

Daniel Craiovan

*Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage
optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern*

Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 04. Juli 2011
Tag der Promotion: 05. Dezember 2011
Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Merklein
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer
Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

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 978-3-87525-324-5

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 Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2012
Herstellung: inprint GmbH, Erlangen
Printed in Germany

Vorwort

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

Mein herzlichster Dank gilt dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann und seinem Nachfolger Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, die mir beide die Möglichkeit zur Promotion gegeben haben. Besonders haben mich die enge Zusammenarbeit mit Ihnen und das in mich gesetzte Vertrauen bei der Durchführung von Forschungsprojekten stark positiv geprägt.

Für die freundliche Übernahme des Koreferates danke ich sehr herzlich Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Gedankt sei auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K. Willner für die Übernahme des Vorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günther Roppenecker als weiterem Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation beruht vorwiegend auf den Ergebnissen des öffentlich geförderten Forschungsprojektes AMOB der Bayerischen Forschungsstiftung. Den beteiligten Industriepartnern sei herzlichst für die sehr gute fachliche Zusammenarbeit gedankt.

Danken möchte ich Herrn Dr. Felix Betschon, CEO von vario-optics ag und Herrn Dr. Henning Schröder für die intensiven Fachgespräche und die gemeinsame Wirkung in Fachkreisen zur Vertiefung der gewonnen Erkenntnisse.

Die außerordentlich positive Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl FAPS hat stets zur Motivation und zum Gelingen der Arbeit ausdrücklich beigetragen. Besonders anerkennen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Michael Rösch, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Goth, Herrn Dr.-Ing. Florian Schüßler, Herrn Dipl.-Ing. Michael Pfeffer, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Härter, Herrn Dipl.-Ing. Johannes Hörber, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Müller, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Reinhardt, Herrn Dipl.-Ing. René Schramm, Herrn Dipl.-Ing. Gerald Gion, Herrn Dipl.-Ing. Denis Kozic, Herrn Siegfried Maly und Herrn Leonhard Maußner für die vielen fachlichen Gespräche und den freundschaftlichen Zusammenhalt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die durch ihre unermüdliche Unterstützung meinen Weg erst ermöglicht haben. Der größte Dank gilt jedoch meiner Frau Lysann. Sie gab mir stets Zeit und Freiraum, das Thema intensiv zu bearbeiten. Ihr Rückhalt und bereitwilliger Verzicht auf gemeinsame Freizeit haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Nürnberg, im Dezember 2011

Daniel Craiovan

**Prozesse und Systemlösungen
für die SMT-Montage optischer Bauelemente
auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern**

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

DOKTOR - I N G E N I E U R

vorgelegt von

Daniel Craiovan

Erlangen – 2011

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Physikalische Grundlagen der optischen Datenübertragung	4
2.1 Historischer Überblick.....	4
2.2 Physikalische Grundlagen.....	6
2.2.1 Elektrische Signalübertragung.....	7
2.2.2 Eigenschaften des Lichts.....	9
2.3 Funktionsweise der optischen Datenübertragung mittels Lichtwellenleiter...	12
2.3.1 Prinzip der Lichtführung im Wellenleiter.....	13
2.3.2 Akzeptanzwinkel und numerische Apertur.....	14
2.3.3 Interferenzphänomen im Lichtwellenleiter (Modenbegriff).....	15
2.3.4 Grundtypen der Lichtwellenleiter.....	16
3 Technologischer Wandel der Leiterplattentechnologie durch Integration optischer Funktionalität	19
3.1 Grundprinzip der elektrooptischen Leiterplatte.....	20
3.2 Komponenten für die optische Funktionalität.....	22
3.2.1 Herstellung planarer Lichtwellenleiter.....	24
3.2.2 Sende- und Empfangsbaulemente.....	27
3.2.3 Koppellemente.....	30
3.3 Vergleich alternativer Aufbaukonzepte hinsichtlich der automatisierten Montage.....	33
3.3.1 Diskrete Koppelmodule mit integrierten LWL-Fasern und Zentrierpins.....	33
3.3.2 Direkte Stirnflächenkopplung mit v-förmiger Zentrierung.....	34

3.3.3	Steckbare Verbindungen auf Basis von MT-Ferrulen	35
3.3.4	Diskrete Umlenkung mit mechanischer Zentrierung durch photolithographisch strukturierte Passungen	37
3.3.5	Zusammenfassende Gegenüberstellung der EOCB-Konzepte	39
3.4	Ableitung des Forschungsbedarfs	40
4	Aufbaukonzept elektrooptischer Baugruppen für die automatisierte Low- Cost-Fertigung	42
4.1	Entwicklung gehäuster Bauelemente mit 850 nm VCSEL	42
4.2	Aufbau der elektrooptischen Leiterplatte	45
4.3	Entwicklung eines Charakterisierungsmessplatzes zur Bauelementqualifizierung und Koppelanalyse	48
4.4	Analyse der optischen Bauelementeigenschaften hinsichtlich der Montage.....	51
4.4.1	Festlegung montagerelevanter Kenngrößen des Laserprofils.....	51
4.4.2	Identifikation relevanter Einflussgrößen auf die Laserprofilkennwerte.....	53
4.5	Untersuchung der Einkoppelcharakteristik	59
4.6	Zusammenfassung und Ableitung der Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik	60
5	Entwicklung von Montageprozessen für die elektrooptische Aufbau- und Verbindungstechnik.....	63
5.1	Herausforderung der optischen AVT	63
5.2	Positionierkonzepte für die elektrooptische AVT	65
5.2.1	Alternative Positionierkonzepte	65
5.2.2	Toleranzbetrachtung zu den alternativen Montagekonzepten.....	67
5.2.3	Vor- und Nachteile der alternativen Montagekonzepte	73
5.3	Methoden zur Steigerung und Überwachung der Bestückgenauigkeit für die optische AVT.....	75
5.3.1	Definition der Bestückgenauigkeit.....	75

5.3.2	Identifikation von Einflussfaktoren zur Steigerung der Bestückgenauigkeit bei der Montage optischer Bauelemente.....	78
5.3.3	Nachweis der Bestückgenauigkeit elektronischer Bauteile	81
5.3.4	Nachweis der Bestückgenauigkeit optischer Bauelemente.....	84
5.4	Fixierung der optischen Komponenten mittels Klebstoffen	90
5.4.1	Bewertung alternativer Fixierverfahren	91
5.4.2	Auswahl geeigneter Klebstoffsysteme für die in-situ-Fixierung.....	93
5.4.3	Experimentelle Untersuchung des Fixierprozesses auf Basis dualhärtender Klebstoffe und des Jettens.....	94
5.4.4	Zusammenfassende Bewertung	101
5.5	Schutz des optischen Strahlengangs.....	102
5.6	Lösungskonzept für eine durchgängige Prozesskette für die elektrooptische AVT in Standard-SMT-Bestückautomaten.....	102
6	Prototypische Umsetzung der teilaktiven Bestückung in einem SMT-Bestückautomaten	105
6.1	Grundaufbau und Modifikation des Bestückautomaten.....	105
6.1.1	Aufbau der Basismaschine	105
6.1.2	Erweiterte Funktionalität.....	107
6.1.3	Hochpräziser Bestückkopf mit integrierter UV-Einheit.....	108
6.1.4	Integrierte Systeme für den berührungslosen Klebstoffauftrag	110
6.2	Maschinenkinematik	111
6.2.1	Beschreibung der umgesetzten automatischen Kalibrierung	113
6.2.2	Realisierte optische Zentrierung der Leiterplatten und Bauelemente.....	115
6.3	Funktion und Aufbau des Feinmessplatzes für die teilaktive Montage optischer Komponenten.....	115
6.3.1	Funktionen des Feinmessplatzes.....	116
6.3.2	Realisierter Aufbau des Feinmessplatzes	116
6.3.3	Fokuseinstellung über IR-Beleuchtung	120

6.3.4	Drei-Stufige Kalibrierung des FMP auf Basis der Zwei-Punkt-Messung	122
6.3.5	Erweiterter Prozessablauf	124
7	Qualifizierung der teilaktiven Bestückung	126
7.1	Nachweis der Positionier- und Bestückgenauigkeit	126
7.1.1	Messmittel und Messmethode	126
7.1.2	Wiederhol- und Positioniergenauigkeit der Hauptachsen	129
7.1.3	Bestückgenauigkeit	131
7.2	Maschinen- und Prozessfähigkeitsnachweis der teilaktiven Bestückung mit optischen Bauelementen	133
7.2.1	Maschinenfähigkeitsuntersuchung	133
7.2.2	Prozessfähigkeitsuntersuchung	136
8	Zusammenfassung	144
9	Summary	146
	Literatur	147

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Verwendete Abkürzungen

AOI	Automatische optische Inspektion
BE	Bauelement
BGA	Ball Grid Array
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (lat.: Kohlenstoff = Carbon)
chem. Sn	Chemisch Zinn
CMP	Charakterisierungsmessplatz
D	Delay (Parameter des Mikrodosierventils)
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
EOCB	Electro-optical Circuit Board (elektrooptische Leiterplatte)
eV	Elektronenvolt
FMP	Feinmessplatz
FR4	Flame Resistant, Klasse 4
FT	Falling time (Parameter des Mikrodosierventils)
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde
HMI	Human Machine Interface
ICT	In Circuit Test
IR	Infrarot
LP	Leiterplatte
LSL	Lötstopplack
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramics
LWL	Lichtwellenleiter
MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
MKS	Maschinenkoordinatensystem
N	Number of Pulses (Parameter des Mikrodosierventils)
NL	Needle Lift (Parameter des Mikrodosierventils)
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
OT	Open time (Parameter des Mikrodosierventils)
PCB	Printed Circuit Board (Leiterplatte)

PD	Photodiode
PFU	Prozessfähigkeitsuntersuchung
RT	Raising time (Parameter des Mikrodosierventils)
SMD	Surface Mount Device
SMT	Surface Mount Technology
TAT	Transatlantisches Telefonkabel
Tbit/s	Terabit pro Sekunde
USG	Untere Spezifikationsgrenze
UV	Ultraviolett
VB	Visueller Bereich
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser

Verwendete Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_N		Numerische Apertur
C	Farad	Kapazität
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
C_m		Maschinenfähigkeitsindex
C_{mk}		Kritischer Maschinenfähigkeitsindex
D_{opt}	dB	Optische Dämpfung
dx_{korr}	m	Positionskorrektur in X-Richtung
dy_{korr}	m	Positionskorrektur in Y-Richtung
E	J	Energie
f	1/s	Frequenz
F	N	Kraft
h	Js	Plancksches Wirkungsquantum
i	A	Stromstärke
I	A	Versorgungsstrom
m	kg	Masse

M_0	kg	Ruhemasse
M1		Messpunkt 1
M2		Messpunkt 2
m_{BE}	kg	Masse eines Bauelementes
n		Anzahl
n		Brechungsindex
n_K		Brechungsindex (Kern)
n_L		Brechungsindex (Luft)
n_M		Brechungsindex (Mantel)
P_{max}	J/s	Maximale optische Leistung
P_{RX}	J/s	Optische Empfängerleistung
$P_{RX,max}$	J/s	Übertragungspotenzial einer optischen Strecke
P_{TX}	J/s	Optische Sendeleistung
P_{UV}	J/s	Leistung der UV-Strahlung
R	Ohm	Widerstand
R_{MKS}	°	Drehlage der Pipette im Maschinenkoordinatensystem
t	s	Zeit
t_0	s	Dauer der UV-Strahlung gleich Null
t_{max}	s	UV-Zeit bis Klebstoff ausgehärtet ist
t_{min}	s	Minimale UV-Zeit für eine Anhärtung des Klebstoffes
U	V	Versorgungsspannung
$U_a(t)$	V	Zeitabhängige Ausgangsspannung
$U_e(t)$	V	Zeitabhängige Eingangsspannung
v	m/s	Geschwindigkeit
X_{BE}, Y_{BE}	m, m	Ort im Koordinatensystem der Bauelementkamera
X_{FMP}, Y_{FMP}	m, m	Ort im Koordinatensystem des Feinmessplatzes
X_{LP}, Y_{LP}	m, m	Ort im Koordinatensystem der Leiterplattenkamera
X_{MKS}, Y_{MKS}	m, m	Horizontale Position im Maschinenkoordinatensystem
X_{PCB}, Y_{PCB}	m, m	Ort im Koordinatensystem der Leiterplatte
Z_{MKS}	m	Vertikale Position der Pipette im Maschinenkoordinatensystem
Δ		Relative Brechzahl

Δx	m	Versatz in X-Richtung
Δx_e	m	Versatz der elektrischen Bauelementbeinchen zum Sollpunkt
Δy	m	Versatz in Y-Richtung
Θ	°	Akzeptanzwinkel
δ	°	Winkel des gebrochenen Strahls im Mantel
ε	°	Einfallswinkel
ε_g	°	Grenzwinkel
ε_r	°	Ausfallswinkel
λ	m	Wellenlänge
μ		Arithmetischer Mittelwert
σ		Standardabweichung

1 Einleitung

Die elektronische Baugruppe sieht sich in den Bereichen der Computer-, Telekommunikations- und Unterhaltungselektronik durch stetig steigende Datenübertragungsraten herausgefordert. Darüber hinaus gewinnt die Datenkommunikation auch in den Industriesektoren Automobil, Medizin und Automatisierungstechnik immer mehr an Bedeutung. Der kupferbasierte elektrische Signaltransport stößt an seine physikalische Grenze und limitiert somit das Potenzial der nach dem Mooreschen Gesetz prognostizierten wachsenden Kapazität zukünftiger Prozessoren. In Weitverkehrsnetzen und auch lokalen Netzwerken ist die faserbasierte, optische Datenübertragung bereits etabliert und bietet viele technologische Vorteile. Neben der hohen Bandbreite im Bereich mehrerer Tbit/s ist sie gegen elektromagnetische Strahlung unempfindlich, erfordert weniger Bauraum und zeichnet sich durch eine hohe Signalintegrität aus. Vor dem Hintergrund der wachsenden Rohstoffpreise, insbesondere von Kupfer, stellt das Lichtwellenleitermaterial (Glas oder polymere Kunststoffe) neben der Gewichtseinsparung eine wirtschaftliche Alternative dar.

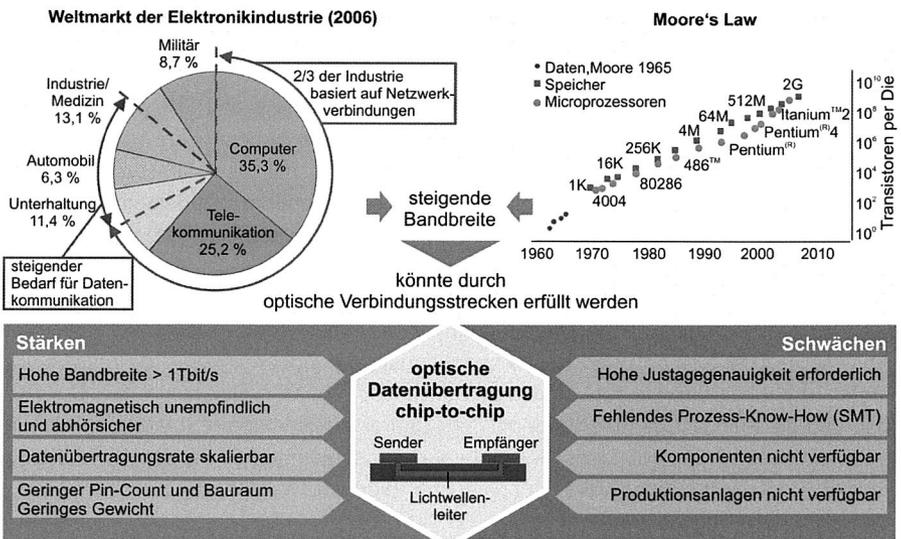


Bild 1: Die steigenden Datenübertragungsraten sind mittels optischen Verbindungsstrecken realisierbar und erfordern geeignete Fertigungsverfahren [31] [68] [72] [96]

Die optische Datenübertragung auf Leiterplattenebene (chip-to-chip Verbindung) bringt jedoch auch große Herausforderungen mit sich. Neben der Verfügbarkeit elektrooptischer Sender und Empfänger als auch Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern ist

eine wirtschaftliche Aufbau- und Verbindungstechnik erforderlich. Die Forderung kann jedoch nur durch Kombination der beiden bisher inkompatiblen Technologien der elektrischen und optischen Aufbau- und Verbindungstechnik erfüllt werden. Das Ziel dieser Arbeit liegt darin, die in Bild 1 dargestellten vier Schwächen der optischen Datenübertragung auf Leiterplattenebene zu beseitigen. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit massenfertigungstaugliche Sender- und Empfängerbauelemente entwickelt, angepasste Fertigungsverfahren konzipiert und eine Produktionsanlage prototypisch aufgebaut und qualifiziert.

Zunächst werden in Kapitel 2 die physikalischen Grundlagen der optischen Datenübertragung besprochen. Ein kurzer Abriss der Historie der optischen Datenübermittlung zeigt die langwierigen Entwicklungsarbeiten bis hin zum Erfolg der optischen Technologie. Der Wandel der Leiterplattentechnologie durch die Integration von optischen Funktionen wird in Kapitel 3 aufgezeigt. Für die elektrooptischen Baugruppen ergeben sich aus dem Spannungsfeld zwischen den physikalischen Eigenschaften, den Fertigungsprozessen und der Wirtschaftlichkeit unterschiedlichste Aufbaukonzepte. Insbesondere werden die Koppeltechniken und Herstellverfahren für die integrierten Lichtleiter unterschieden. Nach einer Klassifizierung und Begriffsdefinition werden die aktuellen Entwicklungen der elektrooptischen Baugruppen aufgezeigt und hinsichtlich montagerelevanter Kriterien bewertet.

Für die optische chip-to-chip Kommunikation eignen sich insbesondere Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL). Die Halbleiterchips mit den Abmessungen von $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ lassen sich mit Standard-SMT-Bestückautomaten derzeit nicht verarbeiten. Gehäusete Bauelemente mit einer nach unten gerichteten optischen Wirkfläche, die mit Produktionsanlagen der SMT verarbeitbar sind, gibt es bislang nicht. Die Entwicklung SMT-fähiger Bauelemente ist neben der Beschreibung der prototypischen elektrooptischen Leiterplatten Gegenstand von Kapitel 4. Den Schwerpunkt stellt die Analyse der Bauelement- und Koppelcharakteristika in Abhängigkeit der Prozessparameter VCSEL-Strom, Umgebungstemperatur und thermische Belastung dar. Der Aufbau und die Funktion des hierfür benötigten Charakterisierungsmessplatzes werden im Vorfeld beschrieben. Auf Basis der Untersuchungserkenntnisse können die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik abgeleitet werden.

Aufgrund der hohen Komponententoleranzen, die eine Low-Cost-Fertigung ermöglichen, stellt die Ausrichtung des Lasers zur Koppelstelle und zugleich die der elektrischen Anschlussbeinchen zu den elektrischen Pads mit einer Bestückgenauigkeit von $20\ \mu\text{m}$ eine Herausforderung dar. Darüberhinaus muss das Bauelement unmittelbar nach der Bestückung fixiert werden, um die Selbstzentrierung des Bauelementes im nachfolgenden Lötprozess zu verhindern. Für die Montageaufgabe werden drei alternative Bestückkonzepte vorgestellt und auf Basis einer Toleranzbetrachtung das Potenzial für die automatisierte Bestückung bewertet. Die Fixierung erfolgt mittels dualhärtenden

Klebstoffen. Das Zusammenspiel aus licht- und thermisch induzierter Härtung wird experimentell untersucht und die Prozessfenster für kurze Taktzeiten ermittelt. Bislang ungeklärt ist, ob der Klebstoffschrumpf die optische Kopplung beeinflusst. Experimentelle Untersuchungen geben hierzu Aufschluss. Die theoretischen und experimentellen Analysen der Einzelprozesse liefern mit Kapitel 5 das erforderliche Prozess-Know-how für die Montageaufgabe. Im Sinne einer hochautomatisierten Massenfertigung wird aus den Erkenntnissen eine durchgängige Prozesskette abgeleitet.

Der Nachweis über die Maschinen- und Prozessfähigkeit der automatisierten Fertigung elektrooptischer Leiterplatten liefert den entscheidenden Beitrag zur Festigung der optischen chip-to-chip Technologie. Den Ausgangspunkt stellt ein Hochleistungsbestückautomat (Siplace HF) mit der Möglichkeit, die Bestückabläufe in der Programmiersprache C++ zu individualisieren und zusätzliche Komponenten zu integrieren. Die Realisierung der modifizierten Produktionsanlage umfasst die Implementierung der Bestückkinematik inklusive der Bauelement- und Leiterplattenzentrierung und einer vollautomatischen Selbstkalibrierung. Neben den integrierten Jet-Systemen für den Klebstoffauftrag und der integrierten UV-Einheit für die Klebstoffaushärtung stellt die Entwicklung und Integration des sogenannten Feinmessplatzes zur optischen Zentrierung des Lasers den Kernpunkt von Kapitel 6 dar. Schließlich wird in Kapitel 7 die Wiederhol-, Positionier- und Bestückgenauigkeit der Anlage untersucht und die Maschinen- und Prozessfähigkeit mit den realen Bauelementen und Leiterplatten nachgewiesen. Aus dem gewonnenen Prozess-Know-how werden weiterführende Vorschläge zur Optimierung von Bestückungsanlagen abgeleitet.

2 Physikalische Grundlagen der optischen Datenübertragung

Die elektrische Datenübertragung stößt zunehmend an ihre physikalische Grenze und beschränkt somit die Bandbreite. Gemäß Herstellerangaben kann die elektrische Übertragungskapazität nur durch Beherrschung der Fertigungsprozesse und hohes Maß an Know-how im Bereich der Leiterplattengestaltung, um kapazitive Effekte zu verhindern, gesteigert werden [63]. Die geschichtliche Entwicklung der Kommunikationstechnik zeigt, dass optische Signalübertragungsstrecken eine sinnvolle Alternative darstellen. Dies wird nachfolgend durch einen historischen Überblick vom Rauchsignal bis hin zu leistungsfähigen optischen Transatlantikverbindungen motiviert. Die vielen Vorteile der optischen Kommunikation liegen letztendlich in den Eigenschaften des Lichts begründet. Nach einer kurzen Darstellung der physikalischen Grundlagen wird anschließend das Prinzip der fasergebundenen optischen Datenübertragung gezeigt und die wichtigsten Begriffe erläutert. Die spezifischen Probleme und Lösungsansätze optischer Kurzstreckenverbindungen auf Leiterplattenebene werden detailliert im anschließenden Kapitel behandelt.

2.1 Historischer Überblick

In der Natur erfolgt die Datenübermittlung vorwiegend über Licht- und Akustiksignale. Aufgrund der Fähigkeit des Menschen, Lichtsignale mit seinen Sinnesorganen zu erfassen, wurden bereits in der Antike Nachrichten mit primitiven Mitteln wie Rauch- und Feuerzeichen übertragen. So wurde z. B. die Nachricht vom Sieg der Griechen über Troja in das mehr als 500 km entfernte Argos mit einer Feuerzeichenkette übermittelt [38]. Später war es möglich, mit Hilfe der Feuerzeichentelegraphie frei formulierte Botschaften zu senden. Die zu übertragenden Buchstaben wurden durch die Position von Fackeln links oder rechts eines großen Schildes kodiert [86]. So nutzten auch die Römer die optische Nachrichtenübermittlung, um mittels Feuerzeichen entlang von Wachtürmen zu kommunizieren.

In [67] wird die Geschichte der optischen Telegraphie dargestellt. So soll die Erfindung des Fernrohrs im Jahr 1608 durch den holländischen Brillenmacher eine entscheidende Rolle gespielt haben, da sie dem Menschen ermöglichte, „*die Reichweite seiner Wahrnehmung zu vervielfachen*“. Von Robert Hooke wurde die Idee der Übermittlung von „*Gedanken über weite Entfernungen*“ in Form von großen einzelnen Buchstaben auf großen beschriebenen Tafeln der Royal Society in London vorgelegt – die Erfindung zeigte sich jedoch als nicht praktikabel und wurde nicht weiterverfolgt. Erst der optische Telegraf des französischen Technikers Claude Chappe überzeugte die Nationalversammlung der französischen Revolution – sie stimmte 1792 dem Bau einer 70 km langen Versuchsstrecke zu. Das robuste und einfach zu bedienende System – Zeichenübermittlung mit Hilfe von manuell schwenkbaren Signalarmen – fand schließlich seinen

Durchbruch im Jahre 1794 mit dem Bau einer 270 km langen Telegraphenlinie mittels einer Kette von Signalarm-Stationen zwischen Paris und Lille und beeindruckte vor dem Hintergrund des militärischen Nutzens durch die hohe Übertragungsgeschwindigkeit von nur zwei Minuten für einen Buchstaben. Das System fand eine große Verbreitung in vielen anderen europäischen Staaten und auch in den USA und in Ägypten. Die Informationsübermittlung war jedoch störanfällig gegen Witterungseinflüsse, die aufgrund von Nebel, Dämmerung und Unwetter einen unzuverlässigen Betrieb verursachten.

Die Entdeckung der elektrischen Ladung und erste Experimente im 18. Jahrhundert durch Benjamin Franklin, André-Marie Ampère und Georg Simon Ohm legten zusammen mit der Erfindung der Voltasche Säule den Grundstein für die praktische Verwendung des Stroms. Nach der Entdeckung der elektromagnetischen Induktion durch Michael Faraday im Jahre 1832 präsentierten Carl Friedrich Gauß und Wilhelm Eduard Weber ein Jahr später einen elektromagnetischen Telegrafen. Somit wurde die optische Telegrafie durch die elektrische Signalübertragung, die witterungsunabhängig war, zunehmend abgelöst. Den Durchbruch brachte 1844 der von Samuel Morse optimierte Schreibtelegraf, der die optische Signalübertragung im Jahre 1853 nach einer zwanzigjährigen Koexistenz beider Technologien endgültig ablöste. [116] [84]

Zwanzig Jahre später im Jahre 1870 demonstrierte John Tyndall die Möglichkeit der Lichtleitung in einem Wasserstrahl und weckte somit weltweit die Neugier der damaligen Wissenschaftler, um Licht durch verschiedene Medien zu leiten [112]. Bereits 1881 erfand William Wheeler ein Lichtleitersystem mit einer hoch reflektierenden Schicht, um ein Haus mit nur einer Lichtquelle zu beleuchten [33]. In den darauffolgenden Jahren wurden gebogene Glasstäbe für Beleuchtungszwecke in der Medizin verwendet, und in den zwanziger Jahren des 19. Jahrhunderts ein Patent des Engländers John Logie Baird und des Amerikaners Clarence W. Hansell mit der Idee, Bilder über transparente Stäbe für das Fernsehen zu übertragen, angemeldet. Später im Jahre 1930 wurde von dem Medizinstudenten Heinrich Lamm diese Technologie erweitert, um auf Basis eines Glasfaserbündels innere Organe sichtbar zu machen. 1954 veröffentlichte der holländische Wissenschaftler Abraham Van Heel eine Faser mit einer Ummantelung, dessen Material einen geringeren Brechindex als der Kern besaß. Mit der Erfindung des Lasers im Jahre 1960 tauchte die Idee der fasergebundenen, optischen Übertragung auf; allerdings wiesen damalige Fasern eine Dämpfung von über 1000 dB/km auf und waren somit für die optische Datenübertragung nicht geeignet. [111]

Der Durchbruch erfolgte wenige Jahre später mit den bahnbrechenden Arbeiten von Charles K. Kao und George A. Hockham. Es gelang Ihnen laut eines Interviews des IEEE Global History Network mit Kao [52], Glasfasern mit stark reduzierter Dämpfung herzustellen. Die Ursache läge lediglich in Verunreinigungen des Glases. Auf Basis theoretischer Arbeiten gelang ihm die Identifikation eines geeigneten Materials und erhielt für seine Entdeckung erst viel später im Jahre 2009 den Nobelpreis für Physik [89].

Innerhalb von nur fünf Jahren nach Kaos Entdeckung konnte ein Forscherteam, das mit Quarzglas experimentierte, eine Lichtwellenleiterfaser, die 65000 mal mehr Informationen als eine Kupferleitung übertragen kann, herstellen. [3]

Wenige Jahre später in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts wurden die ersten optischen Datenübertragungssysteme zur Verbindung von Computern und Telefonzentralen in Betrieb genommen. Nach ersten Versuchen im Jahre 1978 startete die Deutsche Bundespost 1980 das Projekt BIGFON (Breitbandiges Integriertes Glasfaser-Fernmelde-Orts-Netz). Da zu der Zeit keinerlei Erfahrungen oder Normwerke für die optische Datenübertragung existierten, wurden nur sehr wenige Rahmenvorgaben gemacht [14]. Anfangs war die optische Dämpfung noch höher als die der elektrischen Datenübertragung mittels Koaxialleitungen. Daher konnten zunächst nur kurze Strecken realisiert werden. Dies hat sich in kürzester Zeit ins Gegenteil verkehrt, so dass 1988 das erste optische transatlantische Telefonkabel (TAT-8) mit 40.000 Kanälen in Betrieb ging. In der Zwischenzeit wird Deutschland mit den USA über das TAT-14 mit 47×10 Gbit/s Kanälen auf Basis des Wellenlängenmultiplexverfahrens (DWDM) bei einer gesamten Übertragungskapazität von 3,2 Tbit/s optisch verbunden [105] [104].

2.2 Physikalische Grundlagen

In der Einleitung dieser Arbeit wurden zahlreiche Gründe, die den Einsatz optischer Datenübertragungssysteme befürworten, genannt. Nachfolgend werden die elektrische und optische Datenübertragung gegenübergestellt, um die intensiven Bemühungen der letzten Jahre, die optische Datenübertragung auch auf Leiterplatten- und sogar Chip-ebene zu etablieren, besser zu verstehen. Nach [68] basieren die Vorteile der optischen im Gegensatz zur elektrischen Signalübertragung auf drei fundamentalen physikalischen Unterschieden. Sowohl die optische als auch die elektrische Datenübertragung erfolgt durch die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Wellenlänge, Frequenz und Energie (Bild 2).

Miller verdeutlicht, dass bei der elektrischen Datenübertragung nicht die Elektronen das Signal transportieren, sondern elektromagnetischen Wellen. Daher breiten sich Signale auf verlustarmen elektrischen Leitungen (LC-Leitung) auch nicht mit der Elektronengeschwindigkeit von ca. 10^6 m/s aus, sondern annähernd mit Lichtgeschwindigkeit. Somit ist die Lichtübertragung nicht schneller als die elektrische Datenübertragung – ein Sachverhalt, der oft falsch angenommen wird. Auf verlustbehafteten Leitungen (RC-Leitung) – typischerweise auf Leiterplatten – breitet sich das Signal etwas langsamer fort. Die Signalgeschwindigkeit ist von dem Gesamtwiderstand und der kapazitiven Wirkung der Leitung abhängig und lässt sich daher nicht pauschalisiert ausdrücken. Dennoch weisen sowohl LC- als auch RC-Leitungen bei der elektrischen Datenübertragung physikalische Probleme auf, wie z. B. Signalverzerrung und -dämpfung, Impedanzabweichungen, Übersprechen, Leistungsverluste, Reflexionen, limitierte Signaldichte

und galvanische Verbindung, die alle durch den optischen Signaltransport gelöst oder zumindest minimiert werden können [68].

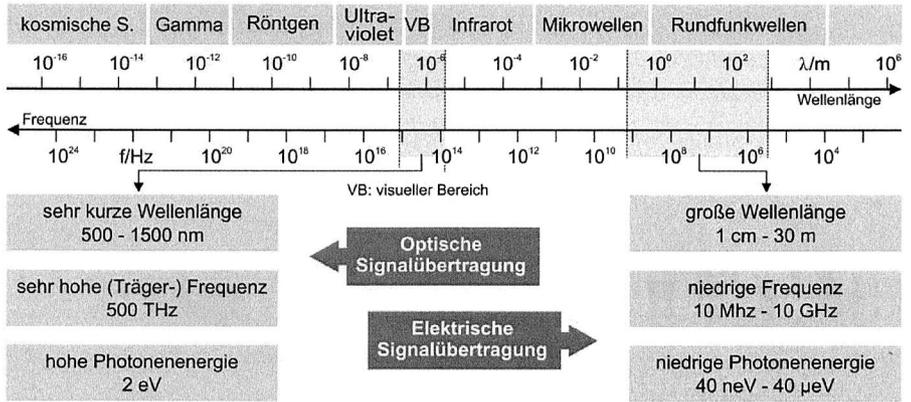


Bild 2: Drei fundamentale Eigenschaften des Lichts, die für eine optische Datenübertragung sprechen (in Anlehnung an [68])

Darüber hinaus bietet die Optik alternative Möglichkeiten wie z. B. Freistrahverbindungen, Wellenlängenmultiplex und ultrakurze optische Impulse für hochdynamische Verbindungen.

2.2.1 Elektrische Signalübertragung

Elektrische Verbindungen nutzen in der Regel kein Trägersignal, wie in Bild 3 dargestellt, um Daten zu transportieren, sondern arbeiten im Basisband. Die Signalmodulation auf eine hochfrequente Trägerfrequenz stellt für eine rein elektrische Verbindung (z. B. auf LP-Ebene) einen nicht praktikablen Aufwand dar.

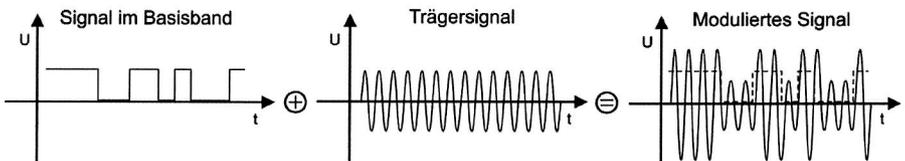


Bild 3: Erzeugung eines modulierten Signals auf einer Trägerfrequenz

Bei der Datenübertragung im Basisband wird aufgrund des Leitungswiderstandes und der kapazitiven Wirkung die Anstiegsgeschwindigkeit eines Signals gemäß

$$U_a(t) = U_e \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (2.1)$$

limitiert (Bild 4). Somit wird bei einer solchen Leitung die Übertragungsrate durch die Anstiegszeit begrenzt. Das Augendiagramm stellt ein Hilfsmittel zur Beurteilung der Signalqualität dar. Hierbei wird ein zufälliger Datenstrom in einem festen Zeitabschnitt überlagert abgebildet. Die ansteigende und fallende Flanke sowohl von U_{\max} als auch von U_{\min} kommend erzeugt das typische Augendiagramm. Bei einer zu engen Abfolge der Bits überlappen sich die Flanken, so dass keine eindeutige Unterscheidung zwischen „0“ und „1“ mehr erfolgen kann. Wird vor Erreichen der Schwellspannung das Signal geändert (Bild 4, Augendiagramm f_2), so führt dies zur Verkleinerung des Auges, so dass keine eindeutige Zuordnung von „0“ und „1“ mehr möglich ist und das Signal somit unbrauchbar wird.

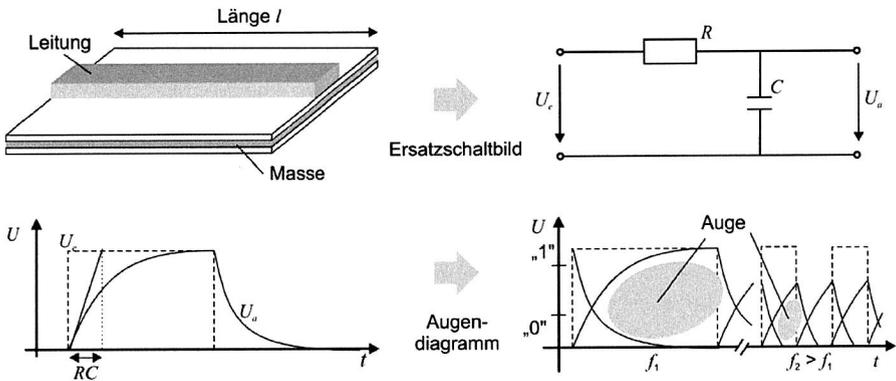


Bild 4: Ersatzschaltbild einer einfachen elektrischen RC-Leitung und das resultierende Augendiagramm

Doch auch bei LC-Leitungen, die keine kapazitiven Verluste besitzen, führt selbst die Modulation des Signals mit einem hochfrequenten Trägersignal zur Signalverzerrung, was im Skin-Effekt begründet ist. Elektromagnetische Wellen werden auf einer Leitung in Abhängigkeit der Lastimpedanz und der Leitungseigenschaften reflektiert [47]. Somit muss bei der Auslegung einer HF-Leiterplatte das Design auf die Betriebsfrequenz angepasst werden. Eine Änderung der Übertragungsrate würde aufgrund von Reflexionen zu Verlusten und Rauschverhalten führen. Die Nutzfrequenz wird durch aufwändige Anpassungen mit LC-Netzwerken, Übertragern und spezifischen Leitungen realisiert. Ferner ist das Übersprechen von Signalen in der kapazitiven Wirkung zwischen zwei Leitungen begründet. Bei hohen Frequenzen wirkt ein Kondensator wie ein Kurzschluss, so dass erneut in Abhängigkeit des Designs die Übertragungsrate begrenzt ist. Außerdem muss das Dipolverhalten von Leitungen berücksichtigt werden; beträgt die Leitungslänge ein Viertel der Wellenlänge, werden die Signale abgestrahlt und stören so die restliche Schaltung oder umgebende Elektronik, so dass nach [119] eine aufwändige Schirmung erforderlich ist. Aufgrund dieser Eigenschaften ist eine elektrische Baugruppe hinsichtlich der Frequenz nicht skalierbar und nur mit hohem technischem

Aufwand realisierbar. Optische Übertragungstrecken weisen diese Probleme nicht auf, da die elektromagnetische Welle des Lichts eine Sonderstellung einnimmt und sich aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften anders verhält.

2.2.2 Eigenschaften des Lichts

Licht ist im physikalischen Sinne eine elektromagnetische Strahlung im optischen Spektralbereich, die im Wellenlängenintervall von 380 nm bis 780 nm vom menschlichen Auge wahrgenommen werden kann. Interessanterweise besitzt das Licht die Eigenschaften von Welle und Teilchen zugleich. Bei Wellenlängen kleiner als 10 nm dominiert die Teilcheneigenschaft und bei Wellenlängen größer als 1000 nm lässt sich nur noch die Welleneigenschaft nachweisen [66]. Somit stellt der Bereich der optischen Strahlung einen Übergangsbereich zwischen Teilchen- und Welleneigenschaften dar. Aufgrund dieses Welle-Teilchen-Dualismus kommt dem Licht eine besondere Stellung zu, da es gleichzeitig Masse und Impuls, als auch Wellenlänge und Frequenz aufweist. Es lassen sich folgende physikalische Eigenschaften zusammenfassen:

- Teilcheneigenschaften:
Emission, Absorption, Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung, Gravitation
- Welleneigenschaften:
Reflexion, Brechung, Streuung, Beugung, Interferenz, Polarisation,

Nach [66] gehören beiden Modellen zur Beschreibung des Lichts Energie und Ausbreitungsgeschwindigkeit an. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist für alle elektromagnetischen Wellen im Vakuum gleich und besitzt einen Näherungswert von $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Bei der Ausbreitung des Lichts im transparenten Medium, wie z. B. in einem Lichtwellenleiter, hat die Lichtgeschwindigkeit aufgrund der Brechzahl n des Mediums einen wellenlängenabhängigen Wert

$$c = \frac{c_0}{n}. \quad (2.2)$$

Die Ausbreitung einer Welle ist außerdem mit einem Energietransport verbunden. Max Planck formulierte im Jahre 1900 den Zusammenhang zwischen Energie E , Phasengeschwindigkeit c und Wellenlänge λ mit

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.3)$$

wobei $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ eine Naturkonstante ist und als Plancksches Wirkungsquantum bezeichnet wird. Albert Einstein postulierte im Rahmen seiner Relativitätstheorie die Äquivalenz zwischen Masse m und dem äquivalenten Energiebetrag E mit

$$E = mc^2 \quad (2.4)$$

Werden die Gleichungen (2.3) und (2.4) gleichgesetzt, so lassen sich die Teilchengrößen Masse und Impuls als Funktion der Frequenz und Wellenlänge und umgekehrt beschreiben. Ein weiterer Zusammenhang, der die fehlende Masse von Strahlungsquanten im Rundfunkbereich erläutert, ist der Sachverhalt, dass die Ruhemasse von Lichtquanten Null ist. Mit der Ruhemasse m_0 bei der Geschwindigkeit $v = 0$ und m bei der Geschwindigkeit v gilt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (2.5)$$

Somit geht die Masse für Photonen tiefer Frequenz gegen Null und für Photonen hoher Frequenz, wie z. B. bei der kosmischen Höhenstrahlung, steigt sie stark an, so dass nur noch Masse und Impuls erkennbar sind. Bei der optischen Signalübertragung werden typischerweise Wellenlängen im Bereich zwischen 850 nm und 1300 nm bei einer Frequenz von ca. $f = 3 \cdot 10^{14}$ Hz eingesetzt, so dass die Energie nach Gleichung (2.3) eines Lichtquanten $E = 1,45$ eV beträgt.

