhöht.

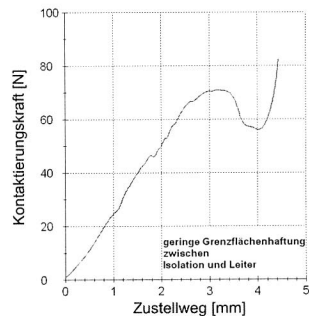
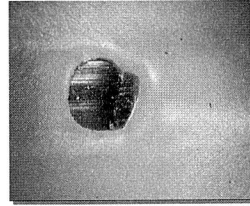
#### 7.4.5 Einfluss der Grenzflächenhaftung zwischen Leiter und Isolation

Die Grenzflächenhaftung zwischen Isolationsschicht und Flachleiter, der so genannte *Haftsitz*, kann bei extrudierten Flachleiterkabeln während des Herstellungsprozesses durch Verfahrensvariation anwendungsgerecht eingestellt werden. Das *Druckverfahren* bei dem der Isolierwerkstoff unter hohem Druck auf den Leiter gepresst wird, ist ein Extrusionsverfahren, mit dem ein hoher Haftsitz erzielt werden kann. Demgegenüber kann z. B. mit dem *Halbkompaktionsverfahren*, bei dem weniger Druck aufgebracht wird, ein geringerer Haftsitz realisiert werden. [67]

Zur Untersuchung des Einflusses der Grenzflächenhaftung zwischen Isolationsschicht und Flachleiter, wurden Kontaktierungsversuche mit Stahlklammern und einer Kontaktierungseinheit mit 60° Schrägenwinkel an Flachkabeln mit hohem, Bild 7.13, und mit geringem Haftsitz, Bild 7.14, durchgeführt.



**Bild 7.13:** Aufnahme und Kraftverlauf bei einer Flachleiter-Direktkontaktierung mit großer Grenzflächenhaftung



**Bild 7.14:** Aufnahme und Kraftverlauf bei einer Flachleiter-Direktkontaktierung mit geringer Grenzflächenhaftung

Da der Isolationswerkstoff beim Druckverfahren mit hohem Druck aufgebracht wird, ist die Duktilität des Flachkabels geringer als bei Flachleitern mit reduziertem Haftsitz, was zu einer Erhöhung der Kontaktierungskraft führt. Auch der Rückgang der Anpresskraft nach dem Überschreiten des Kraftmaximums fällt geringer aus, da während des Abgleitens des Federklammerbeins auf dem Flachleiter kontinuierlich eine größere Kraft zum Abscheren der Isolationsschicht vom Leiter aufgebracht werden muss. Die Aufnahme des Kontaktierungsbereichs in Bild 7.13 oben zeigt eine undefiniert ausgerissene Isolationstrennstelle sowie eine inhomogene Wulstbildung, wogegen der in Bild 7.14 dargestellte Kontaktierungsbereich für ein Kabel mit geringem Haftsitz eine definierte Trennstelle und einen homogen geformten Wulst aufweist. Nach dem Erreichen des Kraftmaximums fällt hier in der Gleitphase der Kraftverlauf deutlich ab, da nur wenig Kraft zum Abscheren der Isolationsschicht vom Flachleiter aufgebracht werden muss. Bei Flachleiterkabeln mit niedrigem Haftsitz kann es deshalb an Knick- oder Schnittstellen zu Delaminations-Erscheinungen kommen. In den Versuchen wurde zudem festgestellt, dass das Spektrum an Schrägenwinkeln für eine zuverlässige Kontaktierung mit zunehmendem Haftsitz kleiner wird.

### 7.4.6 Zusammenfassende Betrachtung und Zuverlässigkeitstests

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, ist der Kontaktierungsprozess durch eine Reihe von Einflussparametern gekennzeichnet, deren tendenzielle Auswirkungen auf die wichtigsten Kenngrößen der Kontaktierung in Tabelle 7.1 noch einmal zusammenfassend gegenübergestellt sind. Die hier aufgezeigten Tendenzen können potenzielle Anwender bei der Auslegung eines optimalen Kontaktierungssystems unterstützen.

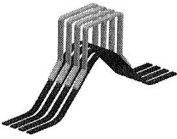
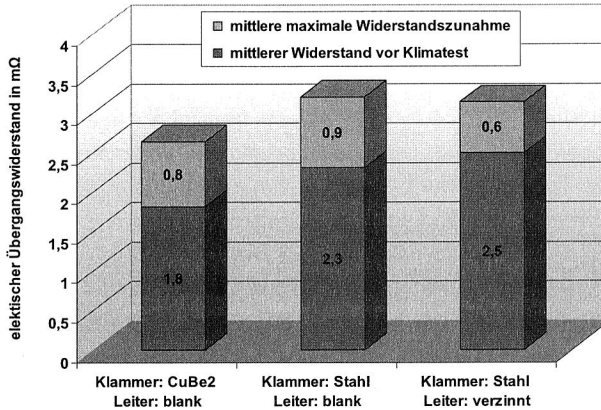
Federklammer-Direktkontaktierung 	... hat Auswirkung auf ...	... Kenngrößen und mögliche Kontaktierungsfehler					
		Maximale Kontaktierungskraft	Resultierender elektr. Übergangswiderstand	Ausprägung der Plateauphase	Grad der plastischen Verformung der Klammerbeine	Gefahr des Abgleitens auf der Isolation	Gefahr der Beschädigung des Leiters
Eine Veränderung des Einflussparameters ...							
größerer Schrägenwinkel		↓	↑	↓	↓	↑	↓
größere Beinlänge		↓	↑	↑	○	↑	↓
größere Beindicke		↑	↓	○	↑	↓	↑
bessere mechan. Eigenschaften des Klammerwerkstoffes		↑	↓	↓	↓	↓	↑
stärkerer Haftsitz		↑	↑	○	○	↑	↑
↑: nimmt zu; ↓: nimmt ab; ○: kein Einfluss oder kein eindeutiger Zusammenhang							

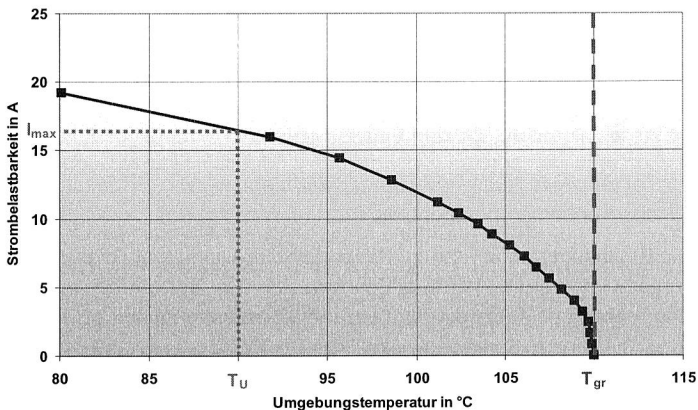
Tabelle 7.1: Tendenzielle Auswirkungen der Veränderung von Einflussparametern auf das Kontaktierungsergebnis

Nachdem die Einflussparameter für die Federklammer-Direktkontaktierung an einzelnen Klammern untersucht wurden, ist zu prüfen, wie sich das System bei der gleichzeitigen Kontaktierung mehrerer Federklammern verhält. Zu diesem Zweck wurde eine Kontaktierungseinheit mit einem Schrägenwinkel von  $67,5^\circ$  mit vier Stahlklammern bestückt und mit einem vieradrigen Flachleiterkabel kontaktiert. Dabei wurde festgestellt, dass die Anpresskraft erwartungsgemäß zirka viermal so groß ist, wie beim Versuch mit nur einer Klammer. Da sich die Kraftmaxima für die vier Klammern an unterschiedlichen Stellen des Zustellwegs befinden, ergibt sich insgesamt eine Glättung des Kraftverlaufs. Für den Übergangswiderstand zwischen den Klammern und den Flachleitern, der in diesem Fall bei  $0,69 \text{ m}\Omega$  lag, waren im Vergleich zur Kontaktierung mit einer Federklammer erwartungsgemäß keine nennenswerten Unterschiede festzustellen.



**Bild 7.15:** Veränderung des elektrischen Übergangswiderstands nach 500 h Auslagerung bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte

Zur Untersuchung des Langzeitverhaltens der Federklammer-Direktkontaktierung wurden verschiedene, mit vier Federklammern versehene, Kontaktierungssysteme in einem Klimaschrank bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte gelagert. In definierten Zeitabständen wurde jeweils der Übergangswiderstand in Vierleitertechnik online gemessen. Auch nach 500 Stunden thermischer Auslagerung im Klimaschrank konnten die geprüften und in Bild 7.15 gegenübergestellten Werkstoffkombinationen nur geringfügige absolute Vergrößerungen des Übergangswiderstands festgestellt werden.



**Bild 7.16:** Strombelastbarkeitskurve (Derating-Kurve) der Federklammer-Direktkontaktierung mit Grenztemperatur  $T_{gr} = 110\text{ °C}$  und Korrekturfaktor  $\alpha = 0,8$

Neben dem Alterungsverhalten der Federklammer-Direktkontaktierung wurde die Belastbarkeit dieser Verbindungstechnik durch elektrischen Strom untersucht. Zu diesem



Zweck wurden Thermoelemente zur Messung des Stromerwärmungsverhaltens an den Federklammen fixiert und diese über eine Konstantstromquelle gestaffelt mit unterschiedlichen elektrischen Strömen bis zur Ausbildung einer Gleichgewichtstemperatur belastet. Aus den Messergebnissen wird eine Derating-Kurve nach DIN IEC 512 Teil 3 abgeleitet, die auf eine maximale Einsatztemperatur des Flachkabels von 110 °C ausgerichtet ist und einen Korrekturfaktor von  $\alpha = 0,8$  beinhaltet, Bild 7.16. Sie gibt an, welche Strombelastung je nach Umgebungstemperatur zulässig ist, ohne die Grenztemperatur zu überschreiten. In diesem Fall könnte die Kontaktierung bei einer Einsatztemperatur von 90 °C mit einer maximalen Strombelastung von ca. 16,5 A beaufschlagt werden, was hier bereits im Bereich der maximalen Strombelastbarkeit der Flachleiter selbst liegt. Dieses überaus positive Ergebnis ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Federklammer-Direktkontaktierung zwei räumlich getrennte Kontaktstellen je Leiter besitzt, über die durch Strombelastung entstehende Wärme abgeführt wird und mit deren Hilfe ein sehr niedriger elektrischer Übergangswiderstand realisiert werden kann.

## 7.5 Anwendungsbeispiele für die Kontaktierungslösung im Pkw-Türmodul

Das Funktionsprinzip der Federklammer-Direktkontaktierung kann grundsätzlich an vielen Stellen im Automobil zur Anwendung gebracht werden. Im Folgenden werden Beispiele zum Einsatz dieser Kontaktierungstechnik auf einem Pkw-Türaggregateträger gegeben, auf dem zuvor mittels der neu entwickelten automatisierten Handhabungstechnik flexible Flachleiterkabel verlegt wurden. Ein Anwendungsfall ist die elektrische Kontaktierung von Funktionselementen des Pkw-Türmoduls, wie beispielsweise des in Bild 7.17 dargestellten Lautsprechers.