Teilchenstruktur des Lichts

Die Teilchenstruktur wird bei der Wechselwirkung zwischen Licht und Stoff, die mit einem Energieaustausch verbunden ist, deutlich. Licht entsteht in den Atomen eines Stoffes in Folge von Übergängen zwischen diskreten, atomaren Energiestufen und besitzt daher kleine elementare Energieportionen, die der Energiedifferenz im Atom entspricht. Umgekehrt wird durch Aufnahme der Quantenenergie das Atom in einen angeregten Zustand versetzt, was jedoch nur unter der Bedingung, dass die eingebrachte Energie der Energiedifferenz zwischen den atomaren Energiestufen entspricht. Diese besondere Eigenschaft des Lichts ermöglicht eine elektrooptische Wandlung durch den Photoeffekt, wobei zwischen dem äußeren und inneren Photoeffekt unterschieden wird.

Beim äußeren Photoeffekt werden Elektronen aus Metalloberflächen durch Licht abgelöst, wobei die Anzahl der freigesetzten Elektronen durch die Leistung der optischen Strahlung bestimmt wird. Somit wird durch den äußeren Photoeffekt ein Stromfluss erzeugt; je nach Art der Anregung lässt sich somit ein elektrisches Signal ohne zusätzliche Quelle erzeugen.

Der innere Photoeffekt basiert auf der Bildung freier Elektronen im Leitungsband eines Halbleiters durch die Einwirkung optischer Strahlung. Da die Energiebandlücke ΔE zwischen Valenzband und Leitungsband im Bereich von 1 eV und somit in der Größenordnung der Energie optischer Strahlung liegt, ist es mit Licht möglich, in einem Halbleiter Valenzelektronen aus ihrer atomaren Bindung zu lösen und in das energetisch höhere Leitungsband anzuheben. Die freibeweglichen Leitungselektronen folgen einem ange-

legten elektrischen Feld als Photostrom und ermöglichen somit die Wandlung von optischen Signalen in elektrische Signale.

Welleneigenschaft des Lichts

Die Erscheinungen, welche die Welleneigenschaften des Lichts bestätigen, werden zusammengefasst als Wellenoptik bezeichnet. Sie erklärt die physikalischen Phänomene der Streuung, Interferenz, Beugung und Polarisation, außerdem Reflexion und Brechung. Die Strahlenoptik oder auch geometrische Optik stellt einen Teil der Wellenoptik dar und erlaubt mit den Gesetzen der Reflexion und Brechung eine einfache Beschreibung der Lichtausbreitung durch mathematische Linien (Lichtstrahlen) unter der Annahme, dass die optischen Hindernisse (Linsen, Spiegel usw.) im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts um ein Vielfaches größer sind. Auch wenn die meisten Eigenschaften der optischen Signalübertragung im Lichtwellenleiter mit der geometrischen Optik erklärt werden können, so bleiben Effekte wie Dämpfung oder der Modenbegriff unbeantwortet, so dass nachfolgend knapp die grundlegenden Phänomene der Wellenoptik beschrieben werden und hinsichtlich ihrer Relevanz für die optische Signalübertragung bewertet werden. [66] [2]

- Interferenz ist die Überlagerung mehrerer Einzelwellen in einem Raumgebiet, wodurch auf Basis des Superpositionsprinzips räumliche Variationen der Feld- und Intensitätsverteilung (Interferenzmuster) auftreten. Bei der Ausbreitung des Lichts in einem Lichtwellenleiter spielt die Interferenz eine entscheidende Rolle und erklärt die Ausbreitung unterschiedlicher Moden (siehe Modenbegriff).
- Polarisation beschreibt die definierte Ausrichtung der Schwingungsebene des elektrischen Feldvektors der elektromagnetischen Welle. Ist z. B. der Kern bei einer Singlemodefaser nicht exakt kreisrund, so breiten sich die Vektorkomponenten des elektromagnetischen Feldes nicht gleich schnell aus, so dass es aufgrund der Laufzeitdifferenz zu einer Pulsverzerrung durch die sog. Polarisationsmodendispersion kommen kann.
- Reflexion und Brechung des Lichts erfolgt an Grenzflächen zweier Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen. Da das Licht stets so verläuft, dass die benötigte Laufzeit minimal wird und sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Medien unterschiedlicher Brechzahl ändert, muss zwangsläufig eine Richtungsänderung erfolgen, die als Brechung bezeichnet wird. Ein Teil des Lichtstrahls wird unter demselben Winkel wie der Einfallswinkel zurück reflektiert. Ist der Einfallswinkel kleiner als ein materialspezifischer Grenzwinkel, existiert kein gebrochener Strahl mehr, sondern nur noch ein reflektierter Strahl (Totalreflexion). Bei der im Medium geführten Lichtübertragung spielt die Totalreflexion eine wesentliche Rolle.
- Beugung des Lichts ist die Ablenkung einer Welle an Kanten oder Blenden. Die Ausprägung der Beugung ist hierbei maßgeblich von der Wellenlänge und der Spaltbreite abhängig. Die Beugungserscheinung tritt erst mit annähernd gleich

chem Wert für die Wellenlänge und Spaltbreite auf und verstärkt sich mit kleiner werdender Spaltbreite. Dieser Effekt kann durch den Einsatz eines Beugungsgitters gesteigert werden und lässt sich neben diversen technischen Anwendungen als Koppelmethode in den Lichtwellenleiter nutzen.

- Bei der Streuung ändert das Licht seine Ausbreitungsrichtung an kleinen Hindernissen oder bei der diffusen Reflexion an rauen Oberflächen. Durch das einfallende Licht werden die Elektronen der Atome des Mediums angeregt und somit zur Quelle für Sekundärwellen, die sich diffus ausbreiten. Streuprozesse treten in unterschiedlichen Varianten (Rayleigh-, Mie, Raman- und Brillouin-Streuung) auf und sind maßgeblich für die Dämpfung und Modentransformationen verantwortlich.

2.3 Funktionsweise der optischen Datenübertragung mittels Lichtwellenleiter

Allgemein betrachtet besteht ein Nachrichtenübertragungssystem aus einer Übertragungsstrecke mit Sender und Empfänger sowie den entsprechenden Signalaufbereitungs- und Konverterstufen. Der Sender wandelt das elektrische Signal in die für das Übertragungsmedium erforderliche Energieform und koppelt es in den Kanal, wo es zum Empfänger transportiert wird. Umgekehrt erfasst der Empfänger das angekommene Signal und demoduliert es zur Weiterreichung an die Nachrichtensenke. [109]

Ein System zur optischen Signalübertragung mit Lichtwellenleitern (LWL) besitzt grundsätzlich immer den gleichen Aufbau wie in Bild 5 beispielhaft dargestellt. Die Strahlungsquelle und der Strahlungsempfänger werden durch Halbleiterbauelemente dargestellt. In der Strahlungsquelle erfolgt die Modulation (vgl. Bild 3) der optischen Trägerfrequenz (elektrooptischer Wandler) mit der in elektrischer Form aufbereiteten Nachricht.

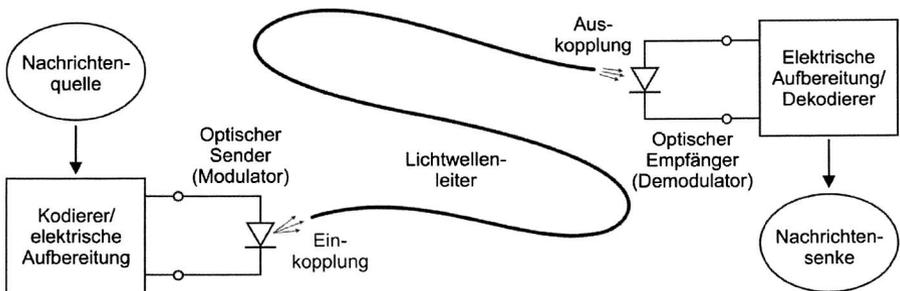


Bild 5: *Prinzipieller Aufbau eines optischen mediengebundenen Nachrichtenübertragungssystems (in Anlehnung an [109])*

Im Gegensatz zur Rundfunktechnik, bei der sich die Information mit modulierten Rundfunkwellen geradlinig in der Luft ausbreitet, wird das optische Signal in den Lichtwellenleiter eingespeist, in welchem ein geführter Transport des optischen Signals stattfindet. Der Strahlungsempfänger wandelt das optische Signal wieder in ein elektrisches Signal (optoelektrischer Wandler) zurück, so dass in den nachgeschalteten elektrischen Komponenten die kodierte Information rückgewonnen wird.

2.3.1 Prinzip der Lichtführung im Wellenleiter

Die Übertragung von Licht in lichtgeführten Leitern beruht auf der Anwendung der physikalischen bekannten Gesetze der Reflexion unter Berücksichtigung von Brechung. Hierfür besteht ein Lichtwellenleiter aus einem Kern und einem Mantelbereich. Das Licht breitet sich in einem homogenen Medium geradlinig aus. Trifft der Lichtstrahl, wie in Bild 6 dargestellt, auf die Grenzfläche zwischen Kern- und Mantelmaterial mit unterschiedlichen Brechungsindizes, so wird der Lichtstrahl 1 in zwei Strahlen zerlegt. Der reflektierte Strahl 2 wird im Kernmaterial weiter geführt, der gebrochene Strahl 3 geht im Kernmaterial aufgrund seiner höheren Dämpfung verloren. Dabei gilt:

$$\text{Reflexionsgesetz: } \varepsilon = \varepsilon_r \quad (2.6)$$

$$\text{Brechungsgesetz: } n_K \cos \varepsilon = n_M \cos \delta \quad (2.7)$$

$$\text{Energiesatz: } E_1 = E_2 + E_3 \quad (2.8)$$

Der Einfallswinkel des Lichtstrahls 1 und der Reflektionswinkel des Lichtstrahls 2 sind gemäß dem Reflexionsgesetz (2.6) gleich. Ist der Einfallswinkel kleiner als der Grenzwinkel ε_g , tritt Totalreflexion auf, so dass keine Brechung nach (2.7) stattfindet und dadurch Verluste minimiert werden. Der gebrochene Strahl 3 zeigt die Ursache für fortlaufende Verluste; mit jedem neuen Auftreffen des Lichtstrahls an die Grenzfläche wird aufgrund des Energiesatzes (2.8) der Energiebetrag E_3 abgestrahlt.

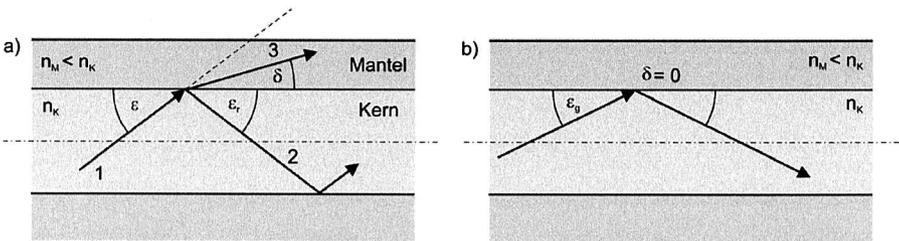


Bild 6: Ausbreitung des Lichts im Kern durch die fortgeführte Totalreflexion (vgl. [66])

Eine verlustfreie Ausbreitung des Lichts in einer Zick-Zack-Linie im LWL ist somit nur unter Voraussetzung der Totalreflexion möglich. Die Bedingung hierfür ist die Einkopplung des Lichts in einem Winkel, der kleiner als der Akzeptanzwinkel ist.

2.3.2 Akzeptanzwinkel und numerische Apertur

Der Akzeptanzwinkel stellt den maximal zulässigen Einkopplungswinkel dar, um einen Lichtstrahl von außen über die Stirnfläche des Lichtwellenleiters in den Kernbereich einzukoppeln, so dass das Licht durch den Vorgang der fortgeführten Totalreflexion weitergeleitet werden kann. Lichtstrahlen, die unter einem größeren Winkel eingespeist werden, besitzen einen Reflexionswinkel, der größer als der Grenzwinkel ε_g der Totalreflexion ist, so dass aufgrund von wiederholter Brechung der Strahl im Mantel absorbiert wird. Bild 7 zeigt den Zusammenhang zwischen Akzeptanzwinkel und Grenzwinkel der Totalreflexion.

Beim Eintritt des Lichts in den Lichtwellenleiter gilt $\theta > \varepsilon_g$, sofern $n_0 < n_K$. Mit Luft als Umgebungsmedium ist dies stets erfüllt, so dass für den Zusammenhang zwischen den beiden Winkeln mit dem Brechungsgesetz (2.7) gilt:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varepsilon_g} = \frac{n_K}{n_0} \quad \text{bzw.} \quad n_0 \sin \theta = n_K \sin \varepsilon_g \quad (2.9)$$

Dabei stellt das Produkt aus der Brechzahl n_0 des Umgebungsmediums und dem Sinus des Akzeptanzwinkels θ die numerische Apertur

$$N = n_0 \sin \theta \quad (2.10)$$

dar.

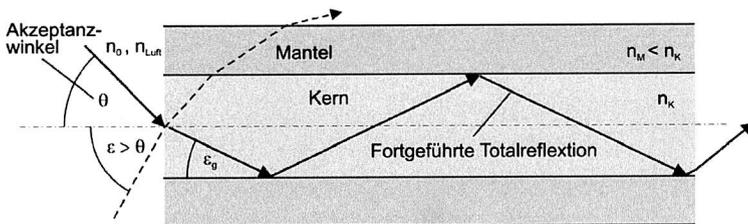


Bild 7: Akzeptanzwinkel θ und Grenzwinkel ε_g der Totalreflexion (vgl. [2])

Mit $\cos \varepsilon_g = n_M/n_K$ und der relativen Brechzahldifferenz $\Delta = (n_K - n_M)/n_K$ ergibt sich nach kurzer Zwischenrechnung für die numerische Apertur

$$N = n_0 \sin \theta = \sqrt{n_K^2 - n_M^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.11)$$

und für den Akzeptanzwinkel

$$\sin \theta = \frac{N}{n_0} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_K^2 - n_M^2} \approx \frac{n_K}{n_0} \sqrt{2\Delta} \quad (2.12)$$

Somit ist die numerische Apertur in Abhängigkeit der relativen Brechzahldifferenz ein Maß für die Fähigkeit eines optischen Elementes, Licht zu fokussieren und kennzeichnet den größtmöglichen Winkel bezogen auf die Lichtwellenleiterachse, unter dem ein Lichtstrahl in den Wellenleiter eingekoppelt und anschließend geführt werden kann.

2.3.3 Interferenzphänomen im Lichtwellenleiter (Modenbegriff)

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, ist die Lichtführung im Wellenleiter an die Bedingung der Totalreflexion gebunden. Wird zur Beschreibung der Lichtführung die Wellennatur des Lichts hinzugezogen, so müssen Interferenzphänomene berücksichtigt werden, die zur Folge haben, dass sich die Lichtwellenleitung weder auf eine homogene Intensitätsverteilung noch auf ein zentrales Intensitätsmaximum beschränkt. Die Bedingung, dass sich in einem Wellenleiter nur solche Wellen verlustfrei ausbreiten können, die quer zur Ausbreitungsrichtung eine stehende Welle erzeugen, zeigt Bild 8 links. Eine stehende Welle quer zur Ausbreitungsrichtung entsteht, wenn sich zwei Wellen in einem bestimmten Winkel schneiden und in Folge miteinander interferieren. Die Ausbreitungsrichtung ist in Bild 8 durch gestrichelte Linien dargestellt und die zugehörigen Phasenfronten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, welche die Lage der Wellenberge darstellen. Dort wo sich zwei Wellenberge schneiden, addieren sie sich und bilden ein Interferenzmaximum. Da sich beide Lichtwellenfelder mit Lichtgeschwindigkeit in ihrer Ausbreitungsrichtung fortbewegen, breiten sich die Interferenzmaxima in Richtung der grauen Pfeile aus. Zwischen den grauen Pfeilen treffen zwei gegenphasige Abschnitte aufeinander, wodurch sie sich gegenseitig auslöschen. Als Resultat entsteht ein stehendes Wellenmuster in der dargestellten x-Richtung, welches sich in z-Richtung als stehende Welle fortbewegt. Mit einem Lichtwellenleiter ist es auf Basis von Interferenzen möglich, die auseinanderlaufenden Wellen wieder in die Mitte zurückzuführen und somit die Ausbreitung des Intensitätsmaximums über eine beliebige Strecke zu erhalten (vgl. Bild 8 rechts). Bei der Darstellung der Wellenausbreitung im Wellenbild findet die Umlenkung nicht nur in einem diskreten Punkt statt, sondern kontinuierlich entlang der lateralen Ausdehnung entlang des Wellenleiters immer dann, wenn die Phasenfront auf den Kernrand trifft. Die sich daraus ergebende in z-Richtung ausbreitende Summenwelle wird als Leitungsmode bezeichnet. Als Voraussetzung für diesen Energietransport gilt das Auftreffen eines Wellenberges auf ein Wellental der gegenlaufenden Welle, so dass die Intensität an der Kern-Mantel-Grenze auf Null abfällt. Ansonsten wäre eine ungedämpfte Ausdehnung nicht möglich, da Intensität in den Mantelbereich gelangen würde. In Abhängigkeit des Neigungswinkels können als Folge der Superposition mehrere Leitungsmoden entstehen, die für den Energietransport verantwortlich sind. [69] [2]

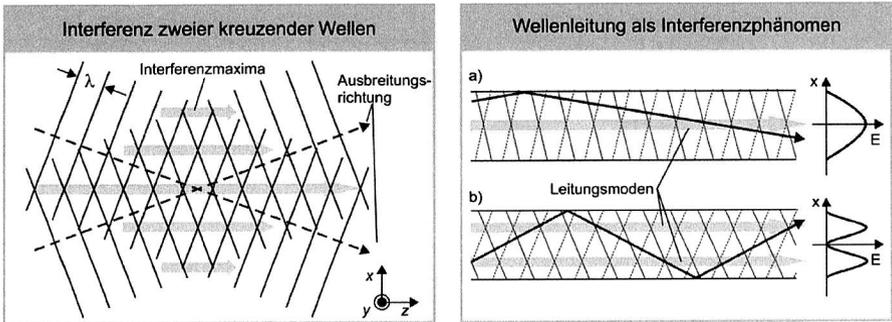


Bild 8: Schematische Darstellung des Leitungsmodus im Lichtwellenleiter (vgl. [69], [2])

Somit lässt sich schlussfolgernd feststellen, dass die Entstehung der Leitungsmoden im Wesentlichen von der Wellenlänge des Lichts und dem Radius der Faser bzw. dem Querschnitt des Lichtwellenleiters abhängt. Je nach Anwendungsfall ergeben sich somit unterschiedliche Typen von Wellenleitern, die sich in der Bandbreite und den geometrischen Eigenschaften unterscheiden. Der Lichtwellenleiterquerschnitt hat einen wesentlichen Einfluss auf die Montagefreundlichkeit und wird in Kapitel 3 diskutiert.

2.3.4 Grundtypen der Lichtwellenleiter

Nach [69] und [124] werden in der Praxis drei Lichtwellenleitertypen, wie in Bild 9 dargestellt, eingesetzt. Bei gleichem Material zeigen sie unterschiedliche Übertragungseigenschaften, die auf den Kerndurchmesser und die Brechzahlendifferenz zurückzuführen sind. Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt, verlaufen die eingekoppelten Lichtstrahlen prinzipiell in einer Zickzack-Bewegung, wobei abhängig von der Wellenlänge, dem Grenzwinkel der Totalreflexion und dem Querschnitt des Kerns, die gegenseitige Auslöschung (Interferenz) nur eine bestimmte Anzahl von Leitungsmoden zulässt. Aufgrund unterschiedlicher Wegstrecken der Leitungsmoden kommen diese nicht zur gleichen Zeit am Ende des Wellenleiters an, so dass dies zu einer Impulsverbreiterung am Ausgang führt. Diese Laufzeitverzögerung wird als „Modendispersion“ bezeichnet und stellt den entscheidenden Faktor für die übertragbare Bandbreite dar. Abhängig von der Art der Strahlausbreitung und der daraus resultierenden Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden wird zwischen Multimodewellenleitern mit Stufenprofil, Multimodewellenleitern mit Gradientenprofil und Singlemodewellenleitern mit Stufenprofil unterschieden.

Multimode-Lichtwellenleiter mit Stufenindex gelten als Standardausführung und sind durch den abrupten Brechzahlssprung zwischen Kern- und Mantelbereich gekennzeichnet. Der Kerndurchmesser beträgt ein Vielfaches der Lichtwellenlänge mit Werten von $50\ \mu\text{m}$ bis zu $1000\ \mu\text{m}$. Für die Übertragung von Daten werden typischerweise Kerndurchmesser bis maximal $200\ \mu\text{m}$ verwendet. Aufgrund der beschriebenen Ausbreitung

über verschiedene Moden und damit Wege unterschiedlicher Länge kommen die sich ausbreitenden Leistungsanteile zu unterschiedlichen Zeiten an und überlagern sich zu einem auseinandergezogenen Signal am Ausgang. Daher muss bei der Übertragung digitaler Nachrichten die Pulsfrequenz ausreichend klein sein, damit es zu keiner Überschneidung der Pulse am Empfänger kommt.

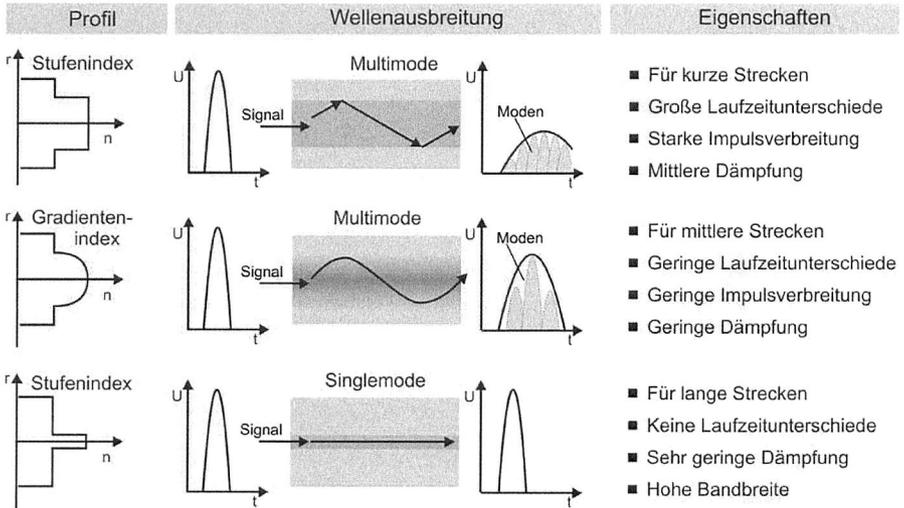


Bild 9 Grundtypen für Lichtwellenleitertypen

Die Vorteile des Multimodewellenleiters mit Stufenprofil liegen in den vergleichsweise niedrigen Herstellungskosten und den höheren Montagetoleranzen aufgrund des großen Kerndurchmessers. Nachteilig zeigt sich die begrenzte Bandbreite aufgrund der hohen Modendispersion. Die Anzahl N der ausbreitungsfähigen Moden lässt sich mit dem LWL-Durchmesser a und der Numerischen Apertur A_N nach [2] hinreichend genau mit

$$N = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot A_N \right)^2 \tag{2.13}$$

beschreiben. Für einen Lichtwellenleiter mit einem Durchmesser von $70 \mu\text{m}$ und einer numerischen Apertur von $0,5$ bei einer Lichtwellenlänge von 850 nm liegt die Größenordnung der ausbreitungsfähigen Moden bei ungefähr $N = 35.000$.

Multimode-Lichtwellenleiter mit Gradientenindex stellen eine mögliche Lösung für die Bandbreitenproblematik aufgrund der Modendispersion dar. Stellt man LWL so her, dass die Brechzahl des Kerns nach außen zum Kern hin parabelförmig abnimmt, stellt sich anstatt der abrupten Umlenkung des Lichts in Form einer Zickzack-Bewegung ein

weiches Umlenken ein. Mit der medienabhängigen Lichtgeschwindigkeit nach Gleichung (2.2) breitet sich ein Lichtstrahl umso schneller aus, je weiter außen dieser im Medium mit niedriger Brechzahl verläuft. Daher breiten sich Moden im Außenbereich schneller fort und erreichen nahezu gleichzeitig das Faserende, wodurch nur eine geringe Pulsverbreiterung folgt. Aufgrund dieses Unterschieds der Ausbreitungsgeschwindigkeit gelingt es, Laufzeitunterschiede auszugleichen und die Bandbreite von Multimode-Gradientenindex-LWL um das 20- bis 50-fache zu vergrößern. Nachteilig zeigen sich jedoch aufgrund der reduzierten ausbreitungsfähigen Moden die höheren Einkopplungsverluste. Analog zu Gleichung (2.13) lässt sich für Gradientenindex-LWL die Anzahl N ausbreitungsfähiger Moden berechnen, wobei sich nur noch halb so viele Moden ausprägen.

Singlemode-Lichtwellenleiter besitzen einen sehr kleinen Durchmesser von etwa $3\ \mu\text{m}$ bis $9\ \mu\text{m}$. Der Durchmesser des Kerns ist im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts so klein, dass nur noch eine Mode übertragen wird. Das Strahlenmodell lässt sich nicht mehr anwenden und ist in Bild 9 schematisch durch eine Linie angedeutet. Durch die Monomodeausbreitung fällt somit eine Impulsverbreiterung völlig weg, so dass die Bandbreite im Vergleich zur Gradientenindex-Faser nochmals deutlich gesteigert werden kann. Typischerweise wird die Singlemodefaser in der optischen Nachrichtentechnik zur Übertragung extrem hoher Datenraten in Langstreckennetzen eingesetzt. Durch die sehr kleinen Kerndurchmesser werden hohe Forderungen an die Herstellungsverfahren gestellt, um u. a. auch Polarisierungseffekte zu vermeiden. Des Weiteren ist aufgrund der kleinen Abmessungen und des geringen Akzeptanzwinkels eine verlustarme Einkopplung nur schwierig zu realisieren.

3 Technologischer Wandel der Leiterplattentechnologie durch Integration optischer Funktionalität

Die heute bekannte Leiterplatte, welche elektrische und elektronische Komponenten verbindet, hat bereits eine knapp 100-jährige Vergangenheit hinter sich [73]. Die Geschichte zeigt, dass die optische Datenübertragung heute eine ähnliche Entwicklung hinsichtlich des Integrationsgrades durchläuft (Bild 10).

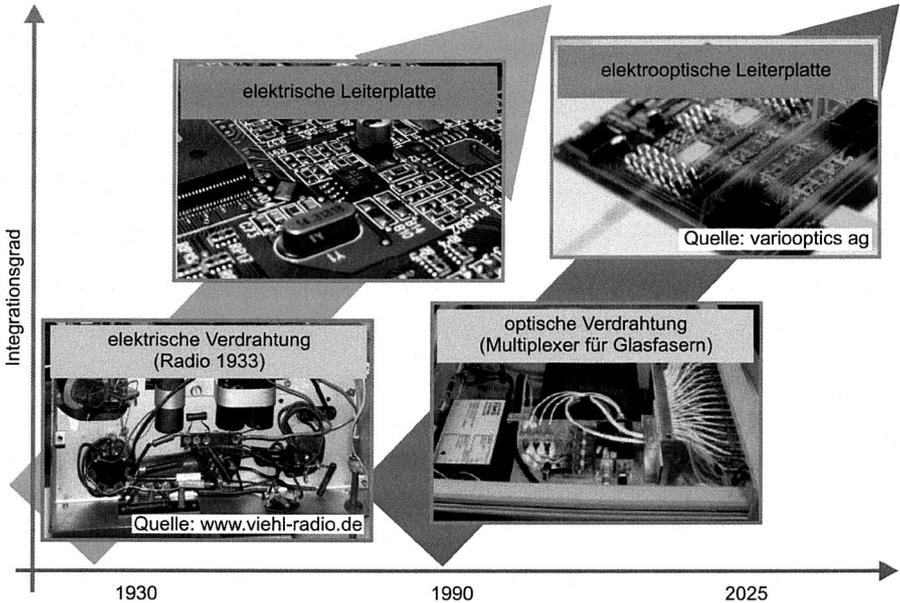


Bild 10: Die Integration optischer und elektrischer Verbindungen auf einem Substrat stellt eine logische Notwendigkeit dar.

Während zunächst die elektrischen Komponenten frei miteinander verdrahtet wurden, revolutionierte 1920 die Erfindung der Leiterplatte den Aufbau elektrischer Systeme. In den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts wurde das heute bekannte Prinzip zur Herstellung von Leiterbahnen auf Basis des Subtraktivprinzips – dem Ätzen des Leiterbildes aus einer Kupferschicht – eingeführt und ermöglichte mit der Massenfertigungstauglichkeit die weite Verbreitung. Der heutige Druck, hochintegrierte Systeme herzustellen, insbesondere durch den Telekommunikations- und Konsumgütermarkt, treibt die Entwicklung der Leiterplatte vom einfachen Komponententräger zur multifunktionalen Systemeinheit mit integrierten und passiven Komponenten stetig an. [90]

Mit den hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Verarbeitung hoher Datenmengen in einem System gerät die rein elektrische Übertragung an ihre wirtschaftlichen und technologischen Grenzen. Bereits heute werden optische Baugruppen hergestellt, die eine optische Verbindung zwischen ihren Komponenten aufweist. Wie bei der früheren elektrischen Verkabelung werden die Lichtwellenleiter manuell verdrahtet. Eine automatisierte Massenfertigung ist jedoch nur durch die gleichzeitige Integration der elektrischen und optischen Verbindungen auf einem Substrat möglich. Die Integration der optischen Übertragungstechnik in die elektrische Leiterplatte treibt nun seit über zehn Jahren die Forschungsaktivitäten an. Neben der technologischen Machbarkeit steht auch die Aufbau- und Verbindungstechnologie für eine wirtschaftliche, automatisierte Flachbaugruppenfertigung vor neuen Herausforderungen, da der Montageprozess sowohl den elektrischen als auch den optischen Anforderungen genügen muss.

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst der prinzipielle Aufbau der elektrooptischen Leiterplatte dargestellt und die erforderlichen optischen Komponenten im Einzelnen beschrieben. Diverse Aufbauvarianten elektrooptischer Leiterplatten stellen den Gegenstand der Forschung dar. Sie werden vorgestellt und hinsichtlich der automatisierten Montagetechnologie diskutiert. Schließlich wird der Handlungsbedarf für die optische Aufbau- und Verbindungstechnik abgeleitet.

3.1 Grundprinzip der elektrooptischen Leiterplatte

Die elektrooptische Leiterplatte stellt ein hybrides System zur elektrischen und zusätzlich optischen Übertragung von Daten auf Systemebene dar. Der Aufbau elektrooptischer Leiterplatten wird nach [56] grundsätzlich in zwei Basistechnologien unterschieden: Overlay-Technologie und Inlay-Technologie.

Die Overlay-Technologie bezeichnet ein Verfahren, bei dem die optische Lage auf die Oberseite der fertiggestellten elektrischen Flachbaugruppe, also nach dem Bestücken und Löten der elektronischen Komponenten, montiert wird. Die optische Lage kann technologisch als Polymerfolie mit integrierten planaren Lichtwellenleitern, als Dünnglasmodul mit ionisierten Lichtführungen oder als Multiwire-Folie ausgeführt sein. Dieses Verfahren erfordert einen zusätzlichen nicht SMT-konformen Prozessschritt bei der Herstellung der Baugruppe. Die nachträgliche Montage einer flexiblen Folie erfordert eine komplexe Handhabung. Dennoch bietet diese Aufbauvariante auch beachtenswerte Vorteile. Aufgrund der nachträglichen Montage entfallen zusätzliche Reflowprozesse, so dass die Temperaturbelastung für die optischen Komponenten reduziert wird. Für den Fall, dass ein komplettes optisches Nachrichtenübertragungsmodul montiert wird, besteht die Möglichkeit, die optische Funktionalität vor der Montage zu testen und ggf. zu ersetzen. Des Weiteren zeigt sich im Bereich der Nacharbeit ein deutlicher Vorteil, denn im Fehlerfall kann die optische Funktionseinheit ausgetauscht werden.

Während die Overlay-Technologie lediglich eine elektrooptische Leiterplatte durch Überlagerung zweier Technologien darstellt, ist die Inlay-Technologie ein echter Revolutionsschritt in der Leiterplattenfertigung. Bild 11 zeigt den Aufbau einer elektrooptischen Leiterplatte mit elektrischen und optischen Funktionen in einem integrierten Produkt.

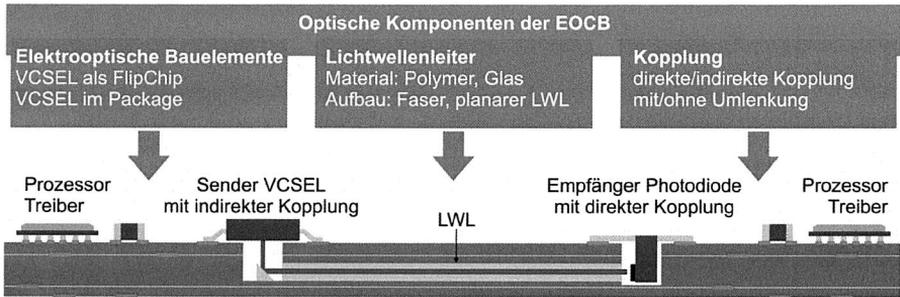


Bild 11: Schematischer Aufbau einer elektrooptischen Flachbaugruppe in Inlay-Technologie

Die Nachrichtenübertragungsstrecke entspricht dem prinzipiellen Aufbau einer optischen Übertragungsstrecke wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt (vgl. Bild 5). Im Gegensatz zur dargelegten Kabelführung ist die optische Lage im FR4-Multilayer integriert und von der Leiterplattenoberfläche optisch zugänglich, so dass an definierten Stellen Licht in die Leiterplatte ein- bzw. ausgekoppelt werden kann. Die Nachricht wird elektrisch im signalverarbeitenden Bauelement (Prozessor) erzeugt, über Treiberstufen an den Sender elektrisch übertragen und dort in ein optisches Signal umgewandelt. Das vom Sender vertikal emittierte Licht wird zur Leiterplatte hin ausgestrahlt, mittels Totalreflektion an der Koppelstelle um 90° umgelenkt und in den Lichtwellenleiter eingekoppelt. Alternativ lässt sich auch eine Stirnkopplung durch das Versenken der optischen Bauelemente in die Leiterplatte realisieren, wie beispielhaft in Bild 11 empfangenseitig dargestellt. Im Lichtwellenleiter wird das Licht bis zur Auskoppelstelle verlustarm geführt, wo es in Richtung Leiterplattenoberfläche umgelenkt und vom Empfänger in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Die empfangene Nachricht am Empfänger kann somit in elektrischer Form im Prozessor weiterverarbeitet oder in einem Speichermodul abgelesen werden.

Die wesentlichen optischen Komponenten der EOCB sind die Sender- und Empfängerbauelemente, die Lichtwellenleiter und die Koppellemente. Die Sende- und Empfangsbauelemente können in hochpräziser Flip-Chip-Variante oder gehäust mit einem nach unten gerichteten optischen Fenster aufgebaut sein. Die optische Lage wird in eine herkömmliche FR4-Multilayer-Leiterplatte integriert und muss daher die hohen Temperaturen und Drücke (170°C , 25 bar) beim Laminieren des Multilayers standhalten, so dass

die Materialwahl hierdurch eingeschränkt ist. Bei der Montage der elektrischen und optischen Bauelemente treten im Lötprozess erneut hohe Temperaturbelastungen auf, denen das Material widerstehen muss. Wie bei der Overlay-Aufbauvariante werden für die Inlay-Technologie integrierte planare Streifenwellenleiter, Dünnglasmodule mit ionisierter Lichtführung oder eingebettete lichtleitende Fasern eingesetzt. Die Inlay-Technologie bietet Potential für höchste Datenraten, da die Sende- und Empfangsdioden direkt auf dem informationsverarbeitenden Chip untergebracht werden können. Sie muss sich jedoch den hohen Anforderungen an die Montagetechnologie stellen, da die Komponenten sowohl elektrisch, als auch optisch gleichzeitig prozesssicher und dauerhaft kontaktiert werden müssen. Somit ist die rein elektrische Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) um Prozesse für die optische Kopplung zu einer elektrooptischen AVT zu erweitern. Während die Standardprozesse der elektrischen AVT mit einem hohen Automatisierungsgrad bereits im Markt verfügbar sind, steht für die optische AVT kein etabliertes Fertigungsverfahren zur Verfügung. Auch wenn in den letzten Jahren vielfache Aufbaukonzepte elektrooptischer Leiterplatten veröffentlicht wurden, kann sich die elektrooptische Leiterplatte vermutlich nur mit einem verfügbaren Massenfertigungsverfahren nahe dem Standard-SMT-Prozess durchsetzen.

Vor diesem Hintergrund werden die nachfolgenden Betrachtungen zum Aufbau elektrooptischer Flachbaugruppen hinsichtlich Ihrer Eignung für den SMT-Massenfertigungsprozess bewertet. Dies schließt die Betrachtung von Herstellungsverfahren der integrierten Lichtwellenleiter, Koppelstrategien sowie Aufbauvarianten von Sende- und Empfängerbauelementen ein. Aktuell bekannte Aufbaukonzepte werden hinsichtlich etablierter SMT-Fertigungsverfahren diskutiert.

3.2 Komponenten für die optische Funktionalität

Für den Aufbau elektrooptischer Leiterplatten stehen für die drei Hauptfunktionen

- elektrooptische Wandlung
- Lichtkopplung
- Lichtführung

eine Vielzahl unterschiedlicher Komponenten mit angepassten physikalischen Eigenschaften zur Verfügung. Je nach Aufbaukonzept ergeben sich unterschiedliche physikalische Eigenschaften, die entsprechend angepasste, kostenoptimierte Fertigungsprozesse erfordern. In [102] werden Kriterien (wie z. B. Prozessierbarkeit, Thermische Stabilität, Optische Eigenschaften und Kosten) zur Auswahl von Polymermaterialien für planare LWL in Abhängigkeit der Prozesseigenschaften beschrieben. Nach dieser Darstellung bestimmen die Kriterien die Auswahl der Materialien und Prozesse. Wird die gesamte elektrooptische Baugruppe betrachtet, so erhöhen sich die Freiheitsgrade bei der Prozess- und Materialwahl und somit auch bei der Kostenkalkulation, so dass ein

Spannungsfeld zwischen physikalischen Eigenschaften, möglichen Fertigungsprozessen und der Wirtschaftlichkeit resultiert. Bild 12 verdeutlicht diese stark gegenseitige Abhängigkeit in Form des „magischen Dreiecks“. Nachstehendes Szenario soll die enge Verzahnung unterstreichen.

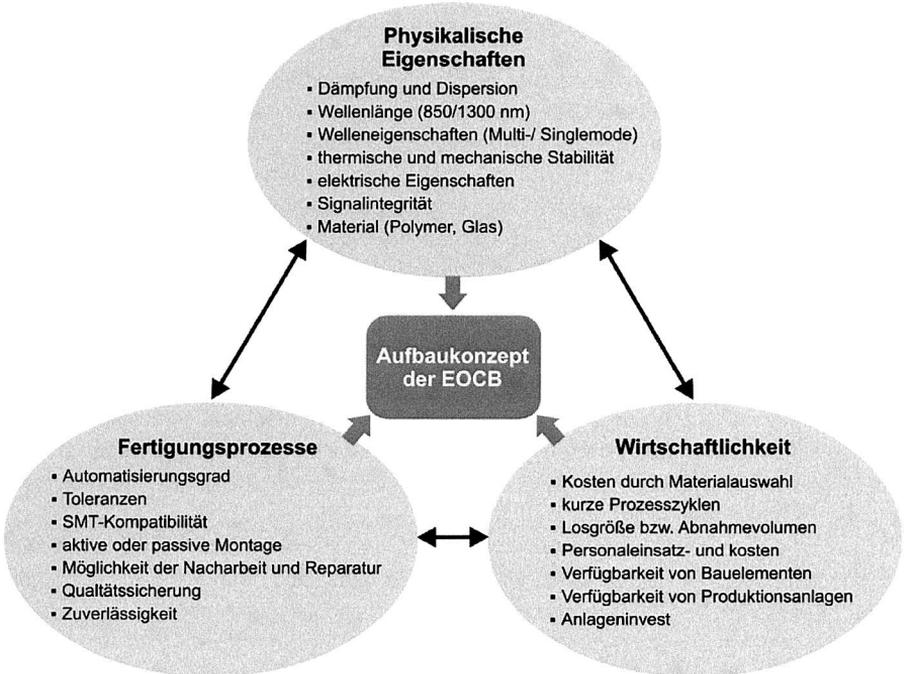


Bild 12: Spannungsfeld bei der Auswahl des Aufbaukonzepts von EOCB

Die Aufgabe der elektrooptischen Leiterplatte besteht darin, ein Signal mit hoher Integrität von einem Punkt zu einem anderen Punkt zu transportieren. Eine hohe Signalintegrität ist jedoch nur mit Singlemodefasern erfüllbar (siehe Abschnitt 2.3.4). Die Materialeigenschaften monomodaler Fasern zeigen optimale Lichtausbreitungseigenschaften bei Wellenlängen von 1300 nm, bedingen jedoch den Einsatz teurerer Materialien. Darüber hinaus erfordert die Wahl dieser Wellenlänge angepasste Prozesse bei der Montage der Bauelemente. Singlemodefasern weisen üblicherweise einen Durchmesser von 3 µm bis 9 µm im Gegensatz zur Multimodefaser mit 30 µm bis 70 µm auf. Um die damit verbundenen hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit zu erfüllen, sind ausreichend präzise Produktionsanlagen notwendig. Da die geforderte Präzision zur Montage optischer Komponenten in der Standard-SMT nicht üblich ist, können optische und elektrische Komponenten nicht in einem zurzeit verfügbaren Produktionssystem

verarbeitet werden. Die spezifische Fertigungsanlage wirkt sich somit negativ auf die Kosten aus. Ferner wird zwischen hochgenauen und toleranzbehafteten Komponenten unterschieden. Je nach Wahl ist eine passive Montage möglich oder erfordert eine Inbetriebnahme der optischen Funktion während des Montageprozesses. Zweiteres, kombiniert mit der 1300nm-Technologie, erfordert Kamerasysteme zur Erfassung des Lasers bei entsprechender spektraler Empfindlichkeit, was wiederum die Kosten erhöht.

Für die Auswahl des Aufbaukonzeptes lässt sich aufgrund der starken Verzahnung kein allgemeingültiges Vorgehen ableiten, jedoch erscheint der Ansatz sinnvoll, von den Anforderungen an die Signalintegrität und den erforderlichen Dimensionen (Streckenlänge) auszugehen. Anschließend sind die physikalischen Eigenschaften einzubeziehen und die Prozesse und Materialien bei niedriger Kostenäquivalenz auszuwählen. So können z. B. auf kurzen Strecken, wie sie auf Leiterplattenebene ($< 1\text{ m}$) gegeben sind, multimodale Lichtwellenleiter bei hoher Signalintegrität eingesetzt werden, so dass mit den fertigungsgerechten LWL-Querschnitten unter Verwendung der 850 nm Technologie kostengünstige Aufbaukonzepte möglich sind.

Nachfolgende Abschnitte beschreiben unter Berücksichtigung der SMT-Fertigungsprozesse die derzeit bekannten Aufbauvarianten optischer Komponenten für die Fertigung elektrooptischer Leiterplatten zur optischen Chip-zu-Chip-Datenübertragung.

3.2.1 Herstellung planarer Lichtwellenleiter

Optische Wellenleiter werden in optische Fasern und planaren Lichtwellenleitern unterschieden (vgl. [124]). Beide Varianten werden grundsätzlich durch die gleichen optischen Eigenschaften charakterisiert. Die Dämpfung und Temperaturbeständigkeit hängt von dem Material ab. Die Datenübertragungskapazität wird durch den Brechungsindex, der sich durch die Materialien von Kern und Mantel ergibt, bestimmt. Dennoch können wesentliche Unterschiede benannt werden. Optische Fasern werden mit einem runden Querschnitt als Meterware hergestellt und anschließend für die entsprechende Anwendung konfektioniert. Planare Wellenleiter hingegen werden mit genau vorgegebenem Verlauf und Länge direkt auf dem Zielträgersubstrat erzeugt. Da optische Glasfasern vorwiegend für Langstrecken eingesetzt werden, spielt die Dämpfung der Faser eine große Rolle. Planare Lichtwellenleiter weisen meist eine Länge von weniger als einem Meter auf, so dass die Dämpfungseigenschaften eine untergeordnete Rolle spielen. Die erforderlichen Bedingungen zur Integration von LWL in den Leiterplattenverbund sind:

- Einfache Strukturierbarkeit
- Hohe Formtreue und gute Haftung
- Einfache Einstellung von Brechungsindex und Kontrast
- Hinreichende Qualität der Strukturen (Wandraugigkeit, Homogenität)
- Angepasste thermische Stabilität (Laminierprozess, Reflowprozess, Verzug)

- Preiswerte Herstellung im Massenfertigungsverfahren
- Geringe optische Dämpfung
- Große Akzeptanzwinkel für eine montagefreundliche Justage

Nach [101] werden diese Eigenschaften insbesondere durch Polymermaterialen erfüllt, da sie im Vergleich zu anderen Stoffen bei niedrigen Prozesstemperaturen die Möglichkeit zur Abformung bieten und sich als optische Lage in die Leiterplatte integrieren lassen. Für die Integration von optischen Lichtwellenleitern in den Leiterplattenverbund werden vorwiegend multimodale Lichtwellenleiter empfohlen. Der Hauptgrund hierfür liegt im Vergleich zu monomodalen LWL in den hohen Montagetoleranzen bei der Bestückung der elektrooptischen Komponenten begründet. Da auf Leiterplattenebene die Längen optischer Lichtwellenleiter typischer Weise in einem Bereich unter einem Meter liegen, ist es dennoch möglich, Bitraten von vielen Gbit/s problemlos zu übertragen.

Für die Herstellung planarer optischer Wellenleiter auf Boardebene kommen zumeist Verfahren zur Abformung oder photochemische Strukturierungsverfahren zum Einsatz. Hierbei muss bei allen Verfahren die entsprechend geforderte Brechzahldifferenz zwischen Wellenleiterkern (n_2) und Mantel (n_1) realisiert werden. In [40] werden eine Vielzahl an Herstellungsverfahren beschrieben und verglichen: Ionenätzen von Polyamid, Ionenbestrahlung, Photostrukturierung, induzierte Diffusion dotierter Polymere, Spritzguss, Molekulare Orientierung der Dotierung, Photobleichen, Elektronenstrahlstrukturierung, Sol-Gel-Technologie und Abformtechnik. Der Aufbau aktuell veröffentlichter elektrooptischer Leiterplatten basiert vorwiegend auf fünf Herstellverfahren, deren Prozessketten in Bild 13 gezeigt ist.

Das Heißprägeverfahren nutzt die Eigenschaft der geometrischen Formgebung. Hierbei wird ein Prägewerkzeug mit Druck und Wärme auf eine thermoplastische Folie gepresst, so dass das Polymer in die Werkzeugform unter Formzwang fließt. Anschließend wird das Kernmaterial mittels Rakeltechnik in die erzeugten Gräben aufgetragen und thermisch oder auch mittels UV-Licht ausgehärtet. Schließlich wird als LWL-Mantel eine Deckfolie auflaminiert. Die so entstandene Wellenleiterfolie kann bei der Leiterplattenfertigung mit dem Basismaterial zu einer elektrooptischen Leiterplatte verpresst werden. Das Heißprägeverfahren eignet sich insbesondere für die kostengünstige Massenproduktion und weist eine gute Formbeständigkeit als auch ausreichende Maßhaltigkeit auf. Darüber hinaus lassen sich Umlenkstrukturen direkt im Prägeprozess erzeugen, so dass keine zusätzlichen Prozessschritte erforderlich sind. Nachteilig zeigen sich jedoch die fehlende Flexibilität hinsichtlich des Layouts und die Notwendigkeit teurer Prägewerkzeuge mit hoher Oberflächengüte, so dass die Wellenleitergrenzflächen eine Rauigkeit unter 10 % der Lichtwellenlänge liegen.

Die In-Kupfer-Technologie stellt ein kosteneffizientes Verfahren dar, das größtenteils kompatibel zur Standardleiterplattenfertigung ist. Bei dieser Technologie werden in ei-

ner relativ dicken Kupferkaschierung in einem nasschemischen Ätzprozess Gräben mit einem wannenförmigen Querschnitt erzeugt und mit optisch leitfähigem Polymer aufgefüllt. Die Belichtung erfolgt mittels einer Photomaske wie im Standard-Leiterplattenfertigungsprozess. Die Kanalwandungen werden mit einem Kunststoffmantel überzogen und verbessern somit die Oberflächengüte, so dass ein scharfer Materialübergang zwischen Kern- und Mantelmaterial möglich ist. Abschließend wird das Overcladding wie bei den vorhergehenden Technologien aufgetragen. Die so generierte Substratlage mit den integrierten Lichtleitungen kann zusammen mit weiteren Kupferlagen zu einem Multilayer verpresst werden. Der wesentliche Vorteil dieser Technologie zeigt sich in der Verwendung der gleichen technologischen Prozesse wie bei der Standard-Leiterplattenfertigung. Nachteilig scheint jedoch die Gestaltung geeigneter Ankopplungsmöglichkeiten zu sein. Eine Formgebung der Lichtwellenleiterenden ist im Fertigungsprozess nicht möglich, so dass ein diskretes Koppellement nachträglich platziert werden muss und somit die Toleranzkette verlängert.

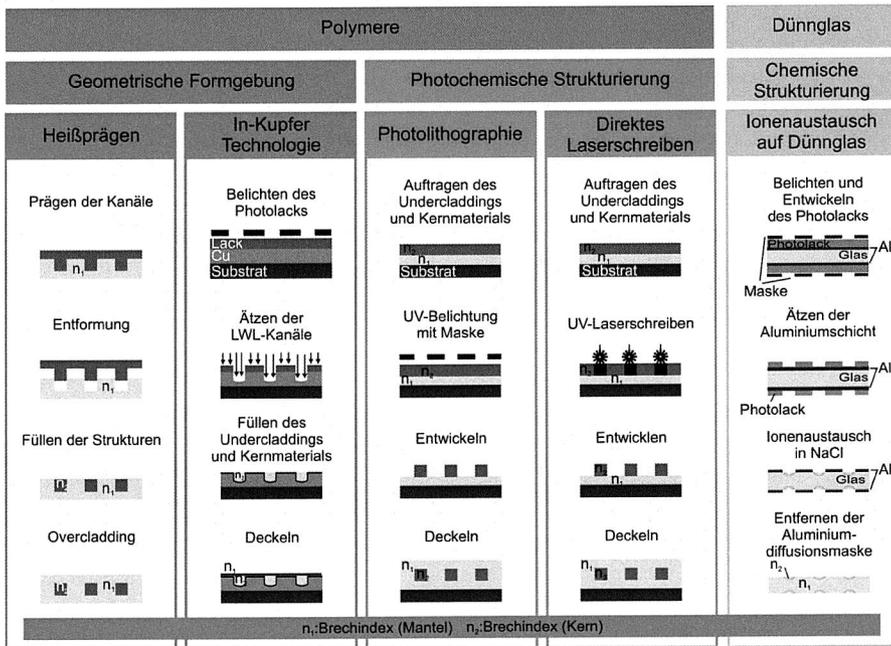


Bild 13: Prozesskette bekannter Herstellungsverfahren planarer Lichtwellenleiter für die Integration in EOCB (vgl. [6] [96] [99] [103])

Eine Möglichkeit zur flexiblen Herstellung multimodaler Wellenleiter aus Polymermaterial basiert auf der photochemischen Strukturierung. Die Herstellverfahren

sind die Photolithographie und das Laserschreiben, wobei sich lediglich der Belichtungsprozess unterscheidet. Das Kernmaterial wird vollflächig auf ein Trägermaterial, welches gleichzeitig als Undercladding dient, aufgebracht, wobei die Dicke des Films der späteren Höhe des Wellenleiters entspricht. Beim photolithographischen Prozess werden mit einer Photomaske die Wellenleiterstrukturen mittels UV-Belichtung übertragen und das nicht vernetzte Material in einem Entwicklungsprozess abgetragen. Im Gegensatz dazu werden mit dem flexiblen Laserdirektschreiben die Lichtwellenleiter mit einem fokussierten UV-Laser geschrieben und anschließend das nicht vernetzte Material in gleicher Weise entfernt. Bei beiden Verfahren werden die Wellenleiter im Anschluss mit dem Mantelmaterial des Undercladdings überdeckt. Die optischen Eigenschaften der erzeugten LWL sind mit denen der im Heißprägeprozess hergestellten LWL ähnlich und eignen sich ebenso für die Integration in Folienschaltungen. Da die Direktbelichtung ohne kostenintensive Photomaske auskommt, ist sie für große Flächen und prototypische Aufbauten einsetzbar. Ein weiterer Vorteil zeigt sich bei der Ausrichtung zwischen Umlenkelement und Lichtwellenleiter. So kann nach [7] zunächst das Umlenkelement (z. B. ein Parabolspiegel) mit konventionellen Bestückautomaten platziert werden, um anschließend die Lichtwellenleiter mit Hilfe von Bildverarbeitung relativ zu den Referenzmarken des Spiegels zu schreiben.

Ein alternativer Ansatz beruht auf der Integration von Dünnglasfolien in den Leiterplattenverbund. Die lichtleitenden Strukturen werden mittels Ionenimplantation erzeugt, so dass sich unterschiedliche Brechindizes ausprägen und eine Wellenführung möglich wird. Hierfür wird das Dünnglas zunächst gereinigt und anschließend beidseitig mit Aluminium beschichtet. Nach Aufbringen eines Photolacks erfolgen mit einer Maske die Belichtung mit UV und anschließend die Entwicklung. Die Aluminiumschicht wird im nächsten Prozessschritt in den strukturierten Bereichen weggeätzt und ermöglicht an diesen Stellen den Ionenaustausch. Schließlich wird die verbleibende Aluminiumschicht entfernt. Glas zeigt hervorragende optische, elektrische und thermische Eigenschaften. Im Gegensatz zu organischen Materialien wie das Leiterplattenbasissubstrat FR4 ist Glas thermisch stabil, so dass ein hohes Potential für die Fertigung kleinster Pitch-Abstände besteht, wodurch eine hohe Integrationsdichte möglich ist. Ähnlich zur In-Kupfer-Technologie ist auch hier nur eine Stirnflächenkopplung möglich, so dass spezifische Koppellemente nachträglich eingesetzt werden müssen.

3.2.2 Sende- und Empfangsbaulemente

Den Sende- und Empfangsbaulementen kommen bei der optischen Datenübertragung eine besondere Bedeutung zu, da sie die physikalische Form des Informationsträgers entweder in Licht oder in Strom wandeln. Neben den optischen Eigenschaften müssen für die automatisierte Oberflächenmontage der Wandlerbaulemente spezifische Anforderungen berücksichtigt werden. Für die Ein- bzw. Auskopplung des Lichts in die Leiterplatte muss die optisch aktive Fläche zur Koppelstelle gerichtet sein. Ferner muss die

Handhabung mittels Vakuumpipetten möglich sein, so dass die Bestückung mit Standardautomaten möglich ist. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit sind entsprechende Komponenten, welche sowohl die optischen und zugleich die montagerelevanten Anforderungen (Surface Mount Technology) erfüllen, kommerziell nicht erhältlich. Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Typen der Sender- und Empfängerbauteile aufgezeigt und hinsichtlich des Einsatzes auf elektrooptischen Leiterplatten bewertet. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeiten wurden auf Basis dieser Bewertung gehäuste Sende- und Empfängerbauelemente konzipiert und prototypisch aufgebaut. Das realisierte Konzept und die zugehörige Qualifizierung sind im nächsten Kapitel beschrieben.

Sendeelemente

In der optischen Nachrichtentechnik kommen praktisch ausschließlich Halbleitersendendioden zum Einsatz. Die Hauptgründe hierfür sind im Wesentlichen die sehr kleine Bauform, die schnelle Schaltzeit bzw. gute Modulationseigenschaften im GHz-Bereich, Verfügbarkeit in nahezu beliebigen Wellenlängen, spektral eng begrenzte Lichtemission, kleiner Abstrahlwinkel, kleine abstrahlende Fläche, hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Vier verschiedene Typen von Halbleiterdioden bestimmen derzeit die Lichtwellenleiter geführte Datenübertragung (vgl. [123]):

- Lumineszenzdioden (LED) sind für nahezu alle Wellenlängenbereiche verfügbar. Sie strahlen großflächig, sind einfach zu betreiben und preisgünstig. Aufgrund der großen Strahlfläche ist die Ausgangsleistung aber nur langsam modulierbar.
- Resonant Cavity LED (RC_LED) besitzen zusätzlich über und unter der licht-erzeugenden Schicht zwei Halbleiterspiegel. Durch diese spezielle Bauweise werden höhere Übertragungsgeschwindigkeiten und eine bessere Einkopplung gewährleistet.
- Laserdioden (LD) in Form von Kantenemittern strahlen Licht gebündelt aus der Seite ab. Nachteilig zeigt sich die notwendige Stromregelung aufgrund des benötigten Mindeststromes, der temperaturabhängig ist.
- VCSEL sind Oberflächen-Emitter und strahlen wie LEDs aus der oberen Fläche, jedoch gebündelt. Aufgrund des sehr kleinen Mindeststromes ist keine Leistungsregelung erforderlich.

Nach [4] stellen für die optische Datenübertragung über Polymerwellenleiter VCSEL die optimale Variante als Quelle dar. Ein besonderer Vorteil ist durch die geringe Strahldivergenz von weniger als 10 Grad gegeben, was eine optimierte Einkopplung ermöglicht. Aufgrund des hohen Wirkungsgrades von VCSEL sind diese bis zu einer Umgebungstemperatur von 90 °C ohne spezifische Wärmeabfuhrsysteme einsetzbar. Darüber hinaus lassen sich VCSEL als Laserarray im Fertigungsprozess aufbauen, so dass diese für die parallele optische Signalübertragung ideal eingesetzt werden können, ohne dass

zusätzliche Montagetoleranzen zwischen einzelnen Laserelementen berücksichtigt werden müssen.

Empfängerelemente

Empfängerkomponenten besitzen die Fähigkeit, die mit Licht übertragene Information in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Fotowiderstände sind stark temperaturabhängig, Fototransistoren dagegen weisen eine große Verzögerungszeit auf, so dass diese beiden Technologien praktisch keinen Einsatz für die optische Datenübertragung finden. In der optischen Nachrichtentechnik werden aufgrund der hohen Schaltgeschwindigkeit, niedrigem Rauschen, Linearität und einer geringen geometrischen Größe Fotodioden eingesetzt. Die optische Halbleiterfläche absorbiert Lichtquanten und wandelt diese in Elektronen-Loch-Paare um. Somit werden alle Photonen erfasst, deren Energie oberhalb der Bandlücke liegt. Photodioden lassen sich in drei verschiedene Aufbaustrukturen unterteilen.

- Die PIN-Fotodiode besitzt eine intrinsische Schicht zwischen den p- und n-dotierten Halbleitermaterialien. Der Vorteil der PIN-Diode liegt insbesondere in der einfachen Ansteuerung, da lediglich eine Vorspannung angelegt wird und sich aufgrund des linearen Verhaltens sowohl für analoge als auch digitale Anwendungen eignet. [106]
- Die Lawinenfotodiode (APD: Avalanche Photo Diode) besitzt eine hochdotierte Schicht, in der die erzeugten Elektronen durch ein starkes lokales elektrisches Feld sowohl beschleunigt als auch vervielfacht werden. Die interne Verstärkung einer APD kann bis zu 400 betragen, ist jedoch nicht linear, so dass es zu Rauschverhalten führen kann. Außerdem benötigt die temperaturabhängige Vorspannung ($> 100\text{ V}$) eine Regelung zur Leistungsanpassung. [121]
- Für sehr hohe Signalfrequenzen bis zu 30 Gbit/s eignen sich sog. MSM-Fotodioden (Metal-Semiconductor-Metal). Bei MSM-Fotodioden wird auf einen niedrig dotierten n-Halbleiter eine Fingerstruktur aus Metall aufgebracht, wobei der Zwischenraum nur wenige Mikrometer breit ist. Im Zwischenraum entsteht auf Basis des entstandenen Schottky-Kontakts ein photoempfindlicher Bereich mit hohem Wirkungsgrad. Von Vorteil ist wie bei der PIN-Fotodiode die geringe Betriebsspannung. Ferner ist bei gleicher Bandbreite die Erzeugung einer um ein Vielfaches größeren optischen aktiven Fläche möglich. [27], [65]

Vor dem Hintergrund einer kostengünstigen SMT-Fertigung ist vor allem die Größe der Wirkfläche in Abhängigkeit der Schaltgeschwindigkeit relevant. Bei einer ausreichend hohen Wirkfläche ist aufgrund der hohen Montagetoleranzen eine passive Montage mit Standardbestückautomaten möglich. Da MSM-PD mit der großen Wirkfläche für diesen Einsatzbereich kommerziell noch nicht verfügbar sind, werden derzeit typischerweise PIN-PD verwendet.

3.2.3 Koppellemente

Für die Übertragung von Licht bedarf es einer Ankopplung des vom Sender emittierten Lichts in den Wellenleiter und aus dem Wellenleiter heraus in den Empfänger. Wie auch in der elektrischen Verbindungstechnik stellt die Koppelstelle bei hochfrequenter Datenübertragung eine kritische Komponente dar. Neben den technologischen Herausforderungen, um gute optische Eigenschaften zu erzielen, muss auch die Wirtschaftlichkeit bei der Wahl des Aufbaukonzeptes berücksichtigt werden. Dies umfasst die Fertigung der Koppelkomponenten und auch die Komplexität der Montageprozesse. Die Qualität der Einkopplung ist insbesondere von der Ausrichtung des Lasers zur Koppelstelle abhängig. Bei der optischen Auslegung der Koppelstelle kann die numerische Apertur durch fokussierende Elemente erhöht und dadurch die erforderliche Positioniergenauigkeit reduziert werden. Die Einkoppeleffizienz kann ferner durch eine optimierte Oberflächengüte gesteigert werden. Dies zeigt sich insbesondere bei abtragenden Fertigungsverfahren zur Herstellung von Koppellementen. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Konzepte zur Lichtkopplung aufgezeigt. Neben Stecksystemen und Mikrospeiegeln ist auch eine Einkopplung mittels Umlenkung auf Basis von Beugungseffekten mittel Nanogittern möglich [15] [25] [113].

Die Kopplung des Lichts in den bzw. aus dem optischen Wellenleiter wird in [125] in zwei Kategorien aufgeteilt: direkte und indirekte Stirflächenkopplung. Für die Vielzahl der aktuell bestehenden Koppelkonzepte für den Einsatz in EOCB ist diese Aufteilung jedoch nicht ausreichend, so dass nachfolgend weitere Klassifizierungsmerkmale definiert werden (Bild 14).

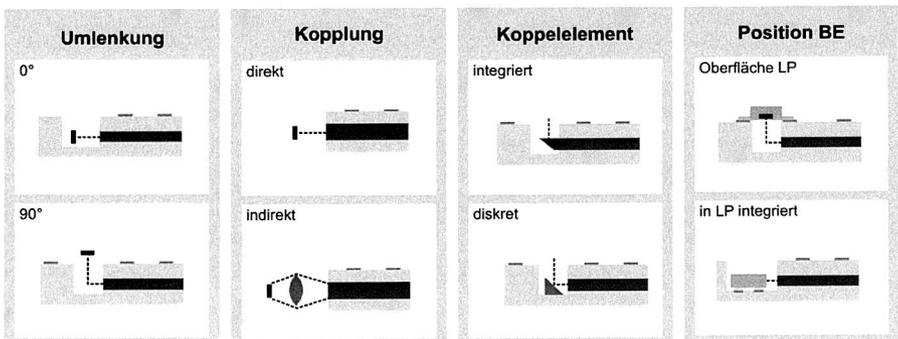


Bild 14: Klassifizierung von Koppelstrategien (vgl. [34])

- Zunächst stellt die Art der Umlenkung ein grundlegendes Merkmal dar. Während die direkte Lichtführung ohne Ablenkung verlustfrei ist, weist die Umlenkung um 90° Verluste auf.

- Von direkter Kopplung spricht man, wenn das Licht des Lasers direkt auf den Lichtwellenleiter auftrifft, ohne zusätzliche Optiken wie Linsen oder Prismen zu verwenden. Die indirekte Kopplung hingegen macht von Optiken wie Linsen oder Prismen Gebrauch, um das Licht entweder zu fokussieren oder es umzulenken.
- Integrierte Koppelemente werden durch Modifikation des Lichtwellenleiters erzeugt. So kann beispielsweise mit einem im 45° geformten Lichtwellenleiterende Totalreflektion erzeugt werden. Diskret aufgebaute Koppelemente sind zusätzliche Komponenten, wie z. B. Spiegel und Prismen. Die diskrete Umlenkung stellt auch immer eine indirekte Kopplung dar.
- Gerade im Hinblick auf eine kostengünstige Leiterplattenfertigung ist die Montageart der Bauelemente von entscheidender Bedeutung. Während die Prozesse für die Oberflächenmontage etabliert sind zeigt sich die Integration der Bauelemente in die Leiterplatte noch im Entwicklungsstadium, ermöglicht aber eine verlustarme direkte Stirnflächenkopplung.

Unter Gewährleistung der geforderten optischen Eigenschaften muss eine kostengünstige Produktionstechnologie der Koppelemente bei gleichzeitiger Kompatibilität zur Leiterplattenproduktion als auch zur Aufbau- und Verbindungstechnik im SMT-Prozess eingesetzt werden. Mit diesen Anforderungen lassen sich drei wesentliche Koppelkonzepte ableiten (Bild 15).

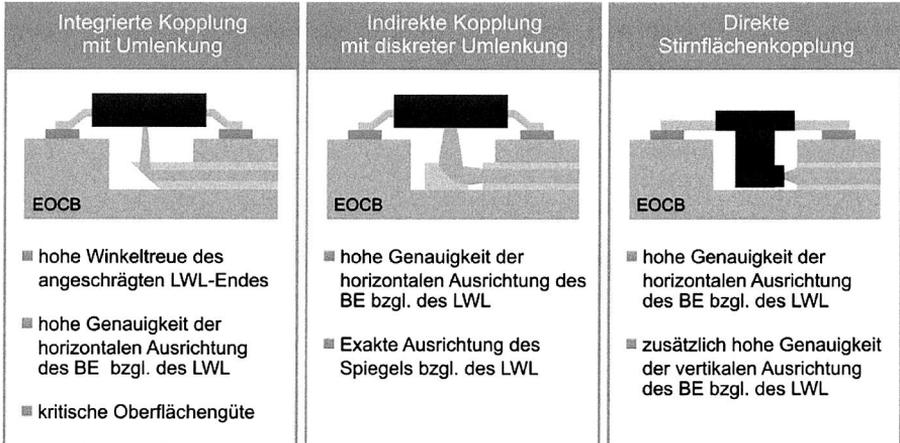


Bild 15: Anforderungen an die drei wesentlichen Koppelprinzipien für elektrooptische Leiterplatten

Die integrierte Kopplung mittels Totalreflektion am 45°-Spiegel stellt einen vielversprechenden Ansatz für die kostengünstige Fertigung dar. Hierbei wird der Spiegel durch einen formgebenden Prozess am Wellenleiterende erzeugt und ermöglicht somit das

einfallende Licht von der Oberseite der Flachbaugruppe in den Lichtwellenleiter umzulenken. Die optischen Eigenschaften der Lichtkopplung werden bei diesem Konzept im Wesentlichen von vier Faktoren beeinflusst. Für eine ideale Umlenkung des Lichts um 90° muss der Winkel des LWL-Endes 45° betragen. In Abhängigkeit dieses Winkels treten Einkoppelverluste auf. Des Weiteren spielt die Oberflächengüte bei der Einkoppelqualität eine entscheidende Rolle, da Rauigkeiten zu Streuverlusten führen. Gerade für den Montageprozess ist eine exakte Ausrichtung des Bauelementes in horizontaler Richtung von entscheidender Bedeutung. Die Formgebung des 45° Endes kann entweder in einem Fräsprozess (vgl. [30]), durch Laserablation (vgl. [21] und [50]) oder mit Hilfe des reaktiven Ionentiefenätzen [64] erfolgen. Beim Fräsprozess wird mittels eines 90° geformten Fräsers von der Unterseite der Leiterplatte das Material abgetragen. Bei der Laserablation wird mittels gepulster Laserstrahlung die Oberfläche des Materials ($1\ \mu\text{m}$) sehr schnell erhitzt, so dass sich Plasma bildet, welches sofort verdampft. Bei beiden Verfahren bildet sich eine auf die Koppelleffizienz negativ auswirkende Oberflächenrauigkeit aus. Abhilfe schafft in einem nachträglichen Prozessschritt das Aufbringen einer metallischen Schicht oder die Polierung der Spiegelfläche.

Die indirekte Kopplung mit diskreter Umlenkung ermöglicht den Gebrauch von Mikrosiegeln mit hoher Oberflächengüte, so dass die Reflexionsverluste minimiert werden [108]. Um eine erhöhte Koppelleffizienz mittels kollimierten Lichts zu erzielen, werden in [110] und [53] Aufbauten mit zusätzlichen Mikrolinsen verwendet. Betschon et al. [5] erweitert das Konzept der indirekten Kopplung durch Einsatz eines parabolisch geformten Umlenkspiegel, um die Einkoppelfläche zu maximieren und den Laserstrahl so zu bündeln, dass eine maximale Lichtausbeute in den LWL über die Stirnfläche eingekoppelt werden kann. Beim Einsatz diskreter Koppелеlemente besteht die Herausforderung in der zusätzlichen Ausrichtung des Spiegels zur Stirnfläche des LWL, so dass ein zusätzliches Glied in der Toleranzkette vorhanden ist.

Nach [98] weist die direkte Stirnflächenkopplung eine optimale Einkoppelcharakteristik auf, setzt aber eine ideale Positionierung des Bauelementes voraus. Bei diesem Konzept sind konstruktiv aufwendige Bauelemente erforderlich, welche in der Leiterplatte versenkt und direkt vor der Stirnfläche des LWL positioniert sind. Neben der kritischen Ausrichtung in der Ebene ist zusätzlich eine Justierung der Bauelemente in vertikaler Richtung erforderlich. Eine solche Ausrichtung in vertikaler Richtung ist jedoch bei der automatisierten Bestückung in der SMT bisher nicht umgesetzt, so dass alternative Montageprozesse und erweiterte Produktionsanlagen erforderlich wären.

3.3 Vergleich alternativer Aufbaukonzepte hinsichtlich der automatisierten Montage

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Aufbaukonzepten für elektrooptische Baugruppen präsentiert. Trotz dieser Vielfalt konnte sich bisher keines der Konzepte kommerziell etablieren. Ein Grund hierfür stellt die fehlende Kompatibilität zu den SMT-Montageprozessen dar. Die Ausrichtung der Sender- und Empfängerbauelemente zu den lichtführenden Komponenten erfordert eine hohe Präzision bezüglich der optischen Funktionen. Die Toleranzen der Standard-FR4-Leiterplatten übersteigen nahezu das Zehnfache der Positionieranforderung optischer Komponenten. Insbesondere vor diesem Hintergrund wird nachfolgend der Stand der Forschung aufgearbeitet. Die verschiedenen Aufbaukonzepte werden kurz beschrieben und hinsichtlich der automatisierten Montage im Kontext der automatisierten SMT bewertet.

3.3.1 Diskrete Koppelmodule mit integrierten LWL-Fasern und Zentrierpins

Das Aufbaukonzept auf Basis einer integrierten, diskreten Faserkopplung wird von zwei unterschiedlichen Instituten vorgestellt und stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Das Konzept A1 nach [91] (Bild 16, links) basiert auf einem Kunststoffmodul mit integrierten Lichtwellenleiterfasern, die einseitig im 45°-Winkel geformt sind. Der Pitch-Abstand der Fasern entspricht dem Pitch-Abstand der in die Leiterplatte integrierten planaren LWL. Die Positionierung und exakte Ausrichtung des Koppelmoduls an die optische Lage erfolgt über Lochführungen in den LWL und zusätzlich mittels Führungspins. Eine Lösung für die Aufbau- und Verbindungstechnik wird von den Autoren nicht diskutiert.

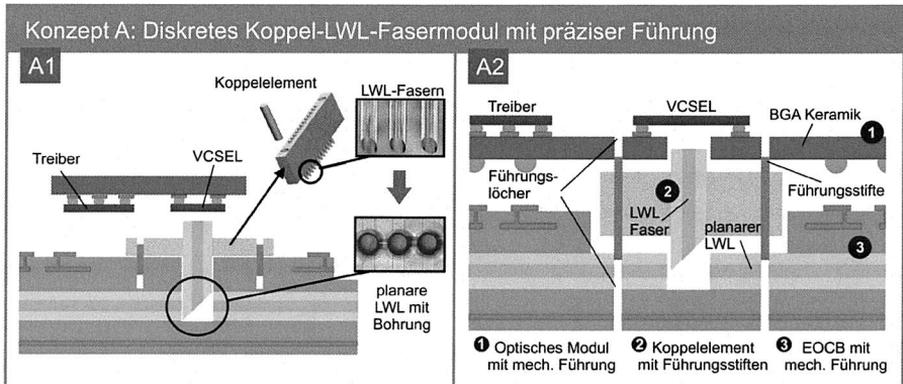


Bild 16: Zwei EOCB-Konzepte basierend auf einem LWL-Faser-Koppelmodul mit mechanischer Führung. (Konzept A1 nach [91] und Konzept A2 nach [77])

Im Gegensatz dazu stellt das Konzept A2 nach [77] (Bild 16, rechts) eine fortgeschrittene Version dar. Es beantwortet zusätzlich die Frage hinsichtlich der AVT der Sender- und Empfänger-Komponenten. Der Aufbau besteht wie bei Konzept A1 aus drei Hauptkomponenten: Sender- bzw. Empfängermodul (1), optisches Koppellement (2) und Leiterplatte mit integrierten Polymer-Lichtwellenleiter (3). Der entscheidende Unterschied liegt in der Zentrierung des Koppellementes zur optischen Lage der EOCB und gleichzeitig zum Sendermodul. Die LWL-Fasern des Koppelmoduls werden nicht wie bei Konzept A1 in einzelne Öffnungen in die optische Lage geführt – sie bleiben freischwebend positioniert. Das Trägermaterial des Koppellementes besteht aus Keramik und erlaubt somit eine exakte Formgebung zur präzisen vertikalen Ausrichtung. Die Zentrierpins werden sowohl in die Leiterplatte, als auch in das Sendermodul geführt, so dass eine Ausrichtung des VCSEL zum Koppellement und zum integrierten LWL gewährleistet ist.

Das beiden Aufbauvarianten zugrundeliegende Konzept ermöglicht grundsätzlich eine passive Montage der Komponenten. Bei der passiven Montage kann das Bauelement, ohne es optisch aktivieren zu müssen, bestückt werden. Nachteilig ist jedoch die Notwendigkeit von hochpräzisen Koppellementen, da die Bohrungen für die Pin-Zentrierung den geringen Koppeltoleranzen genügen müssen. Als Herausforderung zeigt sich sowohl die vertikale Ausrichtung als auch die automatisierte Bestückung mittels verfügbaren SMD-Bestückautomaten bezüglich der mechanischen Zentrierpins.

3.3.2 Direkte Stirnflächenkopplung mit v-förmiger Zentrierung

Das Konzept nach [98] weist durch die Integration von LWL-Fasern in die EOCB ein Alleinstellungsmerkmal auf und ermöglicht auf Basis einer v-förmigen Zentrierung eine automatisierte SMT-Montage. Die aktive Laserfläche wird in einer Aussparung der Leiterplatte nach dem Prinzip der direkten Stirnflächenkopplung positioniert. (Bild 17).

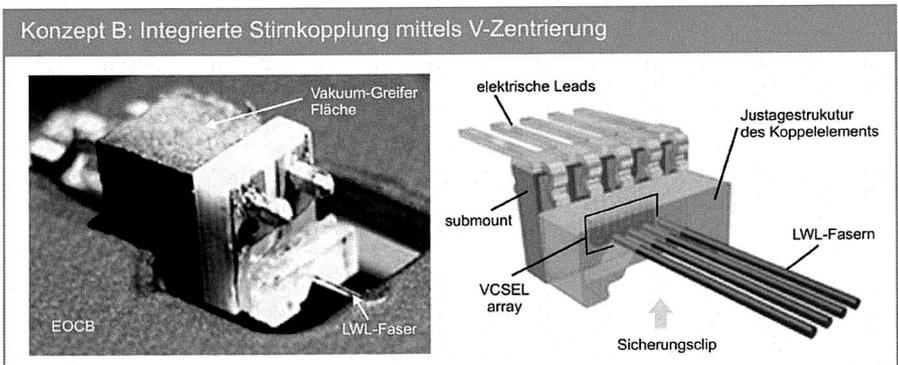


Bild 17: Aufbaukonzept nach [98] mit direkter Faserkopplung ohne Umlenkung

Das spezifisch aufgebaute Bauelement weist ein Plastikgehäuse mit einer flachen Oberfläche auf, so dass es mit einer Vakuumpipette (SMT-Bestückautomaten) gegriffen werden kann. Das Bauelement ragt nach der Platzierung in den Durchbruch der Leiterplatte hinein. Die LWL werden durch die V-Nut des Mikropräzisionsteils zum VCSEL radial positioniert. Die VCSEL sind auf einem Submount montiert, so dass das Licht in horizontaler Richtung emittiert wird. Die Ausrichtung des Bauelementes in axialer LWL-Richtung erfolgt nach dem Bestücken bis hin an den Anschlag der LWL-Stirnfläche und die ermöglicht dadurch einen Ausgleich der Längentoleranz des LWL. Mit Hilfe eines Sicherungsclips werden die LWL fixiert.

Der wesentliche Vorteil des dargestellten Aufbaus ist in der einfachen Zentrierung des LWL zum VCSEL und den hervorragenden optischen Eigenschaften einer LWL-Faser begründet. Aufgrund der breiten V-Nut sind die Bestückgenauigkeiten aktueller SMT-Bestückautomaten ausreichend. Die Anforderungen an eine vollständig automatisierte Fertigung können jedoch mit diesem Verfahren nicht ganz erfüllt werden. Zwei manuelle Prozessschritte scheinen für die optimale Positionierung und Qualitätssicherung notwendig. Einerseits ist das Koppelelement in axialer Richtung bis zum Anschlag zu verschieben und andererseits muss der Sicherungsclip angebracht werden. Zwei Prozessschritte, die in der SMT bisher nicht üblich sind. Ein Problem stellt die thermisch bedingte Längentoleranz der LWL dar. Fraglich ist außerdem aufgrund des Selbstzentriereffektes das Verhalten des Bauelementes im Reflowprozess. Einen weiteren Nachteil stellt die Einschränkung im optischen Layout dar. Im Gegensatz zu den lithographischen Herstellverfahren planarer LWL lassen sich integrierte Verzweiger nicht erzeugen. Außerdem wird die erforderliche Positioniergenauigkeit, welche die optische Technologie mit sich bringt, lediglich auf den Bauelementhersteller verlagert. Das V-Zentrierteil muss mit entsprechender Genauigkeit bezüglich des VCSEL positioniert und fixiert werden.

3.3.3 Steckbare Verbindungen auf Basis von MT-Ferrulen

Zur Verbindung von Lichtwellenleitern werden in der Glasfasertechnik Stecksysteme auf Basis von Standard MT-Ferrulen verwendet. Dabei werden Stecker und Buchse durch präzise mechanische Pins zentriert. Die Integration dieser Technologie in den Leiterplattenverbund stellt die Basis für die vier abgebildeten Konzepte in Bild 18 dar.

Die Konzepte C1 (Bild 18 oben, links) und C2 (Bild 18 oben, rechts) stellen die Forschungsergebnisse der durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung öffentlich geförderten Verbundprojekte OptiCon (2001 - 2004) und NegIT (2003 - 2006) dar. Das Ziel, Lösungen für die optische Verbindung zwischen Leiterplatten und Ankopplung von elektrooptischen Mikrosystemen zu entwickeln, konnte erreicht werden. Beim OptiCon-Konzept wird das Prinzip der integrierten Umlenkung angewendet. Die präzisen Bohrungen zur Führung der MT-Pins werden exakt zu den Koppelstellen mittels

Lasertechnologie gefertigt. Der Stifträger wird von der LP-Unterseite durch die Bohrungen geführt und stellt somit die Schnittstelle zum MT-Stecker, welcher mittels eines Feder-Clips fixiert wird, dar. Die Entkopplung der optischen und elektrischen Schnittstelle erfolgt mittels eines Flex-Substrates. Die Erkenntnisse des OptiCon-Konzeptes und weiterer vorangegangener bmbf-Forschungsprojekte (EOCB [11] und OptoSYS [10]) fanden nach [100] Ihre Berücksichtigung im NeGIT-Konzept. Als Ergebnis der Bewertung wurde ein separates Mikrosystem entworfen, der NeGIT-Pin (vgl. Bild 18 oben, rechts). Der NeGIT-Pin ist vergleichbar zu den vorher genannten Konzepten A1 und A2 – die Umlenkung findet im NeGIT-Pin und nicht im LWL statt.