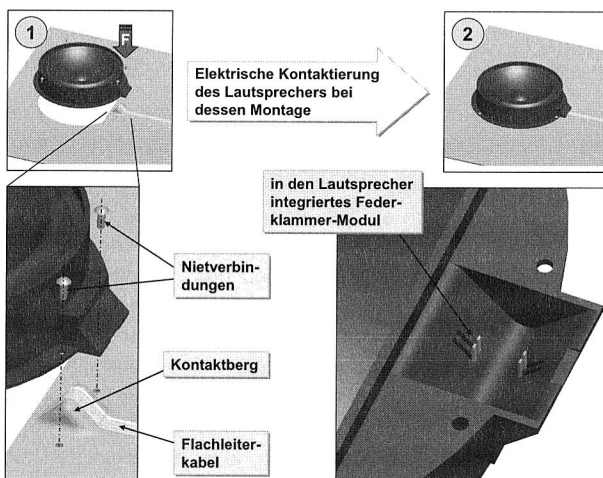
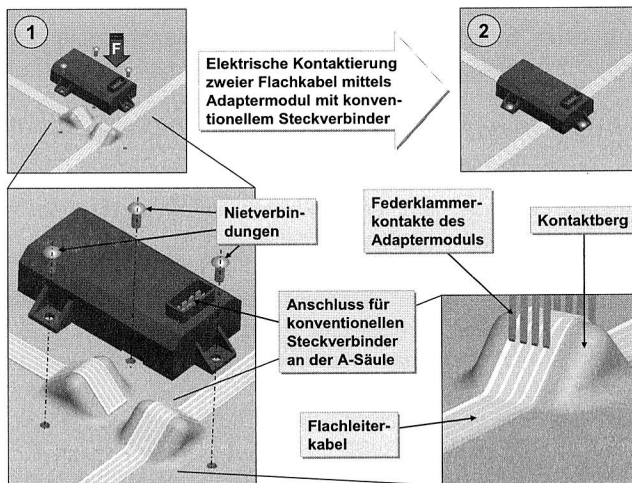


Bild 7.17: Integration eines Federklammer-Moduls in einen Pkw-Lautsprecher

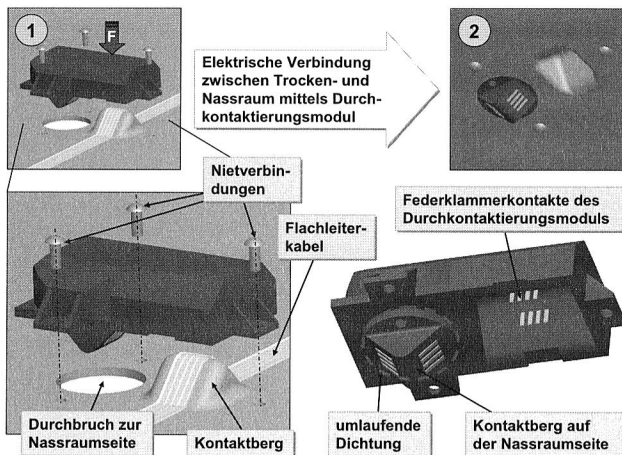
Der Lautsprecher wird in der Fertigung mit einem in der gewünschten Kontaktierungsposition installierten *Federklammer-Modul* ausgestattet. Auf der anderen Seite werden die Pkw-Türaggregateträger bei deren Herstellung mit Kontaktbergen versehen, über die in den gewünschten Kontaktzonen Flachleiterkabel automatisiert verlegt werden. Bei der Montage des Lautsprechers, in diesem Fall einem Nietprozess, wird dieser in einer vertikalen Fügebewegung auf das Türmodul aufgesetzt. Dabei wird er durch das Federklammer-Direktkontaktierungsverfahren gleichzeitig elektrisch kontaktiert. Das Vernieten des Lautsprechers am Türmodul bewirkt einen dauerhaften Anpressdruck der Kontaktierungseinheit und erzeugt damit die für eine zuverlässige Kontaktierung erforderliche, stetige Kontaktkraft. Durch die damit verbundene Verkürzung der Montageprozesskette können erhebliche Rationalisierungspotenziale ausgeschöpft werden.



**Bild 7.18:** Einsatz eines Adaptermoduls zur elektrischen Verbindung der Flachleiterverkabelung auf dem Pkw-Türaggregateträger mit dem übrigen Bordnetz

Eine weitere Anwendung der Federklammer-Direktkontaktierung ist in Bild 7.18 dargestellt. Dabei handelt es sich um ein *Adaptermodul*, das auf dem Pkw-Türaggregateträger montiert wird und als elektrische Verbindung zwischen dem, mit Flachleiterkabel bestückten, Türmodul und dem restlichen Bordnetz des Pkw dient. Als Verbindungsstelle besitzt der Adapter einen konventionellen Stecker- oder Buchsenanschluss, auf den der entsprechende Steckverbinder des Hauptkabelbaums aufgesteckt wird. Das hier abgebildete Adaptermodul zeigt noch einmal die hohe Flexibilität dieses Kontaktierungskonzeptes, das quasi als *Plug-and-Play-Lösung* elektrische Kontaktierungen von Flachleiterkabeln sowohl an den Enden als auch im Verlauf des Verlegewegs zulässt. Auch Mehrfachkontaktierungen von Flachleitern, z. B. zur weiteren Vergrößerung der gesamten Kontaktfläche, können durch eine entsprechende Ausgestaltung des Federklammermoduls realisiert werden. Außerdem ist es möglich, in ein Adaptermodul elektrische Schaltungen, z. B. durch MID-Technologie, mit zu integrieren.

Eine weitere wichtige Anwendung dieses innovativen Kontaktierungssystems in der Pkw-Seitentür ist die Bereitstellung eines Moduls zur Herstellung einer elektrischen Verbindung zwischen dem, zum Fahrzeuginnenraum hin orientierten, Trockenraum und dem, auf der anderen Seite des Pkw-Türaggregateträgers gelegenen, Nassraum. In Bild 7.19 ist ein entsprechend gestaltetes *Durchkontaktierungsmodul* abgebildet, das auf der Trockenraumseite installiert ist und über integrierte Federklammerkontakte ein Flachleiterkabel kontaktiert. Auf der anderen Seite des Durchkontaktierungsmoduls kann beispielsweise ein Kontaktberg zum Anschluss eines Federklammer-Kontaktierungsmoduls auf der Nassraumseite vorgesehen sein. Auch die Integration eines konventionellen Steckverbindersystems nach dem in Bild 7.18 dargestellten Prinzip ist an dieser Stelle denkbar. Der Durchbruch zur Nassraumseite kann z. B. mittels umlaufender Dichtung gegen wandernde Feuchtigkeit abgedichtet werden.



**Bild 7.19:** Einsatz eines Durchkontaktierungsmoduls zur Realisierung einer elektrischen Verbindung zwischen Trocken- und Nassraum der Pkw-Tür

Die drei hier beschriebenen Beispiele zeigen nur einen Teil der Anwendungsmöglichkeiten auf, die dieses flexible Kontaktierungssystem bietet. Die Montage der einzelnen Kontaktierungseinheiten ist leicht automatisierbar und lässt sich hervorragend in die bereits erläuterte Montageprozesskette integrieren.



## 8 Wirtschaftliche Betrachtung eines beispielhaften Automatisierungskonzeptes für die Flachleitermontage

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Konzepte entwickelt und untersucht, die eine automatisierte Montage von Flachleiter-Meterware auf Pkw-Türaggregateträgern möglich machen. Anhand einer ausgewählten Konzeptalternative wird im Folgenden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verlegesystems durchgeführt. Die Ausgangsdaten für die Kostenvergleichsrechnung wurden in Zusammenarbeit mit einschlägigen Automobilzulieferern festgelegt und beruhen auf Erfahrungswerten aus der Praxis. [102]

### 8.1 Erfassung von Rahmendaten für die Kostenvergleichsrechnung

#### 8.1.1 Technologische Rahmendaten der Kostenanalyse

Zunächst sind die technologischen Rahmendaten für die Kostenvergleichsrechnung zu definieren. Diese umfassen ein beispielhaftes Verkabelungslayout für einen Pkw-Türaggregateträger sowie ein geeignetes Layout eines Montagesystems für Flachleiterkabel als Meterware. In Bild 8.1 ist ein Beispiellayout für eine entsprechende Flachkabelverdrahtung einer Pkw-Seitentür dargestellt, die ausgehend von einem zentralen Türsteuergerät insgesamt fünf Verlegeoperationen (VO 1-5) umfasst.

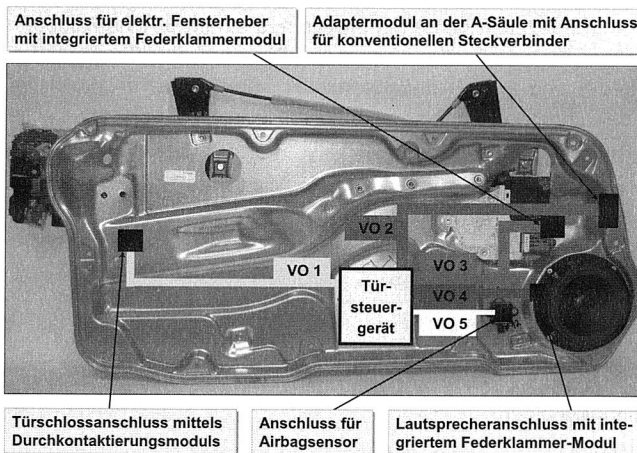


Bild 8.1: Beispiellayout einer mit Flachleiterkabeln realisierten Bordnetzstruktur in einer Pkw-Seitentür

Die einzelnen Verlegeoperationen müssen aufgrund der determinierten Anschlussstruktur mit unterschiedlichen Flachleiterkabeln durchgeführt werden. Da ein Werkzeugwechsel nach jeder Verlegeoperation zu langen Nebenzeiten führen würde, werden die Verlegprozesse durch Hintereinanderschalten von Montagezellen parallelisiert. Die in Bild 8.2 dargestellte Montagelinie ist demnach so gestaltet, dass jede der fünf Verlege-

operationen in einer separaten Montagezelle durchgeführt wird. Der Materialfluss zwischen den Zellen wird durch ein getaktetes Transportsystem realisiert.

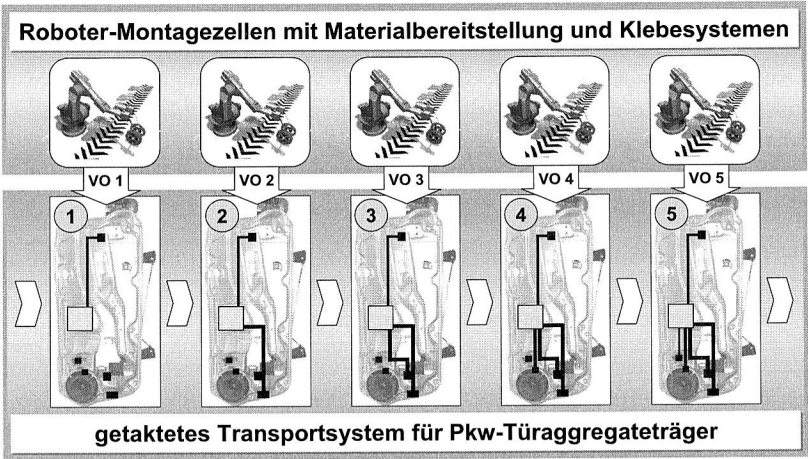


Bild 8.2: Beispiellayout für eine Montagelinie mit fünf parallelisierten Flachkabel-Verlegeoperationen

Die einzelnen Montagezellen bestehen jeweils aus einem 6-Achs-Roboter als Handhabungsgerät, einem Klebstoffauftragsystem zur Fixierung der Flachleiterkabel auf dem Türaggregateträger und zwei Materialbereitstellungseinheiten mit Verlegewerkzeugen, die entweder der Erhöhung der Variantenflexibilität dienen oder zur Verbesserung der Verfügbarkeit der Zelle redundant eingesetzt werden können.

	Länge in cm	Faltungen	Verlegedauer in s
Verlegeoperation 1	44	1	9,26
Verlegeoperation 2	45	1	9,30
Verlegeoperation 3	37	2	11,48
Verlegeoperation 4	21	0	5,84
Verlegeoperation 5	14	0	5,56

Tabelle 8.1: Ermittlung der Dauer der geplanten Verlegeoperationen anhand der Verlegeweglänge und der Anzahl von Kabelfaltungen zzgl. Transfer

Bei diesem Aufbau der Montagelinie richtet sich deren Takt nach der zeitlich längsten Verlegeoperation. Zur Berechnung dieser Größe werden zunächst die Länge der einzelnen Verlegewege sowie die Anzahl der erforderlichen Flachkabelaltungen bestimmt, Tabelle 8.1. Bei den Kabelverlegeversuchen im Labor wurde ermittelt, dass das Kabel mit einer Geschwindigkeit von 25 cm/s verlegt werden kann und für jede Faltung 2½ Sekunden benötigt werden. Zudem werden für jede Verlegeoperation 1½ Sekunden

zum Positionieren und 1½ Sekunden zum Entfernen des Roboters vom Werkstückträger berechnet. Der Transport der Werkstückträger von einer Zelle zur nächsten benötigt noch einmal 2 Sekunden. Daraus berechnet sich eine maximale Verlegedauer von ca. 12 Sekunden.