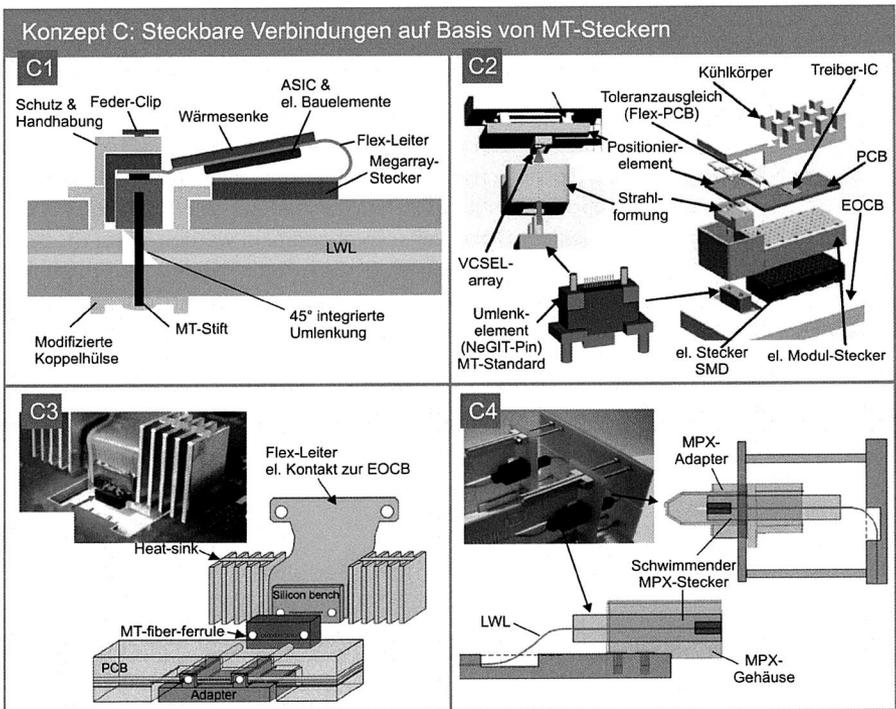


Bild 18: Vier EOCB-Aufbaukonzepte auf Basis von MT-Ferrulen für eine Steckverbindung. (Konzept C1 nach [37], Konzept C2 nach [24], Konzept C3 nach [23], Konzept C4 nach [9])

Beim NeGIT-Pin wurden zwei Ausführungsvarianten untersucht. Die erste Variante stellt ein Präzisions-spritzgussteil dar, in welches Multimode-Fasern integriert sind. Bei der zweiten Variante werden mittels des Laser-Direktschreibens Lichtwellenleiter in u-förmige Vertiefungen des Umlenk-Rohlings geschrieben. Die Montage des Umlenkele-

menten in die EOCB erfolgt laut den Autoren aktiv. Hierfür wird Licht in den LWL eingekoppelt und anschließend der NeGIT-Pin auf das optische Leistungsmaximum justiert und schließlich mit einem angepassten Klebstoff fixiert. Zur Brechindexanpassung wird der Spalt zwischen den Fasern und den LWL mit einem angepassten Gel gefüllt. Schließlich wird das elektrooptische Modul mittels MT-Ferrulen gesteckt. Die Toleranzen zwischen optischer und elektrischer Lage werden durch eine mechanisch schwimmende optische Einheit ausgeglichen.

Das Konzept C3 (Bild 18 unten, links) wie in [23] veröffentlicht, stellt eine Lösung für Supercomputer mit extrem hoher Datenrate dar. Die Lichtwellenleiter sind im photolithographischen Prozess erzeugt und in den Leiterplattenverbund eingebettet. Die Einkopplung erfolgt über die Stirnfläche der LWL, die über eine Aussparung der EOCB zugänglich sind. Auch hier basiert die Justierung der optischen Komponenten zum LWL auf der passiven Ausrichtung mittels MT-Ferrulen. Wie bei den vorher genannten Konzepten liegt somit die Herausforderung in der präzisen Positionierung des Pin-Adapters zu den LWL. Die Lösung stellt nach [61] die Strukturierung der inneren Kupferlage mit mechanischen Zentrierfunktionen und Referenzmarken für die optische Lage dar. Die LWL werden relativ zu den erzeugten Referenzmarken in einem anschließenden Prozessschritt erzeugt. Der Adapter mit seinen MT-Ferrulen wird passgenau in die mechanischen Strukturen, die im geforderten Toleranzbereich zu den optischen Referenzmarken ausgerichtet sind, eingesetzt. Das elektrooptische Modul wird nach der Leiterplattenbestückung schließlich über die Zentrierstifte positioniert und wie bei Konzept C1 über eine Flex-Leiterplatte elektrisch mit der Leiterplatte verbunden.

Zur Kopplung von EOCB mit einem Backplane ist in [9] ein Steckkonzept mit modifizierten MT-Ferrulen, die in einem Standard MPXTM-Stecker integriert sind, realisiert. Die optische Flex-LWL-Flachleiter wird in den Leiterplattenverbund integriert und aus der Leiterplatte herausgeführt und mit dem angepassten MPXTM-Stecker verbunden.

Mit den Konzepten auf Basis von MT-Ferrulen ist eine hohe Koppeffizienz möglich, da die Kopplung auf einer bereits weit entwickelten Technologie beruht. Die Autoren berichten über erreichte Signalübertragungen einer Mehrkanalstrecke von bis zu 10 Gbit/s pro Kanal. Der Versuch, optische Kabeltechnologie mit den Fertigungsprozessen der Leiterplattenindustrie zu kombinieren, macht sich jedoch in der Komplexität der optischen Module deutlich. Außerdem ist eine echte passive Montage nicht gewährleistet. Gleichwohl die Montage des elektrooptischen Moduls passiv erfolgt, muss z. B. der NeGIT-Pin aktiv justiert werden.

3.3.4 Diskrete Umlenkung mit mechanischer Zentrierung durch photolithographisch strukturierte Passungen

Eine passive Montage der optischen Sender- und Empfängermodule verspricht das Konzept nach [54]. Der Umlenkspiegel wird in einer photolithographisch erzeugten Kavi-

tät an die LWL mechanisch ausgerichtet. Die optische Lage stellt dabei eine On-Board-Unit auf der Leiterplattenoberseite dar. Bei der photolithographischen Strukturierung der LWL werden zusätzlich mechanische Strukturen zur Ausrichtung der Mikrooptiken (Umlenkspiegel und Linsenarray) geschrieben. Die Fixierung des Spiegels und des Linsenarrays erfolgt mittels UV-Klebstoff. Wie bei Konzept A2 stellen die elektrooptischen Sender- und Empfängermodule präzise gefertigte LTCC-BGA-Bauelemente dar. Sie weisen an der Unterseite eine Kavität auf, in die ein weiteres Mikrolinsenarray eingeklebt wird. Aufgrund der hohen geometrischen Präzision von LTCC-Komponenten stellt die Ausrichtung des VCSEL relativ zu den Mikrolinsen kein Problem dar. Die Metallisierung kann innerhalb der in der Optik üblichen Toleranzen strukturiert werden. Montageungenauigkeiten beim Bestücken des VCSEL werden durch den Einschwimmeffekt ausgeglichen. Ein vergleichbares Konzept auf Basis der Overlay-Technologie wurde von E. Doany et al. entwickelt und zeigt in [28] den Aufbau der bidirektionalen optischen Verbindung mit einer Bandbreite von 160 Gb/s.

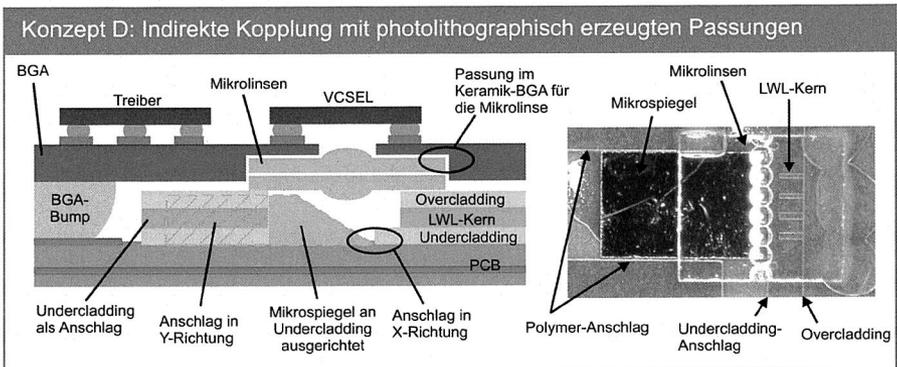


Bild 19: Aufbaukonzept nach [54] basierend auf der Overlay-Technologie mit mikrooptischen Koppelementen für eine passive Positionierung

Das Verfahren ist vor dem Hintergrund montagerelevanter Aspekte vielversprechend, verbraucht jedoch kostbaren Platz auf der Leiterplattenoberseite aufgrund der Overlay-Technologie. Dennoch scheint die Bestückung des BGA-Moduls kritisch. Nach [54] wird das optische Modul in BGA-Montagetechnik bestückt, somit kann eine Dejustage zwischen dem oberen und unteren Mikrospiegel erfolgen, die aus zwei Gründen nicht ausreichend durch den Einschwimmeffekt ausgeglichen werden kann. Ein Grund hierfür ist die fehlende Genauigkeit zwischen der elektrischen und optischen Lage auf dem FR4-Substrat. Ein zweiter Grund liegt im Einschwimmechanismus selbst begründet. Bei üblichen BGA-Dimensionen kann nicht von einem prozesssicheren, vollständigen Einschwimmen ausgegangen werden (vgl. [48]).

3.3.5 Zusammenfassende Gegenüberstellung der EOCB-Konzepte

Die dargestellten Aufbaukonzepte der EOCB weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile hinsichtlich der automatisierten SMT-Montage auf. Insbesondere ist die SMT durch die passive Montage toleranzbehaffeter Bauelemente mit der Möglichkeit zur Nacharbeit bzw. Reparatur gekennzeichnet. Die optische Kopplung weist deutlich höhere Anforderungen auf als die ausschließliche elektrische Verbindung, so dass eine passive Montage bisher nur durch sehr präzise gefertigte Komponenten in Kombination mit mechanischen Stecker- bzw. Führungselementen möglich ist. Die Verlagerung der Präzision auf die Leiterplatte bzw. auf die optischen Sender- und Empfängermodule zeigt im Gesamtkonzept keinen wirtschaftlichen Vorteil, da die Kosten auf den Leiterplatten- bzw. Bauelementhersteller verlagert werden. Tabelle 1 zeigt die Bewertung der Konzepte in Bezug auf die SMT-relevanten Hauptkriterien.

Tabelle 1: Bewertungsmatrix verschiedener EOCB-Aufbaukonzepte hinsichtlich der SMT-Fertigung

Kriterium	Aufbaukonzept							
	A1	A2	B	C1	C2	C3	C4	D
Geringe Komplexität der optischen Module	●	●	◐	○	○	◐	◑	◐
Geringe Maßhaltigkeit der optischen Module	○	○	○	○	○	○	○	○
Geringe Anforderung an die horizontale Positionierung	●	●	●	●	●	◐	●	◐
Geringe Anforderung an die vertikale Positionierung	◐	◑	●	◐	●	●	●	◐
Einfacher Herstellungsprozess der EOCB	◐	◑	◐	◐	◑	◐	◐	◑
Geringe SMT-Bestückgenauigkeit	○	◐	●	○	○	○	○	○
Vollständig automatisierte Montage (SMT) möglich	◐	◑	◐	○	○	○	○	◑
Eignung zur Nacharbeit bzw. Reparatur	●	●	●	●	●	●	●	◐
Gute optische Eigenschaften	◐	◑	●	◐	◑	◐	●	◑
Kompatibilität zu SMT-Fertigungsprozessen	◐	◑	◐	◐	◑	◐	○	◑
○ nicht erfüllt, ◐ kaum erfüllt, ◑ halb erfüllt, ● nahezu voll erfüllt, ● voll erfüllt								

Die bewertende Übersicht der verschiedenen EOCB-Aufbaukonzepte macht deutlich, dass die Konzepte auf eine passive Montage ausgelegt sind. Die Folgen sind entweder inkompatible SMT-Fertigungsprozesse oder komplexe, hochpräzise optische Bauelemente, die das Problem der Justage lediglich auf Bauelementhersteller verlagert.

3.4 Ableitung des Forschungsbedarfs

Die vorangegangenen Darstellungen zeigen, welchen Entwicklungen sich die elektronische Baugruppe ausgesetzt sieht. Die Forderung nach höchsten Datenraten im Terahertz-Bereich macht die Integration der optischen Datenübertragung auf Leiterplatzebene erforderlich. Die internationale Forschungsarbeit der letzten zwölf Jahre brachte vielfältige Aufbaukonzepte für hybride Leiterplatten mit elektrischen Funktionen und integrierten Lichtwellenleiter für eine breitbandige Datenübertragung hervor. Während die Herstellverfahren von planaren Lichtwellenleitern bereits weit fortgeschritten sind, stellen die bisherigen Ansätze für eine automatisierte Montage im Sinne der SMT keine zufriedenstellende Lösung dar. Dies liegt in der fehlenden Verfügbarkeit geeigneter Bauelemente, Prozesse und Bestückautomaten begründet.

Im Hinblick auf eine Low-Cost-Fertigung stellt die Verarbeitung von toleranzbehafteten gehäuseten Bauelementen eine wichtige Voraussetzung dar. Das Gehäuse eines Bauelementes ummantelt einen Halbleiterchip und schützt diesen gegen Beschädigungen durch Umwelteinflüsse. Darüberhinaus werden die geringen geometrischen Abstände der elektrischen Anschlüsse des Halbleiters mittels des Leadframes des Gehäuses aufgeweitet, so dass die Montage durch höhere Toleranzen vereinfacht wird. Einen weiteren Vorteil stellt das Potenzial zur erhöhten Funktionalität dar. Im Fall eines VCSEL kann z. B. zusätzlich der notwendige VCSEL-Treiber und eine Monitordiode zur Kontrolle der Sendeleistung in einem Gehäuse und damit in einem einzigen Bauelement verbaut werden. VCSEL sind derzeit nur als Halbleiter oder gehäust mit einer nach oben gerichteten Strahlführung erhältlich. Für die Erforschung der Montageprozesse im Sinne der SMT stellt daher die Bereitstellung entsprechender Bauelemente eine zwingende Notwendigkeit dar. Ferner stehen für die Qualifizierung der Bauelemente keine kommerziellen Testsysteme zur Verfügung, so dass ein System entwickelt werden muss, mit dem die Untersuchung der Lasereigenschaften und auch Koppelcharakteristika zwischen Bauelement und optischer Leiterplatte möglich ist.

Im Bereich der SMT-Fertigung werden derzeit die Bauelemente ausschließlich an den elektrischen Strukturen ausgerichtet montiert. Mit Hilfe von Lotpaste als Verbindungsmedium wird eine elektrische und mechanische Verbindung im Reflowprozess erzeugt. Ein gewisser Versatz zwischen den Anschlussbeinchen wird dabei toleriert, da die elektrischen und mechanischen Funktionen erhalten bleiben. Optische Komponenten zur Ausleuchtung oder für Anzeigen werden standardmäßig schon seit vielen Jahren verarbeitet. Die Herausforderung liegt jedoch nicht in der exakten Ausrichtung der optischen Wirkfläche zu einer Koppelstelle, sondern in der Abstimmung der Helligkeit. Hierfür werden LEDs entweder vorsortiert oder mit bestimmten Vorwiderständen gepaart [45]. Die Montage optischer Sender- und Empfängerbauelemente erfordert im Gegensatz zu den bisherigen Montageverfahren die Ausrichtung der elektrischen Anschlussstrukturen und zugleich der optischen Wirkflächen zueinander. Vor dem Hintergrund

dieser Anforderung müssen die Prozesse der SMT hinsichtlich ihrer Eignung bewertet und gegebenenfalls erweitert oder modifiziert werden. In diesem Zusammenhang stellt die Bereitstellung einer durchgängigen vollautomatisierten Prozesskette mit angepassten Methoden zur fortlaufenden Qualitätsüberwachung eine wichtige Notwendigkeit dar.

Der Erfolg der elektrooptischen Leiterplattenfertigung hängt insbesondere von der Verfügbarkeit geeigneter Produktionsanlagen ab. Derzeit existieren keine SMT-Bestückautomaten, die den Anforderungen zur Fertigung elektrooptischer Baugruppen genügen. Vor dem Hintergrund einer hybriden Aufbau- und Verbindungstechnik – also die Montage von Bauelementen unter Berücksichtigung von elektrischen, mechanischen und optischen Funktionen – ist die Modifikation eines Standard-Bestückautomaten eine sinnvolle Lösung, da die elektrischen und mechanischen Anforderungen bereits erfüllt sind. Methoden zur flexiblen Integration neuer Prozesse in Bestückanlagen sind bislang unbekannt und bedürften einer vertiefenden Betrachtung.

Mit der Bereitstellung von elektrooptischen Bauelementen und zugehörigen Leiterplatten, massenfertigungstauglichen Prozessen und Produktionsanlagen würde ein wichtiger Beitrag im Rahmen der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der elektrooptischen Baugruppen geleistet werden. Mit dieser Arbeit wird genau dieses Ziel verfolgt, um insbesondere durch die Demonstration der automatisierten Montage mit realen Bauelementen, Leiterplatten und Produktionsanlagen, die Hemmnisse und Vorbehalte gegenüber des Einsatzes elektrooptischer Leiterplatten zu senken.

4 Aufbaukonzept elektrooptischer Baugruppen für die automatisierte Low-Cost-Fertigung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung von gehäusten Sender- und Empfängerbauelementen mit zur Leiterplattenoberfläche gerichteten optischen Wirkflächen beschrieben und durch die Darstellung des Aufbaus prototypischer EOCB mit integrierter Kopplung ergänzt. Für die Qualifizierung der optischen Bauelemente existieren kein kommerziellen Testsysteme. Ferner wird das Aufbaukonzept für die Charakterisierung der Lasereigenschaften und Koppelcharakteristika zwischen Bauelemente und Lichtwellenleiter dargestellt. Den Schwerpunkt des Kapitels bildet die Analyse der Laserprofile und der optischen Kopplung als Wissensbasis für die Prozessentwicklung der SMT-Montage.

4.1 Entwicklung gehäuster Bauelemente mit 850 nm VCSEL

Die elektrooptische Leiterplatte kombiniert elektrische und optische Funktionen zur Steigerung der Datenübertragungsrate und weist, wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, großes Zukunftspotenzial auf. Neben der Verfügbarkeit von geeigneten elektrooptischen Bauelementen und Leiterplatten gilt das Vorhandensein einer wirtschaftlichen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) als Voraussetzung für eine breite Markteinführung. Im Bereich des Halbleiter-Packagings führten die Prozessentwicklungen der Vergangenheit zu stark rationalisierten und spezifischen Fertigungskonzepten, die ein extrem hohes Produktionsvolumen elektrischer Bauelemente ermöglichen. Ebenso weist die SMT-Baugruppenproduktion einen hohen Automatisierungsgrad auf, im Gegensatz zu den Produktionsverfahren für faserbasierte, optische Systeme. Ein Grund hierfür sind die hohen optischen und mechanischen Anforderungen an die Genauigkeit im Submikrometerbereich. Zur Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen werden formstabile Metalle und Keramiken bei hohen Material- und Prozesskosten verwendet. Im Hinblick auf eine Low-Cost-Fertigung, sowohl im First-Level-Bereich (BE-Herstellung) und Second-Level-Bereich (LP-Montage) stellt die Verarbeitung von spritzgegossenen, gehäusten SMT-Bauelementen die Grundlage dar. Vor diesem Hintergrund wird in [1] die Entwicklung eines SMT-fähigen VCSEL-Bauelementes mit einer Wellenlänge von 1310 nm beschrieben. Polymer-LWL, wie sie für EOCB eingesetzt werden, weisen jedoch eine minimale Dämpfung bei einer Wellenlänge von 850 nm auf [121]. Da 850 nm VCSEL derzeit nur als Halbleiter-Chip oder in Gehäusen mit einer nach oben gerichteten Strahlführung erhältlich sind, ist eine Neuentwicklung erforderlich.

Das Packagekonzept zur Integration von U-L-M Photonics Halbleiter-850nm-VCSEL in ein TSSOP-10-Gehäuse in Anlehnung an das gehäuste 1300nm-VCSEL-Bauelement, wie in [1] gezeigt, ist in Bild 20 dargestellt. Die Fertigung der prototypischen Bauelemente erfolgte auf Basis der fertigungsnah definierten Anforderungen durch die Firma Opticon GmbH. Auch wenn die Flip-Chip-Montage in der SMT immer mehr an Bedeutung gewinnt, so stellt nach [46] die Montage von Bauelementen mit Abmessungen von

250 μm x 250 μm nach wie vor eine große Herausforderung für den Leiterplattenfertiger dar. Die Montage gehäuseter Bauelemente ist im Gegensatz dazu etabliert und stellt ein wirtschaftliches Montageverfahren dar. Darüberhinaus können weitere Vorteile genannt werden: das Gehäuse des Bauelementes ummantelt den Halbleiterchip, schützt diesen gegen Beschädigungen durch Umwelteinflüsse und überbrückt die unterschiedlichen geometrischen Abstände zwischen den elektrischen Anschlüssen des Halbleiters und der Leiterplatte. Des Weiteren lassen sich multifunktionale Bauelemente mit mehreren Halbleitern in einem Gehäuse herstellen, so dass weniger Fertigungsschritte bei der Leiterplattenmontage notwendig sind. Im Fall der optischen Bauelemente können zusätzlich zum VCSEL-Chip notwendige Treiber und eine Monitordiode zur Ansteuerung und Kontrolle der Sendeleistung integriert werden. Die Anforderungen an das Bauelement hinsichtlich der Fertigungsprozesse sind in Bild 20 zusammengefasst.

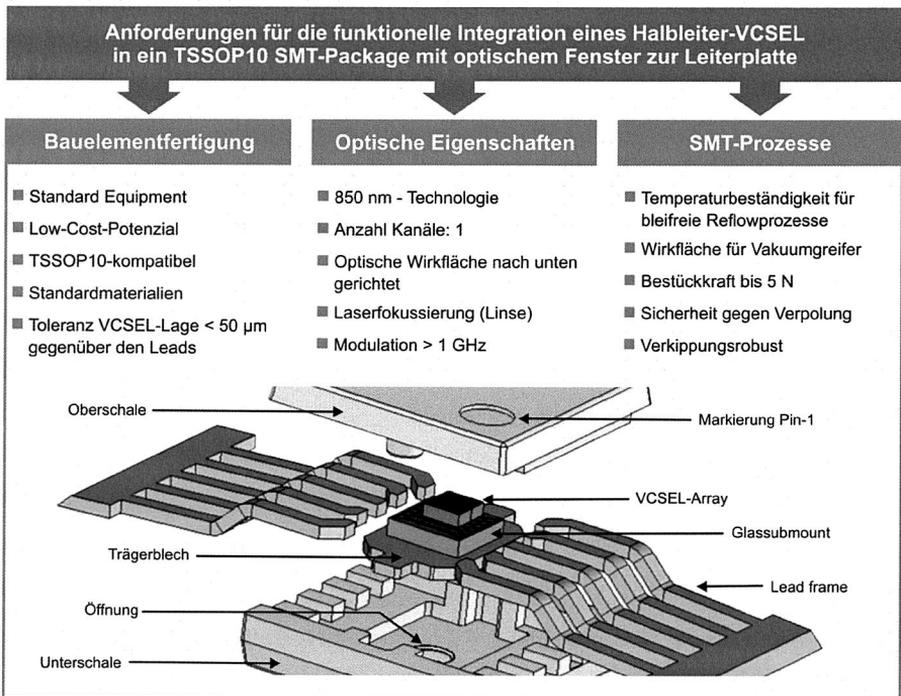


Bild 20: Aufbaukonzept eines 850 nm VCSEL im TSSOP-Package auf Basis von Anforderungen für die Low-Cost-Fertigung (vgl. [29] [30] [85])

Den wesentlichen Unterschied zu einem Standard-TSSOP-10-Bauelement stellt das optische Fenster an der Unterseite des Bauelementes dar. Der VCSEL-Halbleiter wird auf einem Dünnglas-Submount (transparent für 850 nm) montiert und strahlt nach unten.

Das Trägerblech und die Unterschale besitzen eine Öffnung, durch die der Laserstrahl austreten kann. Der mechanische Aufbau ermöglicht die Verarbeitung im bleifreien Reflowprozess und erlaubt das Vakuumgreifen bei einer maximalen Bestückkraft von 5 N. Die wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung der elektrooptischen Sender- und Empfängerbauelemente sind in Bild 21 dargestellt.

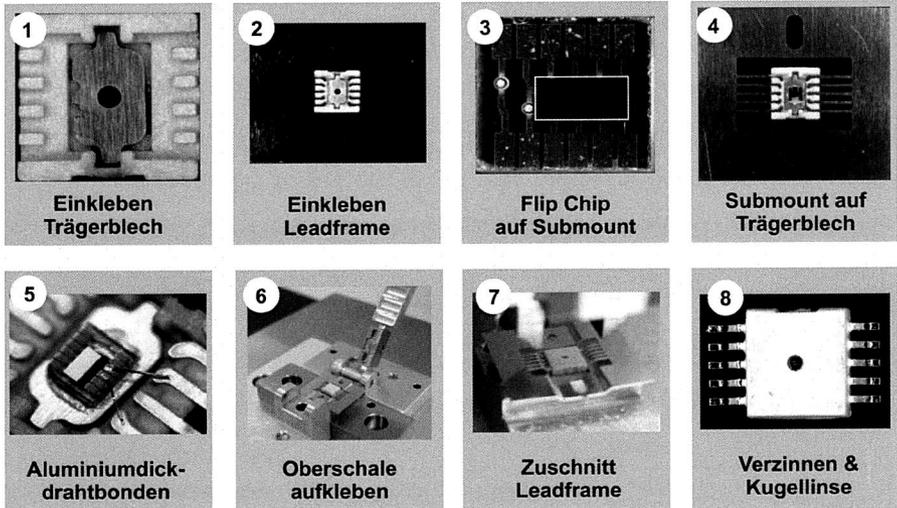


Bild 21: Wesentliche Prozessschritte zur Herstellung der prototypischen Sender und Empfängerbauelemente (vgl. [17] [85])

Die Ober- und Unterschalen werden mit Spezialwerkzeug als Spritzgussteil hergestellt. Für die Montage ergeben sich acht wesentliche Prozessschritte:

- 1-2: Einleiten des Trägerblechs und des Leadframes: Das Trägerblech und das Leadframe werden mittels Ätztechnik aus dem Werkstoff CuFe₂P hergestellt. Es zeichnet sich durch eine günstige Kombination einer sehr guten Kaltumformbarkeit mit hoher elektrischer bzw. thermischer Leitfähigkeit und Festigkeit aus [71]. Die Oberfläche wird mit einer 2-4 µm Schicht Ni matt plus chemisch 0,1 µm Flashgold veredelt. Das Trägerblech und das Leadframe werden in die Unterschale eingesetzt und mit Epoxidharzklebstoff im Ofen (1h bei 120° C) fixiert.
- 3: Montage Flip Chip auf Submount: Das Glassubmount wird aus Planglaswafern mit einer Dicke von 0,2 mm mit 4 Zoll Durchmesser realisiert. Die Leiterbahnen werden aufgesputtert, AuSn-Bumps galvanisch aufgebaut und nach Umschmelzen der Bumps die Submounts vereinzelt. Der funktionale Halbleiter wird in Flip-Chip-Technologie auf den strukturierten und bebumpften Glassubmount montiert

und verlötet. Um die mechanische Stabilität zu gewährleisten, sind zwei VCSEL-Zellen notwendig.

- **4: Montage Submount auf Trägerblech:** Das Submount mit VCSEL wird in einem weiteren Klebprozess mit minimierten Klebspalt zwischen Submount und Trägerblech montiert, wobei der Bereich des Strahlengangs vom Klebstoff ausgespart bleibt.
- **5: Elektrische Kontaktierung:** An den Leiterbahnenenden des Glassubmounts sind bondfähige Anschlusspads realisiert. Die elektrische Verbindung zwischen dem Leadframe und dem Glassubmount wird im Wedge-Wedge-Verfahren drahtgebondet.
- **6: Montage Oberschale:** Nach einer Klebstoffdosierung auf dem Gehäuserand der Unterschale wird der Deckel aufgesetzt und 1 h bei 120 °C im Ofen gehärtet.
- **7: Zuschnitt des Leadframes und Verzinnung:** Mittels Biegewerkzeug werden die Leadframes mit einem Stempel von oben nach unten gebogen. Der Abstand des Leadframes zur Unterseite beträgt 60 µm bis 150 µm. Mit einem Schneidewerkzeug werden die Leadframes abgesichert. Die Verzinnung erfolgt im Lotbad.
- **8: Endmontage Linse:** Zur Fokussierung des Lichtstrahls wird schließlich eine Kugellinse im optischen Fenster ausgerichtet und verklebt.

Die Bauelemente eignen sich für die multimodale Einkopplung des Laserlichts in einlaminierte Wellenleiter einer EOCB. Die durchgeführte Qualifizierung der Bauelemente hinsichtlich der elektrooptischen, thermischen und montagespezifischen Eigenschaften schließt sich der nachfolgenden Beschreibung der EOCB an.

4.2 Aufbau der elektrooptischen Leiterplatte

Für die Entwicklung einer kostengünstigen Montagetechnologie bietet die prototypische Leiterplatte, die im Rahmen des durch die Bayerische Forschungsstiftung geförderten Projektes AMOB (vgl. [31]) entwickelt wurde, beste Voraussetzungen. Der Aufbau der Leiterplatte ist in Bild 22 dargestellt. Das elektrische Schaltungslayout der EOCB ist für eine Taktfrequenz von 1 GHz ausgelegt und besitzt eine integrierte optische Übertragungsstrecke. Das elektrische Datensignal wird symmetrisch über HF-Stecker in die Leiterplatte gespeist und über eine symmetrische Leitung zum elektrooptischen Wandler geführt. Das elektrische Signal wird in einem Treiber aufbereitet und in ein optisches Signal vom VCSEL umgewandelt. Die Lichtführung erfolgt über die optische Strecke zur Empfänger-Photodiode, wo es in ein elektrisches Signal zurückgewandelt wird. Der Transimpedanzverstärker bereitet das Signal auf und sendet das elektrische Signal symmetrisch an die HF-Stecker. Die optische Übertragungsstrecke ist ein polymerer Lichtwellenleiter, dessen Herstellverfahren auf den Ergebnissen des BMBF-Verbundprojektes NeGIT (vgl. [100]) basiert. Im Gegensatz zum NeGIT-Projekt wird eine integrierte Kopplung mit einem 45°-LWL-Ende angewendet, die in einem optimierten Fräsprozess (vgl. [31]) von der Unterseite der Leiterplatte gefertigt wird.

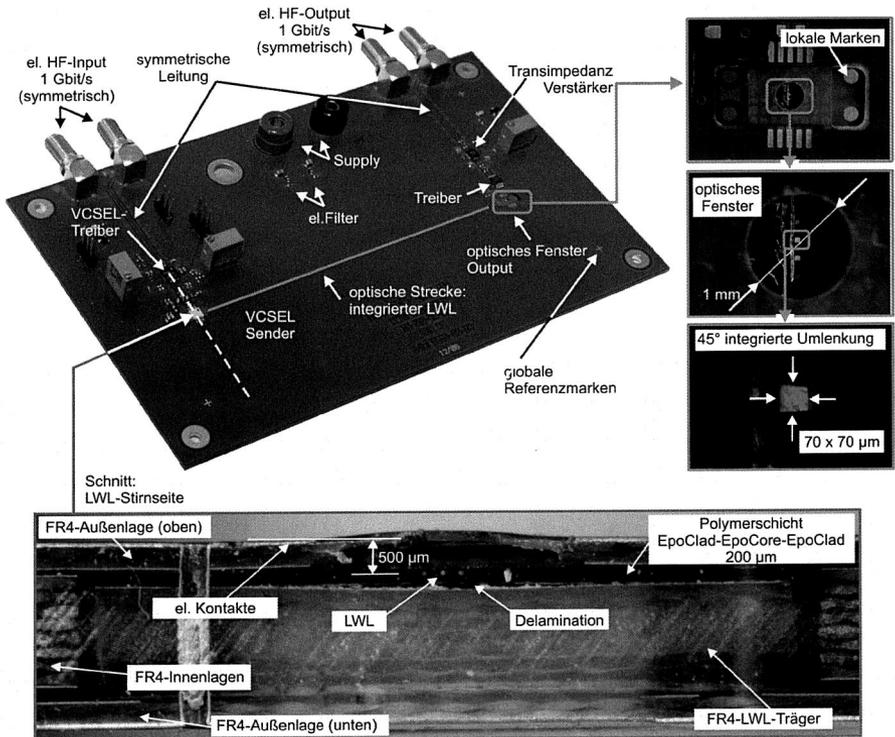


Bild 22: Aufbau der elektrooptischen Demonstrator-Leiterplatte für die Entwicklung eines SMT-Montage-Verfahrens (in Anlehnung an [31] [35])

Die Herstellung der elektrooptischen Leiterplatten erfolgt in mehreren Prozessschritten. Neben den herkömmlichen Verfahrensschritten zur Fertigung rein elektrischer Leiterplatten (vgl. [42]) kommen vor allem der Wellenleiterherstellung, dem Einlaminiern des Wellenleiters in das Gesamtboard sowie dem Fräsen der Koppelstelle besondere Bedeutung zu.

Die Lichtwellenleiter werden auf Basis von Epoxidharzen, die üblicherweise in der Leiterplattenindustrie mit ihren guten Eigenschaften hinsichtlich der Hafffestigkeit, geringen Volumenschumpfung bei der Aushärtung und hohen thermischen Stabilität sowie chemischen Beständigkeit eingesetzt werden, hergestellt. Die Schichtherstellung erfolgt in drei Schritten. Zunächst wird das Undercladding (Material: EpoClad, Brechindex $n = 1,57$) auf ein konventionelles FR4-Substrat vollflächig aufgetragen, thermisch behandelt und mit UV-Licht ausgehärtet. Die Kernschicht (Material EpoCore, Brechindex $n = 1,58$) wird aufgeschleudert und eine Schichtdicke von $70 \mu\text{m}$ über die Schleuder-

Umdrehungsgeschwindigkeit eingestellt. Die LWL werden mit Hilfe einer Maske lithographisch strukturiert und schließlich thermisch nachbehandelt. Die Ummantelung wird mit demselben Material wie das Undercladding (EpoClad) über die Wellenleiterkerne gerakelt und thermisch und mit UV-Licht nachbehandelt. Vor dem Hintergrund der nichtgesteckten Kopplung sind Kupfermarken zur Positionermittlung der Umlenkspiegel notwendig, die auf der LWL-Ebene aufgebaut werden. Die lokalen Marken auf der LWL-Ebene sind vor allem deswegen so wichtig, da beim Laminierprozess der Leiterplatte, also beim Verpressen der elektrischen und optischen Lagen zu einem Verbund, die unterschiedlichen Lagen sich ungleichmäßig dehnen bzw. schrumpfen. Trotz eines verbleibenden Versatzes zwischen der optischen und elektrischen Lage kann die Einkoppelstelle präzise referenziert werden. Außerdem helfen die Marken bei der Ausrichtung der elektrischen Außenlage zur LWL-Lage. Für den Fall, dass keine Marken vorhanden sind, muss auf alternative Verfahren, wie z. B. Röntgenanalyse zurückgegriffen werden [100]. Eine Diskussion zu den Toleranzen zwischen optischer und elektrischer Lage im Hinblick auf die Montage von gehäusten Bauelementen erfolgt in Kapitel 5.

Das Fräsen des Spiegels stellt einen kritischen Prozessschritt dar und bedarf einer genauen Positionierung des Fräasers als auch optimierte Dreh- und Vorschubgeschwindigkeiten, um eine Delamination und Ausplatzung an der Fräskante zu vermeiden [31]. In Abhängigkeit der Fräseparameter ergeben sich unterschiedliche Oberflächengüten, wie in Bild 23 dargestellt ist.

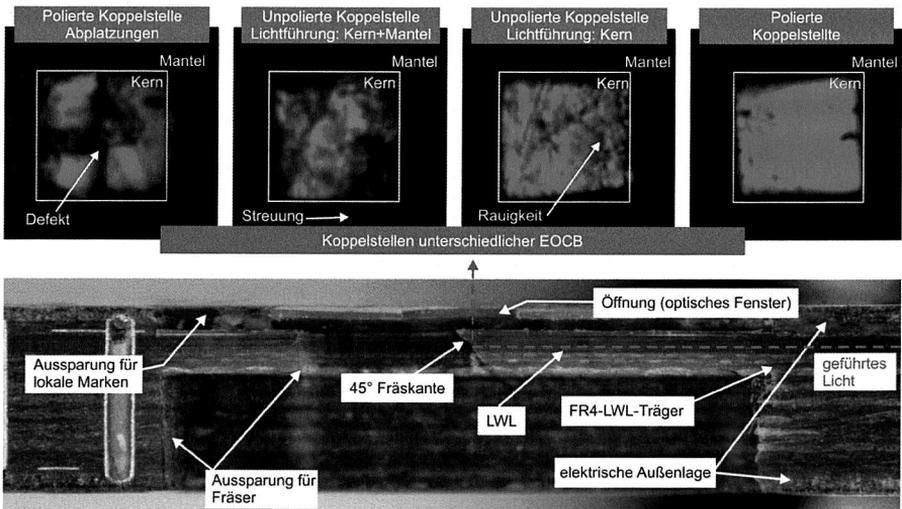


Bild 23: Seitenansicht der EOCB und Koppelstellen unterschiedlicher EOCB

Die abgebildeten Koppelstellen zeigen in der Draufsicht das optische Fenster, wobei Licht von der Gegenseite in den LWL eingekoppelt ist. Eine Verbesserung der Oberflächengüte lässt sich durch Polieren der Fräskanten erzielen. Die Qualität der Fräskanten ist für die optische Signalübertragung zwar ausreichend, begrenzt aber aufgrund der hohen Streuverluste die Übertragungskapazität. Durch die geringere Amplitude am Empfänger wird die Unterscheidung zwischen der logischen Eins und Null erschwert. Für die Entwicklung und Qualifizierung des SMT-Montageprozesses stellt die geringe Qualität jedoch keinen Nachteil dar, da die Positioniergenauigkeit der maximal erreichbaren Leistungsübertragung gegenüber steht.

4.3 Entwicklung eines Charakterisierungsmessplatzes zur Bauelementqualifizierung und Koppelanalyse

In den vorherigen Unterkapiteln sind der Aufbau und die Funktion der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten optischen Komponenten (BE und EOCB) beschrieben. Zur Ermittlung der Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik sind diese hinsichtlich relevanter Größen für die Montage zu untersuchen. Dies umfasst sowohl die Analyse des Laserprofils in der Fokusebene als auch die Koppelcharakteristik. Nachfolgend wird der Aufbau und die Funktion des spezifischen Charakterisierungsmessplatzes (CMP) detailliert beschrieben.

Für die Analyse der Laserprofile und der Koppelcharakteristik muss der CMP unterschiedliche optische, mechanische und elektrische Anforderungen erfüllen. Bild 24 zeigt auf Basis der Anforderungen das Konzept des CMP mit zwei verschiedenen Betriebsmodi. Im Betriebsmodus 1 wird ausschließlich das Laserprofil des VCSEL im Fernfeld in variablen Arbeitsabständen und verschiedenen Abstrahlwinkeln erfasst und ausgewertet. Der Betriebsmodus 2 erlaubt die Aufnahme der Einkoppelcharakteristik des Lasers in den Lichtwellenleiter der EOCB. Hierfür rastert ein aktiver VCSEL in einem definierten Abstand zur EOCB die Einkoppelstelle ab. Die über den LWL übertragene Lichtleistung wird empfängerseitig mit einem Lichtleistungssensor erfasst und elektronisch ausgewertet. Die Anforderungen an den CMP stellen sich wie folgt dar: Die Aufnahme des Bauelementes muss die elektrische Inbetriebnahme des VCSEL ermöglichen und einen schnellen, zerstörungsfreien Bauelementwechsel zulassen, so dass das Bauelement nach dem Test für die Montageuntersuchungen verwendbar ist. Des Weiteren ist eine Minimierung der Einwirkung von Fremdlicht erforderlich, um mögliches Bildrauschen zu vermeiden. Für den Fall einer dynamischen Ansteuerung des Lasers stellt die Echtzeitauswertung des Lasers hinsichtlich der Lichtintensitätsverteilung eine zwingende Notwendigkeit dar. Das System ist auf eine Wellenlänge von 850 nm und für einen Lichtleistungsbereich bis zu 15 mW auszulegen. Die motorgesteuerte Ausrichtung der Komponenten (VCSEL zu CCD-Kamera bzw. VCSEL zu EOCB) zueinander erfordert eine Genauigkeit von mindestens 1 μm in X-/Y-Richtung und 5 μm in Z-Richtung, wobei der VCSEL bis zu 5° um die X- als auch Y-Achse zu kippen ist.

Anforderungen an den flexiblen Messplatz zur Analyse der VCSEL-Eigenschaften und Koppelcharakteristik

- Wiederlösbare BE-Aufnahme (zerstörungsfrei)
- Elektrische Ansteuerung der VCSEL
- Automatische Positionierung der Komponenten zueinander ($x/y < 1 \mu\text{m}$, $z < 5 \mu\text{m}$)
- Echtzeitauswertung des Laserprofils
- Wellenlängenempfindlichkeit gemäß den BE
- konstantes Umgebungslicht
- Lichtleistungsbereich: 0 - 15 mW

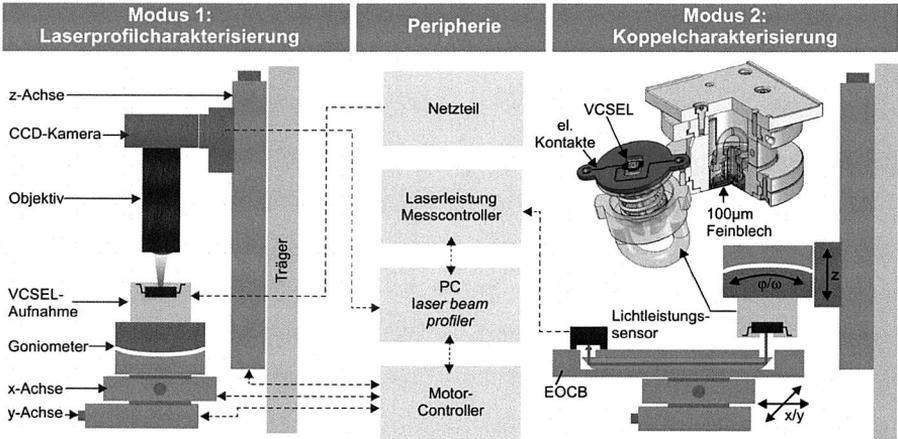


Bild 24: Konzept des Charakterisierungsmessplatzes zur Laserprofilcharakterisierung (Modus 1) und Koppelanalyse (Modus 2)

Der realisierte CMP ist in Bild 25 dargestellt. Er ist als lichtdichter Raum mit Abmessung von 900 mm x 790 mm x 550 mm und Fronttüren aufgebaut. Für die Untersuchung der Laserprofile wird ein kommerzielles Laserprofil-Analysesystem mit einer CCD-Kamera eingesetzt, die eine spektrale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 320 nm bis 1100 nm besitzt. Das Objektiv mit 10-facher Vergrößerung ermöglicht die Analyse der Lichtleistungsverteilung in der Fokusebene mit einer Auflösung von weniger als 1 µm bei einer Bildfläche von 800 µm x 600 µm. Die präzise Positionierung der Lichtquelle zum Sensor erfolgt mittels Nano-Schrittmotoren. Mit einem maximalen Verfahrensweg von 25 mm wird eine Positioniergenauigkeit von 0,5 µm erreicht. Die Kabelführung verläuft über einen lichtdichten Schacht nach außen, so dass Positionen ohne Fremdlichteinwirkung nachjustierbar sind.

Die entwickelte VCSEL-Halterung stellt das Herzstück des CMP dar. Sie ermöglicht die mechanische Fixierung als auch eine elektrische Kontaktierung des Bauelementes, so dass das Bauelement nach unten strahlt und dennoch einen Abstand von weniger als 55 µm zur Unterseite besitzt. Somit kann unter nahezu realistischen Bedingungen Licht in den LWL eingekoppelt werden, ohne das Bauelement mit der EOCB zu kontaktieren. Die VCSEL-Halterung besteht aus drei Funktionseinheiten: Trägereinheit (oben), SMD-

Aufnahme und Gegenhalterung (unten) mit optischem Fenster. Wie in Bild 24 dargestellt, liegt das Bauelement in der SMD-Aufnahme über Kopf in einer Passung, wobei die Oberseiten der Leads die elektrischen Leitungen der Adapterplatine kontaktieren. Die SMD-Aufnahme ist in der Gegenhalterung mittels eines Bajonettverschlusses fixiert, so dass die Bauelementunterseite nach unten ausgerichtet ist und auf dem Feinblech (50 μm + 3 μm Acryllackbeschichtung) der Gegenhalterung mit seinen Leads aufliegt. Die Gegenhalterung ist mit einer Steck-Schraub-Verbindung mit der Trägereinheit verbunden und kann von Hand fixiert und wieder gelöst werden.

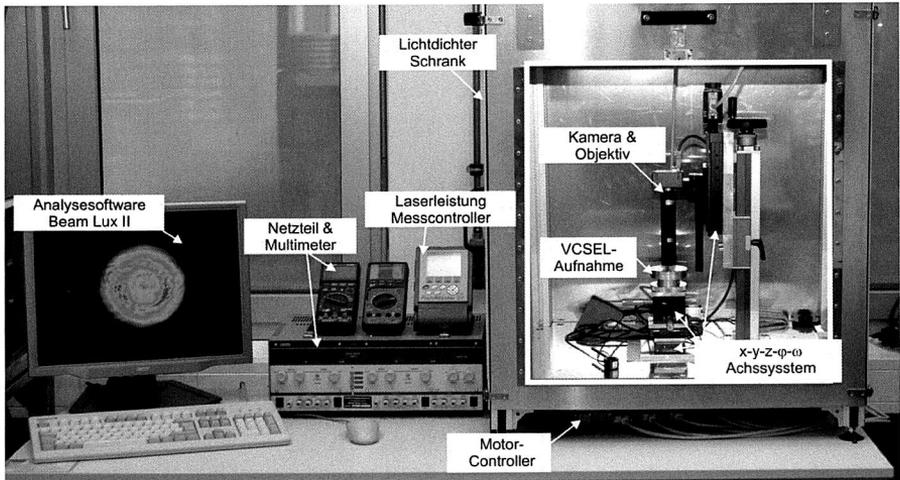


Bild 25: Realisierter Aufbau des Charakterisierungsmessplatzes

Für den Betriebsmodus 2 (Koppel-Analyse) wird die EOCS über einen mechanischen Adapter an die X-Y-Mikropositioniereinheit fixiert. Die VCSEL-Halterung ist an die Z-Achse montiert, so dass der VCSEL nach unten strahlt und das Licht in den LWL der EOCS eingekoppelt. Über die Stellmotoren wird die Leiterplatte der horizontalen Ebene relativ zum VCSEL bewegt, so dass die Einkoppelstelle mit dem Laser mikrometergenau abgerastert werden kann. Der Abstand zwischen LWL und VCSEL ist über die Z-Achse einstellbar. Für die automatisierte Rasterung wurde ein Matlab-basiertes Programm entwickelt, das die Koppelstelle dreistufig rastert. Zunächst wird in 200 μm Schritten eine Fläche von 4 mm x 4 mm untersucht und anschließend im identifizierten Lichtleistungsmaximum in einem zweiten Durchlauf auf einer Fläche von 200 μm x 200 μm in 20 μm Schritten das Leistungsmaximum bestimmt. Schließlich wird im Punkt des Leistungsmaximums die Fläche der Koppelstelle von 70 μm x 70 μm in 2 μm Schritten gerastert.

4.4 Analyse der optischen Bauelementeigenschaften hinsichtlich der Montage

Für die integrierte Übertragung von Licht auf Leiterplattenebene bedarf es einer Ankopplung des VCSEL an den eingebetteten Lichtwellenleiter. Die Qualität der Kopplung ist insbesondere durch die optischen Verluste charakterisiert und größtenteils montageabhängig. Bei der Bestückung der VCSEL ist die Lage des Laserstrahls zu ermitteln und mittig zur Einkoppelstelle auszurichten. Die Charakterisierung des Laserstrahls zeigt, dass die Mitte bzw. der Schwerpunkt des Laserstrahls nicht zwingend den idealen Einkoppelpunkt darstellt. Daher werden in diesem Unterkapitel zunächst montagerelevante Laserstrahlkennwerte definiert. Die Analyse möglicher Einflussgrößen und die Bedeutung für die automatisierte SMD-Montage schließt das Unterkapitel ab.

4.4.1 Festlegung montagerelevanter Kenngrößen des Laserprofils

Das Laserprofil beschreibt nach [78] und [79] innerhalb der Profilvergrenze die Intensitätsverteilung an einer axialen Position z entlang der Strahlabbreitungsrichtung. Bild 26 zeigt ein typisches Laserprofil zusammen mit den im Rahmen dieser Arbeit festgelegten Kenngrößen, die in Tabelle 2 beschrieben sind.

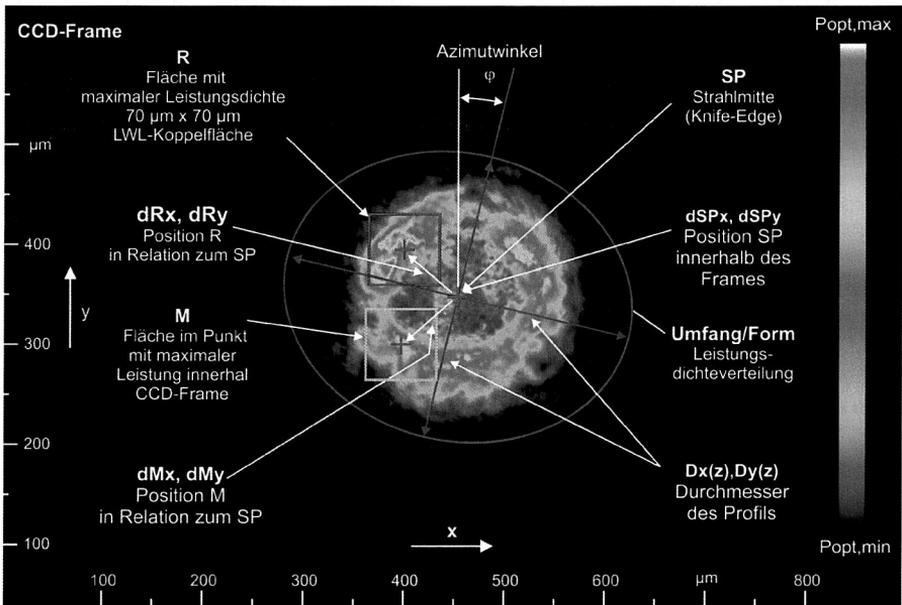


Bild 26: Darstellung eines typischen Laserprofils mit Kennzeichnung relevanter Merkmale

Die im Bild dargestellten Punkte und Flächen sind in Tabelle 2 um die zugehörigen Lichtleistungswerte ergänzt.

Tabelle 2: Beschreibung der Laserstrahlmerkmale

Beschreibung des Laserstrahlkennwerts	Abkürzung
Optische Leistung innerhalb des gesamten Bildframes	P_{opt}
Optische Leistung innerhalb einer Fläche von $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$, die im Schwerpunkt liegt	$P_{\text{opt,SP},70}$
Position von SP innerhalb des Bildframes	$d\text{SP}_x, d\text{SP}_y$
Optische Leistung innerhalb einer Fläche von $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$, die sich im Punkt maximaler Lichtintensität befindet (M-Fläche)	$P_{\text{opt,P},70}$
Position von $P_{\text{opt,P},70}$ innerhalb des Bildframes	M_x, M_y
Relative Position von $P_{\text{opt,P},70}$ zum Schwerpunkt	dM_x, dM_y
Optische Leistung innerhalb einer Fläche von $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ mit höchster Leistungsdichte (R-Gebiet)	$R_{\text{opt,R},70}$
Position von $P_{\text{opt,R},70}$ innerhalb des Bildframes	R_x, R_y
Relative Position von $P_{\text{opt,R},70}$ zum Schwerpunkt	dR_x, dR_y
Durchmesser des Intensitätsprofils im axialen Abstand z	$D_x(z), D_y(z)$
Azimutwinkel	φ

Aus der Darstellung wird deutlich, dass die räumliche Verteilung von Laserstrahlen keine scharfen Ränder besitzt. Daher ist es notwendig, Schwellwerte zur eindeutigen Abgrenzung zu definieren, wie z. B. mit der Knife-Edge-Methode. In dem dargestellten Beispiel ist die Profilfläche deutlich größer als die Fläche der Einkoppelstelle, die $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ (vgl. Aufbau der EOCB in Abschnitt 4.2) beträgt. Diese Überstrahlung ist durch die Aufweitung des Laserstrahls bedingt und von der axialen Position z abhängig. Die Überstrahlungsverluste können durch den Einsatz einer fokussierenden Linse minimiert werden, so dass die Profilfläche kleiner als die Einkoppelfläche wird.

Des Weiteren ist die Lichtintensitätsverteilung innerhalb des Laserprofils nicht fließend. Im Idealfall zeigt sie eine Gauß-Verteilung, die aus der elektromagnetischen Grundmode resultiert. Durch Interferenzen setzen sich eine begrenzte Anzahl an Moden durch, so dass sich verschiedene Intensitätsmaxima einstellen und das typische Laserprofil abbilden. Gerade vor dem Hintergrund der automatisierten Montage stellen die Positionen des Schwerpunktes, der Fläche mit maximaler Leistungsdichte und der Punkt im Leistungsmaximum wichtige Merkmale dar. Äußere Einflüsse bzw. Prozessparameter könnten diese Laserprofilkennwerte beeinflussen und damit das Einkoppelverhalten

verändern. Nachfolgend werden mögliche Einflussgrößen identifiziert und hinsichtlich der Montage bewertet.

4.4.2 Identifikation relevanter Einflussgrößen auf die Laserprofilkennwerte

Zur Ermittlung der idealen Bestückposition muss das Bauelement optisch aktiviert werden. Hierfür ist zu klären, ob die ideale Einkoppelposition von der Ansteuerung des VCSEL abhängig ist. Des Weiteren können thermische Einflüsse durch Eigen- oder Fremderwärmung die Lichtintensitätsverteilung verändern. Für das Bauelement stellt insbesondere der Reflowprozess eine hohe thermische Belastung dar. Geometrische Faktoren, wie z. B. der Arbeitsabstand, die Strahldivergenz und der Abstrahlwinkel bewirken ein Verschieben des Laserstrahls, so dass die Kopplung in den Lichtwellenleiter verhindert wird. Die ausgesuchten Einflussfaktoren

- Ansteuerung VCSEL (angelegte Spannung und Strom)
- Betriebsdauer und Umgebungstemperatur
- SMD-Reflowprozess
- Geometrischer Gesamtaufbau der elektrooptischen Baugruppe (Abstand und Verkippung)

werden nachfolgend auf die Ausprägung der Intensitätsverteilung hin untersucht und vor dem Hintergrund der automatisierten Montage diskutiert. Für alle untersuchten Einflussgrößen werden zunächst die charakteristischen Laserprofile beschrieben und anschließend hinsichtlich montagerelevanter Kriterien bewertet.

Einfluss des VCSEL-Stroms

Nachfolgende Untersuchung beschäftigt sich mit dem Einfluss des VCSEL-Stroms auf die Intensitätsverteilung. Insbesondere vor dem Hintergrund der aktiven Montage ist das Wissen über die ideale Koppelposition unerlässlich, die sich im späteren Betrieb der elektrooptischen Baugruppe nicht ändern sollte, um die optischen Verluste zu minimieren. Die qualitative Untersuchung an jeweils 25 Bauelementen mit und ohne Linse zeigt einen signifikanten Unterschied der Intensitätsverteilung. Bild 27 verdeutlicht diesen Sachverhalt anhand eines repräsentativen Beispiels jeweils für ein Bauelement mit Linse und ohne Linse. Von links nach rechts sind die Laserprofile bei einem Arbeitsabstand von 1050 μm mit einem Strom von 4 mA bis 10 mA in 2 mA-Schritten dargestellt. Gemäß Tabelle 2 bezeichnet SP den Schwerpunkt des Profils, M den Punkt der maximalen Lichtleistung und R den Ort des begrenzten Gebietes von 70 μm x 70 μm mit maximaler Leistungsdichte.

Die Bauelemente ohne Linse zeigen bei einem niedrigen Strom annähernd eine Gaußverteilung. Mit zunehmendem Strom wandert das Intensitätsmaximum ringförmig nach außen, so dass sich die Positionen M und R in einer Größenordnung von bis zu 110 μm

verschieben. Darüber hinaus stellt sich eine Aufweitung des Laserstrahls von 30 % ein, so dass die Überstrahlung zunimmt und dadurch die Koppelverluste erhöht werden.

Bauelemente mit Linse weisen eine geringe Überstrahlung der Einkoppelstelle auf. Das Laserprofil besitzt bei einer Ansteuerung von 4 mA zwei lokale Maxima. Mit zunehmendem Strom wachsen diese zu einem Maximum zusammen. Aufgrund der geringen Überstrahlung lässt sich keine signifikante Verschiebung des R-Gebiets feststellen – das Laserprofil befindet sich komplett innerhalb der Fläche der Einkopplung. Das Intensitätsmaximum verschiebt sich jedoch um bis zu 11 μm .

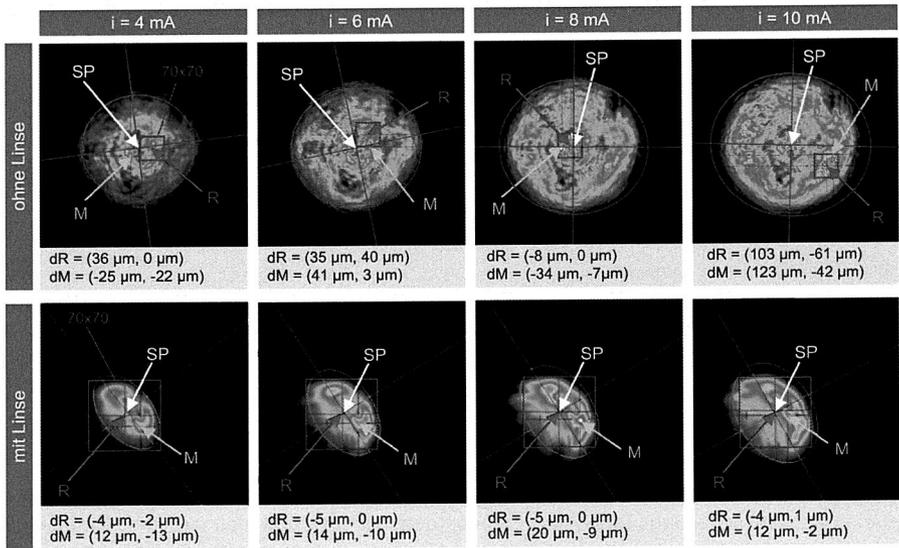


Bild 27: Einfluss des VCSEL-Stroms auf die Intensitätsverteilung für Bauelemente ohne und mit Linse

Die Überstrahlung der Einkoppelstelle stellt ein grundlegendes Problem der optischen Konstruktion dar. Sie kann durch eine optimierte Montage nicht verhindert werden, so dass bereits bei der optischen Konstruktion der elektrooptischen Baugruppe die Bauelementeigenschaften und Leiterplattendimensionen aufeinander abzustimmen sind. Ist eine Auslegung nicht erfolgt, lässt sich bei der Montage lediglich eine mit dem Aufbau maximal mögliche Einkopplung erreichen. Bei Positioniergenauigkeiten von weniger als 100 μm bei Bauelementen ohne Linse stellt die richtige Stromwahl während des Bestückvorgangs einen entscheidenden Prozessparameter dar, da sich die Lage der Fläche mit maximaler Lichtintensität in dieser Größenordnung verschiebt. Bauelemente ohne Linse hingegen sind deutlich robuster. Der Abstand zwischen dem Schwerpunkt

und der Lage der Fläche maximaler Lichtintensität ist nahezu konstant. Der Punkt des Leistungsmaximums variiert signifikant, was jedoch für die Bestückung unkritisch ist.

Einfluss der Betriebsdauer und Umgebungstemperatur

Der Einsatz der optischen Datenübertragung ist nur möglich, wenn die optische Kopp- lung von der Betriebsdauer unabhängig ist. Nach [51] nimmt die optische Leistung des VCSEL durch Eigenerwärmung oder Fremderwärmung ab und erfordert eine geeignete Wärmeabfuhr. Thermische Untersuchungen mit aktiven VCSEL bei einer Bestromung von 8 mA bei 22° C weisen eine sehr gute Wärmeabfuhrung des Bauelementes auf. Die Temperatur auf der Bauelementoberfläche steigt innerhalb von wenigen Sekunden auf 33° C und bleibt im Dauerbetrieb konstant.

Bei Erhöhung der Umgebungstemperatur sinkt die optische Leistung. Bild 28 zeigt re- präsentativ den Einfluss der Umgebungstemperatur bei 25 °C und 80 °C für ein Baue- lement ohne und mit Linse.

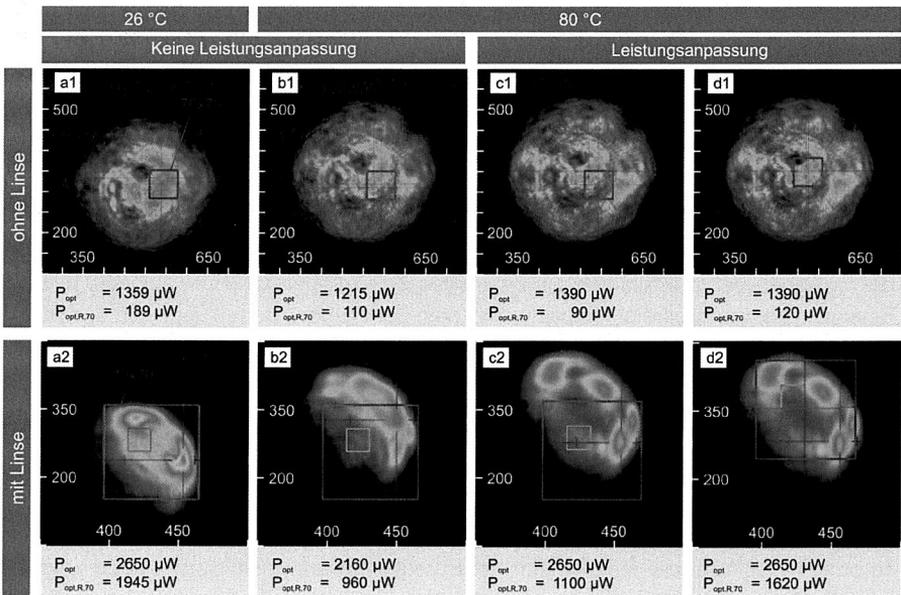


Bild 28: Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Intensitätsverteilung

Bei einem Anstieg der Temperatur auf 80 °C ist ohne Leistungsanpassung eine deutliche Abnahme der optischen Intensität festzustellen (Bild 28: b1 und b2). Bei beiden Bauelementtypen verschiebt sich das Profil in positiver Y-Richtung um ca. 25 µm, so dass die optische Leistung innerhalb des R-Gebietes eine Dämpfung von etwa -3 dB

beträgt. Mit einer geeigneten Schaltung kann im Betrieb der elektrooptischen Baugruppe bei einem optischen Leistungsabfall durch Erhöhung des Stroms die optische Leistung angepasst werden. Im vorliegenden Versuch wird der Strom soweit erhöht, dass sich die optische Ausgangsleistung einstellt (Bild 28: c1 und c2). Die optische Leistung innerhalb des ursprünglichen R-Gebietes sinkt beim Bauelement ohne Linse und beim Bauelement mit Linse lässt sich ein leichter Anstieg feststellen. Wird die Verschiebung des Profils in y-Richtung berücksichtigt und die Lage des R-Gebietes korrigiert (Bild 28: d1 und d2), so zeigt sich bei Bauelementen mit Linse, dass sich die Lage von R in Bezug auf den Schwerpunkt des Lasers nicht verschiebt, die optische Leistung jedoch innerhalb des korrigierten R-Gebietes gesunken ist. Bei Bauelementen ohne Linse ist eine Verschiebung von R in der Größenordnung von 35 μm zu erkennen.

Die Bedeutung der Umgebungstemperatur für die Montage scheint gering, da die Montage in der Regel in temperierter Umgebung stattfindet und der ideale Einkoppelpunkt in Bezug auf den Schwerpunkt des Bauelementes nahezu temperaturunabhängig ist. Für den Betrieb der optischen Baugruppe stellt die Umgebungstemperatur jedoch einen kritischen Parameter dar. Die Verschiebung des Profils gegenüber dem Kameramittelpunkt, welcher den Mittelpunkt der Einkoppelstelle repräsentiert, führt zu nennenswerten Verlusten, so dass eine konstante Umgebungstemperatur im Betrieb der optischen Baugruppe erforderlich ist.

Einfluss der thermischen Belastung im Reflowprozess

Im Reflowprozess der Aufbau- und Verbindungstechnik wird die elektrische und mechanische Verbindung des Bauelementes mit der Leiterplatte hergestellt. Der Baugruppe wird über mehrere Minuten ein definiertes Zeit-Temperatur-Profil aufgeprägt. Beim Einsatz typischer bleifreier Lotpasten ist das Bauelement dabei Spitzentemperaturen von bis zu 255 $^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt (vgl. [49]). Die Fertigung elektrischer Baugruppen erfordert in spezifischen Fällen mehrere Reflowdurchgänge, insbesondere bei einer Mischbestückung. Die nachfolgende Analyse untersucht den Einfluss der thermischen Belastung im Reflowprozess für insgesamt drei Reflowdurchgänge. Hierfür werden die Bauelemente ohne Lotpaste auf einen FR4-Träger mit Kaptonband fixiert und durch den Reflowofen mit einem typischen Sattelpfad für bleifreie Lotpasten gefahren. Nach jedem Durchgang wird nach Abkühlung der Bauelemente auf Raumtemperatur das Laserprofil hinsichtlich der festgelegten Laserprofilkennwerte analysiert. Bild 29 zeigt die Laserprofilausprägung eines jeweils repräsentativen Bauelementes mit und ohne Linse.

Bei den Bauelementen ohne Linse lässt sich eine deutliche Änderung der Intensitätsverteilung feststellen. Im Ausgangszustand weist das Bauelement ein Ringprofil auf. Mit jedem Reflowdurchgang konzentriert sich die Lichtleistung zunehmend im Schwerpunkt des Profils. Das R-Gebiet weicht nur noch bis zu zwölf Mikrometer vom Strahlschwerpunkt ab. Bauelemente ohne Linse hingegen zeigen keine signifikante Profiländerung, das R-Gebiet ist in einem Vertrauensbereich von zwei Mikrometer ortsstabil, so dass

sich keine Einschränkungen an die Montage ergeben. Für die Montage von Bauelementen ohne Linse lässt sich daraus eine interessante Schlussfolgerung ziehen. Unabhängig von der Intensitätsverteilung im Ausgangszustand kann das Bauelement bezüglich des Laserschwerpunktes zum Lichtwellenleiter ausgerichtet werden, da sich dort nach dem Reflowprozess die optische Leistung konzentriert. Alternativ könnten die Bauelemente vor der Verarbeitung thermisch behandelt werden, so dass sich die maximale Leistungsdichte bereits bei der Montage im Schwerpunkt befindet.

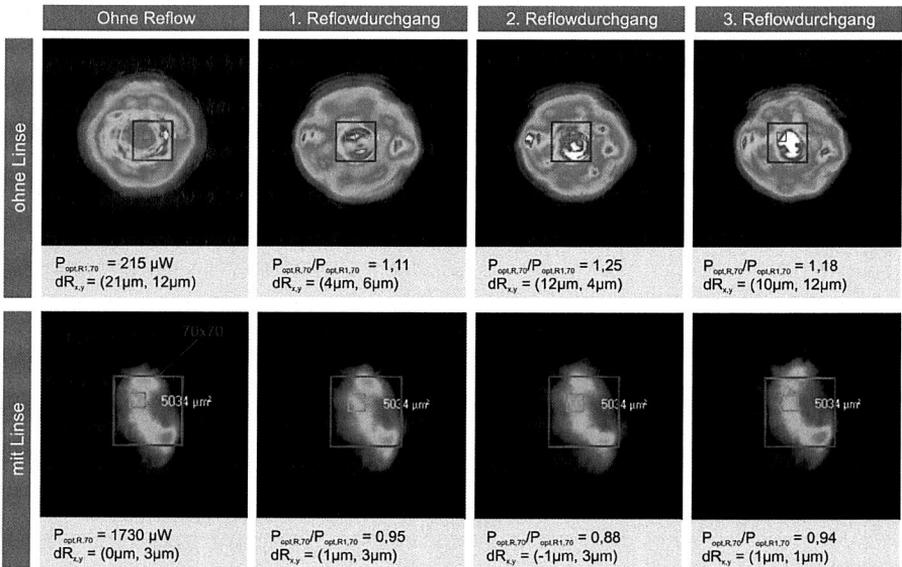


Bild 29: Einfluss der thermischen Belastung auf die Laserstrahlprofile für VCSEL mit und ohne Linse für drei aufeinanderfolgende Reflowdurchgänge

Geometrische Einflüsse

Die Auswirkungen der divergenten Strahlausbreitung liegen auf der Hand. Mit zunehmendem Abstand vergrößert sich der Strahldurchmesser. Bei gleichbleibender optischer Ausgangsleistung muss zwangsläufig die optische Leistungsdichte im R-Gebiet sinken. Ebenso sind die Auswirkungen von Positionsabweichungen naheliegend. Ein Versatz des Bauelementes in horizontaler Ebene oder Verkippen bewirken eine Verschiebung des Lasers innerhalb des Frames. Trotz dieser trivialen Zusammenhänge sollen nachfolgend kurz die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Montage veranschaulicht werden.

Im Gegensatz zur Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer Baugruppen muss bei der Fertigung optischer Baugruppen zusätzlich der vertikale Abstand berücksichtigt

werden. Die Laserprofilaufnahmen zeigen, dass sich durch den Arbeitsabstand nicht nur der Durchmesser verändert, sondern sich das R- und M-Gebiet signifikant verschiebt. Die Charakterisierung des Lasers in einer zur Leiterplatte abweichenden Fokusebene von $500\ \mu\text{m}$ liefert für Bauelemente mit Linse im dargestellten Beispiel einen Messfehler von $8\ \mu\text{m}$ und für das Bauelement ohne Linse von $22\ \mu\text{m}$. Die Position des Leistungsmaximums variiert sogar in einer Größenordnung von etwa $30\ \mu\text{m}$.

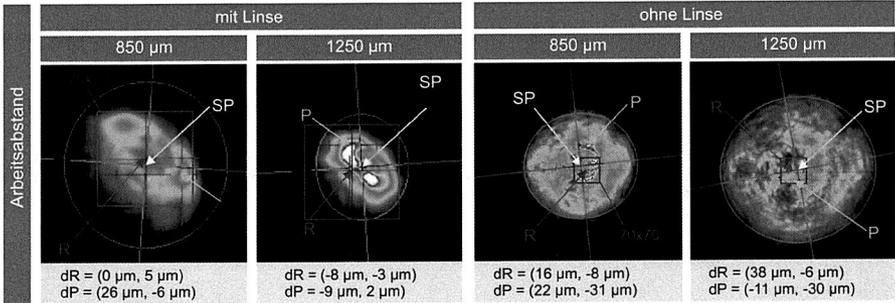


Bild 30: Einfluss der Arbeitsabstandes auf die Lasermerkmale

Während der Baugruppenfertigung können die Bauelemente beim Bestückvorgang oder im Reflowprozess verkippen. Wie in Bild 31 dargestellt, verschiebt sich dadurch der Laserspot in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes. Im dargestellten Beispiel sinkt die optische Leistung im R-Gebiet bei einer Verkipfung von nur 3° um 50%.

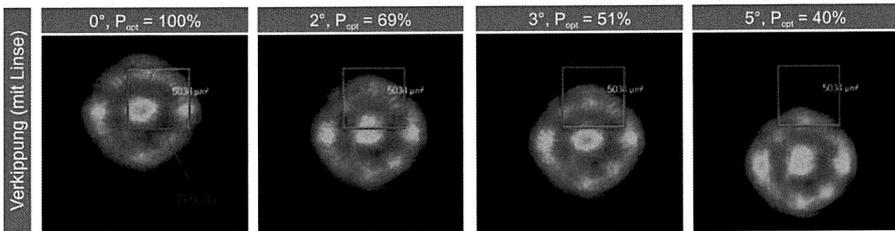


Bild 31: Einfluss der Bauelementverkipfung auf die Intensitätsverteilung bei einem Arbeitsabstand von $1050\ \mu\text{m}$ für Bauelemente mit Linse

Die Einkopffläche liegt zwar noch deutlich innerhalb des Laserspots, hat jedoch den Bereich der maximalen Lichtintensität verlassen. Gerade vor dem Hintergrund der Aufbau- und Verbindungstechnik stellt die Verkipfung einen kritischen Faktor dar und muss im Fügeprozess entlang der gesamten Prozesskette verhindert werden.

Die dargelegten Analysen der Koppelfähigkeit in Abhängigkeit verschiedener Faktoren basieren auf der Verwendung einer idealen Einkopffläche. Wie im vorherigen Unter-

kapitel dargestellt, besitzen die Koppelstellen eine deutlich geringere Qualität. Weitere Untersuchungen der realen Einkopplung sind daher notwendig.

4.5 Untersuchung der Einkoppelcharakteristik

Die Qualität einer optischen Übertragungstrecke ist vorwiegend durch den Wirkungsgrad der Kopplung bestimmt. Vor dem Hintergrund der automatisierten Montage stellt die erforderliche Bestückgenauigkeit eine wichtige Fragestellung dar. Die Untersuchung im vorherigen Unterkapitel bezüglich der Bauelementverkipfung zeigt, dass bei einem Versatz des R-Gebietes von $35 \mu\text{m}$ die Einkoppelleistung nahezu halbiert wird. Die im vorherigen Unterkapitel angenommene ideale Kopplung innerhalb des R-Gebietes lässt sich auf reale Leiterplatten nicht übertragen. Daher soll die erforderliche Positioniergenauigkeit nachfolgend vertiefend betrachtet werden.

Mit Hilfe des Charakterisierungsmessplatzes kann im Betriebsmodus 2 (vgl. Abschnitt 4.3) die Kopplung untersucht werden. Der Untersuchung liegen fünf Leiterplatten, vier Bauelemente mit Linse und zwei Bauelemente ohne Linse zugrunde. Bild 32 stellt sechs ausgewählte Koppelprofile dar. Die Profile zeigen die übertragene Lichtleistung in Abhängigkeit der Bauelementposition mit einer x-y-Auflösung von $2 \mu\text{m}$. Das Farbspektrum steht jeweils in Relation zur maximal erreichten optischen Leistung, so dass nur die Intensitätsverteilung, nicht jedoch die Absolutwerte vergleichbar sind. Um nicht mehr als 50 % der Lichtleistung montagebedingt zu verlieren, muss die Bestückung des Lasers innerhalb der grün gestrichelten -3 dB-Grenze erfolgen.

Beim Vergleich der Profile der Bauelemente mit Linse lassen sich mehrere Zusammenhänge beobachten. Die 3dB-Grenzen werden näherungsweise durch eine Ellipse beschrieben. Die Größe der 3dB-Fläche ist sowohl von der Bauelementcharakteristik, als auch von der Einkoppelstelle, also von der Leiterplatte abhängig. Der kleinste Durchmesser beträgt $35 \mu\text{m}$ und der größte Durchmesser $56 \mu\text{m}$. Des Weiteren zeigt sich, dass mit VCSEL A eine höhere Leistung in die EOCB B eingekoppelt werden kann. VCSEL B wiederum besitzt eine höhere Koppelleffizienz bei EOCB A. Dies lässt sich auf die starke Inhomogenität der Koppelstellen der Versuchsleiterplatten zurückführen (vgl. Bild 23). Bei einer Sendeleistung der VCSEL von $P_{TX} = 2 \text{ mW}$ ergibt sich selbst bei idealer Bestückung mit der gemessenen Empfängerleistung $P_{RX} = 100 \mu\text{W}$ für die gesamte Übertragungstrecke (Einkopplung – Lichtwellenleiter – Auskopplung) eine optische Dämpfung von

$$D_{opt} = 10 \lg \frac{P_{TX}}{P_{RX}} = -13 \text{ dB}. \quad (4.1)$$

Dieser hohe Dämpfungswert kann nur durch starke Streuverluste an den Koppelstellen und im Lichtwellenleiter erklärt werden, da die Einkopplung innerhalb des Akzeptanz-

winkels erfolgt und der horizontale Versatz im Punkt maximaler Lichtleistung gleich Null ist.

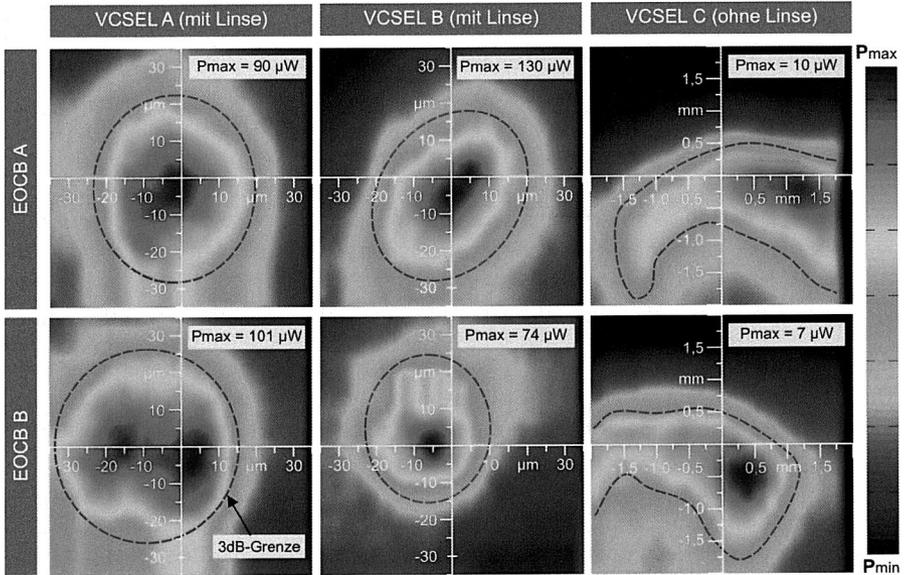


Bild 32: Vergleich der optischen Einkopplung für verschiedene EOCB-BE-Kombinationen bei einer Sendeleistung für alle BE von 2,0 mW

Wie zu erwarten war, zeigt sich bei Bauelementen ohne Linse eine deutlich stärkere Dämpfung von bis zu $D_{opt} = -33$ dB. Auffällig ist vor allem, dass die 3 dB-Grenzen nicht mehr durch Ellipsen beschrieben werden, sondern beliebige, geschlossene Freiformflächen darstellen. Die in 200 μm-Schritten abgerasterte Fläche umspannt ein Gebiet von 4 mm x 4 mm. Aus der Darstellung der Koppelprofile lässt sich ein zulässiger Versatz von über einen Millimeter feststellen. Bei einem Durchmesser des Laserprofils von 300 μm (vgl. Bild 26) und einer Einkopplfläche von 70 μm x 70 μm erscheint dieser Messwert nicht möglich. Zu berücksichtigen ist jedoch die extrem niedrige Maximalleistung $P_{max} = 0,7 \mu W$. Vermutlich wird das Licht nicht nur über den Lichtwellenleiter, sondern über die gesamte optische Lage transportiert, so dass dennoch Licht übertragen wird, obwohl das Profil außerhalb der Koppelstelle ist.

4.6 Zusammenfassung und Ableitung der Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik

Eine kostengünstige, automatisierte Fertigung elektrooptischer Baugruppen setzt die Verfügbarkeit von Bauelementen, Leiterplatten, Prozessen und Anlagen voraus. Zurzeit

sind gehäuste VCSEL für die Montage auf elektrooptischen Leiterplatten am Markt nicht verfügbar. Die im Rahmen dieser Arbeit prototypisch entwickelten Bauelemente im TSSOP-10-ähnlichen Gehäuse lassen sich mit Standardbestückautomaten verarbeiten und erfüllen die Anforderungen der SMT. Die optisch aktive Fläche des VCSEL-Halbleiters ist nach unten gerichtet, so dass der Laser durch ein optisches Fenster der Bauelementunterschale senkrecht auf die Leiterplatte strahlt. Für eine Fokussierung des Lasers auf die Koppelstelle innerhalb der Leiterplatte werden Bauelemente mit einer Kugellinse bereitgestellt.

Die verwendeten, prototypischen Leiterplatten im Euroformat integrieren in der Mittellage in einer Tiefe von 500 μm einen planaren 100 mm langen Lichtwellenleiter mit einer Kantenlänge von 70 μm x 70 μm . Die Koppelstelle stellt einen integrierten 45°-Spiegel dar, der in einem Fräsprozess von der Unterseite der Leiterplatte gefertigt ist. Die Spiegel sind von der Oberseite der Leiterplatte optisch zugänglich und werden durch präzise lokale Marken auf der Lichtwellenleiterenebene referenziert. Die Spiegel weisen aufgrund des Fräsprozesses große Qualitätsunterschiede auf, was jedoch für die Erarbeitung einer geeigneten Montagetechnologie nicht hinderlich ist.

Der realisierte Lasercharakterisierungsmessplatz mit einer spezifischen Bauelementaufnahme und einem kommerziellen Laser beam profiler (Metrolux, BeamLux II) ermöglicht die zerstörungsfreie Aufnahme und Charakterisierung der Laserbausteine. Mit dem Aufbau steht ein Messsystem zur Fernfeldcharakterisierung zur Verfügung und ermöglicht darüber hinaus eine mikrometeregenaue Abrasterung der Koppelstelle des aktiven Lasers in einem Abstand von 55 μm zur Leiterplattenoberfläche.

Die untersuchten VCSEL weisen kein homogenes Gaußprofil auf, so dass die Montage der VCSEL bezüglich des Laserschwerpunktes in Frage gestellt ist. Besonders bei den Bauelementen ohne Linse weicht die Lage des begrenzten Gebietes mit höchster Intensitätsdichte (R-Gebiet) um nahezu 150 μm ab. Untersuchungen zeigen, dass die Intensitätsverteilung vom VCSEL-Strom, der Umgebungstemperatur und der Temperaturbelastung des Reflowprozesses abhängig ist. Ein Einfluss der Betriebsdauer konnte nicht festgestellt werden. Nach einer kurzen Einschwingzeit von wenigen Sekunden bleibt die Temperatur des aktiven VCSEL-Bauelementes konstant bei 33 °C. Grundsätzlich zeigt sich, dass Bauelemente ohne Fokussierung für EOCB mit integrierten LWL nicht geeignet sind. Durch den großen Abstand zwischen VCSEL und LWL (1050 μm) besitzt das Laserprofil einen viermal größeren Durchmesser als die Kantenlänge des LWL. Einkoppeluntersuchungen bestätigen, dass die Verwendung von Bauelementen ohne Linse gegenüber Bauelementen mit Linse eine zusätzliche Dämpfung von -20 dB hervorruft.