### 8.1.2 Ökonomische Rahmendaten der Kostenanalyse

In Abstimmung mit Experten der Automobilzulieferfirmen BROSE und LEONI wurden weitere Vorgaben für die Kostenvergleichsrechnung festgelegt. Da von einer Reaktionszeit auf OEM-Anforderungen von maximal drei Stunden ausgegangen wird, kann für die Kabelsatzmontage in den Pkw-Türaggregateträger keine lange Logistikkette ins Ausland aufgebaut werden. Der Produktionsstandort befindet sich demnach in der Nähe zum OEM, z. B. im Raum Ingolstadt oder Dingolfing.

Die Lohnkosten pro Stunde betragen an diesen Standorten 24,- € für einen Montagearbeiter und 36,- € für einen Anlagenbetreuer, die üblicher Weise an 225 Tagen in zwei Schichten zu je 8 Stunden arbeiten.

Die Produktion ist zudem auf 250.000 Fahrzeuge und damit 1 Mio. Türmodule jährlich auszulegen. Dabei sollen 30 Kabelsatzvarianten für die vier Pkw-Türen gefertigt werden können, davon je zwölf Varianten in der Vordertür und drei Varianten in der hinteren Fahrzeugtür.

Die Instandhaltungskosten für die Produktionsanlagen werden mit einem Kostenanteil von 10 % des Wiederbeschaffungswertes, in diesem Fall der Investitionssumme, bemessen. Sie beinhalten Kosten für die Herstellung (Reparatur) und Erhaltung (Wartung) der Funktionsfähigkeit der Maschinen und Anlagen.

Des Weiteren werden folgende monetäre Festlegungen getroffen:

- Die Investitionen für Maschinen und Anlagen werden über einen Zeitraum von 6 Jahren abgeschrieben.
- In der Kalkulation werden keine Overheadkosten, wie z. B. Gemeinkosten für Verwaltung, berücksichtigt.
- Zukaufteile werden nur hinsichtlich der Preisdifferenz betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass der Austausch konventioneller Steckverbinder durch Federklammer-Module kostenneutral erfolgen kann.
- Kosten für Strom- und Wasserverbrauch sowie der Verbrauch an Betriebsstoffen werden bei der Kostenvergleichsrechnung nicht berücksichtigt.
- Die kalkulatorischen Zinsen in Höhe von 7 % werden als Verzinsung des während der Nutzungsdauer der Maschinen und Anlagen durchschnittlich gebundenen Kapitals und somit auf 50 % des Anschaffungswerts berechnet. [102]

Nachdem die Rahmendaten für die Kostenvergleichsrechnung festgelegt sind, wird für die manuelle und die automatisierte Kabelsatzmontage im Folgenden eine entsprechende Kostenanalyse durchgeführt.

## **8.2 Kostenvergleichsrechnung zwischen automatisierter und manueller Kabelsatzmontage in der Pkw-Seitentür**

### **8.2.1 Betrachtung der konventionellen Kabelsatzmontage**

Die konventionelle Montage der z. B. in der Ukraine von der Fa. LEONI gefertigten Pkw-Türkabelsätze erfolgt bei der Fa. BROSE in Deutschland manuell. Dabei werden die Türkabelsätze beispielsweise mit Klipsen versehen und diese im Pkw-Türaggregate-träger verrastet. Außerdem müssen die Kabelstecker zum Teil durch Öffnungen hindurchgeführt und in die Funktionselemente des Türmoduls gesteckt werden. Die manuelle Kabelsatzmontage erfolgt an vier Linien, die mit den erforderlichen Einzelteilen beliefert werden und mit je einem Montagearbeiter besetzt sind. Daraus ergibt sich eine Taktzeit von ca. 0,8 min. pro Türtyp und Linie, bei vier parallelen Linien demnach 0,8 min. pro Pkw, wodurch eine Jahresproduktion von 1.080.000 Türmodulen erreicht werden kann.

Die Gesamtkosten setzen sich aus den fixen und den variablen, beschäftigungsabhängigen Kosten zusammen. Zu den Fixkosten zählen die Investitionskosten, für die pro Linie 20.000,- € anfallen, was einer Gesamtinvestition von 80.000,- € entspricht. Auf sechs Jahre umgelegt ergeben sich daraus jährliche Abschreibungen in Höhe von 13.333,- €. Außerdem fallen jährlich kalkulatorische Zinsen in Höhe von 2.800,- € und Instandhaltungskosten in Höhe von 8.000,- € an, was zu jährlichen Gesamtkosten von 24.133,- € führt.

Da an den vier Linien im Zwei-Schicht-Betrieb gearbeitet wird, sind Lohnkosten für insgesamt acht Montagearbeiter zu berechnen, deren Stundenlohn in Bayern derzeit 24,- € beträgt. Damit betragen die jährlichen Lohnkosten für die Montagearbeiter 345.600,- €. Bei der manuellen Kabelsatzmontage von 1 Mio. Türmodulen belaufen sich somit die jährlichen Gesamtkosten auf 369.733 €, woraus sich, unter Berücksichtigung einer laut Herstellerangaben 100%-igen Verfügbarkeit, [102] Stückkosten in Höhe von 0,370 € ergeben.

### **8.2.2 Betrachtung der automatisierten Verlegung von Flachleiter-Meterware**

Für die Betrachtung der automatisierten Verlegung von Flachleiter-Meterware wird das in Bild 8.2 dargestellte Layout einer Montagelinie verwendet. Für die aus fünf Montagezellen bestehende Produktionslinie wird eine Gesamtinvestition von 475.000,- € angesetzt. Diese setzt sich pro Zelle aus folgenden Positionen zusammen:

- 40.000,- Euro für einen 6-Achs-Roboter
- 10.000,- Euro für ein Transportsystem
- 5.000,- Euro für 2 Verlegewerkzeuge
- 25.000,- Euro für eine Klebstoffauftragsanlage
- 15.000,- Euro für Überwachungssensorik.



Bei der automatisierten Flachkabelmontage ergeben sich aus der maximalen Verlegedauer von ca. 12 Sekunden eine Taktzeit von ca. 0,2 min. pro Türtyp und damit ebenfalls 0,8 min. pro Pkw. Dies führt auch hier zu einer möglichen Jahresproduktion von 1.080.000 Türmodulen.

Die Gesamtkosten setzen sich wiederum aus den fixen und den variablen Kosten zusammen. Nach Umlage der Investitionskosten auf die vorgegebenen sechs Jahre ergeben sich jährliche Abschreibungen in Höhe von 79.167,- €. Zudem sind kalkulatorische Zinsen in Höhe von 16.625,- € und Instandhaltungskosten in Höhe von 47.500,- € zu berechnen. Bei der automatisierten Montage von Flachleiterkabeln beträgt die Höhe der fixen Gesamtkosten somit 143.292,- € pro Jahr.

Die variablen Kosten der automatisierten Kabelsatzverlegung entsprechen den Lohnkosten. Für die Überwachung der automatisierten Montagelinie und Betreuung der Montagezellen werden im Zwei-Schicht-Betrieb zwei Anlagenbetreuer benötigt. Bei einem Stundenlohn von 36,- € in Bayern sind die Lohnkosten mit 129.600,- € pro Jahr anzusetzen. Damit belaufen sich die Gesamtkosten für die automatisierten Montage auf 272.892,- €. Daraus errechnen sich Stückkosten in Höhe von 0,321 € für eine vorgegebene Verfügbarkeit des Produktionssystems von 85 %. Somit kann festgestellt werden, dass unter Berücksichtigung der genannten Vorgaben die automatisierte Montage von Flachleiterkabeln die kostengünstigere Alternative wäre.

### 8.3 Zusammenfassende Beurteilung der Kostenvergleichsrechnung

Die Kostenvergleichsrechnung ist ein statisches Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung, bei dem prinzipiell davon ausgegangen wird, dass die Kosten während der Nutzungsdauer der Anlagen, in diesem Fall der Abschreibungsdauer, konstant bleiben. Diese Annahme kann für eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsbeurteilung nur über einen verhältnismäßig kurzen Zeitraum erfolgen. Um die kostengünstigere Investitionsalternative zu finden, geht man bei der Kostenvergleichsrechnung zudem davon aus, dass die erwirtschafteten Erlöse bei allen Alternativen gleich groß sind und damit unberücksichtigt bleiben können. Auch Kostenpositionen, die bei allen Investitionsalternativen in gleicher Höhe anfallen, wie beispielsweise die Miete für eine Montagehalle gleicher Größe und Bauart, müssen nicht mit betrachtet werden. [144]

In Tabelle 8.2 werden die beiden in Kapitel 8.2 erörterten Investitionsalternativen anhand der relevanten Vergleichskriterien noch einmal gegenübergestellt. Auffällig hierbei sind die sich deutlich unterscheidenden Investitionskosten, die auch erhebliche Unterschiede bei den Fixkostensockeln bedingen. Dieser Sachverhalt ist allerdings nicht ungewöhnlich, da Produktionsanlagen mit einer höheren Kapazität bei niedrigen Stückzahlen für gewöhnlich eine geringere Wirtschaftlichkeit aufweisen als Anlagen mit einer niedrigeren Kapazität. Dieser Zusammenhang ist in Bild 8.3 noch einmal graphisch dargestellt. Ab einer so genannten *kritischen Menge* sind die Gesamtkosten eines Produktionssystems mit automatisierter Montage von Flachleitern geringer als die der konventionellen, manuellen Kabelsatzmontage.

Vergleichskriterium	manuelle Montage	automatisierte Montage
Investitionskosten	80.000,- €	475.000,- €
Nutzungs-/Abschreibungsdauer (in Jahren)	6	6
Ausbringungsmenge (in Stück)	1 Mio.	1 Mio.
Verfügbarkeit des Produktionssystems	100 %	85 %
Abschreibungen	13.333,- €	79.167,- €
Kalkulatorische Zinsen (7 % des ½-Invests)	2.800,- €	16.625,- €
Instandhaltungskosten (10 % des Invests)	8.000,- €	47.500,- €
Sonstige fixe Kosten (z. B. Gemeinkosten)	n. b.	n. b.
<b>Summe der fixen Kosten p. a.</b>	<b>24.133,- €</b>	<b>143.292,- €</b>
Materialkosten	n. b.	n. b.
Fertigungslöhne	345.600,- €	129.600,- €
Sonstige variable Kosten (z. B. Energiekosten)	n. b.	n. b.
<b>Summe der variablen Kosten p. a.</b>	<b>345.600,- €</b>	<b>129.600,- €</b>
Variable Kosten pro Stück	0,346 €	0,130 €
Gesamtkosten pro Jahr	369.733,- €	272.892,- €
Gesamtkosten pro Stück	0,370 €	0,273 €
Gesamtkosten pro Stück unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit des Produktionssystems	0,370 €	0,321 €

Tabelle 8.2: Vergleich der Kosten für die Investitionsalternativen manuelle und automatisierte Kabelsatzmontage

Die kritische Menge kennzeichnet damit den Punkt, an dem die Gesamtkosten der zu vergleichenden Investitionsalternativen gleich sind: [144]

$$K_{fix,aut} + x_{krit} \cdot k_{var,aut} = K_{fix,man} + x_{krit} \cdot k_{var,man} \quad (8.1)$$

Um die geringere Verfügbarkeit bei der automatisierten Verlegung von Flachleitern angemessen zu berücksichtigen, werden die variablen Stückkosten mit einem entsprechenden Kostenaufschlag versehen. Die kritische Menge des Gesamtkostenvergleichs errechnet sich damit wie folgt:

$$x_{krit} = \frac{K_{fix,aut} - K_{fix,man}}{k_{var,man} - k_{var,aut}} \quad (8.2)$$

$$x_{krit} \approx \frac{143.292 - 24.133}{0,3456 - 0,1778} = 710.125 \text{ Stück} \quad (8.3)$$

Bis zu einer Menge von 710.125 Stück pro Jahr wäre die manuelle Montage aufgrund ihrer Kostenvorteile vorzuziehen. Da in diesem Fall eine Mindestmenge von 1 Mio. Stück pro Jahr vorgegeben wurde, wäre ein automatisiertes Montagekonzept günstiger.

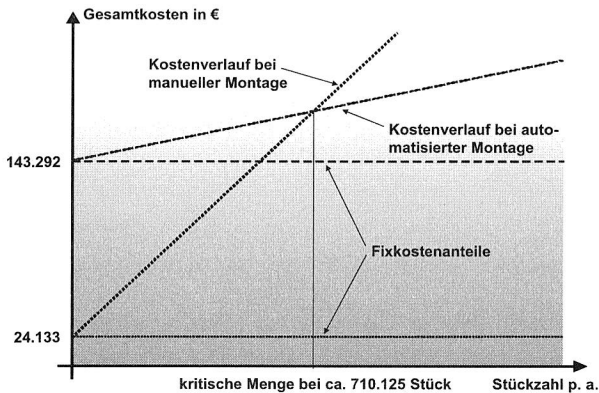


Bild 8.3: Graphische Bestimmung der kritischen Menge am Schnittpunkt der Gesamtkostenkurven

In Kapitel 8.1.2 wurde die Festlegung getroffen, dass Zukaufteile nur hinsichtlich der Preisdifferenz betrachtet werden und der Austausch konventioneller Steckverbinder durch Federklammer-Module kostenneutral erfolgt. Bei den Zukaufteilen waren dabei insbesondere die Türaggregateträger selbst gemeint, bei denen die konventionellen Blechträger durch Schalenträger aus Polypropylen ersetzt wurden, um Gewichtseinsparungen z. B. von -33 % bei massiven und -61 % bei geschäumten PP-Trägern zu erzielen. [102] Dem standen Mehrkosten für die unterschiedlichen PP-Träger von 0,50 € bis 4,40 € abhängig von der zu fertigenden Stückzahl gegenüber, die jedoch für die in Kapitel 8.2 durchgeführte Kostenvergleichsrechnung, die ausschließlich die Montage des Kabelsatzes selbst betrifft, irrelevant sind.

Ein kostenneutraler Austausch der konventionellen Steckverbindersysteme durch Federklammer-Module erscheint zunächst unwahrscheinlich in Anbetracht der Tatsache, dass der Weg von der Entwicklung über die patentrechtliche Absicherung bis hin zur Freigabe einer neuen Kontaktierungslösung beim Automobilhersteller für den Zulieferer sehr lang und kostenintensiv werden kann. Allerdings können Kostenvorteile, die sich durch eine u. a. damit realisierbare Verkürzung der Montageprozesskette ergeben, den Ausschlag zum Einsatz des neuen Kontaktierungsprinzips geben.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Grundlage der Überlegungen, ein System zur automatisierten Montage von Flachleiterkabeln auf Pkw-Modulen zu entwickeln, ist der technologische Wandel in der Bordnetzfertigung, der Automobilhersteller und –zulieferer veranlasst, nach innovativen Konzepten für automatisierte Prozessketten zur Montage des Pkw-Bordnetzes zu suchen. Dieser Wandel wird durch eine Reihe von Einflussfaktoren hervorgerufen, die einerseits als nachfrageinduzierte Produktrends und andererseits als angebotsbasierte Rahmenbedingungen auf die Bordnetzproduktion einwirken. Die immer stärkere Beeinflussung bis hin zur Ablösung mechanischer durch elektrische Funktionen im Automobil, führt zu einem stetig wachsenden Elektronikanteil, der einen immer höheren Energiebedarf im Pkw verursacht. Durch den Wunsch der Kunden nach einer Individualisierung des Fahrzeugs sowie der Einbindung von zusätzlichen Features aus dem Komfort- und Infotainment-Bereich, wie beispielsweise einem Internet-Anschluss, kommen zudem fortwährend neue elektronikgestützte Funktionen hinzu. Diesen Anforderungen muss das Pkw-Bordnetz genügen, ohne an Gewicht und Volumen weiter zu wachsen.

Neben dem umweltpolitischen Aspekt der Gewichtsreduzierung, treibt angesichts gestiegener Ölpreise vor allem der Kundenwunsch nach sparsamen und dennoch leistungsfähigen Fahrzeugen die Suche nach Möglichkeiten zur Reduktion des Fahrzeuggewichts weiter an. Dabei wurde festgestellt, dass das Fahrzeuggewicht durch einen konsequenten Einsatz von Flachleiterkabeln deutlich reduziert werden kann. Führende Experten quantifizieren dieses Einsparpotenzial auf 40 – 60 % des Gewichts eines Rundleiterkabelsatzes. Darüber hinaus werden sogar noch höhere Einsparpotenziale beim Raumbedarf und bei der elektrischen Verbindungstechnik gesehen. Da Flachleiter im Vergleich zu Rundleitern die gleiche Strommenge über einen geringeren Querschnitt übertragen können, lässt sich pro Leiter ca. 10 % Kupfer einsparen, was angesichts des, in den letzten fünf Jahren bereits um über 500 % gestiegenen, Kupferpreises eine immer wichtigere Rolle spielt.

Die Fertigung und Montage der konventionellen Rundleiterkabelsätze wird aufgrund der hierfür erforderlichen, komplexen und sich durch die hohe Variantenanzahl ständig ändernden Handhabungsvorgänge manuell durchgeführt. Die Fertigung erfolgt wegen des geringeren Lohnkostenniveaus heutzutage fast ausschließlich in europäischen Niedriglohnländern, von denen aus eine sehr lange und kostenintensive Logistikkette zu Automobilzulieferern und –herstellern in Deutschland aufgebaut werden muss. Der grundlegende Trend zur Modularisierung des Automobils, mit dem der stetig steigenden Komplexität der Fertigungs- und Montageprozesse begegnet werden soll, unterstützt den Einsatz von Flachleiterkabeln in einer hybriden Bordnetzarchitektur. Aufgrund ihrer Geometrie lassen sie sich erheblich besser ins Fahrzeug integrieren als Rundleiterbündel und finden in flachen Durchbrüchen sowie in Räumen hinter Verkleidungselementen eher Platz. Dadurch können Verlegewege realisiert werden, die so mit Rundleiterbündeln nicht zu erreichen sind. Zudem bieten Flachleiterkabel über ihren rechteckigen Querschnitt eine standardisierte Geometrie, die eine wirtschaftliche Automatisierung der

Kabelmontage erleichtert. Da Flachleiterkabel mit mehreren, nebeneinander liegenden und unterschiedlich breiten Adern aufgebaut sein können, ist es möglich, mit einem einzelnen Flachkabel ein ganzes Rundleiterpaket mit unterschiedlichen Leiterquerschnitten zu ersetzen, wodurch sich die Anzahl der erforderlichen Montageoperationen deutlich reduzieren lässt.

Da bislang noch keine geeigneten Systeme zur automatisierten Montage flexibler Flachleiterkabel auf Fahrzeugmodulen existieren, wurde in dieser Arbeit ein gesamtheitlicher Lösungsansatz für eine automatisierte Montage von makromechatronischen Fahrzeugmodulen auf Basis von Flachleiterkabeln und deren Anbindung an das Pkw-Bordnetz entwickelt und prototypisch umgesetzt. Der erarbeitete Lösungsansatz für die Montageprozesskette bei Pkw-Türaggregateträgern ist in seiner Ausprägung durch standardisierte Teilprozesse und eine automatisierte Handhabbarkeit der Montagewerkzeuge und –werkstücke gekennzeichnet, womit die Voraussetzung für eine erfolgreiche Automatisierung der Montage geschaffen wurde. Zur Untersuchung der robotergeführten Handhabung der Flachkabel wurden drei der sechs entwickelten Werkzeugkonzepte, konstruiert und prototypisch umgesetzt. Anschließend wurden sie in eine Montagezelle mit einer Reihe von Peripheriegeräten zur Unterstützung und Überwachung der Montageprozesse eingebunden.

Um die komplexen Prozessabläufe kontrollieren und flexibel ausgestalten zu können, wurde zudem eine durchgehende CAD/CAM-Kette auf Basis einer Simulationssoftware aufgebaut, durch die Montagevorgänge in einer virtuellen Umgebung offline geplant, spezifische Fertigungsdaten generiert und zur Umsetzung in die reale Montagezelle ausgeleitet werden können. Mit der Einbindung der Systemperipherie in das Modell der Montagezelle, wird die Idee der Digitalen Fabrik, nicht nur für die Simulation der Montageprozesse, sondern auch zur Planung und Optimierung des Montagesystem-Layouts, auf Zellenebene aufgegriffen.

Neben der Entwicklung und prototypischen Realisierung von Handhabungsprozessen für flexible Flachleiterkabel, wurden auch Konzeptalternativen zum automatisierten Befestigen der Flachkabel auf Fahrzeugmodulen entworfen und gegenübergestellt. Dabei lag der Fokus auf standardisierten Lösungen für eine flexible, prozessintegrierte Fixierung des Kabels, die möglichst parallel zum Verlegen des Flachleiterkabels auf dem Türmodul erfolgen kann und vorzugsweise ohne zusätzliche Befestigungselemente auskommt. Das hierbei favorisierte Klebverfahren bedingt eine Abstimmung des thermischen Ausdehnungsverhaltens der Pkw-Türaggregateträger aus Kunststoff auf das Flachleiterkabel, beispielsweise durch eine Modifikation des Substratmaterials mittels Füllstoffen, da es andernfalls bei thermischer Wechselbeanspruchung durch die dann auftretenden Scherspannungen zu einem Ablösen des Kabels unter Adhäsionsversagen des Klebeverbundes kommt.

Für ein gesamtheitliches Lösungskonzept ist es darüber hinaus wichtig, dass dazu passende Alternativen für die elektrische Kontaktierung der Flachleiter mit den Funktionskomponenten der Pkw-Seitentür entwickelt werden. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die prozessbedingte, einseitige Zugänglichkeit der auf dem Pkw-Tür-

aggregateträger liegenden Flachkabel dar. Mit dem, in dieser Arbeit beschriebenen und zum Patent angemeldeten, Prinzip der Federklammer-Direktkontaktierung wurde ein Konzept für ein flexibles Kontaktierungssystem erarbeitet, das sich hervorragend in die bestehende, automatisierte Montageprozesskette integrieren lässt und über vielfältige Anwendungsmöglichkeiten verfügt. Wie bereits bei dem, gemeinsam mit führenden Elektronikherstellern patentierten, Prinzip der „Lösbaren elektrischen Kontaktierung dreidimensionaler spritzgegossener Schaltungsträger“, wurde auch hier ein elektrisches Verbindungskonzept entwickelt, das auf einer direkten elektrischen Kontaktierung von Flachleiterkabeln beruht. Mit Hilfe der frei gestaltbaren Adaptermodule, die auch mit konventionellen Steckeranschlüssen oder integrierten Elektronik-Baugruppen ausgestattet sein können, bietet dieses Kontaktierungskonzept quasi eine Plug-and-Play-Lösung zur elektrischen Kontaktierung von Flachleiterkabeln sowohl an den Enden als auch im Verlauf des Verlegewegs und eine flexible Anbindung an das übrige Pkw-Bordnetz.

Die wirtschaftliche Betrachtung einer nach dem erarbeiteten Lösungskonzept automatisierten und einer konventionellen, manuellen Kabelsatzmontage mittels Kostenvergleichsrechnung zeigte eine leichte Kostenersparnis beim Einsatz der automatisierten Lösung. Aufgrund fehlender Vergleichswerte konnte eine Betrachtung des, über die reine Montage des Kabelsatzes auf dem Pkw-Türaggregateträger hinaus gehenden, Kostensenkungspotenzials nicht vorgenommen werden.

Mit dem erarbeiteten, gesamtheitlichen Lösungsansatz zur automatisierten Montage von Flachleiterkabeln auf Fahrzeugmodulen, lässt sich die exemplarisch nachvollzogene Montageprozesskette für Pkw-Türaggregateträger erheblich verkürzen und vollständig automatisieren. Dadurch ist es möglich, die lange und teure Logistikkette in europäische Niedriglohnländer aufzulösen und eine flexible Modulmontage mit kurzen Reaktionszeiten in der Nähe der Automobilhersteller in Deutschland aufzubauen.





## Summary

The basis of the considerations of developing an automated system for assembling flexible flat cables on vehicle modules is the technological change in the wiring harness production, which induces automobile manufacturers and suppliers looking for innovative concepts for automated process chains. This change is evoked by a series of influential factors, which affects the wiring harness production on the one hand as demand-induced product trends and on the other hand as offer-based basic conditions. The increasing influence up to the substitution of mechanical functions with electric functions in the automobile leads to a continually growing rate of electronics that causes a higher and higher energy-demand in the vehicle. Through the wish of the customers for an individualization of the vehicle as well as the integration of additional comfort and information technology features, like for example an internet-connection, moreover, continuously new electronics-supported functions are added. The automobile wiring harness must suffice these requests without a further growing of weight and volumes.