Bauelemente mit auf die Leiterplattendimension abgestimmter Linse zeigen gute Einkoppeleigenschaften. Die Dämpfung von -13 dB der gesamten optischen Strecke ist

vorwiegend auf die Spiegel- und LWL-Qualität zurückzuführen; die Überstrahlung bewirkt lediglich eine Dämpfung von $-0,62$ dB. Die hohe Bestückgenauigkeit von $\pm 20 \mu\text{m}$ kann nur durch Messung der Laserposition während des Bestückprozesses erreicht werden, da der VCSEL-Halbleiter eine Positioniergenauigkeit von $\pm 50 \mu\text{m}$ bezüglich des Leadframes besitzt. Die Ausrichtung des Bauelementes bezüglich der Öffnung an der Unterseite des Bauelementes oder bezüglich der Linse durch eine passive Messung kann nicht angewendet werden, da einerseits aufgrund der Linse die Laseröffnung nicht sichtbar ist, außerdem die Linse zusätzlich einen Versatz zum VCSEL aufweist (vgl. Bild 33).

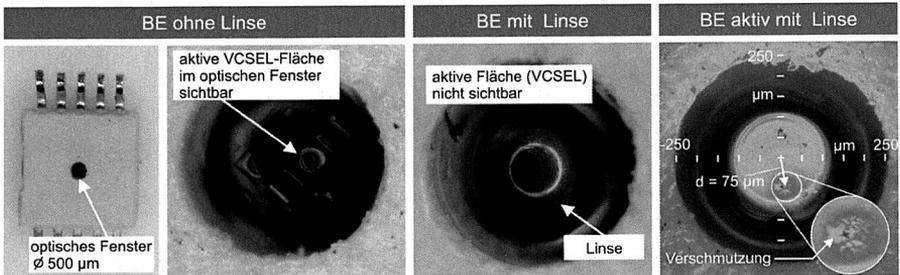


Bild 33: Darstellung des optischen Fensters von Bauelementen ohne und mit Linse
Die Lage des VCSEL bei Bauelementen mit Linse ist nur im aktiven Zustand sichtbar.

Besonders kritisch erweist sich bei den genannten Baugruppendimensionen die Verkippung des Lasers. Eine Verkippung von lediglich 3° nach der Platzierung des Lasers führt zu einem Leistungsverlust von ca. 50 %. Daher ist eine ausreichende Fixierung nach der Platzierung des Bauelementes zu gewährleisten. Für die aktive Montage ist wie bei den Bauelementen ohne Linse das R-Gebiet und nicht der Schwerpunkt des Laserprofils gegenüber dem LWL auszurichten. Zur Bestimmung des idealen Koppelpunktes ist der Ort des Leistungsmaximums innerhalb des Laserprofils nicht geeignet.

5 Entwicklung von Montageprozessen für die elektrooptische Aufbau- und Verbindungstechnik

Standardprozesse der elektrischen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) werden mit einem hohen Automatisierungsgrad in der Industrie eingesetzt. Die optische AVT auf Leiterplattenebene dagegen wird noch größtenteils manuell durchgeführt. Der Grund hierfür liegt in der im Gegensatz zu Standard-SMT gestiegenen Anforderung bei der Montage optischer Komponenten und den bislang fehlenden Fertigungsprozessen [18] [19]. Ziel ist es, eine hybride EOAVT (elektrooptische AVT) zu entwickeln, welche es ermöglicht, die Montage elektrischer als auch elektrooptischer Komponenten in einem modifizierten System mit angepassten Prozessen im größtmöglichen Maß zu automatisieren. Ausgehend von der Darstellung der wesentlichen Anforderungen an die optische AVT werden alternative Positionierkonzepte diskutiert. Anschließend werden Möglichkeiten zur Steigerung der Bestückgenauigkeit von heute verfügbaren Bestückautomaten aufgezeigt und schließlich Lösungsansätze für die bei der optischen AVT erforderliche Fixierung der Bauelemente diskutiert, wobei die Eignung von Klebstoffen für die Fixieraufgabe experimentell vertiefend untersucht wird. Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Darstellung einer möglichen durchgängigen Prozesskette für eine automatisierte, hybride EOAVT.

5.1 Herausforderung der optischen AVT

Die Entwicklung einer geeigneten elektrooptischen AVT, also die Kombination der elektrischen und optischen AVT muss in Anlehnung an die klassische SMT erfolgen. Die Prozesse der Verbindungstechnik (Pastenauftrag und Lötén) können für die elektrooptische AVT direkt übernommen werden. Der Bestückprozess dagegen erfordert aufgrund der spezifischen Anforderungen eine entsprechende Modifikation der Produktionsanlage und der Einzelprozesse. Im Vergleich zur elektrischen AVT existieren bei der optischen AVT grundsätzlich vier neue Herausforderungen (Bild 34).

Ausrichtung und Bestückgenauigkeit: Bei der Bestückung der elektrischen Bauelemente werden die elektrischen Anschlussflächen von Bauelement und Leiterplatte zueinander ausgerichtet und in Deckung gebracht, bevor das Bauelement auf der Leiterplatte abgesetzt wird. Das elektrische Layout von Bauelement und Leiterplatte ist somit maßgebend für die notwendige Bestückgenauigkeit, die bei Hochleistungsbestückautomaten je nach Ausführung zwischen $30\ \mu\text{m}$ und $40\ \mu\text{m}$ (3σ) beträgt. Nach [92] wird in den nächsten fünf Jahren eine Bestückgenauigkeit von weniger als $10\ \mu\text{m}$ gefordert werden. Neben der Ausrichtung der elektrischen Anschlussflächen sind bei der Bestückung optischer Bauelemente aber auch die optischen Wirkflächen zueinander auszurichten. Diese Forderung stellt höhere Ansprüche an die AVT, da in der optischen Technologie wesentlich geringere Abmessungen vorliegen. Der Durchmesser des Laseraustritts im

VCSEL beträgt z. B. lediglich 15 μm . Die Analysen des vorangegangenen Kapitels zeigen, dass sich daraus eine absolute Bestückgenauigkeit von $\pm 20 \mu\text{m}$ für Bauelemente mit Linse ergibt. Dies übersteigt deutlich die Fähigkeit verfügbarer Standard-Bestückautomaten, so dass langfristig Bestückautomaten mit höherer Bestückgenauigkeit erforderlich sind. Kurzfristig sind Maßnahmen unter Einbußen des Durchsatzes zu identifizieren, die heute schon eine Montage optischer Komponenten ermöglicht.

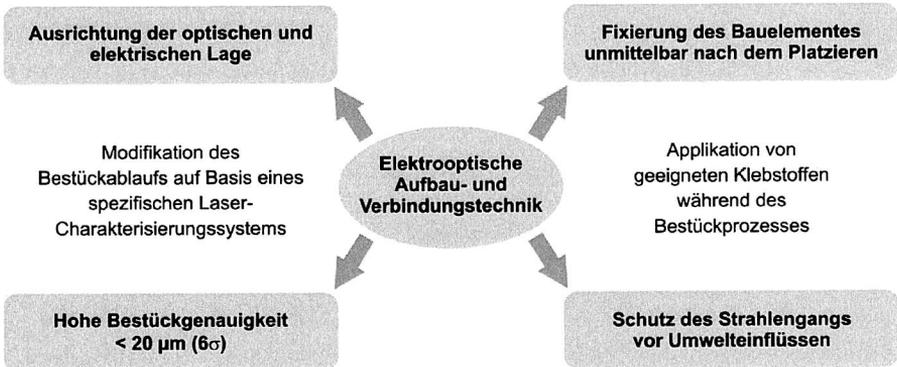


Bild 34: Spezifische Herausforderungen der elektrooptischen AVT

Fixierung und Schutz: Aufgrund der hohen Anforderungen an die Positionstreuung des Laserstrahls relativ zur Einkoppelstelle ist die Fixierung des Bauelementes exakt in der platzierten Position zwingend erforderlich. Bereits kleinste Positionsabweichungen von wenigen Mikrometern z. B. durch Vibrationen des LP-Transportes oder Erschütterungen bei der Handhabung der Leiterplatte können zu einer Fehlkopplung des Laserstrahls führen. Zudem kommt vor allem vor dem Hintergrund des Einschwimmeffektes beim Reflowlöten dem Aspekt der Fixierung besondere Bedeutung zu. Durch die Selbstzentrierung des Bauelementes bezüglich der elektrischen Pads in der Liquidusphase verschiebt sich zwangsläufig auch der Laserstrahl zusammen mit dem Bauelement, so dass es zum Totalausfall der optischen Kopplung kommt. In der elektrischen AVT werden aufgrund des Einschwimmeffektes gewisse Bestückgenauigkeiten toleriert und teilweise gezielt berücksichtigt. Bei der optischen AVT muss dieser Effekt verhindert werden. Desweiteren kann es im Reflowprozess zu einer Verkippung des Bauelementes führen, die ebenfalls verhindert werden muss. Darüberhinaus führen die Verarbeitung oberflächenmontierbarer Sender- und Empfängerbauelemente und der Ansatz der Freistrahkopplung dazu, dass der optische Strahlengang freigestellt und somit störanfällig für Umwelteinflüsse ist. Vor dem Hintergrund einer zuverlässigen optischen Übertragungsstrecke stellt dieser Aspekt eine Herausforderung an die Aufbau- und Verbindungstechnik dar.

5.2 Positionierkonzepte für die elektrooptische AVT

Im vorausgegangen Abschnitt wurde die Ausrichtung der elektrischen und gleichzeitig der optischen Lage als Herausforderung bei der Montage identifiziert. Hierfür werden nachfolgend drei alternative Konzepte vorgestellt, hinsichtlich der Positionstoleranzen diskutiert und abschließend anhand von technisch-wirtschaftlichen Kriterien bewertet.

5.2.1 Alternative Positionierkonzepte

Für die Ausrichtung der elektrooptischen Senderbauelemente existieren nach [125] drei alternative Justagekonzepte: „passive Bestückung“, „aktive Bestückung“ und „teilaktive Bestückung“. Bei der passiven Ausrichtung des Bauelementes wird das Bauelement ohne Inbetriebnahme platziert. Sowohl bei der aktiven als auch teilaktiven Montage wird das Bauelement eingeschaltet und bezüglich der Laserposition bestückt. Bild 35 zeigt eine Gegenüberstellung der jeweiligen Verfahrensabläufe. Bei allen drei Verfahren wird die Leiterplatte zunächst in den Bestückbereich transportiert, anschließend geklemmt und nach dem Bestücken ins Ausgabeband gefahren. Nachfolgend wird der Begriff „optische Zentrierung“ ausschließlich für die Lagebestimmung des Bauelementgehäuses bzw. der Leiterplatte verwendet. Um eine Verwechslung zu vermeiden, wird die Positionsbestimmung des Lasers geeignet umschrieben.

Die „passive Bestückung“ ist stark an die Bestückung elektrischer Bauelemente angelehnt. Zunächst wird der Sollbestückpunkt, also die Lage der Einkoppelstelle, anhand präziser lokaler Marken mit der LP-Kamera bestimmt. Nach dem Greifen des Bauelementes erfolgt die optische Zentrierung mit der BE-Kamera. Zusätzlich aufgebrachte hochpräzise Strukturen, wie z. B. Referenzmarken oder passgenaue Leads, charakterisieren dabei die Lage des integrierten VCSEL, so dass eine Ausrichtung des Bauelementes bezüglich der optisch aktiven Fläche möglich ist.

Bei der „aktiven Bestückung“ handelt es sich im eigentlichen Sinn um eine geregelte Positionierung. Die Lage des Bauelementes wird solange korrigiert, bis die ideale Position hinsichtlich einer maximalen Lichteinkopplung erreicht ist. Im ersten Prozessschritt wird die Leiterplatte optisch mit den globalen Marken zentriert. Eine ungefähre Lagebestimmung ($\pm 30 \mu\text{m}$) der Einkoppelstelle ist dabei ausreichend, so dass auf lokale Marken verzichtet werden kann. Im nächsten Schritt wird das Bauelement von einem speziellen Greifer abgeholt, über der BE-Kamera optisch zentriert und anschließend zur Bestückstartposition bewegt. Mit einer zusätzlichen Aktorik wird ein Lichtleistungssensor über der Auskoppelstelle positioniert. Die anschließende Aktivierung des Lasers erfolgt über eine angepasste elektrische Kontaktierung am Greifer, so dass ein Teil des emittierenden Lichts in den LWL eingekoppelt wird. Zeitgleich erfasst der empfängerseitig positionierte Lichtsensor die übertragene Lichtleistung. Die Position des Senders wird so lange korrigiert, bis eine ideale Einkopplung mit maximaler Lichtleistung am Empfänger erreicht ist. Schließlich wird das Bauelement in seiner Endlage platziert.

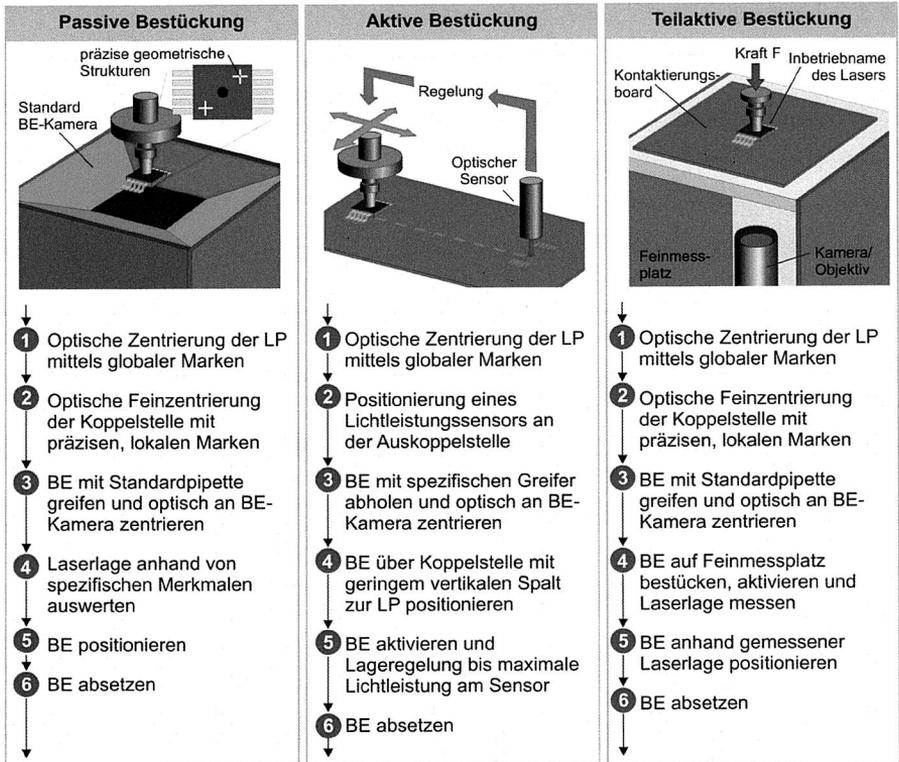


Bild 35: Verfahrensabläufe alternativer Montagekonzepte für die optische AVT

Die „teilaktive Bestückung“ stellt eine Kombination aus der passiven und aktiven Bestückung dar. Nach der Leiterplattenklemmung wird die Sollbestückposition wie bei der passiven Montage anhand von lokalen Marken bestimmt. Nach der optischen Zentrierung des Bauelementes erfolgt in einem anschließenden Prozessschritt zusätzlich die Messung der Laserposition. Der Laseraustritt des VCSEL stellt dabei nicht die ideale Referenz dar, da aufgrund der möglichen Neigung des Lasers die abbildende Fläche des Lasers im Arbeitsabstand (Abstand zwischen VCSEL und LWL) versetzt ist. Zur Messung der Laserlage im Arbeitsabstand ist eine spezifische Messstation, nachfolgend Feinmessplatz genannt, erforderlich. Das Bauelement wird auf dem Kontaktierungsboard (vgl. Bild 35) bezüglich der elektrischen Anschlussstrukturen zentriert platziert und optisch aktiviert. Der Laser wird von einem optischen System, z. B. ein laser beam profiler wie bei den Analysen in Kapitel 2 angewendet, im Fokus des Arbeitsabstandes erfasst und dessen Lage bezüglich des Greifers ermittelt. Die anschließende Bestückung des Bauelementes erfolgt passiv, wobei der gemessene Versatz zur elek-

trischen Bestückposition addiert wird. Die elektrische Inbetriebnahme des Bauelementes am Feinmessplatz dient zugleich als Funktionstest, so dass fehlerhafte Bauelemente zuverlässig erkannt und abgeworfen werden. Darüberhinaus ist eine Toleranzanalyse der Abstände zwischen der geometrischen und optischen Lage durch Fusionierung der Versatzdaten der Bauelementkamera und des Feinmessplatzes möglich. Unter der Voraussetzung einer sicheren Fixierung des Bauelementes lässt sich somit noch vor dem Bestücken eine Vorhersage über den resultierenden side overhang (SO) und toe overhang (TO) des Leads machen. Dabei stellt der SO den seitlichen Überhang des Beinchen und TO den Überhang in Richtung der Beinchen spitze gegenüber den Pads. Nach [12] sinkt die mittlere Lebensdauer mit größer werdenden SO, so dass bei Überschreitung der zulässigen Toleranzen nach [82] das Bauelement nicht bestückt wird.

5.2.2 Toleranzbetrachtung zu den alternativen Montagekonzepten

Für die Bestückung elektronischer Bauelemente werden in entsprechenden Normenwerken Kriterien für die Abnahme anhand von zulässigen Versatztoleranzen angegeben. Das Normwerk IPC-A-610 [82] gibt die zulässigen Grenzwerte für den Überstand der elektrischen Anschlüsse (Pins, Leads, Balls u. a.) zu den Anschlussflächen auf dem Substrat (Pads) an. Bei Konsumerprodukten und Elektronikbaugruppen mit gestiegenen Anforderungen (Klasse 1 und 2) ist ein Versatz der halben Beinchenbreite zulässig. Für Hochleistungs-Elektronikprodukte (Klasse 3) wird dagegen nur ein Viertel der Beinchenbreite toleriert. Für die Beurteilung des Bestückprozesses elektrooptischer Bauelemente muss diese Forderung um Aussagen zur Relation zwischen der optischen zur elektrischen Lage erweitert werden. Bild 36 zeigt am Beispiel des im TSSOP-10 gehäuseten VCSEL die relevanten Abstände in Bezug zur Koppelstelle der EOCB für den resultierenden TO. Die Darstellung für den SO erfolgt analog.

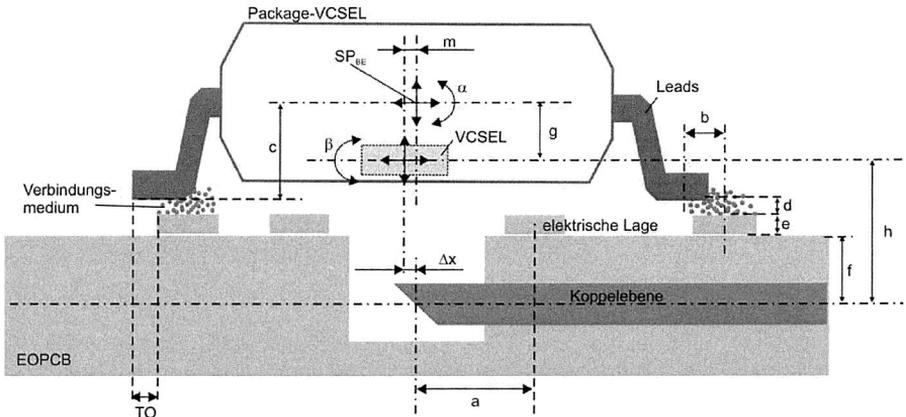


Bild 36: Darstellung der relevanten Abstände bestückter VCSEL bezüglich der optischen Achse. Die Abkürzungen sind in Tabelle 3 beschrieben.

Die angegebenen Toleranzen in Tabelle 3 basieren auf gängigen Werten der Leiterplattenfertigung nach [75] und sind um die ermittelten Messdaten der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Leiterplatten und entwickelten Bauelemente ergänzt. Der maximal zulässige optische Versatz Δx beträgt $20 \mu\text{m}$, die Arbeitshöhe h beträgt $1200 \mu\text{m}$.

Tabelle 3: Typische Toleranzwerte eines bestückten optischen Bauelementes auf einer elektrooptischen Leiterplatte mit integrierter Kopplung [75]

Sym- bol	Beschreibung	Typische Toleranzwerte
a	Abstand zwischen optischer und elektrischer Lage	$T_a = \pm 5 \mu\text{m}$
b	Bauelementversatz (Leads)	$T_b = \pm 50 \mu\text{m}$
c	Abstand zwischen Beinchenunterseite und BE-Schwerpunkt	$T_c = \pm 20 \mu\text{m}$
d	Lotpastenhöhe	$T_d = \pm 35 \mu\text{m}$
e	Kupferdicke der elektrischen Lage	$T_e = \pm 5 \mu\text{m}$
f	Vertikaler Abstand zwischen LP-Oberseite und Lichtwellenleiter	$T_f = \pm 90 \mu\text{m}$
g	Vertikale Position des VCSEL relativ zum Schwerpunkt des BE	$T_g = \pm 30 \mu\text{m}$
m	Horizontale Position des VCSEL relativ zum Schwerpunkt des Bauelementes	$T_m = \pm 50 \mu\text{m}$
α	Verkipfung des VCSEL relativ zum Gehäuse	$T_\alpha = \pm 2^\circ$
β	Verkipfung des Bauelementes relativ zur Leiterplatte	$T_\beta = \pm 2^\circ$

Mit der nachfolgend aufgeführten Toleranzbetrachtung wird das Potenzial für die Verarbeitung von toleranzbehafteten Bauelementen im Vergleich zu hochpräzisen Komponenten diskutiert und hinsichtlich der vorher beschriebenen Montagekonzepte bewertet. Für den Vergleich der vier möglichen Fälle

- passive Bestückung mit hochpräzisen Bauelementen
- passive Bestückung mit toleranzbehafteten Bauelementen
- aktiv geregelte Bestückung mit toleranzbehafteten Bauelementen
- teilaktive Bestückung mit toleranzbehafteten Bauelementen

wird die arithmetische Maß- bzw. Toleranzkettenberechnung angewendet, also der ungünstigste Fall angenommen. Dieser Berechnungsmethode liegt zugrunde, dass die Istmaße beliebig im Toleranzfeld liegen dürfen, also auch gehäuft in der Nähe der Grenzmaße (vgl. [88]), was im Fall der zu analysierenden Konstruktion gegeben ist. Diese Berechnungsmethode erlaubt außerdem nach [55] eine einfache Bestimmung

des resultierenden Schließmaßes, um die Montierbarkeit der genannten Bestückmethoden vergleichen zu können.

Toleranzanalyse der passiven Bestückung

Bei der passiven Montage wird das Bauelement mit Hilfe der optischen Zentrierung bezüglich der elektrischen Anschlussstrukturen ohne Inbetriebnahme des Lasers positioniert. Die Sollbestückposition wird anhand von Referenzmarken auf der Leiterplatte ermittelt. Im Gegensatz zur Standardbestückung wirkt sich bei Montage der optischen Komponenten eine Verkippung des Bauelementes signifikant auf den optischen Versatz aus. Geht man zunächst von einer idealen Standardbestückung aus, sind die elektrischen Wirkflächen ohne Versatz zueinander ausgerichtet, so dass

$$b = 0 \quad (5.1)$$

und der optische Versatz

$$\begin{aligned} \Delta x &= T_m + T_a + T_g \sin(T_\alpha) + (h + T_f + T_e + T_d + T_c - g \cos T_\alpha) \tan(T_\alpha + T_\beta) \\ &= 146,3 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (5.2)$$

mit den typischen Toleranzen nach Tabelle 3 bei einer Einbauhöhe des VCSEL von $g = 30 \mu\text{m}$ und einem Abstand des VCSEL zum Lichtwellenleiter $h = 1200 \mu\text{m}$ ist. Die maximal zulässige Abweichung für den optischen Versatz beträgt $\Delta x = 20 \mu\text{m}$ und wird somit selbst bei der hypothetisch vorausgesetzten idealen Bestückung um das 7-fache überschritten.

Die geforderte Genauigkeit kann allerdings im Halbleiter-Bereich mittels präzisen Komponenten erreicht werden. Ohne das Gehäuse ergibt sich für $T_m = 0$ und mit genauen Referenzmarken kann die optische Lage exakt ermittelt werden, so dass auch $T_a = 0$ anzunehmen ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch der Einsatz von Keramik- oder Dünnglassubstraten. Bei der Montage von Flip-Chips verbleiben somit die Ungenauigkeiten der Produktionsanlage und mögliche prozessbedingte Verkippungen des Bauelementes. Für diesen zweiten Fall reduziert sich außerdem der Arbeitsabstand auf $h = 500 \mu\text{m}$, so dass bei einer Verkippung von 1° der optische Versatz $\Delta x = 9 \mu\text{m}$ beträgt. Mit einem Bestückautomaten mit einer Genauigkeit von $20 \mu\text{m}$ (6σ) wäre somit die passive Montage denkbar.

Bei der passiven Montage mit toleranzbehafteten Komponenten werden die Bauelemente bezüglich geometrischer Merkmale, welche die optische Position bestimmen, bestückt. Diese geometrischen Merkmale können z. B. Referenzmarken auf dem Bauelement oder die optisch aktive Fläche des VCSEL selber sein. Der Bestückprozess entspricht mit geringen Erweiterungen bzw. Modifikationen dem Standard-SMT-Prozess. Die optische Zentrierung der Leiterplatte und somit die Lagebestimmung der Koppelstelle erfolgt mittels der optischen Zentrierung anhand globaler und zusätzlich

präziser lokaler Referenzmarken. Der Prozess für die optische Bauelementzentrierung erfordert jedoch geringfügige Modifikationen, um z. B. die Position der lichtemittierenden Fläche zu bestimmen. Einerseits muss die lichtemittierende Fläche für das Visionsystem optisch zugänglich sein, und zusätzlich erfordert die Messaufgabe eine angepasste Auflösung, so dass die aktive Fläche mit einem typischen Durchmesser von $15\ \mu\text{m}$ eindeutig erkannt werden kann. Für den optischen Versatz erhält man nach Bild 36 mit Tabelle 3 einen optischen Versatz von

$$\begin{aligned}\Delta x &= (\lambda + T_f + T_e + T_d + T_c - g \cos T_\alpha) \tan(T_\alpha + T_\beta) \\ &= 90,9\ \mu\text{m}\end{aligned}\quad (5.3)$$

und einen Bestückversatz von

$$b = T_m + T_a = 55\ \mu\text{m}.\quad (5.4)$$

Bei dieser Montagevariante ist der Ausgleich eines schräg strahlenden Lasers nicht möglich. Somit führen prozessbedingte Verkippungen des Bauelementes zu einem Versatz außerhalb der geforderten Toleranz. Der Versatz zwischen den Bauelementbeinchen und dem Leadframe mit $b = 55\ \mu\text{m}$ ist hinsichtlich der Anforderungen an die elektrische Verbindung gemäß des Normwerks IPC 610 [82] unkritisch. Die passive Montage toleranzbehafteter Bauelemente mit den typischen Werten nach Tabelle 3 ist jedoch aus technischer Sicht nicht geeignet.

Geregelte aktive Bestückung von toleranzbehafteten Bauelementen

Mit der aktiven Montage wird im Gegensatz zur passiven Montage das Bauelement so bestückt, dass der optische Versatz

$$\Delta x = 0\quad (5.5)$$

und der Bauelementversatz analog zum optischen Versatz nach Gleichung (5.2)

$$\begin{aligned}b &= T_m + T_a + T_g \sin(T_\alpha) + (\lambda + T_f + T_e + T_d + T_c - g \cos T_\alpha) \tan(T_\alpha + T_\beta) \\ &= 146,3\ \mu\text{m}\end{aligned}\quad (5.6)$$

ist. Mit einer Beinchenbreite eines TSSOP-10-Bauelementes von $220\ \mu\text{m}$ und einer Padbreite von $300\ \mu\text{m}$ ergibt sich für den Seitenüberstand $SO = 101,3\ \mu\text{m}$. Dieser maximale Seitenüberstand ist nach dem Normwerk IPC 610 [82] für Elektronikbaugruppen der Klasse 1 und 2 zulässig, für Hochleistungsbaugruppen der Klasse 3 jedoch nicht. Durch Anpassung des Designs hinsichtlich der Paddimension und des optischen Arbeitsabstandes können auch Baugruppen der Klasse 3 gefertigt werden. Zur Auslegung des Designs elektrooptischer Baugruppen ist Gleichung (5.6) für den Bauelementversatz mit der Beziehung für den seitlichen Überstand

$$SO = \text{Baelementversatz} - \frac{\text{Padbreite}}{2} - \frac{\text{Beinchenbreite}}{2}$$

mit

$$SO < \frac{\text{Beinchenbreite}}{2} \quad \text{bzw.} \quad SO < \frac{\text{Beinchenbreite}}{4} \tag{5.7}$$

zu verwenden. Mit Erfüllung dieser Bedingung sind die Anforderungen der elektrischen und optischen Positionierung gewährleistet.

Teilaktive Bestückung mit toleranzbehafteten Bauelementen

Die Bestückung nach dem Prinzip der teilaktiven Montage erfolgt mittels Messung der Laserlage im optischen Arbeitsabstand und anschließender Positionskorrektur, so dass der Laserstrahl des VCSEL in LWL koppelt. Idealerweise beträgt der optische Versatz $\Delta x = 0 \mu\text{m}$. Somit gelten auch für diesen Fall die entworfenen Designrules nach Gleichung (5.7) für elektrooptische Baugruppen. Konstruktions- und prozessbedingt sind jedoch mit diesem Verfahren nicht alle Abweichungen ausreichend genau messbar, so dass ein optischer Versatz verbleibt. Die wesentlichen konstruktionsbedingten Einflussgrößen bei der Messung der Laserlage mit dem Feinmessplatz sind in Bild 37 dargestellt.

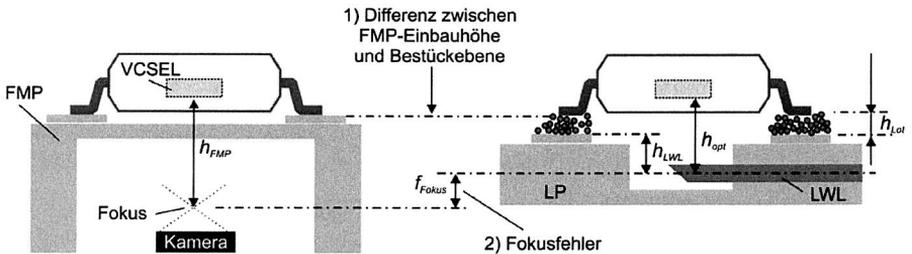


Bild 37: Konstruktionsbedingte Einflussgrößen auf den optischen Versatz mit der teilaktiven Montage

Aufgrund des geneigten Abstrahlwinkels des VCSEL ist der optische Versatz vom optischen Arbeitsabstand abhängig. Nur durch Charakterisierung des Laserstrahls in der richtigen Fokusebene kann der Einfluss der Verkippung eliminiert werden. Einen weiteren Einfluss stellt die Höhe des Verbindungsmediums dar. Sie ist zur richtigen Fokuseinstellung bei der Konstruktion des Feinmessplatzes zu berücksichtigen und setzt einen sicheren Lotpastenauftrag voraus. Bei der Bestückung stellt die Leiterplattenoberseite die Bestückerbene dar. Stimmt die FMP-Einbauhöhe mit dieser Bestückerbene nicht überein, ergibt sich ein zusätzlicher Versatz aufgrund von Ungenauigkeiten der z-Achse. Im Wesentlichen trägt jedoch der Fokusfehler zum optischen

Versatz bei. Prozessbedingte Einflussgrößen auf den Fokusfehler sind in Bild 38 dargestellt.

Aufgrund der Federwirkung der peripheren Anschlussbeinchen bestimmt die Bestückkraft den Fokusfehler. Darüberhinaus hängt die Eindringtiefe des Bauelementes in das Verbindungsmedium von der Bestückkraft ab. Die Wahl der Bestückkraft muss sich daher bei der Auslegung des Bestückprozesses an die gewünschte Eindringtiefe in die Lotpaste in Abhängigkeit der Einbauhöhe des FMP richten. Die Eindringtiefe des Bauelementes ist darüberhinaus vom Volumen des Pastendepots abhängig, so dass sich Prozessschwankungen bei der Transfereffizienz der Lotpaste auf den Fokusfehler auswirken. Das Bestückverfahren erfordert daher einen stabilen Prozess für den Lotpastenauftrag. Die Streuung der Transfereffizienz kann z. B. durch den Einsatz von nanobeschichteten Schablonen signifikant gesenkt werden [93].

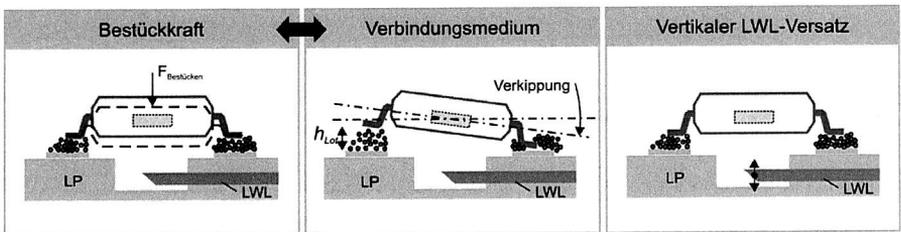


Bild 38: Prozessbedingte Einflussgrößen auf den Fokusfehler am FMP

Eine weitere Ungenauigkeit resultiert aus den Schwankungen der vertikalen Position des Lichtwellenleiters innerhalb der Leiterplatte. Mittels erweiterter Messtechnik zur Bestimmung der vertikalen LWL-Lage ist ein Ausgleich möglich. Auf Basis des Triangulationsverfahrens wird bei modernen Bestückautomaten die Leiterplattenhöhe punktuell abgetastet, um die Leiterplattenverwölbung zu bestimmen, so dass eine Steigerung der Bestückgenauigkeit erreicht wird [74]. Diese Funktion ist auch im Bestückprozess elektrooptischer Leiterplatten einsetzbar, um die vertikale Lage des Lichtwellenleiters zu bestimmen. Durch diesen zusätzlichen Messschritt können die Höhe des Feinmessplatzes und der Fokus des Messsystems individuell für jede zu bestückende Leiterplatte justiert werden. Konstruktiv muss hierfür der Feinmessplatz über einen Antrieb in der Höhe positionierbar sein und das optische Messsystem eine Fokusanpassung ermöglichen. Ohne Berücksichtigung der beschriebenen Korrekturmaßnahmen des Fokusfehlers f_{Fokus} (Bild 37) ergibt sich für den optischen Versatz nach Bild 36 mit Tabelle 3

$$\begin{aligned} \Delta x &= T_a + f_{\text{Fokus}} \tan(\alpha + \beta) \\ &= T_a + (T_f + T_e + T_d + T_g) \tan(\alpha + \beta) = 14,7 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Der resultierende optische Versatz ist zusätzlich von der Positioniergenauigkeit des Bestücksystems abhängig. Um den maximal zulässigen Versatz von $20\ \mu\text{m}$ einzuhalten ist ein Bestückautomat mit einer Positioniergenauigkeit von $2\ \mu\text{m}$ (3σ) notwendig. Mit der Toleranzanalyse wird deutlich, dass die teilaktive Bestückung Potenzial aufweist. Für die Umsetzung ist eine Produktionsanlage mit entsprechender Bestückgenauigkeit und Erweiterung des Bestückablaufs zur Messung der Laserlage erforderlich.

5.2.3 Vor- und Nachteile der alternativen Montagekonzepte

Für den Vergleich der unterschiedlichen Montagevarianten sind vor allem die Gewährleistung der elektrischen und optischen Funktion, die Komplexität der Prozesse und die damit verbundene Anlagentechnik relevant. In Bild 39 werden die drei möglichen Montagekonzepte hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile gegenübergestellt. Die optische Zentrierung der Leiterplatte erfolgt bei allen drei Varianten mittels der Leiterplattenkamera. Die Lagebestimmung der Einkoppelstelle bedarf bei der passiven und teilaktiven Bestückung zusätzlich hochpräziser lokaler Marken, die auf der optischen Lage aufgebracht sind. Nur so kann eine mikrometeregenaue Positionsbestimmung garantiert werden. Die aktive Montage kommt ohne zusätzliche Marken aus, was sich auf den Herstellprozess der optischen Leiterplatten positiv auswirkt.

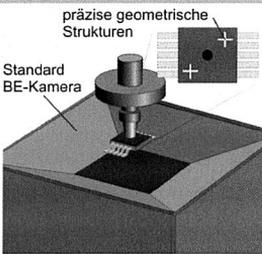
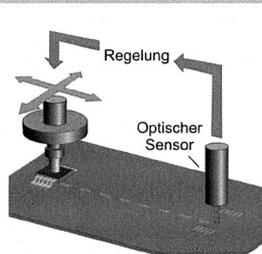
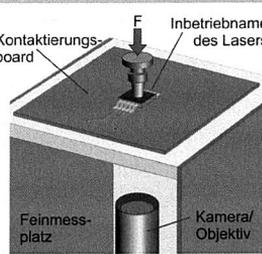
Passive Bestückung	Aktive Bestückung	Teilaktive Bestückung
 <p>präzise geometrische Strukturen</p> <p>Standard BE-Kamera</p>	 <p>Regelung</p> <p>Optischer Sensor</p>	 <p>Kontaktierungs-board</p> <p>Inbetriebnahme des Lasers</p> <p>Feinmessplatz</p> <p>Kamera/Objektiv</p>
<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Hochpräzise lokale Fiducials ⊕ Bestückablauf wie im Standardprozess ⊕ Nur sehr geringe Maschinenmodifikation erforderlich ⊖ Aufwand wird auf den BE-Hersteller verlagert, da hochpräzise Komponenten erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Standard Fiducials ⊕ Hohe Koppelleffizienz ⊕ Toleranzbehafete, preiswerte Komponenten verarbeitbar ⊖ Komplexer Greifer zur Aktivierung des Lasers erforderlich ⊖ Komplexer Regelprozess ⊖ Kritischer Prozess bei Positionskorrektur wegen bereits bedruckter Lotpaste 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hochpräzise lokale Fiducials ⊕ Gute Koppelleffizienz ⊕ Toleranzbehafete, preiswerte Komponenten verarbeitbar ⊕ Moderate Maschinenenerweiterung erforderlich ⊕ Hohe Prozesszuverlässigkeit ⊖ Erhöhte Prozesszeit durch zusätzlichen Messschritt

Bild 39: Vor- und Nachteile der alternativen Montagekonzepte (vgl. [125])

Die passive Bestückung weist im Vergleich zu den alternativen Montagekonzepten den geringsten Modifikationsgrad zur Anpassung der Produktionsanlage auf. Geringe Änderungen des Auswertelgorithmus in der Software des Visionssystems ermöglichen es,

die Leads und zusätzlich aufgebrachte Marken auszuwerten. Somit sind Standardanlagen mit dem typischen Bestückablauf einsetzbar. Voraussetzung für solch eine passive Bestückung stellt jedoch der Einsatz hochgenauer Komponenten dar. Hierbei ist zu unterstreichen, dass die Herstellung von gehäuteten Bauelementen die geforderten Toleranzen der optischen Kopplung deutlich übersteigen. Ein Zuwachs an Genauigkeit muss im Allgemeinen teuer erkaufte werden, so dass die Prozesskosten lediglich auf den Bauelementhersteller verlagert werden, und somit keine Lösung im Sinne einer technisch-wirtschaftlichen Montage bietet.

Der Vorteil der aktiven Justage liegt eindeutig in der hohen Koppelleffizienz begründet, selbst mit toleranzbehafteten Komponenten. Der Prozess wird jedoch zusätzlich zur nachteiligen erheblichen Maschinenmodifikation als äußerst kritisch eingestuft. Die Ausrichtung des Bauelementes erfolgt bei aktiviertem Laser, indem die eingekoppelte Lichtleistung gemessen wird. Um den optischen Arbeitsabstand einzuhalten, muss das Bauelement hierfür nahezu auf der Leiterplatte aufgesetzt sein. Dies bedeutet, dass die Bauelementbeinchen während dieser aktiven Positionskorrektur in die Lotpaste eintauchen. Aufgrund von Bauelement- und Leiterplattentoleranzen ist eine Positionskorrektur von bis zu 150 µm notwendig. Dadurch wird die Lotpaste verschmiert und begünstigt die Bildung typischer Fehler wie z. B. Lotperlen oder Brückenbildung. Alternativ könnten für die Montage der optischen Bauelemente Leitlebstoffe zum Einsatz kommen, um so die typischen Fehler zu vermeiden. Auf eine vertiefende technisch-wirtschaftliche Analyse dieses Alternativverfahrens sei an dieser Stelle hingewiesen. Anlagentechnisch sind geeignete Bestückkopflösungen zu entwickeln, die das gleichzeitige Aktivieren von Sender und Empfänger ermöglichen. Das Greifen mittels Vakuum ist bei diesem Verfahren nicht möglich, da einerseits die elektrische Kontaktierung eine ausreichende Gegenkraft erfordert und außerdem der Haftreibung zwischen Lot und Bauelementbeinchen entgegengewirkt werden muss. Vakuumwerte von -900 mbar, wie sie typischerweise in SMD-Bestückautomaten verwendet werden, sind hierfür nicht ausreichend. Neben der deutlich höheren Anlagenkomplexität zeigt sich die zu erwartende hohe Prozesszeit nachteilig.