Beside the environment-political aspect of the weight reduction the customer's wish for economical and powerful vehicles intensifies the search for possibilities to reduce weight of the vehicle especially facing risen oil prices. It was recognized that the weight of the vehicle can be reduced considerably through a consistent use of flexible flat cables. Leading experts quantify these potential savings on 40 - 60 percent of the weight of a round wiring harness. In addition, even higher savings are predicted with the required space and with the electric connection technology. Since flat wire cables in the comparison to round wire cables can transfer more amperage over the same cross-section, approximately 10 percent of copper per wire can be saved. This aspect plays an ever more important role in view of the copper price that has climbed already by over 500 percent the last five years.

The production and assembling of the conventional round wiring harness is operated predominantly manually, due to the high variation number and with this to constantly altering handling processes. Because of the more inferior labor cost level the production almost exclusively takes place in European low-wage-countries, from which a very long and cost intensive logistic chain must be built to automobile suppliers and manufacturers in Germany, nowadays. The basic trend towards a modular design of the vehicle, with which should be antagonized the continually growing complexity of the production and assembling processes, supports the use of flexible flat cables in a hybrid wiring system architecture. Because of their geometry they let themselves integrate considerably better in the vehicle than round wiring bundle and find easily place in flat breakthroughs as well as in areas behind disguise elements. Cable laying paths, that are not to be reached with round wiring bundles, can be realized by it. Moreover, over their rectangular cross-section flexible flat cables offer a standardized geometry that eases an economic automation of the cable assembling. Since flexible flat cables with several, side by side lying and differently wide wires can be built, it is possible to replace one whole round wiring package with one single flat cable with different wire cross-

sections, through which the number of the necessary assembling operations lets itself clearly reduce.

As no suitable systems yet exist an integral approach for the automated assembling of flexible flat cables on car door modules was developed and proto-typically realized. This new solution for the assembling process chain is characterized through standardized part processes and an automated use of the assembling tools and work pieces, with what the prerequisite for a successful automation of the assembling was created. To analyze the automated assembling process three of the six developed tool concepts were constructed and proto-typically installed. Then they were bound into an assembling cell with a row of periphery appliances to support and supervise the assembling process.

To be able to control and to flexibly arrange these complex assembling processes, a nonstop CAD/CAM-chain was created based on simulation software, which allows planning the assembling processes off-line in a virtual reality, generating specific production data and carrying them out in the real assembling system. Embedding the systems periphery into the simulation model of the assembling system, the idea of the digital factory is taken up on system level, not only for the simulation of the assembling processes but also for the planning and optimization of the assembling system layout.

Beside the design and proto-typical realization of handling processes for flexible flat cables, also alternative concepts for an automated fixation of the flat cables on vehicle modules were developed and compared. The main focus laid thereby on standardized solutions for a flexible, process-integrated fixation of the cable that can take place as parallel as possible to the assembling of the flexible flat cable on the car door module and preferably can be realized without additional fortification elements. The on this occasion favored hot melt gluing process causes an adaptation of the thermal expansion of the car door module out of plastic of the flexible flat cable. This could happen by a modification of the door modules material, for example by means of fillers.

For the integral approach it is also important to develop matching alternatives for the electric contacting of the flat cable with the function components of the car door module. On that occasion the process-conditional, one-sided accessibility of the flat cables lying on the car door module represented a special challenge. In this work a concept for a flexible electric contacting system called "Federklammer-Direktkontaktierung" was developed that offers diverse uses and can be integrated very well into the existing automated assembling process chain. This electric connection concept is based on a direct electrical contacting of flat cables wires. Using freely shaped adapter modules, that also can be equipped with conventional plug connections or integrated electronics, this electric contacting concept offers a plug and play connection solution both at the ends and in the course of the laid flexible flat cable and a very facile electric connection to the main wiring harness of the vehicle.

An economic contemplation of the developed integral approach and a conventional manual assembling of the wiring harness of car door modules resulted in cost savings

when using the automated solution. Because of lacking comparison values a contemplation of the cost-lowering potential, exceeding the pure assembling of the wiring harness on the car door module, could not be delivered.

The exemplarily reproduced process chain for car door units can be considerably shortened and completely automated by means of an innovative and integral approach for the automated assembling of flexible flat cables on car door modules. By that, it is possible to break up the long and expensive logistic chain to European low-wage countries and to arrange a flexible module assembling with short reaction times close to the automobile manufacturers in Germany.



## Literaturverzeichnis

- [1] ABELE, E.; RADTKE, P.; BITZER, A.: Automobilindustrie im Wandel - Wertschöpfungsarchitekturen der Zukunft. In: REINHART, G.; ZÄH, M. F. (Hrsg.): *Marktchance Individualisierung*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2003, S. 109-117.
- [2] ADAMS, M.: Extrudierte Flachleiter für vielseitige automotive Anwendungen. In: *Auto & Elektronik*, Heft 2/3 (2003), S. 18-19.
- [3] ADAMS, W.: Innovative Bordnetz-Leitungssätze mit FFCe. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug - VDI-Berichte*, 1789, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 879-889.
- [4] ADRIAN, J.: *Automatisiertes, stoffschlüssiges Fügen folienisolierter Flachleiter mit Oberflächenkontamination*. IPA-IAO Forschung und Praxis 418. Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2005.
- [5] ARNOLD, M.; HUCK, H.-G.; KALB, H.; REICHEL, W.; STÖHR, R.: Extrusion von Flachleitern für automotive Anwendungen. In: *Kabelextrusion 2003*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 117-136.
- [6] BAUMANN, G.: Schnittiges Verfahren - Abisolieren und Ablängen von Kabeln mit CO<sub>2</sub>-Lasern. In: *Draht*, Heft 3 (2000), S. 58-59.
- [7] BECK, V.: *Produktions- und Produktorientierte Leitungssatzentwicklung*. Alternative Technologien für die Verdrahtungstechnik der Zukunft, Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, 25.06.1999.
- [8] BERCHTOLD, L.; ENSER, W.; JOHN, W.; KUNZE, A.; NEUBERT, J.; NICKLBAUER, G.; SCHIMPF, C., "Lösbare elektrische Kontaktierung dreidimensionaler spritzgegossener Schaltungsträger," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 01.12.2005: DE 10 2004 023 189.3, Anmeldetag 11.05.2004, Int. Cl.: H01R 12/12, H05K 3/32 ed. Internationale Patentanmeldung Nr. PCT/EP2005/004887, Anmeldetag 04.05.2005: DE: Tyco Electronics pretema GmbH & Co.KG, DE: Intedis GmbH & Co.KG, DE: ODU Steckverbindersysteme GmbH & Co.KG, AT: I & T Innovation Technology Entwicklungs- und Holding AG, DE: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [9] BERTELS, A.: Für Runde ist kein Platz mehr - Flachleiter mit PUR-Ummantelung im Automobil. In: *plastics*, Heft 2 (2004), S. 31.
- [10] BLASCHKE, J.: *Neue Verbindungstechnologien im Aufwind! - Die Verarbeitung von Flachleitern am Beispiel der Firma Coroplast Fritz Müller GmbH*. Komax Holding AG (Hrsg.): <http://www.komax.ch>, Zugriff am 10.05.2007.
- [11] BLEYMÜLLER, J.; GEHLERT, G.; GÜLICHER, H.: Regressionsanalyse I. In: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*, 10. überarbeitete Auflage, München: Verlag Franz Vahlen GmbH, 1996, S. 139-146.
- [12] BLIEDTNER, J.; MÜLLER, H.; DIETRICH, J.; REISZNER, H.: FFC-Konfektionierung für Bordnetze im Automobilbau. In: *DVS-Berichte*, 230, Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag, 2004, S. 178-182.
- [13] BRAMESFELD, W.; NEUMANN, L.: Flachleiter, Technologie moderner E/E-Architekturen. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug - VDI-Berichte*, 1789, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 891-904.
- [14] BRIETER, K.: Die deutschen Autos werden immer besser. In: *ADAC motorwelt* Heft 6 (2007), S. 22-26.
- [15] BÜHLER, L.: Flachleiter innovativ verarbeiten. In: *Procucltronic*, Heft 7/8 (2004), S. 34-35.

- [16] BURGHOFF, H.-G.; DAISS, M.; KÜHNER, T.; NIEUWENHUIZEN, R.; SCHRÖDER, M.: Ein Schritt ins nächste Jahrtausend - Elektrische und elektronische Innovationen. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Heft 4, Spezialausgabe (1998), S. 70-83.
- [17] CZABANSKI, J.; ADRIAN, J.: *Folienisolierte Flachleiter im Automobil*. Werkstoffe und Technologien im Kfz-Bordnetz, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart, 05.-06.05.2003.
- [18] CZABANSKI, J.; KRIEGER, J.: Flex-Wiring und MID substituieren konventionelle Leitungssätze. In: *Draht*, Heft 3 (2000), S. 54-56.
- [19] CZICHOS, H.: *Mechatronik - Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006.
- [20] DARIO, P.; GARZELLA, P.; TORO, M.; MICERA, S.; ALAVI, M.; MEYER, U.; VALDERRAMA, E.; SEBASTIANI, L.; GHELARDUCCI, B.; MAZZONI, C.; PASTACALDI, P.: Neutral Interfaces for Regenerated Nerve Stimulation and Recording. In: *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Heft 4 (1998), S. 353-363.
- [21] DIEBOLD, K.: Die Leiterplatte erobert den Raum. In: *Industrieanzeiger*, Heft 21 (2007), S. 16-21.
- [22] DIEBOLD, K.: Effizienz in 3-D. In: *Plastverarbeiter*, Heft 6 (2007), S. 22-24.
- [23] DOMKE, W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. 10. Auflage. Berlin: Cornelsen Verlag, 1986.
- [24] DRAGOV, N., "Verfahren und Vorrichtung zum Falten von Flachbandkabel," in *Patentblatt 2003/47*, EUROPÄISCHES PATENTAMT, 19.11.2003, Patentschrift: EP 1 271 719 A3, Int. Cl.: H01R 43/28 ed. AT: I & T Flachleiter Produktions-Ges. m. b. H., 2003.
- [25] EHRENSTEIN, G. W.: *Polymerwerkstoffe - Struktur und mechanisches Verhalten*. München: Carl Hanser Verlag, 1978.
- [26] EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe - Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften*. München; Wien: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [27] EHRENSTEIN, G. W.: *Mit Kunststoffen konstruieren*. München: Carl Hanser Verlag, 1995.
- [28] ENDRES, E.; WEHNER, T., "Probleme in der Reorganisation der zwischenbetrieblichen Arbeitsteilung: Kooperation zwischen Endherstellern und Lieferanten in der deutschen Automobilindustrie," Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2004.
- [29] FELDMANN, K.: *Montageplanung in CIM*. CIM-Fachmann Köln: Springer-Verlag, 1992.
- [30] FELDMANN, K.; GOTH, C.; KUNZE, A.: Interdisziplinäre Zusammenarbeit zur spezifischen Förderung der MID-Technologie. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, Heft 9 (2007), S. 558-562.
- [31] FELDMANN, K.; HOLZMANN, R.; KUNZE, A.: Rationalisierungspotenziale und Produktionskonzepte für elektronische Baugruppen. In: *Elektrotechnik und Elektronik in Bayern*, Heft 1 (2004), S. 48-52.
- [32] FELDMANN, K.; JUNKER, S.; KUNZE, A.: Montageautomatisierung durch innovative Produkte und Prozesse. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, Heft 3 (2005), S. 94-98.
- [33] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: Eingeschmolzen in Raum und Plastik. In: *Automobil-Elektronik*, Heft 3 (2003), S. 52-54.