Die teilaktive Bestückung vereint die wesentlichen Vorteile der beiden zuvor genannten Montagekonzepte. Einerseits wird eine gute Koppelleffizienz durch eine optimierte Bestückposition bezüglich optischer Merkmale erzielt. Auf der anderen Seite zeigt sich die Komplexität der Produktionsanlage im Gegensatz zur aktiven Montage gering. Die Verarbeitung der Bauelemente ist mit einem Standard-Vakuumgreifer möglich. Der technologische Vorteil dieser Variante liegt darin begründet, dass der Einfluss des Kippwinkels des Lasers größtenteils ausgeglichen werden kann. Der verbleibende Messfehler ist auf den Fokusfehler im Messsystem zurückzuführen. Durch Integration weiterer Messtechnik zur Bestimmung des optischen Arbeitsabstandes und des Lotpastenvolumens ist eine weitere Steigerung der Bestückgenauigkeit bei der teilaktiven Montage zu erwarten.

Fazit: Die geführte Diskussion in diesem Abschnitt hat gezeigt, dass sowohl die passive Bestückung als auch die Bestückung mittels Aktivierung des Bauelementes ihre Daseinsberechtigung haben. Der befürwortete Ansatz der aktuellen Fachwelt (vgl. Abschnitt 3.3) ist die passive Montage. Dies wird mit dem Vorteil begründet, Anlagen und Prozesse nicht anpassen zu müssen. Im Gegenzug werden präzise und damit teure Komponenten eingesetzt, die den Toleranzanforderungen gerecht werden. Dieser Ansatz entspricht jedoch nicht der Strategie der SMT. Um den über die Jahre gestiegenen Anforderungen bei der AVT zu begegnen, sind die Produktionsanlagen durch zusätzliche Messstationen wie z. B. die Bauelementkamera, Koplanaritätssensor und Höhenmessung von Leiterplatten kontinuierlich erweitert worden [120]. Mit der Methode der teilaktiven Justage bleibt der grundlegende Bestückprozess erhalten. Entsprechend der Historie wird auch hier der Bestückprozess durch Integration eines zusätzlichen Messplatzes erweitert. Daher wird der teilaktiven Montage das höchste Realisierungspotenzial zugeschrieben.

5.3 Methoden zur Steigerung und Überwachung der Bestückgenauigkeit für die optische AVT

Wie im vorangegangenen Unterkapitel gezeigt, erfordert die Ausrichtung des Laserstrahls zur Koppelstelle eine hohe Bestückgenauigkeit in der Größenordnung von $20\ \mu\text{m}$ (6σ). In diesem Unterkapitel werden ausgehend von der Definition der Bestückgenauigkeit Einflussfaktoren identifiziert und hinsichtlich des Potenzials zur Genauigkeitssteigerung bestehender Automaten diskutiert. Der Fähigkeitsnachweis stellt ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl einer Produktionsanlage dar. Die typische Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchung ist für die Montage optischer Bauelement nicht direkt übertragbar. Nach einem kurzen Abriss des klassischen Verfahrens zur Bestimmung der Maschinenfähigkeit von SMT-Bestückautomaten werden alternative Konzepte für die Maschinen- und Prozessfähigkeit für die optische AVT entwickelt.

5.3.1 Definition der Bestückgenauigkeit

Hersteller von Bestückautomaten sind im stark umkämpften Elektronikmarkt gefordert, Maschinen mit einem hohen Durchsatz bei höchstmöglicher Qualität durch eine hohe Präzision anzubieten. Unterschiedliche Angaben für die Genauigkeit von SMD-Bestückautomaten machen jedoch einen Vergleich nur bedingt möglich. Folgende Definition nach [120] hat sich bewährt, um Verwechslungen zu vermeiden.

- Die Bestückgenauigkeit ist ein Maß für die Abweichung der tatsächlichen Bestückposition von der Sollposition des Bauelementes. Die Abweichung setzt sich zusammen aus einer zur Prozessfläche parallelen translatorischen Abweichung, die durch den X-Versatz (Δx) und den Y-Versatz (Δy) angegeben wird und durch eine rotatorische Abweichung, die durch den Drehfehler ($\Delta\varphi$) definiert ist. Bei der

Angabe der Bestückgenauigkeit gehen daher Positionierfehler der Linearachsen, Drehfehler des Bestückkopfes, Verwindung des Portalsystems und Zentrierfehler durch das Visionsystem ein.

- Die Positioniergenauigkeit dagegen beschreibt die Abweichung der Istposition zur Sollposition der linearen Achsen oder auch in manchen Fällen die Position der Pipette. Die resultierende Istposition der Bauelemente wird nicht berücksichtigt, so dass Zentrier- und Drehfehler bei der Bewertung nicht eingehen.
- Die Wiederholgenauigkeit stellt eine Angabe dar, bei der die vorgegebene Sollposition keine Rolle spielt. Es wird lediglich die Abweichung von einer einmal angefahrenen Position zur wiederholt angefahrenen Position bestimmt. Zentrier- und Drehfehler, jedoch insbesondere Verwindungen des Portalsystems werden bei dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

Während für den Entwickler einer Produktionsanlage die Unterscheidung der Genauigkeitsangaben von entscheidender Bedeutung ist, um gezielt Teilkomponenten und Systeme optimieren zu können, ist für den Anwender ausschließlich die Bestückgenauigkeit ausschlaggebend, da es bei der Produktion nur auf das Bestückergebnis ankommt, also die tatsächliche Bauelementposition relativ zur der Sollposition auf dem Schaltungsträger. Die Bestückgenauigkeit setzt sich aus einer systematischen und einer stochastischen, normalverteilten Komponente zusammen. Die systematische Abweichung ist das arithmetische Mittel μ des Versatzes Δx des Messumfangs n mit

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (5.9)$$

Die verbleibende Positionsabweichung mit $\mu = 0$ stellt die stochastische Komponente dar. Sie lässt sich durch die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung mit

$$f(X, \bar{X}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.10)$$

beschreiben, wobei σ die Standardabweichung der stetigen Zufallsgröße Δx (Bestückabweichung) ist. Zur Bestimmung der Bestückgenauigkeit werden eine ausreichende Anzahl an Bauelementen bestückt und deren Versatz gemessen (vgl. Bild 40 links). Die dargestellte Dichtefunktion rechts in Bild 40 b) stellt die Häufigkeit der Versatzwerte dar.

Die beiden Wendepunkte der Dichtefunktion nach Gleichung (5.10) sind jeweils um den Abstand der Standardabweichung σ vom Mittelwert μ entfernt. Somit ist die Standardabweichung ein Maß für die Güte des Bestückautomaten und lässt sich durch die zweite Ableitung der Gleichung (5.10) mathematisch mit

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i + \mu)^2} \quad (5.11)$$

beschreiben. Die Bestückgenauigkeit ist also eine zufällige Größe und ist ohne Bezug auf die Standardabweichung nicht zulässig und wäre für die Beurteilung der Qualität der Anlage wertlos. Daher wird die Bestückgenauigkeit beispielsweise in der Form „±60 µm (3σ)“ angegeben. Dies bedeutet, dass die bestückten Bauelemente mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit *P* innerhalb der Grenzen -60 µm und +60 µm liegen.

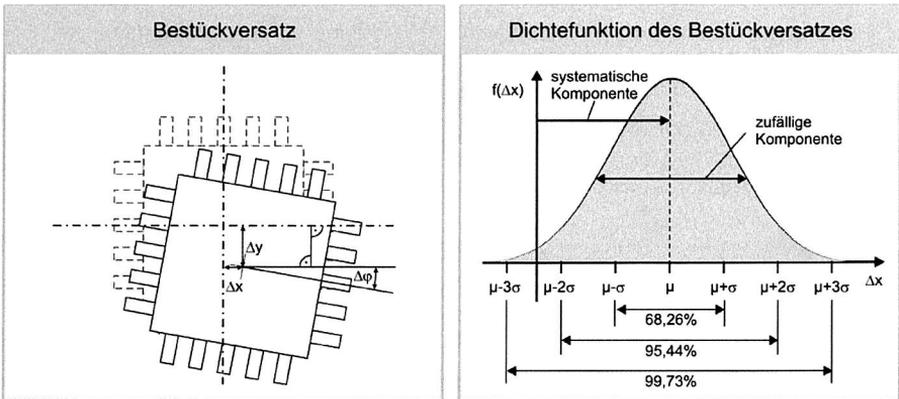


Bild 40: a) Soll- und Istposition eines bestückten quadratischen Bauelementes, b) Dichtefunktion der Normalverteilung

Umgekehrt wird die Fehlerwahrscheinlichkeit durch 1 - P beschrieben und gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Werte außerhalb des Intervalls liegen. Tabelle 4 zeigt die Werte für P und 1 - P, wobei die Abweichung d in Abhängigkeit der Standardabweichung σ angegeben ist. [97] [117]

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Standardabweichung und dpm (nach [97] [117])

Abweichung d von μ	Wahrscheinlichkeit P [%]	Fehlerwahrscheinlichkeit 1-P [%]	Fehlerrate [dpm]
1 σ	68,26	31,74	317400
2 σ	95,44	4,56	45600
3 σ	99,73	0,27	2700
4 σ	99,994	0,006	63,3
5 σ	99,999	0,001	0,573
6 σ	100	0	0,002

5.3.2 Identifikation von Einflussfaktoren zur Steigerung der Bestückgenauigkeit bei der Montage optischer Bauelemente

Die Bestückgenauigkeit eines SMD-Automaten setzt sich aus einer Vielzahl von Einflussgrößen zusammen. Je nach Grundaufbau des Automaten verändern sich diese in Anzahl und Gewichtung. Die Fülle aller Einflüsse ist für den Anwender prinzipiell nicht von Interesse, solange der Bestückautomat innerhalb der Spezifikationen arbeitet. Treten jedoch signifikante Abweichungen auf oder werden neue Prozesse mit erhöhten Anforderungen benötigt, so ist es sinnvoll, diese im Detail zu kennen, um die Genauigkeit gezielt steigern zu können.

Gerade im Hinblick auf die elektrooptische AVT ist eine hohe Bestückgenauigkeit notwendig und erfordert eine Modifikation der Bestückungsanlagen. Mit Hilfe einer systematischen Analyse der Einflussgrößen lassen sich geeignete Maßnahmen ableiten, die eine Verbesserung der Bestückgenauigkeit ermöglichen. Die wesentlichen Einflussgrößen sind in Bild 41 in einem Ursache-Wirkungsdiagramm dargestellt. Der Überlegung steht ein Pick&Place-Bestückautomat mit nachfolgenden Grundmerkmalen zugrunde:

- Die Bauelementzuführung und Leiterplatte ist feststehend
- Der Bestückkopf wird über ein Portalsystem in x- und y-Richtung bewegt
- Die Aufnahme der Bauelemente erfolgt mit einer Vakuum-Pipette
- Die Pipette wird über eine Linearachse in z-Richtung bewegt
- Die Leiterplattenkamera ist am Bestückkopf befestigt
- Die Bauelementkamera ist feststehend im Maschinenbett montiert

Es sei erwähnt, dass insbesondere die Ursachen mit praktischem Verbesserungspotenzial für den Anwender herausgestellt sind. Konstruktive und methodische Lösungsansätze, die vom Hersteller zu leisten sind, bleiben weitestgehend unberücksichtigt.

Positioniersystem: Die Bestückgenauigkeit setzt sich aus der Positioniergenauigkeit und weiteren maschinenrelevanten Einflussgrößen wie z. B. der Genauigkeit der optischen Zentrierung oder dem Pipettenspiel zusammen. Somit stellt die Positioniergenauigkeit eine Grundvoraussetzung für eine hohe Bestückgenauigkeit dar. Sie ist im Wesentlichen von der Art des Antriebes und des eingesetzten Lageerfassungssystems abhängig. Während ein Getriebe aufgrund von Spiel zu Positionierungenauigkeiten führt, ist ein linearer Direktantrieb weniger anfällig für mechanischen Verschleiß. Ebenso lässt sich eine hohe Bestückgenauigkeit nur mit direkten Wegmesssystemen erreichen. Zur Steigerung der Bestückgenauigkeit eines bereits vorhandenen Automaten sind Veränderungen am Positioniersystem nicht geeignet. Das Positioniersystem ist ein fester Bestandteil des Automaten, so dass eine Nachrüstung bzw. ein Umbau nicht wirtschaftlich ist. Ungenauigkeiten, die durch Verwindung des Portalsystems und durch Eigenschwingung des Auslegers verursacht werden, lassen sich hingegen minimieren. Zur Kompen-

sation der Verwindung kann ein sogenanntes Mapping durchgeführt werden [97]. Mit Hilfe der Leiterplattenkamera wird ein Sollraster auf einer Glasplatte im Bestückautomaten abgetastet. Für jeden angefahrenen Punkt auf dem Raster wird der gemessene Versatz in einer Tabelle hinterlegt und beim nächsten Anfahren korrigiert. Befindet sich die Position nicht auf dem Raster, werden die Korrekturwerte durch Interpolation der benachbarten Punkte ermittelt. Des Weiteren treten Eigenschwingungen der Ausleger aufgrund von Reib- und Trägheitskräften auf. Befindet sich die Pipettenspitze nach Erreichen der Sollposition noch in Schwingung führt dies folglich zu einer nichtvorhersagbaren Abweichung der Bestückposition [16]. Zur Steigerung der Positioniergenauigkeit lässt sich die Verfahrensgeschwindigkeit reduzieren und zusätzlich das Abklingen der Schwingung vor dem Absetzen abwarten. Auch wenn dies im Widerspruch zur Bestückleistung steht, ist dies für einzelne Bauelemente, die höchste Präzision erfordern, im Hinblick auf die Bestückaufgabe vertretbar [122].

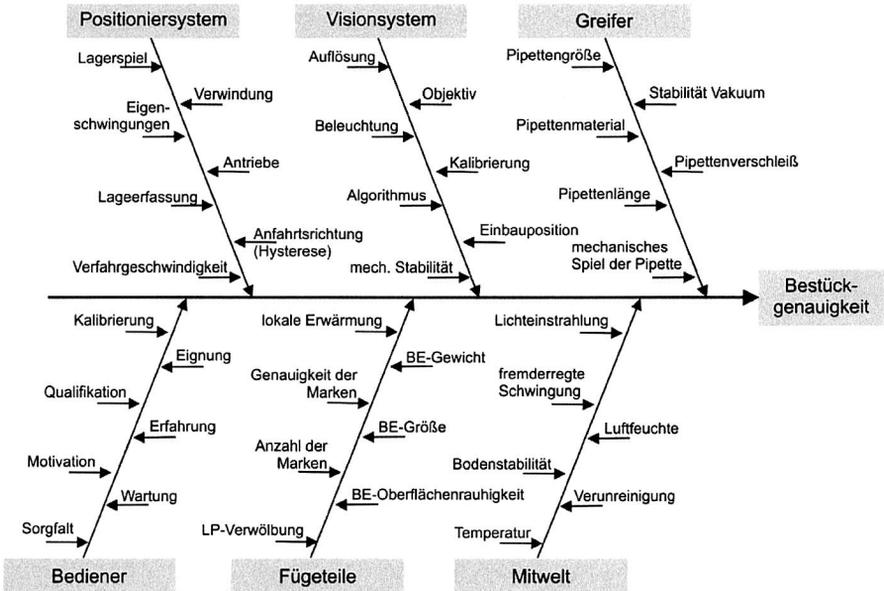


Bild 41: Darstellung der Einflussgrößen auf die Bestückgenauigkeit im Ursache-Wirkungs-Diagramm [97] [120] [117] [87]

Greifer: Gerade durch die beschriebenen Schwingungsprozesse kann der Kraftschluss der Bauelemente an der Pipette durch die hohen Beschleunigungskräfte kurzzeitig unterbrochen werden, wodurch ein Verrutschen des Bauelementes an der Pipette resultiert. Findet dieses Verrutschen nach der optischen Zentrierung statt, wird das Bauelement mit dem entstandenen Versatz bestückt. Um dieses Verrutschen zu vermeiden, ist

ein konstanter und ausreichend hoher Kraftschluss erforderlich. In [60] ist der Zusammenhang zwischen Gewichtskraft, Reibkraft und Beschleunigung für die richtige Pipettenwahl beschrieben. Verschmutzung an der Pipette durch Ablagerung kann die Haftung deutlich reduzieren. Der Einsatz einwandfreier Pipetten ist daher für höchste Präzision unerlässlich. Darüberhinaus stellt das Spiel der Steckverbindung zwischen Pipette und Pinole einen wichtigen Einflussfaktor dar. Der Vorteil der Steckverbindung liegt in der Fähigkeit, flexibel unterschiedliche Pipetten automatisiert, bedarfsgerecht umzurüsten. Mit Modifikationen am Greifer, z. B. mittels einer Schraub- oder stoffschlüssigen Verbindung, kann die Genauigkeit gesteigert werden.

Visionsystem: Eine Optimierung der Bestückgenauigkeit durch Modifikation des Visionsystems ist in der Regel ohne den Automatenhersteller nicht möglich. Durch den Einsatz einer höher auflösenden Kamera ist zwar eine Verbesserung zu erwarten, bedarf aber einer elektrischen, optischen und softwaretechnischen Anpassung, die in der Regel nur durch den Hersteller möglich ist. Vor dem Hintergrund der teilaktiven Justage, bei der die Laserlage an einem zusätzlichen Visionsystem mit hoher Auflösung gemessen wird, spielt die Genauigkeit des Visionsystems für die optische Zentrierung keine Rolle.

Bediener: Wie bei allen Produktionsanlagen trägt der Bediener einen wesentlichen Beitrag zur Qualität des Erzeugnisses bei. Werden z. B. Wartungsintervalle nicht eingehalten, führt dies zu einer Verschlechterung der Bestückgenauigkeit. Beim Erstellen eines Bestückprogramms trifft der Bediener die Entscheidung über den Erkennungsalgorithmus der Passmarken und der Bauelemente. Falsche Toleranzangaben oder Fehler in den CAD-Daten führen zu einem Bestückversatz.

Fügeteile: Mit Hilfe von Visionmodulen wird die Lage von Leiterplattenmarken und Bauelementen optisch ermittelt. Weist die Leiterplatte einen linearen Verzug auf, so lässt sich die Bestückposition durch Interpolation bestimmen. Bei einem nichtlinearen Verzug bzw. Verwölbung der Leiterplatte sind zur exakten Bestimmung der Bestückposition zusätzlich lokale Marken notwendig, um eine hohe Bestückgenauigkeit zu ermöglichen. Der Bestückvorgang kann nur so genau erfolgen wie genau die Sollposition ermittelt ist. Des Weiteren hat die Oberflächenrauigkeit der Bauelemente in Korrelation mit dem Bauelementgewicht und der Bauelementgröße einen signifikanten Einfluss auf die Bestückgenauigkeit. Nach [20] kann die Genauigkeit mittels Keramikpipetten und glatter Bauelementoberfläche die Winkelposition um $0,2^\circ$ erhöht werden. Des Weiteren wurde eine Senkung des Versatzes in Richtung der Hauptachse nachgewiesen.

Mitwelt: Die Einflussgrößen der Mitwelt ermöglichen keine Verbesserung der Bestückgenauigkeit im eigentlichen Sinne. Sie wirken sich verschlechternd aus. Fremderregte Schwingungen durch z. B. andere Produktionsanlagen klingen im Gegensatz zu den Eigenschwingungen nicht ab und sind somit nicht kompensierbar. Temperaturschwan-

kungen führen aufgrund von unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Maschinenkomponenten zu einem temperaturspezifischen Versatz zwischen Pipette und Visionssystem. Ohne Maßnahmen zur Temperaturkompensation lässt sich diese Abweichung nicht ausgleichen. Des Weiteren kann die Bestückqualität durch starke Lichteinstrahlung negativ beeinflusst werden. Gerade optische Sensoren wie z. B. Positionsgeber sind Lichtempfindlich und liefern bei starkem Fremdlicht falsche Messwerte.

Durch Berücksichtigung der Einflussfaktoren durch das Portalsystem, dem Visionssystem und dem Greifer ist eine Steigerung der Maschinenfähigkeit möglich. Zur Beherrschung des Gesamtprozesses müssen auch die äußeren Einflüsse durch den Bediener, der Fügeteile und der Mitwelt beachtet werden. Sowohl vor als auch kontinuierlich während der Produktion ist ein Nachweis der Maschinen- und Prozessfähigkeit zu führen. Die klassischen Methoden lassen sich nicht direkt auf die elektrooptische AVT übertragen, da der Bestückversatz der elektrischen Anschlussbeinchen kein Maß für den optischen Versatz darstellt. Nachfolgend wird in Anlehnung an die übliche Fähigkeitsuntersuchung für die Bestückung elektronischer Bauelemente ein Konzept zur Qualifizierung der Bestückgenauigkeit elektrooptischer Bauelemente beschrieben.

5.3.3 Nachweis der Bestückgenauigkeit elektronischer Bauteile

Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, beeinflussen die Arbeitsgenauigkeit, das Leistungsvermögen, das Umweltverhalten und die Zuverlässigkeit von Produktionsanlagen die Qualität der gefertigten Produkte. Zur Bewertung der Arbeitsgenauigkeit wird in [114] zwischen der direkten und indirekten Erfassung von Maschineneigenschaften unterschieden. Bei der direkten Methode werden einzelne Kenngrößen an der Maschine mit Messinstrumenten ermittelt. Dies erlaubt eine eindeutige Zuordnung von Maschinenfehlern zu deren Ursachen. Für eine Abnahme von Serienmaschinen ist jedoch der erforderliche Messaufwand viel zu umfangreich, zeit- und kostenintensiv. Die indirekte Bewertung der Maschineneigenschaften wird mit der Fähigkeitsuntersuchung durchgeführt. Hierbei werden Probeerzeugnisse mit definierten geometrischen Eigenschaften auf der zu untersuchenden Anlage hergestellt. Die geometrischen Abweichungen der Probe erlauben einen Rückschluss auf die Maschinengenauigkeit.

Maschinenfähigkeit

Bestückanlagen in der Elektronikproduktion werden bei der Abnahme durch eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU), die auf dem Prinzip der indirekten Erfassung basiert, bewertet. Dabei handelt es sich im Prinzip um eine Kurzzeitfähigkeitsanalyse mit dem Ziel, die Fertigungszelle unter Idealbedingungen hinsichtlich der produzierten Qualität zu beurteilen [115]. Es werden eine ausreichende Anzahl von hochpräzisen Bauelementen auf maßhaltige Glasplatten, die mit doppelseitiger Klebefolie versehen sind, bestückt, wobei äußere Einflüsse, die nicht auf den Bestückautomaten zurückzuführen sind, vermieden werden. In einem Koordinatenmessgerät werden die relevanten Abwei-

chungen gemessen. Das Bestückergebnis wird anschließend unter Berücksichtigung festgelegter Toleranzgrenzen ausgewertet und durch Qualitätsfähigkeitskoeffizienten ausgedrückt. Als Voraussetzung für die Ermittlung dieser Fähigkeitskoeffizienten sind nach [117] zunächst eindeutige Festlegungen zu treffen:

- Festlegung der Qualitätsmerkmale (X-Versatz, Y-Versatz, Drehfehler)
- Eindeutige Definition der oberen und unteren Spezifikationsgrenzen (OSG, USG)
- Auswahl einer geeigneten Messmethode der Qualitätsmerkmale (Messmittelfähigkeit)
- Prüfung der statistischen Eigenschaften der Qualitätsmerkmale (z. B. Normalverteilung, arithmetischer Mittelwert, Median, Streuzahl)

Sind die Messwerte der Qualitätsmerkmale normalverteilt, lässt sich der Maschinenfähigkeitsindex c_m durch das Verhältnis der Toleranzweite zur Streubreite wie folgt beschreiben:

$$c_m = \frac{OSG - USG}{6\sigma} \quad (5.12)$$

Dabei sind die festgelegten oberen und unteren Spezifikationsgrenzen symmetrisch und stellen die Abweichung von der Soll-Position dar. Mit Hilfe des kritischen Fähigkeitsindex c_{mk} wird zusätzlich zur Streuung die Lage des Mittelwertes bewertet. Durch Verschiebung des Mittelwertes nähert sich dieser einer der Spezifikationsgrenzen. Der geringere Abstand zwischen Mittelwert und USG bzw. OSG wird als kritische Toleranzweite bezeichnet. Die Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der kritischen Fähigkeit ist definiert als

$$c_{mk} = \frac{\min(USG - \mu, \mu - USG)}{3\sigma} \quad (5.13)$$

Aus den Ergebnissen dieser beiden Indizes wird eine Aussage darüber getroffen, ob eine Maschine die gestellten Anforderungen erfüllen kann oder nicht. Der Mindestgrenzwert für die Fähigkeitsindizes ist firmenspezifisch. Meist wird für den Fähigkeitsindex $c_m = 2,0$ und für $c_{mk} = 1,67$ gefordert [26].

Prozessfähigkeit

Die Aussagekraft der Maschinenfähigkeit ist für die Prozessqualität begrenzt, da nur die Einflüsse der Maschine berücksichtigt werden. Sie wird jedoch für qualitätsfähige Prozesse vorausgesetzt. Zur Berücksichtigung der Störgrößen durch Bedienung, Schwankungen der verwendeten Bauelemente und Substrate und äußeren Einflüsse eignet sich die Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU), die auf realistischen Annahmen beruht und alle Einflussgrößen der Serienfertigung berücksichtigt. Die Kenngrößen der PFU c_p und c_{pk} werden mathematisch analog zu den MFU-Kenngrößen nach den Gleichungen

(5.12) - (5.13) ermittelt. Wie in Bild 42 dargestellt, sind die Verteilungsparameter eines Merkmals wie Lage, Streuung und Form zeitabhängig und werden in vier Fälle unterteilt. Die Fähigkeit eines Prozesses wird dadurch definiert, dass die Verteilung innerhalb der Spezifikationsgrenzen liegt. Prozesse mit sich systematisch veränderlichen Mittelwerten oder auch nicht zufälligem Streuverhalten sind nicht beherrschbar. Ist der Prozess beherrscht und gleichzeitig fähig, spricht man von einem stabilen Prozess.

Die dargelegten Vorschriften zur Prozessfähigkeitsanalyse mit den Gleichungen (5.12) und (5.13) sind nur für den Fall, dass das untersuchte Qualitätsmerkmal normalverteilt ist, gültig. Dies ist beim Bestückprozess gewährleistet, solange die Abweichung der bestückten Bauelemente getrennt nach X- und Y-Richtung analysiert wird. Stellt die Absolutabweichung des bestückten Bauelementes das Qualitätsmerkmal dar, also die gleichzeitige Abweichung in X- und Y-Richtung, liegt keine Normalverteilung mehr vor, so dass andere Verfahren zur Bestimmung der Fähigkeit herangezogen werden müssen. Reale Prozesse lassen sich durch verschiedene Verteilungsmodelle annähern. Die Berechnungsvorschriften für die Qualitätsfähigkeitskenngrößen der unterschiedlichen Modelle sind in der DIN ISO 21747 [80] festgelegt und in [26] praxisnah aufbereitet.

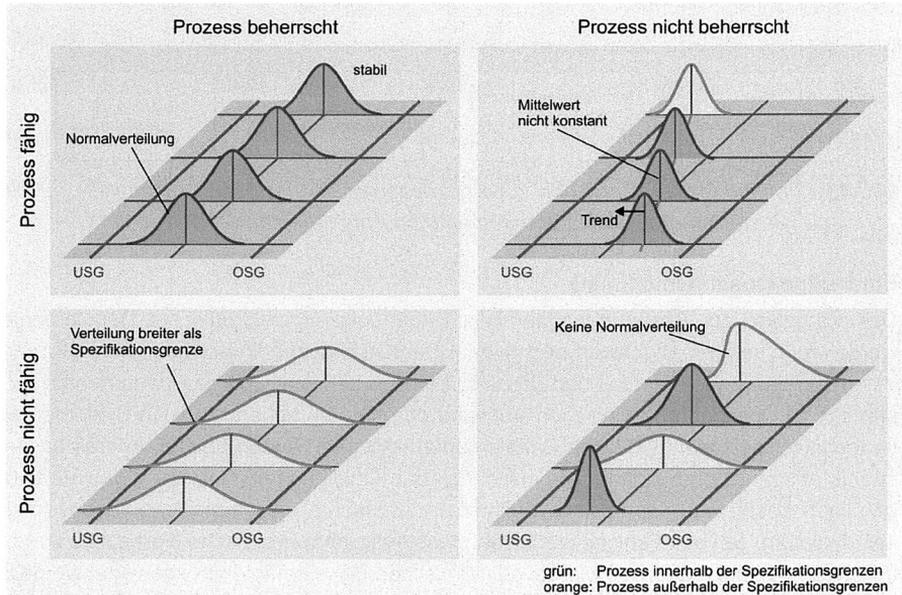


Bild 42: Beherrschtheit und Fähigkeit eines Prozess (in Anlehnung an [26])

5.3.4 Nachweis der Bestückgenauigkeit optischer Bauelemente

Die Bestückung der optischen Bauelemente erfolgt im Gegensatz zu den elektrischen Bauelementen bezüglich der Laserlage. Dieser Unterschied erfordert eine angepasste Methode zur Beurteilung der Maschinen- und Prozessfähigkeit. Insbesondere liegt die Herausforderung darin, messbare Qualitätsmerkmale zu identifizieren, die einen Rückschluss im Sinne der indirekten Bestimmung der Arbeitsgenauigkeit ermöglichen. Der Laserstrahl ist nach der Bestückung des VCSEL optisch nicht mehr zugänglich, so dass seine Lage nicht direkt bestimmt werden kann. Nachfolgende Ausführungen stellen einen Versuch dar, dieser Problematik zu begegnen, und ein geeignetes Verfahren für die Maschinen- und Prozessfähigkeit der Fertigungsprozesse elektrooptischer Baugruppen bereit zu stellen. Die systematische Vorgehensweise zur Konzeptionierung der Fähigkeitsanalyse ist nach [26] in Bild 43 dargestellt.

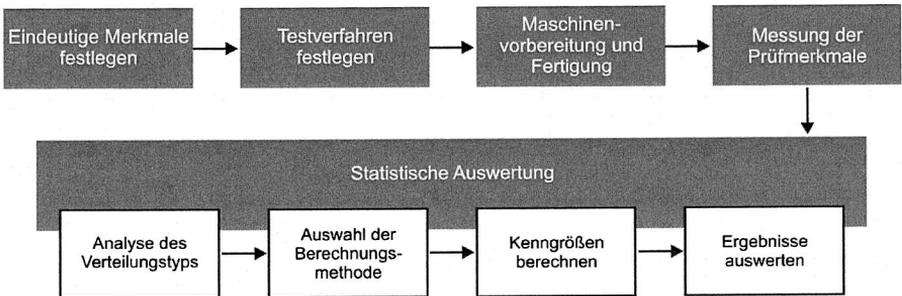


Bild 43: Methodisches Vorgehen zur Konzeptionierung der Fähigkeitsanalyse für die Bestückung optischer Bauelemente (in Anlehnung an [26])

Eindeutige Qualitätsmerkmale

Das Vorgehen zur Bestimmung der Bestückgenauigkeit elektronischer Bauelemente wurde im vorherigen Abschnitt beschrieben. Das Qualitätsmerkmal ist durch den X- und Y-Versatz des Bauelementes und dessen Drehlage bestimmt. Diese Prüfmerkmale lassen sich mit geringem technischen Aufwand durch entsprechende Vision-Systeme datentechnisch erfassen. Optische Bauelemente hingegen werden bezüglich ihres Laserstrahls ausgerichtet, so dass für diesen Fall das Qualitätsmerkmal durch den Versatz zwischen Laser und Koppelstelle definiert ist. Zunächst erscheint dieser Sachverhalt kein Problem. Bei der Fähigkeitsanalyse muss lediglich der optische Versatz bestimmt und anschließend statistisch wie bei elektronischen Bauelementen ausgewertet werden. Die optische Erfassung der Laserlage ist jedoch nach der Bestückung des gehäuseten VCSEL nicht mehr möglich, da der Laser in die Leiterplatte hinein strahlt und von außen nicht mehr sichtbar ist und damit von Vision-Systemen nicht erfasst werden kann. Der Versatz der elektrischen Beinchen erlaubt aufgrund der Gehäusetoleranzen keinen

Rückschluss auf die Laserposition (vgl. Abschnitt 5.2.2). Daher muss auf ein messbares Prüfmerkmal zurückgegriffen werden.

Eine optische Übertragungsstrecke wird insbesondere durch ihre optische Dämpfung charakterisiert. Die Frage, die sich aus Sicht der Bestückaufgabe stellt, ist, ob die Dämpfung als Maß für die erreichte Bestückgenauigkeit herangezogen werden darf. Die optische Dämpfung wird durch drei Hauptfaktoren bestimmt: Materialdämpfung durch den Lichtwellenleiter, numerische Apertur und optischer Versatz. Zur Beurteilung der Bestückqualität dürfen aber nur Verluste, die durch Positionsfehler entstehen, berücksichtigt werden, so dass die Dämpfung nur eine ungenaue Aussage über die Bestückgenauigkeit zulässt. Die Aussagekraft kann erhöht werden, in dem die empfangene Lichtleistung ins Verhältnis zur maximal einkoppelbaren Lichtleistung des spezifischen Bauelement-Leiterplatten-Paars gesetzt wird. Somit ließe sich die Dämpfung ausschließlich auf Montageverluste zurückführen und eine Aussage über die Bestückgenauigkeit zulassen. Nachfolgend sind vier identifizierte Prüfmerkmale in Tabelle 5 aufgelistet und hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften und ihres Potentials für eine Fähigkeitsanalyse des Bestückprozesses ergänzt.

Tabelle 5: Alternative Prüfmerkmale für die Fähigkeitsanalyse der optischen Montage

Prüfmerkmal	Eigenschaften	Beurteilung der Bestückqualität
1 <u>Optischer Versatz:</u> Horizontaler Versatz des Laserprofils bezüglich der Koppelstelle	Versatz mit Kamerasystem nach dem Bestücken ist nicht direkt erfassbar.	▪ Nicht möglich
2 <u>Empfängerseitige Lichtleistung:</u> Übertragene Lichtleistung empfängerseitig im Verhältnis zu einem Sollwert	Einfache Messtechnik durch Lichtsensor am Empfänger (z. B. bestückte Photodiode)	▪ Beurteilung der Bestückgenauigkeit nicht möglich, da keine Referenz existiert
3 <u>Optische Dämpfung der optischen Strecke:</u> Empfangene Lichtleistung im Verhältnis zur Sendeleistung	Einfach Messtechnik. Senderseitig: Monitoriode im Bauelement oder mittels FMP Empfängerseitig: Photodiode	▪ Geringe Aussagekraft über Bestückgenauigkeit, da Verluste durch numerische Apertur und Streuung im LWL nicht bekannt sind
4 <u>Optische Dämpfung in Bezug auf einen Schätzwert der maximal übertragbaren Lichtleistung:</u> Empfangene Lichtleistung im Verhältnis zur maximal übertragbaren Lichtleistung bei idealer Bestückung	Aufwändige Messtechnik Für eine Stichprobe des Loses wird der Mittelwert der maximal übertragbaren Lichtleistung bestimmt.	▪ Mäßige Aussagekraft über Bestückgenauigkeit ▪ Nur Distanz zur Sollposition bestimmbar, X-/Y-Versatz nicht separat auswertbar

Mögliche Testverfahren

Die Auswahl des Testverfahrens ist insbesondere durch die Messtechnik bestimmt. Nachfolgend werden zwei Konzepte vorgestellt. Das erste Testverfahren basiert auf der Ermittlung des optischen Versatzes (Prüfmerkmal 1). Aufgrund der aufwändigen Messtechnik ist das Verfahren ausschließlich für eine Maschinenfähigkeitsanalyse geeignet. Anschließend wird ein Testverfahren basierend auf der Auswertung der optischen Dämpfung (Prüfmerkmal 4) mit Einbußen in der Aussagekraft der Bestückgenauigkeit diskutiert. Da die Prüfmerkmale 3 und 4 keine Aussage über die Bestückgenauigkeit zulassen, werden diese nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Zwei Testverfahren auf Basis des Prüfmerkmals 1 „optischer Versatz“: Die Position des Laserstrahls ist nach der Bestückung auf die elektrooptische Leiterplatte mit einem Kamerasystem nicht mehr messbar. Dennoch können zwei Testverfahren angewendet werden:

Testverfahren 1 (optischer Versatz): Um das Potential der Maschine für die Bestückung optischer Bauelemente zur bewerten, kann die Bestückgenauigkeit unter idealisierten Bedingungen mit Hilfe des Feinmessplatzes bestimmt werden. Hierzu wird das Bauelement nicht auf eine elektrooptische Leiterplatte bestückt. Der Positionier- und Messvorgang erfolgt ausschließlich am Feinmessplatz wie in Bild 44 dargestellt.

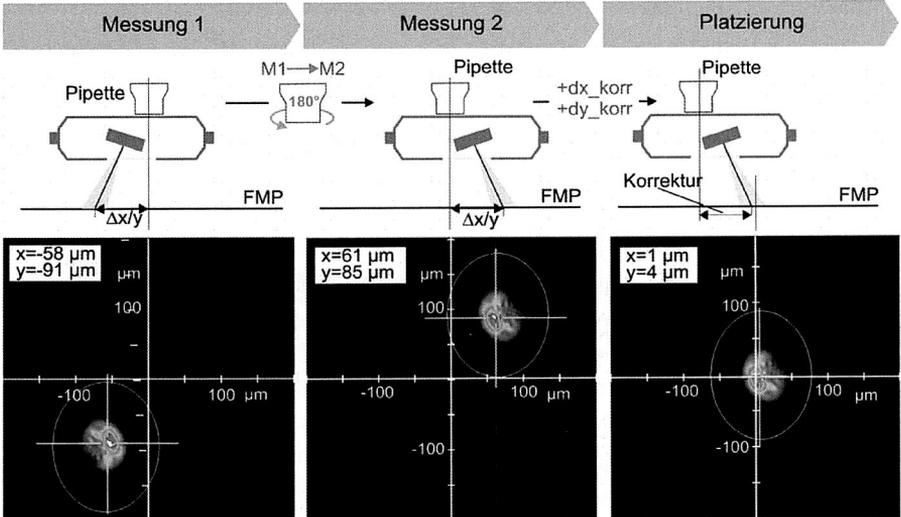


Bild 44: Optische MFU mit Hilfe des Feinmessplatzes

Das Bauelement wird für die optische Zentrierung des Laserstrahls auf dem Feinmessplatz platziert, das VCSEL aktiviert und die Position des Lasers innerhalb des Bildframes bestimmt. Anschließend wird das Bauelement um 180° gedreht und erneut die Position des Lasers bestimmt (vgl. Zweipunktmessung in Abschnitt 6.3.4). Über geometrische Beziehungen wird der Versatz zwischen Laser und Pipette bestimmt. Die anschließende erneute Platzierung auf den Feinmessplatz erfolgt unter Berücksichtigung des gemessenen Offsets, so dass der Laserstrahl auf den Sollpunkt (Kameramitte) ausgerichtet wird. Der X- und Y-Versatz des Lasers zum Kameramittelpunkt ist das Maß für die Bestückgenauigkeit. Die anschließende statistische Auswertung erfolgt analog zu elektronischen Bauelementen. Die Bestückgenauigkeit des Lasers bezüglich der Einkoppelstelle wird jedoch maßgeblich durch den richtigen Fokus (optischer Arbeitsabstand) bestimmt. Dieser Aspekt bleibt bei der „Feinmessplatz-Methode“ unberücksichtigt, da der Fokus am Feinmessplatz konstant ist.

Testverfahren 2 (optischer Versatz): Das zweite Testverfahren bildet den realen Bestückprozess auf eine reale EOCB ohne Lotpaste ab. Der optische Versatz wird hierbei indirekt bestimmt. Hierfür wird das Bauelement mit dem zu qualifizierenden Bestückablauf im Sollbestückpunkt der Leiterplatte auf die elektrischen Kontakte platziert und durch die Pipette mit konstanter Anpresskraft niedergehalten. Die Leiterplatte muss elektrisch aktiv sein, so dass durch die Kontaktierung an den elektrischen Pads der VCSEL in Betrieb genommen wird. Mit Hilfe eines Lichtleistungssensors kann die übertragene optische Leistung erfasst werden. Die Position des Bauelementes wird anschließend so lange korrigiert, bis die Position erreicht ist, bei der die maximale Lichtleistung übertragen wird. Die benötigte Korrektur zum optimalen Einkoppelpunkt stellt den negativen Bestückversatz dar. Die statistische Auswertung ist im Anschluss auch hier analog zu den elektrischen Bauelementen zu führen, da X- und Y-Versatz bekannt sind.