- [34] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: Schaltungsträger als 3D-Teile gefertigt. In: *MM Plastics*, Heft 2 (2003), S. 18-21.
- [35] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: 3D-MID Technology - Latest Materials and Production Processes. In: *Kunststoffe plast europe*, Heft 4 (2004), S. 17-24.
- [36] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: Ratio beim Kabelsatz legen. In: *Automobil-Elektronik*, Heft 3 (2004), S. 30-32.
- [37] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: Saving Weight and Costs with Flat Conductors - Efficient Assembly Concepts. In: *Kunststoffe international*, Heft 3 (2006), S. 125-127.
- [38] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: Three-Dimensional PCBs. In: *Onboard Technology*, Heft 4 (2006), S. 42-45.
- [39] FELDMANN, K.; SLAMA, S.; KUNZE, A.: Innovative Montagekonzepte für mechatronische Produkte. In: REINHART, G.; ZÄH, M. F. (Hrsg.): *Marktchance Individualisierung*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, S. 333-344.
- [40] FELDMANN, K.; SLAMA, S.; KUNZE, A.: Rationalisierungspotenziale und Montagekonzepte für mechatronische Systemlösungen. In: *Maschinenbau in Bayern*, Heft 1 (2003), S. 24-29.
- [41] FORM, T.: *Fahrzeugelektronik - Bordnetz*. TU Braunschweig (Hrsg.): <http://www.ifr.ing.tu-bs.de>, Zugriff am 30.08.2007.
- [42] FRICK, T.: *Temperaturfeldberechnungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen*. LEF 2006 - Laser in der Elektronik und Feinwerktechnik, Bayerisches Laserzentrum gGmbH, Erlangen.
- [43] GIMBEL, M.; GLASER, S.; SCHLINKHEIDER, J., "Elektrischer Verbinder für flexiblen Flachleiter und Schaltvorrichtung," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 09.06.2005, Offenlegungsschrift: DE 103 48 045 A1, Int. Cl.: H01R 12/08 ed. DE: Tyco Electronics AMP GmbH, 2005.
- [44] GOERLANDT, F.: Modularisierung und Komplexität des Kraftfahrzeuges - Konsequenzen für das Bordnetz. In: *VDI-Berichte*, 1009, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- [45] GOLLOCH, R.: *Downsizing bei Verbrennungsmotoren - Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung*. VDI-Buch: Springer Verlag, 2005.
- [46] GÖTZ, K.: *Makromechatronik in Automobil und Medizin*. Univ. Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS (Hrsg.): <http://www.faps.uni-erlangen.de> (Stand: 12.07.2007), Zugriff am 23.08.2007.
- [47] GRAHNERT, D.: Marktübersicht: Kabel für die Elektronik. In: *Markt und Technik*, Heft 14 (1992), S. 55-56.
- [48] HABERLAND, K. R.: Platz- und gewichtssparende Flachleiter-Verbindungssysteme. In: *Der Elektroniker*, Heft 1 (1991), S. 6-10.
- [49] HAFNER, E.; KARCHER, J.: Modularität versus Komplexität am Beispiel eines neuen Dachhimmelmodules. In: *VDI-Berichte*, 1287, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, S. 569-582.
- [50] HAMMER, A.; HAMMER, K.: *Physikalische Formeln und Tabellen*. 5. Auflage. München: J. Lindauer Verlag (Schaefer), 1992.
- [51] HAMPRECHT, H.: Verlagerung von Kapazitäten - In Osteuropa sollen bald fünf Millionen Pkw pro Jahr gebaut werden. In: *Automobilwoche*, Heft 13 (2006).

- [52] HEINZ, H.; KÖNIG, S., "Verfahren zum Verbinden eines flexiblen Flachleiters mit einer Leiterplatte," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 19.05.2005, Offenlegungsschrift: DE 10 2004 038 401 A1, Int. Cl.: H01R 43/02, H01R 12/10, H05K 3/34 ed. DE: Conti Temic microelectronic GmbH, 2005.
- [53] HESSE, S.: *Grundlagen der Handhabungstechnik*. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [54] HEURUNG, T.: Ein integriertes Konzept zur Entwicklung von Kabelbäumen. In: *Auto & Elektronik*, Heft 1 (1999), S. 127-131.
- [55] HEYER, J.; KUNZE, A.: 3D-MID-Technologie. In: SUCHENTRUNK, R. (Hrsg.): *Kunststoff-Metallisierung*, 3. Auflage, *Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung*, Band 37, Bad Saulgau: Eigen G. Leuze Verlag, 2007, S. 131-148.
- [56] HOFFMANN, V.; RUDOLPH, H.: Modulare Automobile Bordnetze. In: *VDI-Berichte*, 1287, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, S. 281-293.
- [57] HOUSDEN, A.; GOULD, J.: *Moulded Interconnect Devices*. Knowledge Transfer Networks (Hrsg.): <http://www.primefaraday.org.uk/technology-watch>, Zugriff am 03.09.2007.
- [58] JANKE, I., "Elektrisches Kontaktelement für einen Flachleiter," in *Patentblatt*, DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 02.09.2004, Gebrauchsmusterschrift: DE 20 2004 002 739 U1, Int. Cl.: H01R 12/38, H01R 4/10 ed. DE: GHW Grothe & Hartmann GmbH, 2004.
- [59] JOHN, B.: Japaner fallen in ADAC-Pannestatistik zurück. In: *Automobilwoche*, Heft 7 (2006).
- [60] JOHN, W.: *Elektronikintegration in Flachleiter-Kabelsätze für die Automobilindustrie*. Systemintegration in der Mikroelektronik: Flexible Leiterplatten - Innovationsfaktor mit Mehrwert für die Baugruppe, VDE Verlag, SMT Hybrid Packaging, Nürnberg, 19.-21.04.2005.
- [61] KAUFMANN, G.: Dekorierung direkt beim Spritzgießen. In: *Automotive Materials*, Heft 3 (2005), S. 24-27.
- [62] KINKEL, S.; LAY, G., "Automobilzulieferer in der Klemme - Vom Spagat zwischen strategischer Ausrichtung und Auslandsorientierung," Fraunhofer ISI - Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Produktionsinnovationserhebung 32, Karlsruhe, 2004.
- [63] KLASCHE, G.: Autoelektronik: Steigende Anforderungen weltweit. In: *Elektronik automotive*, Heft 6 (2007), S. 14-16.
- [64] KLESING, J.; JÖHL, A.; HAHN, F.: Dachmodul - Nutzung mechatronischer Synergiepotentiale bei der Integration von Elektrik- und Elektronikfunktionalität. In: *VDI-Berichte*, 1646, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.
- [65] KLINGER, M.: Flexleiter revolutionieren Bordnetzkonzepte. In: *Siemens Components*, Heft 5/6 (1997), S. 21-23.
- [66] KOLVENBACH, F.-J., "Zur Zukunft der Sozialausgaben bei alternder Bevölkerung," Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart, 1998.
- [67] KÖRNER, H.: Extrusion: Wie aus Kupfer und PVC ein Kabel wird. In: *LEONI in Team*, Heft 1 (2005), S. 4-5.
- [68] KRIEGER, J.; DREYER, H.: Verdrahtungstechnik im Umbruch. In: *Mechatronik F&M*, Heft 7/8 (2000), S. 90-92.
- [69] KRUG, F.: Elektronikrends im Fahrzeug. In: *Elektronik automotive*, Heft 5 (2007), S. 102-105.



- [70] KUGELMANN, D.: *Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern*. Forschungsberichte IWB 129. München: Utz Verlag, 1999.
- [71] KUNZE, A.: *Entwicklung und Perspektiven für den Einsatz der 3D-MID-Technologie*. Strukturierte Metallisierung von Kunststoffen, Fraunhofer Gesellschaft IST, Braunschweig, 25.06.2003.
- [72] KUNZE, A.: *Neue Ansätze zur Produktion von Kfz-Bordnetz-Systemen*. 6. Kooperationsforum Industriearbeitskreis Bordnetze, Bayerische Innovations- und Kooperationsinitiative Automobilzuliefererindustrie - BAIKA, BMW Group, München, 04.12.2003.
- [73] LÖBL, H.: *Stromverdrängung in elektrischen Leitern*. Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Technische Universität Dresden (Hrsg.): [http://www.tu-dresden.de/etieeh/Lehre/vorlesungen\\_eet/Hochspannungsgeraete/G7.pdf](http://www.tu-dresden.de/etieeh/Lehre/vorlesungen_eet/Hochspannungsgeraete/G7.pdf) (Stand: 02.05.2001), Zugriff am 10.09.2007.
- [74] MALLOK, C.: Laminieren ist out - Extrudierte Flachleiter trumpfen mit bislang unerreichten Eigenschaften des Isolationsmaterials. In: *ElektronikPraxis*, Heft 21 (2002), S. 144-145.
- [75] MAYER, U.: Trends in der Automobilverkabelung. In: *Kabelextrusion 2003*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 101-115.
- [76] MCLEOD, P.: *A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications*. Knowledge Transfer Networks (Hrsg.): <http://www.primefaraday.org.uk/technology-watch>, Zugriff am 03.09.2007.
- [77] MÜHREN, O.: *Thermoplastisches Polyurethan für hochbeanspruchte Kabel und Flachleiter*. Fachtagung "Thermoplastische Elastomere", SKZ - ConSem GmbH, Würzburg, 22.-23.10.2003.
- [78] N. N.: DIN 53282 - Winkelschälversuch. In: DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.): *DIN Taschenbuch 205 - Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe 3*, Berlin; Köln: Beuth Verlag GmbH, 1985, S. 197-198.
- [79] N. N.: Einleitung, Sicherheit. In: *KR C1 Bedienhandbuch*, Release 2.2, *Grundlagen der Roboterprogrammierung*, Augsburg: KUKA Roboter GmbH, 1998, S. 58-61.
- [80] N. N., "Auto 1999 – Jahresbericht," Verband der Automobilindustrie e.V., Frankfurt a. M., 1999.
- [81] N. N.: *Antriebssysteme - Mikroantriebe, DC-Kleinstmotoren, Präzisionsgetriebe, Servokomponenten, Steuerungen*. Schönaich: Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2001.
- [82] N. N., "Aluminium im Pkw," in *VDI nachrichten*, Nr. 15: Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA), 2002.
- [83] N. N.: BMW setzt auf schnellen "Bus". In: *VDI nachrichten*, Heft 20 (2002), S. 20.
- [84] N. N.: Ferdinand Piëch verabschiedet sich mit dem "1-I-Auto". In: *VDI nachrichten*, Heft 17 (2002), S. 19.
- [85] N. N.: Interbus-ST - die "smarte" Feldbus-Klemmenfamilie. In: *Interbus & Automation*, Blomberg: Phoenix Contact, 2002, S. 168-191.
- [86] N. N., "Neue Technik im Pkw - Autofahrer interessiert ...," in *VDI nachrichten*, Nr. 14: JD Power European Automotive Emerging Technologies Study; Goodyear, 2002.

- [87] N. N., "Strategic Analysis of the European 42 Volt Vehicles and Components Markets," Frost & Sullivan, Market Engineering Research Report 22.08.2002, Oxford, 2002.
- [88] N. N.: *Agieren in Netzwerken – Chancen für den Mittelstand*. Software Offensive Bayern (Hrsg.): <http://www.software-offensive-bayern.de> (Stand: August 2003), Zugriff am 28.10.2003.
- [89] N. N.: *Einsatztemperaturen bei Automobilleitungen*. Coroplast Fritz Müller GmbH & Co. KG (Hrsg.): <http://www.kabelbranche.de>, Zugriff am 14.09.2007.
- [90] N. N.: *3D-MID-Technologie*. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.), München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [91] N. N., "Branchenanalyse Automobilindustrie 2004," IG Metall - FB Wirtschaft-Technologie-Umwelt, Blaue Reihe 411, Frankfurt, 2004.
- [92] N. N.: *Das doppelseitige Klebeband - Verklebesystem für Flachleiter*. Tesa AG (Hrsg.): <http://www.handling.de>, Zugriff am 19.01.2007.
- [93] N. N., "Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse für die Beschaffungslogistik (Be-Log-FMEA)," IPH Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, AiF-Schlussbericht 13388 N/1, Hannover, 2004.
- [94] N. N.: *System zur Verklebung von Flachkabeln im Automobilbau*. Tesa AG (Hrsg.): <http://www.tesa.de> (Stand: 28.04.2004), Zugriff am 19.01.2007.
- [95] N. N.: *Technische Information - Macromelt Q 5375-22*. Henkel Teroson GmbH (Hrsg.): <http://www.henkel.de> (Stand: 24.11.2004), Zugriff am 14.11.2007.
- [96] N. N., "VDI-Richtlinie 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme," Verein Deutscher Ingenieure - VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Düsseldorf, 2004.
- [97] N. N.: *LEONI exFC® - Extrudierte Flachleitungen für die Automobilverkabelung*. LEONI Kabel GmbH (Hrsg.): <http://www.leoni-automotive-cables.com>, Zugriff am 16.11.2007.
- [98] N. N.: *Mit Vielfalt und Stärke - Partner der Automobilindustrie*. Tesa AG (Hrsg.): <http://www.tesa.de> (Stand: 17.06.2005), Zugriff am 10.05.2007.
- [99] N. N.: Polypropylen-Einsatz nimmt zu. In: *Automotive Materials*, Heft 5 (2005), S. 6.
- [100] N. N., "Automobilzulieferer profitabler als Hersteller," in *Automobilwoche 15*: Roland Berger / Rothschild, 2006.
- [101] N. N., "Die zehn beliebtesten Ausstattungs-Details bei deutschen Neuwagenkäufern," in *Automobilwoche 13*: PULS, 2006.
- [102] N. N., "Innovative Montage- und Produktkonzepte für Mechatronische Systeme im Pkw," Bayerische Forschungsförderung, Abschlussbericht AZ: 509/02, 31.03.2006, München, 2006.
- [103] N. N.: *Nieten bei einseitigem Zugang der Verbindungsstelle*. Konstruktionsatlas (Hrsg.): <http://www.konstruktionsatlas.de> (Stand: 20.01.2006), Zugriff am 11.11.2007.
- [104] N. N.: *Der Prozessfaktor*. EPLAN Software & Service GmbH & Co.KG (Hrsg.): <http://www.eplan.de>, Zugriff am 14.09.2007.
- [105] N. N.: *elecolit® - elektrisch/thermisch leitfähige Klebstoffe*. Panacol-Elosol GmbH (Hrsg.): <http://www.panacol.de>, Zugriff am 25.10.2007.

- [106] N. N.: *Flat Flexible Cable extruded for clockspring*. Innovation Technology (Hrsg.): <http://multimedia.3m.com>, Zugriff am 06.08.2007.
- [107] N. N.: *GWS - Pneumatisches Greiferwechselsystem*. SCHUNK GmbH & Co. KG (Hrsg.): <http://www.de.schunk.com>, Zugriff am 01.10.2007.
- [108] N. N.: Natürlich leichter - naturfaserverstärkte Presswerkstoffe. In: *Automobil-Produktion*, Heft 8 (2007), S. 82.
- [109] N. N.: *Neue Konzepte für Kabelbaum-Hersteller*. Eybächer Systemtechnik (Hrsg.): <http://www.eybaecher.de>, Zugriff am 30.08.2007.
- [110] N. N.: *Physikalische Eigenschaften von Kupfer*. Deutsches Kupferinstitut e. V. (Hrsg.): <http://www.kupfer-institut.de> (Stand: 06.09.2007), Zugriff am 09.09.2007.
- [111] N. N.: *Platz gespart, Gewicht gespart, Kosten gespart - Anschluss technik für Flachleiter*. Hirschmann Automotive GmbH (Hrsg.): <http://www.hirschmann.at/de>, Zugriff am 31.07.2007.
- [112] N. N.: *Preisentwicklung bei Kupfer*. Finanzen.net (Hrsg.): <http://www.finanzen.net/rohstoffe>, Zugriff am 09.08.2007.
- [113] N. N.: *Resin Pricing - August 2007*. Plastics Technology Online (Hrsg.): <http://www.ptonline.com/dp/pt>, Zugriff am 20.08.2007.
- [114] N. N., "Studie Tuningmarkt," Verband Automobil tuning und /-zubehör e.V., Frankfurt am Main, 2007.
- [115] N. N.: *Systemapplikationen für FFC - Flexible Flachleiter*. Komax Holding AG (Hrsg.): <http://www.komax.ch/de/home/wire-processing>, Zugriff am 24.10.2007.
- [116] NITZL, C., "Steckverbinder für Flachleiter," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 15.01.2004, Offenlegungsschrift: DE 102 27 602 A1, Int. Cl.: H01R 12/08 ed. DE: Lisa Dräxlmaier GmbH, 2004.
- [117] OSEN, E. J.; ECKNIG, D.: *Thermoplastische Elastomere - Neue Werkstoffe erweitern das Produktspektrum*. Fachtagung "Thermoplastische Elastomere", SKZ - ConSem GmbH, Würzburg, 22.-23.10.2003.
- [118] OTT, M.: Automatische Leitungssatzverlegung im Pkw. In: *Productronic*, Heft 5/6 (2004).
- [119] PFUCH, A.; HEFT, A.; ERTEL, M.; SCHIENMANN, S.; SCHIMANSKI, A.: Effizienz der Vorbehandlung. In: *Kunststoffe*, Heft 3 (2006), S. 147-150.
- [120] PIELSTICKER, B.; TARGIEL, G.: Die EWK-Technologie zur wirtschaftlichen Herstellung von FFC. In: *Draht*, Heft 4 (2003), S. 36-39.
- [121] PIELSTICKER, B.; TARGIEL, G.: Single roll roller die technology in flexible flat cable production. In: *Wire Industry*, Heft 838 (2004), S. 118-120.
- [122] POGGEL, M.; GILLNER, A.; RUSSEK, U.: Fügen mit Licht. In: *Kunststoffe*, Heft 3 (2006), S. 50-54.
- [123] POHL, T. C.: *Herstellung von Flachkabeln für die Automobilindustrie*. Tagungsband zur KTP-Jubiläumstagung "25 Jahre Kunststofftechnologie Paderborn", Shaker Verlag, Paderborn, 23.-24.02.2005.
- [124] PÖHLAU, F., "Techniken zum Abisolieren und Verbinden von Flachbandleitern," Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS, Studie 30.04.1996, Erlangen, 1996.

- [125] POLSTER, S.; FRICK, T.; WIENGARTEN, M.: *Laser Plastic Welding of Flexible Conductors onto preshaped Parts – An alternative structural Design Technique for MIDs*. MID 2004 - 6<sup>th</sup> International Congress Molded Interconnect Devices, Research Association Molded Interconnect Devices 3-D MID e.V., Fuerth, Germany, 22.-23.09.2004.
- [126] PUHLMANN, C.: Türmodul dient als dreidimensionale Leiterplatte. In: *Markt & Technik - Sonderheft Automobilelektronik*, Heft 2 (2007), S. 29-30.
- [127] RAHNER, S.: Automobile Spritzgießrends. In: *Automotive Materials*, Heft 3 (2005), S. 10-14.
- [128] RAJASHEKARA, K.: *42 V architecture for automobiles*. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, Delphi Corp., Troy, MI, USA, 23.-25.09.2003.
- [129] REGER, L.: *42V Bordnetz - Anforderungen an neue Steckverbindersysteme*. 4. Kooperationsforum Industriearbeitskreis Bordnetze, Bayerische Innovations- und Kooperationsinitiative Automobilzuliefererindustrie - BAIKA, BMW Group, München, 31.01.2002.
- [130] REICHINGER, G.; LORENZ, S.; KUNZE, A.: *Innovative Montage- und Produktkonzepte für mechatronische Systeme im Pkw*. Jahreskongress Zulieferer innovativ 2005, Bayerische Innovations- und Kooperationsinitiative Automobilzuliefererindustrie - BAIKA, Audi Forum, Ingolstadt, 06.07.2005.
- [131] RENNER, G.: *Extrudierte Flachleiter - Herstellungsverfahren und Verarbeitungstechniken für kostengünstige FFC-Bordnetze*. Leoni AG (Hrsg.): <http://www.iqpower.de>, Zugriff am 09.08.2006.
- [132] REUL, B.; LAMMERTS, V., "Elektrische Leitungsverbindung mit Querschnittsübergang und Verbundscheibe," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 16.03.2006, Offenlegungsschrift: DE 10 2004 038 401 A1, Int. Cl.: H01R 4/70 ed. DE: Saint-Gobain Sekurit Deutschland GmbH & Co. KG, 2006.
- [133] ROCHA, J.-C. D.; GOBE, M.: CEM sur lignes multifilaires automobiles. In: *Revue de l'Electricité et de l'Electronique - REE*, Heft 6/7 (2003), S. 50-54.
- [134] ROTH, S., "Standortentscheidungen in der Automobilzuliefererindustrie," IG Metall Vorstand 25.03.2004, 2004.
- [135] SALHOFF, T., "Flachleiter sowie Verfahren und Werkzeug zu dessen Herstellung und Verlegung," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 23.06.2005, Offenlegungsschrift: DE 103 56 305 A1, Int. Cl.: H01B 7/08 ed. DE: Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG, 2005.
- [136] SCHAUER, F., "Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitenden Verbindung mit einem Flachleiter," DEUTSCHES PATENTAMT, 31.05.1990, Offenlegungsschrift: DE 3840014 A1, Int. Cl.: H01R 43/01, H01R 43/02, H01R 13/504 ed. DE: kabel-metal electro GmbH, 1990.
- [137] SCHEFFELS, G.: Flach & flexibel. In: *Automobil Industrie*, Heft 9 (2002).
- [138] SCHLOTT, S.: Mehr Strahlkraft für das Interieur. In: *Automobil Produktion*, Heft 2 (2007), S. 60-65.
- [139] SCHMITT, P.: Automatisiertes Bandagieren von Leitungen mit Klebebändern. In: *Maschinenmarkt*, Heft 14 (1998), S. 60-61.
- [140] SCHOLZ, J.: *Zuliefertrends: Globalisierung und Konzentration*. 5. Zulieferforum: Zulieferindustrie im 21. Jahrhundert, Tagungsband, Arbeitsgemeinschaft Zulieferindustrie, Düsseldorf, 2000.

- [141] SCHWEHR, S.; KÖNIG, J.; BLESSING, A.; SCHREIBER, S.; POHLMANN, A.; WENKEL, H.; ALBUS, R.; WILLIKENS, A.: Komfortable Entlastung - Elektrik und Elektronik für den ungetrübten Fahrspaß. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Heft 63, Sonderausgabe (2002), S. 82-93.
- [142] SCHWEIKER, T., "Sitz mit einer an einer Auflage befestigten Verkabelung, Verfahren zur Montage eines Sitzes und Verwendung eines Flachleiters zur Bildung einer Verkabelung eines Sitzes," in *PCT-Gazette*, WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM, 07.04.2005, PCT: WO 2005/030524 A2, Int. Cl.: B60N 2/00 ed. DE: Johnson Controls GmbH, 2004.
- [143] SEEBERGER, J.: Gesamtheitliche Betrachtung der Türfunktionen und die Türarchitektur mit Einsatz von Türmodulen. In: *VDI-Berichte*, 1287, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994, S. 783-800.
- [144] SEIBERT, S.: *Technisches Management: Innovationsmanagement, Projektmanagement, Qualitätsmanagement*. Stuttgart: B. G. Teubner Verlag, 1998.
- [145] STEINMETZGER, R.: *Produktions- und Systemtechnik im Baubetrieb - Bausteine der Produktionstechnik: Automatisierung und Robotisierung*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): <http://www.uni-weimar.de/Bauing/baubet>, Zugriff am 14.09.2007.
- [146] STROH, D., "Überlappungsbereich zwischen Flachleitern und Verfahren zum Verbinden von Flachleitern," DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 28.02.2002, Offenlegungsschrift: DE 100 52 579 A1, Int. Cl.: H01R 12/10, H01R 43/02, H01R 4/70, H01R 4/02 ed. DE: Schunk Ultraschalltechnik GmbH, 2002.
- [147] SÜß-WOLF, R.: *FLAMECON® - eine alternative Verkabelungstechnologie und ihre Möglichkeiten*. CTI-Forum „Automotive Wire 2007 – Kabel und Stecker im Automobil“, Leoni AG, ZFE, Augsburg, 21.-22.05.2007.
- [148] TANABE, S.; SHIRAKI, Y.; MURATA, Y.: *Near and far fields analysis from flat cables*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 18.-22.08.1997.
- [149] TEEPE, G.; REICHART, G.: LIN - Ein ganzheitliches Kommunikationssystem für eine neue Automobilarchitektur - Transformationen der Zuliefererstruktur. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug - VDI-Berichte*, 1789, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 833-847.
- [150] USSLER, W. R., "Alles unter Kontrolle," in *Automobilwoche* vol. 20.11.2006. Oberpfaffenhofen, 2006.
- [151] VOLLMER, A.: Elektr(on)ik-Trends im Automobil. In: *Auto & Elektronik*, Heft 2 (2004), S. 50-51.
- [152] WAGNER, U.: *Anforderungen an zukünftige Fahrzeugbordnetze aus Sicht der physischen Vernetzung*. 8. Kooperationsforum Industriearbeitskreis Bordnetze, Bayerische Innovations- und Kooperationsinitiative Automobilzuliefererindustrie - BAIKA, FIZ Forum, BMW Group, München, 12.12.2005.
- [153] WARSCHAT, U.; FLERLAGE, J.; TITZE, A.: Modularer Systembaukasten als Architektur zukünftiger Karosserieelektroniksysteme. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug - VDI-Berichte*, 1789, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 867-877.
- [154] WENER, A., "Pkw-Leichtbau gibt dem Aluminium künftig mehr Gewicht," in *VDI nachrichten*, Nr. 15. Düsseldorf, 2002.
- [155] WICKI, B.: *Neue Verarbeitungstechnologien für extrudierte und laminierte Flachleiter exFC und FLC*. Komax Holding AG (Hrsg.): <http://www.komax.ch/de>, Zugriff am 01.08.2007.

- [156] ZIMMER, G.: Selektiv gelötete Verbindungen auf Polyester-Laminaten. In: *Producech*, Heft 10 (2000), S. 36-37.
- [157] ZOHN, F.: *Management von Diskontinuitäten - Das Beispiel der Mechatronik in der Automobilzuliefererindustrie*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2004.

## Anhang

### A Übersicht über die beim Anlagenanlauf verwendeten Ein- und Ausgangsvariablen

Beim Hochfahren des Montagessystems müssen der Robotersteuerung verschiedene Informationen von der Software-SPS zur Verfügung gestellt werden, damit der Roboter erkennt, in welchem Zustand sich das Montagesystem befindet und wann welches Programm ausgeführt werden soll. Zu diesem Zweck werden die wichtigsten Ein-/Ausgangsvariablen, deren Werte über die Benutzeroberfläche des Roboters definiert werden können, in den folgenden Tabellen aufgelistet.

Eingang	Funktion
PGNO	Mit dieser Eingangsvariablen wird die Information übergeben, welches Programm der Roboter ausführen soll. Anhand dieser Nummer wird in der case-Anweisung im Programm <i>cell.scr</i> , das die Montagezellensteuerung übernimmt, das entsprechende Roboterprogramm aufgerufen.
PGNO_TYPE	Diese Variable legt fest, in welchem Format die Programmnummer übergeben wird. Die hier obligatorisch verwendete Einstellung 1 zeigt an, dass der Wert im Binärzahlformat übergeben wird.
PGNO_PARITY	Optionale Prüfvariable, die die Anzahl der Einsen in der binär codierten PGNO zählt. Bei gerader Anzahl ist sie HIGH, bei ungerader LOW.
PGNO_LENGTH	Diese Variable beschreibt die Länge der zu übergebenden Programmnummer.
PGNO_VALID	Diese Eingangsvariable signalisiert, dass die aktuelle Programmnummer gültig ist und vom Roboter übernommen werden kann.
EXT_START	Ist dieser Eingang gesetzt, kann ein Programm von der SPS aus gestartet bzw. fortgesetzt werden.
MOVE_ENABLE	Dieser Kontrolleingang schaltet die Bewegungsfreigabe des Roboters ein. Ist dieser Eingang auf LOW, ist keine Bewegung möglich.
CONF_MESS	Ein externes Quittieren einer Fehlermeldung durch die SPS ist durch Setzen dieser Variable möglich.
DRIVES_ON	Die Roboterantriebe werden durch einen Signalimpuls von mindestens 20 ms an diesem Eingang eingeschaltet.
DRIVES_OFF	Durch Ausschalten dieses Eingangs für mindestens 20 ms kann die SPS die Roboterantriebe ausschalten.

Tabelle A.1: Übersicht über die Eingangsvariablen der Software-SPS

Ausgang	Funktion
PGNO_REQ	Mit einem Zustandswechsel dieses Ausganges fordert der Roboter über diese Ausgangsvariable eine Programmnummer von der SPS an.
APPL_RUN	Ist diese Variable auf HIGH gesetzt, wird gerade ein Programm vom Roboter ausgeführt.
STOPMESS	Nachdem der Roboter durch eine Störung zum Stillstand gezwungen wurde, wird diese Ausgangsvariable auf HIGH gesetzt.
PERI_RDY	Der Roboter setzt dieses Signal, wenn die Roboterantriebe eingeschaltet sind.
USER_SAF	Ein Reset dieses Ausganges erfolgt durch das Drücken des Not-Aus-Tasters oder das Aktivieren einer anderen Sicherheitseinrichtung.
T1, T2, AUT, EXTERN	Je nach dem, welcher Betriebsmodus am Schalter der KCP eingestellt ist, wird die entsprechende Variable auf HIGH gesetzt.
ON_PATH	Entspricht die Position des Roboters der programmierten Bahn, ist dieser Ausgang aktiv.
IN_HOME	Befindet sich der Roboter in seiner Home-Position, ist dieser Ausgang gesetzt.
ERR_TO_PLC	Diesen Ausgang nutzt die Robotersteuerung, um der SPS einen Steuerungsfehler mitzuteilen.

Tabelle A.2: Übersicht über die Ausgangsvariablen der Software-SPS

Jedem dieser Ein- bzw. Ausgänge wird eine Speicheradresse zugeordnet, über die die SPS auf die Variablen zugreifen kann. Diese muss über die Systemdatei *codesys.ini* des Roboters auf die entsprechenden Adressen der SPS gemappt werden.

## B Hardwareanschlüsse am Interbus

Komponente	E/A	ID	Adresse	Verbindung
IB ST 24 DI 16/4	E	1.1	%XI0.7	KR30/2 – Ausgang 1 (grün)
IB ST 24 DI 16/4	E	1.1	%XI0.6	KR30/2 – Ausgang 7 (grau)
IB ST 24 DI 16/4	E	1.1	%XI0.5	KR30/2 – Ausgang 12 (braun)
IB ST 24 DI 16/4	E	1.1	%XI0.4	KR30/2 – Ausgang 13 (gelb)
IB ST 24 DI 16/4	E	1.1	%XI0.3	KR30/2 – Ausgang 14 (rosa)
IB ST 24 DI 16/4	E	1.1	%XI0.2	KR30/2 – Ausgang 15 (weiß)
IB ST 24 DO 16/3	A	1.2	%QX 1.7	Trigger der Kraftmesseinrichtung
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.7	Kamera I/O Modul Ausgang 0
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.6	Kamera I/O Modul Ausgang 1



Komponente	E/A	ID	Adresse	Verbindung
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.5	Kamera I/O Modul Ausgang 2
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.4	Kamera I/O Modul Ausgang 3
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.3	Kamera I/O Modul Ausgang 4
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.2	Kamera I/O Modul Ausgang 5
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.1	Kamera I/O Modul Ausgang 6
IB ST 24 DI 16/4	E	1.3	%XI 3.0	Kamera I/O Modul Ausgang 7
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.7	Kamera I/O Modul Eingang 0
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.6	Kamera I/O Modul Eingang 1
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.5	Kamera I/O Modul Eingang 2
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.4	Kamera I/O Modul Eingang 3
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.3	Kamera I/O Modul Eingang 4
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.2	Kamera I/O Modul Eingang 5
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.1	Kamera I/O Modul Eingang 6
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 3.0	Kamera I/O Modul Eingang 7
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 2.1	Ampel – grün
IB ST 24 DO 16/3	A	1.3	%QX 2.0	Ampel – rot
IB ST 24 DO 16/3	A	2.2	%QX4.0	Motortreiber WZ – Richtungswechsel
IB ST 24 AO 4/BP	A	2.3	%QD6	Motortreiber Werkzeug – 0 V bis 10 V
IB ST 24 AO 4/BP	A	2.3	%QD8	Motortreiber Zuführeinrichtung AnIn (-10 V bis 10 V)
IB ST 24 AO 4/BP	A	2.3	%QD10	[frei]
IB ST 24 AO 4/BP	A	2.3	%QD12	[frei]
KUKA	A		%QX497.7	MOVE_ENABLE
KUKA	A		%QX497.6	DRIVES_OFF
KUKA	A		%QX497.5	DRIVES_ON
KUKA	A		%QX497.4	CONF_MESS
KUKA	A		%QX497.2	EXT_START
KUKA	A		%QX497.1	PGNO_VALID
KUKA	A		%QB496	PGNO
KUKA	E		%IX497.5	ERR_TO_PLC
KUKA	E		%IX497.4	IN_HOME
KUKA	E		%IX497.3	PRO_ACT
KUKA	E		%IX497.2	ON_PATH

Komponente	E/A	ID	Adresse	Verbindung
KUKA	E		%IX497.1	EXTERN
KUKA	E		%IX497.0	AUT
KUKA	E		%IX496.7	T2
KUKA	E		%IX496.6	T1
KUKA	E		%IX496.5	USER_SAF
KUKA	E		%IX496.4	ALARM_STOP
KUKA	E		%IX496.3	PERI_RDY
KUKA	E		%IX496.2	APPL_RUN
KUKA	E		%IX496.1	PGNO_REQ
KUKA	E		%IX496.0	STOPMESS

*Tabelle B.1: Übersicht über die Peripherieanschlüsse am Interbus und die dazu gehörenden Speicheradressen in der Software-SPS*

## Lebenslauf

---

### **Persönliche Daten**

Name: Andreas Lothar Kunze  
Geburtsdatum: 07.04.1974  
Geburtsort: Dresden  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: ledig

---

### **Schulausbildung**

1980-1989 Polytechnische Oberschule, Dresden  
1989-1991 Realschule, Nürnberg  
1991-1995 Gymnasium, Nürnberg

---

### **Wehrdienst**

07/1995 – 04/1996 Heeresfliegerregiment 26, Rechnungsführung

---

### **Studium**

WS 96/97 – SS 02 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Studiengang: Maschinenbau  
Studienschwerpunkte: Rechnerintegrierte Produktionssysteme, Kunststofftechnik

---

### **Berufstätigkeit**

seit 09/2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungs-  
automatisierung und Produktionssystematik  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann  
12/2002-06/2007 Geschäftsführer der Forschungsvereinigung Räumliche  
Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V., Erlangen



# 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 Optikdiagnostik  
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 Ehmman  
**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 spritzgegossene 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 Steinwässer  
**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 Spulnwickeln**  
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 Löten 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 Demontage Technologien 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**  
 212 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  
**Oberflächen Ausbildung 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 Stöckel  
**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- Laserstrahlfügen  
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 Nengendank

**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  
Mähaltigkeit 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 Prozetechnik für das simultane Lten 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 –**

**Entwicklung 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

Band 174: Alexander Hofmann

**Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen**

136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.  
ISBN 978-3-87525-243-9  
ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wölfflick

**Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen  
für bleifreie Mechatronik-Anwendungen**

177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.  
ISBN 978-3-87525-246-0  
ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi

**Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding  
of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods**

155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.  
ISBN 978-3-87525-248-4  
ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp

**Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren  
von Kaltmassivumformwerkzeugen**

140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.  
ISBN 978-3-87525-249-1  
ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel

**Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung  
Für kooperierende Industrieroboter**

148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.  
ISBN 978-3-87525-250-7  
ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl

**Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse**

154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.  
ISBN 978-3-87525-251-4  
ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo

**Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und  
Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungssträger (3D-MID)**

181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.  
ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang

**Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und  
Prozesssicherheit in der Produktion**

172 Seiten, 93 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß

**Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere**

171 Seiten, 100 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker  
**Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung  
permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**  
173 Seiten, 75 Bilder, 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer  
**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung  
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**  
135 Seiten, 50 Bilder, 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht  
**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer  
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**  
137 Seiten, 81 Bilder, 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß  
**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung  
mechatronischer Baugruppen**  
180 Seiten, 117 Bilder, 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch  
**Simulationsgestützte Prozessausslegung für das Umformen lokal  
wärmebehandelter Aluminiumplatten**  
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.  
ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber  
**Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen  
durch innovative Softwaresysteme**  
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.  
ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick  
**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen  
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**  
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.  
ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht  
**Werkstoffcharakterisierung und Prozessausslegung für die wirkmedienbasierte  
Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen**  
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.  
ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl  
**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und  
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**  
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi  
**Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen**  
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff  
**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim  
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**  
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-275-2

Band 194: Christian Alvarez  
**Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von  
Lötprozessen in der Elektronikproduktion**  
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze  
**Automatisierte Montage von makromechatronischen  
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze**  
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-278-1