Ein Testverfahren auf Basis des Prüfmerkmals 4 „Optische Dämpfung auf Basis eines Schätzwertes der maximal übertragbaren Lichtleistung“: Die Bestückposition hat direkten Einfluss auf die eingekoppelte Lichtleistung und damit auf die Dämpfung der Übertragungsstrecke; sie ist jedoch im laufenden Produktionsprozess nicht messbar. Zur Beurteilung der Bestückgenauigkeit muss die übertragene Lichtleistung P_{RX} mit der maximal übertragbaren Lichtleistung $P_{RX,max}$ verglichen werden. Nachfolgend wird die maximal übertragbare Lichtleistung Übertragungspotenzial mit

$$P_{RX} = \frac{P_{RX,max}}{\text{Übertragungspotenzial}} \quad (5.14)$$

genannt. Die empfängerseitige Ausgangsleistung P_{RX} ist nach dem Reflowprozess im elektrischen Incircuit Test (ICT) mittels elektrischer Aktivierung des VCSEL und gleichzeitigem Abgreifen des Photostroms an der Photodiode (PD) messbar. Die Ermittlung

des Übertragungspotenzials $P_{RX, max}$ muss jedoch noch vor der Montage erfolgen, da nach dem Reflowprozess keine Lagekorrektur des Bauelementes mehr möglich ist und somit der Referenzwert $P_{RX, max}$ nicht mehr bestimmbar ist. Problematisch ist außerdem, dass das Übertragungspotenzial keinen konstanten Referenzwert darstellt. Einerseits variiert die Oberflächengüte der Koppellelemente unterschiedlicher Leiterplatten und andererseits sind leiterplattenspezifische Verluste durch die numerische Apertur und LWL-Dämpfung zu nennen. Somit variiert für jede Bauelement-Leiterplatten-Kombination das Übertragungspotenzial. Vor diesem Hintergrund lässt sich ein mögliches Konzept zur Überwachung der fortlaufenden Bestückgenauigkeit, wie in Bild 45 dargestellt, ableiten. Vorausgesetzt wird, dass das Übertragungspotenzial eine geringe Streuung aufweist, was mit fortschreitender Reife der EOCB-Technologie bei kommerziell gefertigten Baugruppen zu erwarten ist. In [5] wird z. B. ein Leiterplattenkonzept mit diskreter Umlenkung mit einem spritzgegossenen Spiegel mit hoher Fertigungsgüte vorgestellt. Alternative Ansätze zur Fertigung einer integrierten Kopplung mittels Laserablation zeigen deutlich bessere Charakteristika als die im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Umlenkelemente mittels Fräsen [107]. Das Konzept stellt sich wie folgt dar.

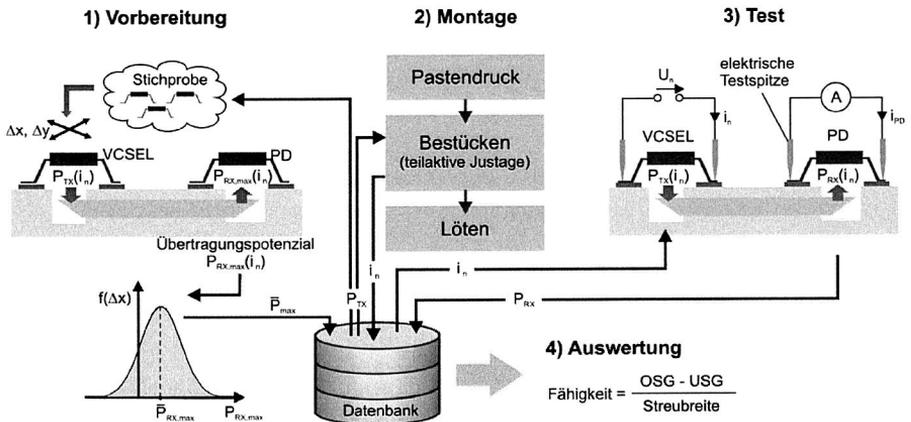


Bild 45: Testablauf für die fortlaufende Prozessfähigkeitsuntersuchung bei der Fertigung elektrooptischer Baugruppen

Vor der Montage wird eine Stichprobe der zu verarbeitenden Bauelemente und Leiterplatten mit Hilfe des Charakterisierungsmessplatzes (vgl. Abschnitt 4.3) hinsichtlich des Übertragungspotenzials $P_{RX,max}$ untersucht. Alle VCSEL der Stichprobe werden mit gleicher Ausgangsleistung $P_{TX}(i_n)$, wobei n jedes Bauelement eindeutig charakterisiert, über den Koppelstellen der zufällig ausgewählten EOCB gerastert und empfängerseitig das Koppelprofil aufgenommen und daraus das jeweilige Übertragungspotenzial $P_{RX,max,n}$ entnommen. Das arithmetische Mittel $\bar{P}_{RX,max,n}$ dieser Werte dient als Referenz und wird

in der zentralen Datenbank der Fertigung hinterlegt. Die Vergleichbarkeit der Daten ist nur bei konstanter optischer Ausgangsleistung der VCSEL mit

$$P_{TX}(i_n) = P_{TX}(i_{n+1}) \quad (5.15)$$

möglich, so dass die gleiche Ansteuerung des jeweiligen VCSEL in der Vorbereitungsphase und entlang aller Fertigungsprozesse zu gewährleisten ist.

Mit abgeschlossener Vorbereitungsphase, die je nach Bedarf stichprobenartig wiederholt werden kann, erfolgt die Montage entlang der SMT-Prozesskette. Bei der teilaktiven Bestückung wird das Bauelement am Feinmessplatz in Betrieb genommen, um die Laserlage zu ermitteln. Der bauelementspezifische VCSEL-Strom i_n wird nachgeregelt bis die optische Leistung des Senders der optischen Leistung der Vorbereitungsphase entspricht. Die Möglichkeit zur optischen Leistungsmessung am Feinmessplatz sei dabei vorausgesetzt. Für jedes Bauelement muss der eingestellte bauelementspezifische VCSEL-Strom i_n für den späteren ICT in einer Datenbank hinterlegt sein. Die übertragene Lichtleistung wird anhand des Photostroms an der Empfängerdiode ausgewertet. Das Qualitätsmerkmal der Bestückung stellt die Dämpfung D_{opt} der übertragenen Lichtleistung in Bezug auf das Übertragungspotenzial dar:

$$D_{opt} = 10 \lg \frac{P_{RX}}{P_{RX,max}} \quad (5.16)$$

Statistische Auswertung

Die optische Dämpfung ist nicht normalverteilt, so dass die Methoden zur Schätzung des Mittelwertes und der Streubreite der Bestückversatzbestimmung nicht verwendet werden dürfen. Mit der Forderung nach einer maximalen Koppeldämpfung von -3 dB liegt die Situation eines einseitigen oberen Schwellwertes vor. Für eine solche Verteilung wird nach [26] die Berechnungsmethode mit dem Mittelwert des Prüfmerkmals für die Prozesslage und die Percentil-Quantilmethode zum Schätzen der Streubreite herangezogen. Nach [26] wird sie als die präziseste Methode angesehen, lässt sich jedoch nur numerisch bestimmen. Diese Einschränkung ist jedoch für eine rechnerintegrierte Fabrik kein Hindernis, so dass der Einsatz dieser Methode sinnvoller scheint. Die Berechnungsformel für das Prozesspotenzial lautet

$$c_p = \frac{\text{Toleranzbreite}}{99,865 \% \text{Punkt} - 0,135 \% \text{Punkt}} = \frac{\text{OSG} - \text{USG}}{Q_{0,99865} - Q_{0,00135}} \quad (5.17)$$

und mit (5.17) die Berechnungsformel für die Prozessfähigkeit

$$c_{po} = \frac{\text{OSG} - \mu}{Q_{0,99865} - \mu} \quad \text{und} \quad c_{pu} = \frac{\mu - \text{USG}}{\mu - Q_{0,00135}} \quad (5.18)$$

mit dem Mittelwert μ des Prüfmerkmals. Insbesondere liegt der Vorteil in dieser Methode darin, dass sie weniger für Ausreißer anfällig ist. Allerdings sind die Gründe für Ausreißer bei dieser Methode nach [26] gesondert zu untersuchen.

5.4 Fixierung der optischen Komponenten mittels Klebstoffen

Für die Fixierung der optischen Bauelemente ist ein geeignetes Verfahren erforderlich, mit dem die Position der Bauelemente nach der Freigabe durch das Positioniersystem erhalten bleibt und sich mit einer elektrischen Verbindungstechnologie kombinieren lässt. Das klassische Reflowlöten kann dieser Anforderungen aus zwei Gründen nicht genügen. Erstens erfolgt das Löten in einem Folgeprozessschritt nach der Freigabe des Bauelementes, so dass in der dazwischenliegenden Handhabung der Leiterplatte die Bauelemente verrutschen könnten. Zweitens bewirkt das umgeschmolzene Lot aufgrund seiner Oberflächenspannung eine Selbstzentrierung des Bauelementes bezüglich der elektrischen Anschlussstrukturen, so dass durch diese Verschiebung die optische Kopplung aufgehoben würde (vgl. Bild 46).

Das Fixieren des Bauelementes zur Verhinderung des Einschwimmeffekt stellt ein zur SMT konträres Ziel dar, da durch das Einschwimmen Montagetoleranzen ausgeglichen werden können. Kleben in der Elektronikfertigung für die Fixierung von Bauelementen kommt nach [41] vorwiegend bei mischbestückten Leiterplatten vor, die mittels Schwallloten verarbeitet werden, so dass auf der Unterseite der Leiterplatte platzierte SMD im Lotbad nicht abfallen können. Hierfür werden speziell angepasste reaktive Einkomponentensysteme auf Basis von Epoxidharzen verwendet, die zusätzlich thermisch leitfähig eingestellt werden.

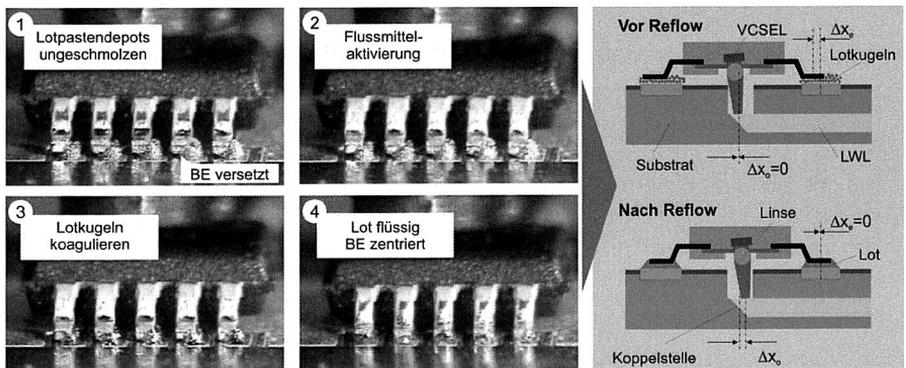


Bild 46: Veranschaulichung des Selbstzentrieres am Beispiel eines gehäuseten VCSEL-Bauelementes und die Auswirkung auf die optische Kopplung

Auch diese Art der Fixierung ist für die Montage der optischen Bauelemente nicht geeignet, da die Aushärtung des Klebstoffes erst nach der Freigabe erfolgt, außerdem die Klebstoffe meist mittig unter dem Bauelement appliziert werden – dies würde den optischen Strahlengang verschließen.

5.4.1 Bewertung alternativer Fixierverfahren

Da die bekannten bzw. etablierten Fixierverfahren der SMT den Anforderungen der optischen AVT nicht genügen, sind alternative Fixierverfahren auszuwählen. Für die Lösung dieser Problematik – Fixierung in weniger als einer Sekunde während das Bauelement noch niedergehalten wird – stehen eine Vielzahl an technologischen Verfahren für die mechanische Fixierung und elektrische Verbindung zur Verfügung. Die Auswahl erfolgt systematisch mit Hilfe der entwickelten Verfahrensmatrix nach Bild 47. Die jeweilige Kombination aus mechanischer Fixierung und elektrischer Verbindung ist hinsichtlich der technischen Sinnhaftigkeit klassifiziert und zusätzlich durch das eingeschätzte Potenzial für den Einsatz in der optischen AVT farblich gekennzeichnet.

Die elektrischen Verbindungsverfahren Drahtbonden und Steckverbindung weisen grundsätzlich für die optische AVT im Sinne der Low-Cost-Fertigung ein geringes Potenzial auf, da gehäuste oberflächenmontierbare Bauelemente verarbeitet werden.

Bewertung möglicher Verbindungsverfahren für die insitu-Fixierung optischer SMD			Elektrische Verbindung					
			Löten	Leitkleben	Drahtbonden	Steckverbindung	Schweißen	
Mechanische Fixierung	Kraftschluss	Niederhalter	✓	✓	✗	✓	✓	
	Formschluss	Aussparung	✓	✓	✗	✓	✓	
	Stoffschluss	Löten		✗	✗	✓	✓	✗
		Leitkleben		✗	✓	✗	✗	✗
		Kleben		✓	✓	✓	✓	✓
		Schweißen		✓	✓	✗	✓	✓

Legende:	■	hohes Potenzial für die optische AVT	✓	technisch sinnvolle Kombination
	■	mäßiges Potenzial für die optische AVT	✗	technisch nicht sinnvolle Kombination
	■	geringes Potenzial für die optische AVT		

Bild 47: Bewertung möglicher Verbindungsverfahren für die insitu-Fixierung in Anlehnung an die Verfahrensmatrix für die 3D-Montage (vgl. [36]).

Das Schweißen als elektrisches Verbindungsverfahren ist in der Elektrotechnik bekannt und wird z. B. zur elektrischen Kontaktierung bei Schaltern mittels gepulsten Lasern an-

gewendet. Insbesondere die Kombination mit der mechanischen Vorfixierung mittels Niederhalter (z. B. durch den Greifer) lässt sich eine dauerhafte sofortige Fixierung des Bauelementes erzielen. Anlagentechnisch ist hierfür in den Greifer eine Laserquelle zu integrieren, die während des Greifens sequenziell Energie an die einzelnen Verbindungsstellen einbringt. Aufgrund des bewährten Verfahrens bei vergleichbaren Anwendungen besitzt diese Fixiermethode hohes Potenzial. Eine Integration in einen Bestückautomaten ist realisierbar. Der Prozess ist hinsichtlich der erforderlichen Investition, der Prozesszeit, der thermischer Belastung und der Zuverlässigkeit zu untersuchen.

Das Leitkleben stellt eine direkte Alternative zum Löten dar und weist hohes Potenzial auf. Gerade in den letzten Jahren hat das Leitkleben in der Leiterplattenfertigung an Bedeutung gewonnen. Es ermöglicht eine Verbindung unterschiedlicher und auch nicht lötlbarer Oberflächen bei geringer Temperaturbelastung. Ein besonderer Vorteil der leitenden Klebstoffe liegt in der Ausbildung verformungsfähiger Fügenschichten, so dass die unterschiedliche Ausdehnung von Leiterplatte und Bauelement im Temperaturwechsel besser ausgeglichen werden kann [79]. Eine insitu-Fixierung während des Bestückprozesses ist durch den Einsatz von UV-härtenden Leitklebstoffen vielversprechend und bedarf wie beim Schweißverfahren vertiefende Untersuchungen hinsichtlich des Anlageninvest, der Materialkosten und der Prozessführung. Desweiteren sind die elektrischen Eigenschaften der Verbindungsstelle für die elektrooptischen Leiterplatten, die für höchste Übertragungsraten ausgelegt sind, zu untersuchen.

Das Löten ist in der SMT ein weit verbreitetes und kostengünstiges Massenfertigungsverfahren für die Herstellung mechanischer und elektrischer Verbindungen, daher weist auch die Kombination aus einer mechanischen Fixierung und dem Löten hohes Potenzial auf [36]. Aufgrund der Nähe zum Standardprozess wird im Rahmen dieser Arbeit das Löten in Kombination mit einer mechanischen Fixierung näher untersucht. Dennoch sei an dieser Stelle empfohlen, in weiterführenden Arbeiten auch die zwei erstgenannten Verbindungsverfahren technisch-wirtschaftlich zu bewerten. Nachfolgend werden mögliche mechanische Fixierverfahren in Kombination mit dem Löten vertiefend diskutiert.

Die Verwendung eines Niederhalters in Form einer Feder ist nur bedingt geeignet, da diese, während das Bauelement noch vom Greifer fixiert ist, angebracht werden müsste. Eine Fixierung auf Basis von Formschluss mittels einer Aussparung ist nicht geeignet. Dieses Verfahren würde der Montage hochpräziser Komponenten entsprechen (vgl. Kapitel 3). Die Kombination mit dem Leitkleben zur Fixierung, um anschließend eine gelötete elektrische Verbindung herzustellen, ist aus technischer Sicht nicht sinnvoll. Das Schweißen als Fixierverfahren einzusetzen, stellt prinzipiell eine geeignete Möglichkeit dar. Hierbei könnten z. B. zwei elektrische Beinchen geschweißt werden und die anderen elektrischen Kontakte im Massenlötverfahren hergestellt werden.

Eine Fixierung durch das Lötten selbst ist grundsätzlich auch eine realisierbare Möglichkeit. Allerdings muss der Lötprozess insitu, also während des Bestückens stattfinden. Ein geeignetes Verfahren stellt z. B. das Lichtlötten dar. Das Bauelement wird in das Lotpastendepot abgesetzt und während der Fixierung durch den Greifer niedergehalten. Das Lot wird mittels hochenergetischem Licht umgeschmolzen. Erfolgt dieser Prozessschritt allerdings vor dem Lötprozess im Reflowofen, würde das Lot erneut umschmelzen und das Bauelement sich aufgrund des Selbstzentriereffektes verschieben. Durch eine geeignete Prozessreihenfolge lässt sich dieses Problem umgehen. Z. B. könnten zunächst alle elektrischen Bauelemente bestückt und im Massenverfahren gelötet werden. Anschließend erfolgt die Bestückung der optischen Komponenten. Ferner könnten verschiedene Lotpasten mit unterschiedlichem Schmelzpunkt eingesetzt werden. Hierfür ist nach dem Schablonen ein zusätzlicher Prozessschritt für das Dispensieren der Lotpaste mit höherem Schmelzpunkt an den Kontakten der optischen Bauelemente notwendig. Auch ließen sich alternativ für kleine Losgrößen alle Verbindungsstellen der Leiterplatte im Bestückautomaten mittels Lichtlötten herstellen. Bei der Massenfertigung mit hohem Volumen ist das Verfahren aufgrund des seriellen Prozesses jedoch unwirtschaftlich.

Das Kleben zur Vorfixierung des Bauelementes vor dem Reflowprozess stellt aufgrund der Nähe zum Standard-Prozess eine vielversprechende Alternative dar. Im Gegensatz zur Fixierung der Bauelemente für das Schwalllötten müssen die Viskosität, Rheologie und Adhäsion des Klebstoffes jedoch erweiterten Anforderungen genügen. Zur Vermeidung von Verunreinigungen darf der Klebstoff beim Auftragen keine Fäden ziehen. Im flüssigen Zustand ist eine ausreichende Standfestigkeit notwendig, so dass der Klebstoff nach dem Auftragen nicht in den optischen Strahlengang fließt. Zudem ist eine ausreichende Höhe erforderlich, um den Klebspalt zwischen Leiterplattenoberfläche und Bauelementunterseite zu überbrücken. Um einen Verzug des Bauelementes während des Härtens zu minimieren, ist ein geringer Schrumpf erforderlich. Außerdem ist die Temperaturbeständigkeit während des Reflowprozesses mit Spitzentemperaturen von bis zu 260 °C zu gewährleisten. Nachfolgend werden geeignete Klebstoffsysteme hinsichtlich der genannten Anforderungen in Verbindung mit den zugehörigen Applikationsverfahren identifiziert.

5.4.2 Auswahl geeigneter Klebstoffsysteme für die in-situ-Fixierung

Die Klebetechnologie bietet eine Reihe an verschiedenen Klebstoffen mit unterschiedlichen Verarbeitungs- und Haftenigenschaften. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen chemisch reagierenden und physikalisch abbindenden Systemen. Bei der chemischen Aushärtung erfolgt ein Wachstum der Molekülketten durch Polymerisation zu einem vielfach vernetzten Molekülgeflecht und wird durch einen Initiator wie z. B. Licht, Luft, Wärme oder einem zweiten Stoff, der als Katalysator dient, ausgelöst. Physikalisch aushärtende Klebstoffe härten durch das Verdunsten des enthaltenen Lösemittels oder

durch Änderung des temperaturabhängigen Aggregatzustandes. Aufgrund der geringen Temperaturbeständigkeit der physikalisch aushärtenden Klebstoffe sind diese für den Einsatz in der SMT wenig geeignet.

Die grundsätzlich in Frage kommenden chemisch aushärtenden Klebstoffe sind einerseits Einkomponenten- und Zweikomponenten-Epoxyharze, die durch Wärme aushärten und andererseits photoinitiert härtende Klebstoffe, die durch UV-Licht aushärten. Besonders vielversprechend zeigt sich die Kombination in Form von dualhärtenden Klebstoffen, die durch Licht und Wärmebehandlung härten. Mit diesen Systemen ist eine ultraschnelle (< 1 Sekunde) Anhärtung mittels UV-Bestrahlung im Bestückprozess möglich, so dass die Haftung des Bauelementes ausreicht, um seine Position zu fixieren. Im anschließenden Reflowprozess wird der Klebstoff durch die Wärmebehandlung komplett ausgehärtet.

Für den Klebstoffauftrag stehen verschiedene technische Lösungen zur Verfügung. Neben dem Schablonen- bzw. Siedruckverfahren für eine parallele Bearbeitung kann der Klebstoff bei geringer Anzahl von Klebepunkten mittels des Dispensverfahrens appliziert werden. Vor dem Hintergrund der Verbindungstechnik Kleben-Löten ist das Schablonendruckverfahren nur eingeschränkt geeignet, da die Schablone für den Klebstoff auf die bereits mit Lotpaste bedruckte Leiterplatte aufgesetzt werden müsste. Ebenso zeigt auch das Dispensieren mehrere Nachteile. Insbesondere bei hochviskosen Klebstoffen besteht die Gefahr des Ziehens von Fäden. Der serielle Auftrag der einzelnen Klebstoffpunkte erfordert im Gegensatz zum Jetverfahren zusätzlich eine Hubbewegung in z-Richtung und ist daher zeitintensiv. Eine sinnvolle Alternative stellen piezobasierte, kontaktlose Mikrodosiersysteme dar, die eine hohe Volumenkonstanz und Reproduzierbarkeit versprechen. Zudem bietet sich diese Technik aufgrund der kompakten Bauweise und des relativ hohen Arbeitsabstandes bis zu 10 mm (je nach Parameterwahl) insbesondere für die Integration in einen SMT-Bestückautomaten an. Die Integration des Systems in dem aufgebauten Bestückdemonstrator dieser Arbeit ist in Kapitel 6 beschrieben.

5.4.3 Experimentelle Untersuchung des Fixierprozesses auf Basis dualhärtender Klebstoffe und des Jettens

Die Verwendung von dualhärtenden Klebstoffen und deren Applikation mittels berührungslosen Mikrodosiersystemen (Jettens) fand bislang keine Anwendung in der SMT, so dass derzeit kein Prozess-Know-how vor dem Hintergrund der Fixierung von elektronischen bzw. elektrooptischen Bauelementen vorliegt. Nachfolgende Experimente beleuchten die Klebstoffapplikation, untersuchen die Prozessparameter der UV-Initiierung, das Verhalten des Klebstoffes im Reflowprozess und schließlich die Eignung, die Selbstzentrierung zu verhindern.

Anforderungen und Prozessierbarkeit

Die grundlegenden Anforderungen an den Klebstoffauftrag sind wie folgt: Das Bauelement soll mittels vier Klebstoffpunkten, die alle vier Ecken des Bauelementgehäuses benetzen, fixiert werden. Das aufgetragene Klebstoffdepot muss eine ausreichende Höhe besitzen, um den Abstand zwischen Leiterplattenoberseite und Bauelementunterseite zu überbrücken. Die Fügepartner sind das Kunststoffgehäuse des Bauelementes und die Leiterplattenoberseite. Auf eine Vorbehandlung der Oberflächen soll verzichtet werden.

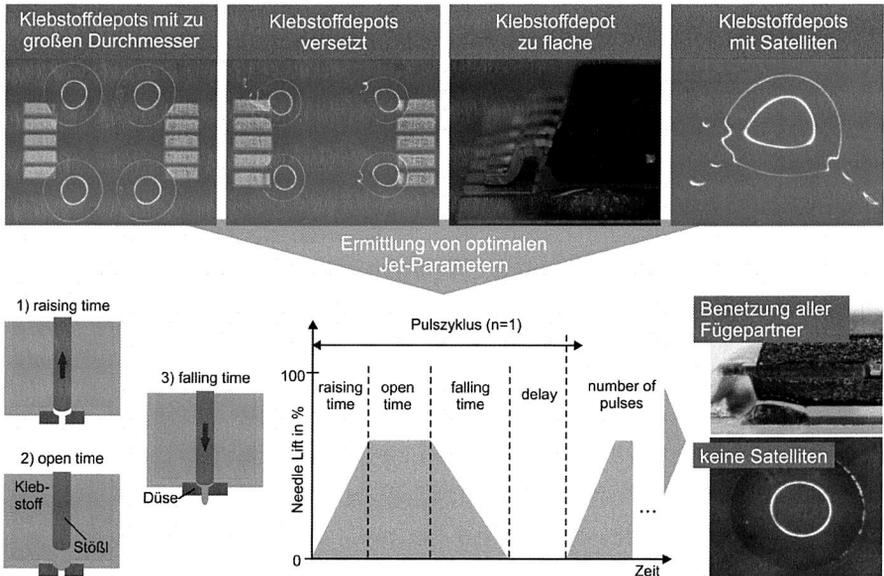


Bild 48: Darstellung der typischen Klebstofffehler und der Jet-Parameter für einen sicheren Klebstoffauftrag

Somit kommen für die Oberflächen der Leiterplatte FR4, Lötstopplack oder die leiterplattenspezifische Metallisierung in Frage, da diese ohne zusätzliche Behandlung direkt vom Leiterplattenlieferanten bezogen werden können. Somit ergibt sich in Abhängigkeit der Klebstoffeigenschaften und der Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner ein spezifisches Verhältnis zwischen dem Durchmesser, Volumen und Höhe des Klebstoffdepots. Der applizierte Klebstoff darf weder die Bauteilm metallisierung noch die Lötflächen benetzen, da sonst die Benetzbarkeit des Lotes verschlechtert wird. Ebenso darf der Klebstoff nicht in das optische Fenster der EOCB bzw. des Bauelementes dringen. Die Qualität des Klebstoffes hinsichtlich der beschriebenen Anforderungen hängt direkt von den Jet-Parametern des Mikrodosiersystems ab (vgl. Bild 48).

Für die Untersuchung wurden insgesamt drei handelsübliche Klebstoffe der Firma Delo und zwei spezifisch für den Prozess angepasste Klebstoffe der Firma Epoxonic untersucht. Zwei der Klebstoffe sind ausschließlich optisch härtend (katiobond) und drei der Klebstoffe sind licht- und thermisch härtend (dualbond). Nachfolgend werden diese mit Klebstoff A bis Klebstoff E abgekürzt. Die handelsübliche Bezeichnung mit den zugehörigen Eigenschaften und für das Jet-System spezifische Verarbeitungsparameter sind Tabelle 6 zu entnehmen. Grundsätzlich bietet die Leiterplatte drei Oberflächenvarianten für die Klebstoffapplikation: blankes FR4, Lötstopplack (LSL) und Oberflächenfinish der Metallisierung chemisch Zinn (chem. Sn). Voruntersuchungen zeigen, dass FR4 als Untergrund nicht geeignet ist, da die untersuchten Klebstoffe stark zerlaufen, so dass keine ausreichende Höhe aufgebaut werden kann. In den nachfolgenden Untersuchungen sind daher nur die zwei Oberflächenvarianten LSL und chemisch Zinn (chem. Sn) berücksichtigt. Weitere typische Oberflächen der Leiterplattenindustrie wie z. B. chem. Ni/Au, HAL bleifrei stellen keinen Gegenstand der Untersuchung dar. Tabelle 6 zeigt die ermittelten Jet-Parameter der Klebstoffe, mit welchen eine satellitenfreie Applikation möglich ist.

Tabelle 6: Bezeichnung und optimierte Jet-Parameter der untersuchten Klebstoffe

Abk.	Handelsname	Härtemechanismus	Viskositätsgrad	Jet-Parameter					
				RT	OT	FT	NL	D	N
A	DELO (KB4594)	Katiobond	Mittel	5	0	5	100	500	1-7
B	DELO (KB4578)	Katiobond	Hoch	5	0	5	100	750	1-7
C	DELO (DB777)	Dualbond	Hoch	5	0	6	100	300	1-7
D	Epoxonic (Ex2325)	Dualbond	Niedrig	15	0	10	100	500	1-7
E	Epoxonic (Ex2387)	Dualbond	hoch	15	0	9	100	500	1-7

RT: raising time, OT: open time, FT: falling time, NL: needle lift, D: delay, N: number pulses

Das LP-Layout für die Untersuchung der Fixierung von TSSOP10-Bauelementen ist links in Bild 49 dargestellt. Mit den optimierten Jet-Parametern gilt es, geeignete Klebstoffdepotthöhen und -durchmesser durch Variation der Anzahl der Jet-Pulse zu identifizieren. Ist die Depothöhe zu niedrig, so besteht die Gefahr, dass keine Benetzung stattfindet, ist sie zu hoch, wird der Klebstoff verdrückt, so dass dieser die elektrischen Kontakte verunreinigt. Gleichzeitig muss die Bedingung für den Depotdurchmesser erfüllt sein. Die festgelegten Toleranzbereiche für Depothöhe und Depotdurchmesser sind rechts in Bild 49 innerhalb der zugehörigen Diagramme gekennzeichnet. Die Untersuchung zeigt, dass die Unterschiede der Depotausprägung zwischen dem LSL und der Metallisierung nur marginal sind. Außerdem erfüllt nur Klebstoff E bei drei Pulsen gleichzeitig beide Anforderungen hinsichtlich Höhe und Durchmesser. Die Auswahl des Klebstoffes stellt somit ein wichtiges Kriterium dar und muss im Bedarfsfall direkt mit

dem Klebstoffhersteller abgestimmt werden. Der Jetting-Prozess zeigt sich für die Integration in den Bestückablauf als vielversprechend.

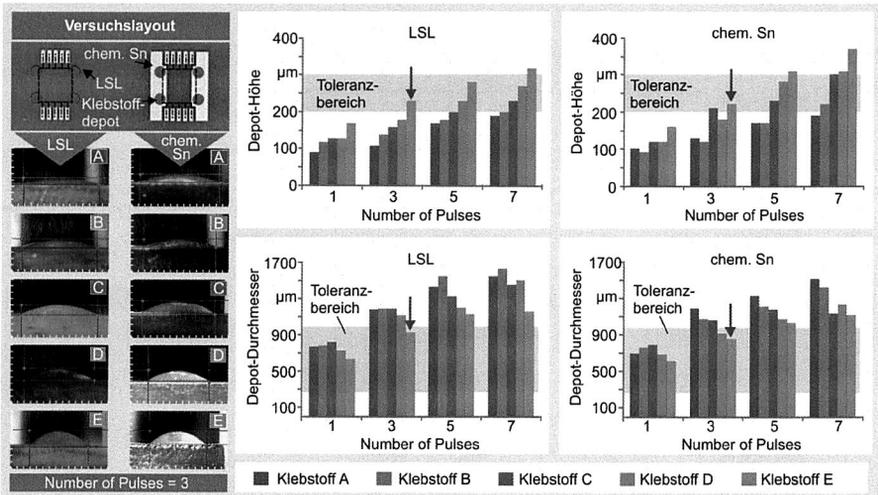


Bild 49: Höhe und Durchmesser der untersuchten Klebstoffe in Abhängigkeit des Volumens und der Leiterplattenoberfläche

Es konnten geeignete Parameter für die sichere Applikation geeigneter UV-Klebstoffe identifiziert werden. Zudem sprechen die kompakte Bauweise und die präzise Dosierung für dieses Verfahren.

Lichtinduziertes und thermisches Aushärteverhalten

Nach dem Klebstoffauftrag wird das Bauelement in die Klebstoffdepots bestückt, so dass die Ecken des Bauelementgehäuses benetzt werden. Nach dem Freigeben des Bauelementes muss eine ausreichende Festigkeit gewährleistet sein, so dass weder mechanische Einflüsse durch die Leiterplattenhandhabung noch der Einschwimmeffekt einen Versatz des Bauelementes provozieren können. Vor dem Hintergrund kurzer Prozesszykluszeiten ist die UV-Zeit zu minimieren, so dass beide Bedingungen erfüllt sind. Bild 50 zeigt die Versuchsanordnung.

Das UV-Licht wird über zwei Lichtleiter (UV-Strahler) in einem Abstand von 10 mm unter einem Winkel von 35° mit einer optischen Leistung von $3,5 \text{ W/cm}^2$ appliziert. Anschließend erfolgt der Reflowprozess (ohne Lotpaste) mit einem typischen bleifreien Sattelpfadprofil (vgl. [76]). Vor dem Hintergrund kurzer Prozesszeiten (< 1 Sekunde) werden die Klebstoffe hinsichtlich ihrer Verbindungsfestigkeit und des Fließverhaltens beim Wärmeeintrag im Reflow bei drei unterschiedlichen UV-Zeiten untersucht: kein UV, T_{\min} und T_{\max} . T_{\min} ist die Zeit, die notwendig ist, dass sich eine gehärtete Hülle bildet. Bei

T_{max} erfolgt eine vollständige Vernetzung des Klebstoffes. Bild 50 zeigt die ermittelten UV-Zeit-Parameter und die resultierenden Scherkraftwerte vor und nach dem Reflow für die unterschiedlichen UV-Zeiten.

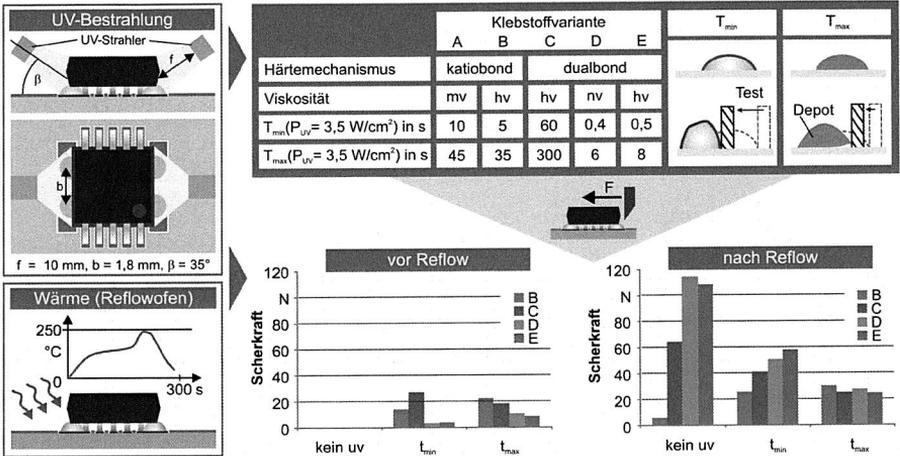


Bild 50: Analyse des Aushärteverhaltens für die relevanten Klebstoffe A bis E

Die Klebstoffe D und E weisen ein sehr geringes t_{min} mit 0,4 – 0,5 Sekunden auf. Für eine vollständige Vernetzung sind 6 bis 8 Sekunden erforderlich. Die Klebstoffe A bis C erfüllen die geforderte Prozesszeit von kleiner einer Sekunde nicht, weisen jedoch deutlich höhere Scherkraftwerte vor dem Reflow auf. Die erreichte Scherkraft des Klebstoffes E mit 3 N ist für die Festigkeit ausreichend. Aufgrund der sehr geringen Masse der Bauelemente ($m_{BE} = 0,024 \text{ Gramm}$) sind deutlich höhere Beschleunigungen als die von Handhabung und LP-Transport zulässig. Prallt eine Leiterplatte auf den Boden nach dem Fall aus einem Meter Höhe, wirken aufgrund der geringen Masse des Bauelementes ca. 10 mN (Beton), so dass die Fixierung selbst unter diesen harten Bedingungen standhalten würde.

Des Weiteren zeigt sich der Effekt, dass die Scherkräfte nach dem Reflow bei längerer UV-Zeit für alle Klebstoffe, ausgenommen bei Klebstoff B, abnehmen. Dieses Phänomen ist auf die Fließ- und Benetzungseigenschaften während der thermischen Behandlung im Reflowofen in Abhängigkeit der Vorvernetzung durch UV-Licht zurückzuführen. In Bild 51 sind drei Bauelemente, die mit Klebstoff E benetzt sind, für die drei UV-Zeiten vor und nach dem Reflow abgebildet.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Klebstoff ohne UV-Behandlung nach dem Reflow deutlich unter das Bauelement geflossen ist. Offensichtlich verringert sich im Reflow zunächst die Viskosität des Klebstoffes, so dass dieser unter das Bauelement zieht und

eine größere Fläche des Bauelementes und des Leiterplattenoberfläche benetzt. Im Gegensatz dazu sind die Klebstoffdepots mit UV-Behandlung formstabil. Aufgrund der Vernetzung des Klebstoffes lässt sich ein deutlicher Schrumpfung beobachten. Die Detailbilder zeigen eine signifikante Deformierung des Klebstoffes im Bereich, wo der UV-Strahl in das Klebstoffdepot hineindringt.

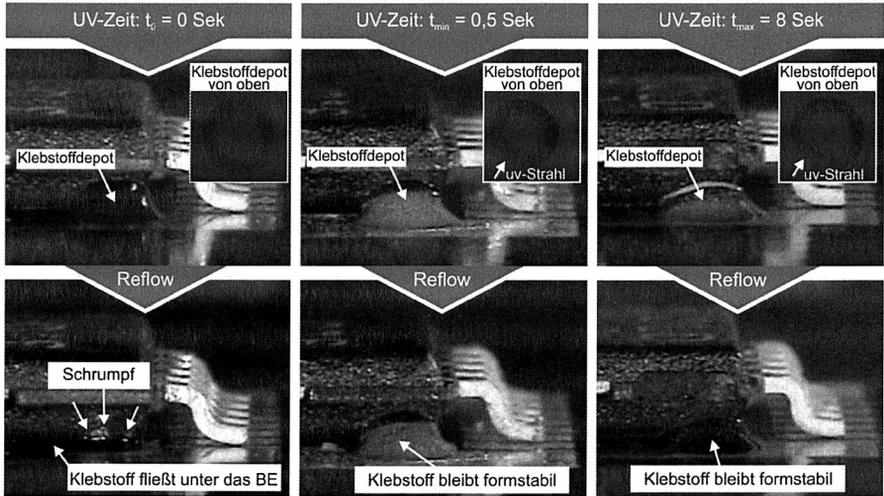


Bild 51: Darstellung der Klebstoffdepotausprägung für die gewählten UV-Parameter vor und nach dem Reflowprozess

Aufgrund der mechanischen Einwirkung des Klebstoffeschrumpfes ist die Annahme, dass sich das Bauelement während der UV-Einwirkung verschiebt, berechtigt, kann jedoch im Versuch nicht bestätigt werden. Bild 52 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau. Die Bestückung des Senders erfolgt auf eine aktive Leiterplatte, so dass bei der Kontaktierung der elektrischen Anschlüsse mit den LP-Pads der VCSEL aktiviert wird und das emittierte Licht in den LWL einkoppelt. Die übertragene Lichtleistung wird empfangenseitig mittels eines Lichtleistungssensors aufgenommen. Im ersten Schritt wird das Bauelement in die Klebstoffdepots platziert und die elektrischen Anschlüsse kontaktiert. Die übertragene Lichtleistung beträgt per Definition 100 %. Im zweiten Prozessschritt erfolgt der Härtingsprozess mit $T_{\max} = 8 \text{ s}$, so dass sich ein maximaler Schrumpfung einstellt. Während der UV-Strahlung sinkt die optische Übertragungsleistung auf unter 50 %. Dieser Leistungsabfall ist jedoch durch die thermische Belastung durch das hochenergetische Licht zu erklären. Nach der UV-Applikation steigt die übertragene Lichtleistung zurück auf den Ausgangswert mit 99,8 %. Durch die mechanische Fixierung des vernetzten Klebstoffes bleibt die elektrische Kontaktierung nach der Bauelementfreigabe erhalten.

Mit diesem Versuch ist bestätigt, dass der Klebstoffschrimp kein signifikanten Einfluss auf die optische Kopplung hat. Es wird jedoch eine ausreichend hohe Bestückkraft vorausgesetzt. Bei einer sehr geringen Bestückkraft liegen die Beinchen nur auf der Lotpaste auf, so dass durch den Klebstoffschrimp das Bauelement versetzt werden könnte. Im dargestellten Versuch zeigt sich die Bestückkraft von 5 N für das untersuchte TSSOP-10-Bauelement ausreichend.

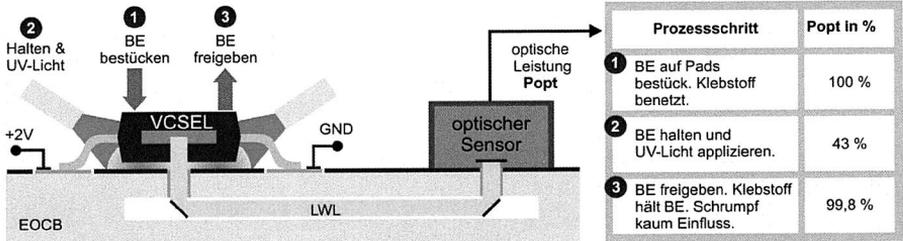


Bild 52: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses des Klebstoffschrimps auf die Einkopplung

Verhinderung der Selbstzentrierung

Zurück kommend auf die Ausgangsanforderung, das Einschwimmen der Bauelemente zu verhindern, ist basierend auf theoretischen Überlegungen zu erwarten, dass das Einschwimmen der Bauelemente mit Klebstoff E erfolgreich verhindert werden kann, wie in Bild 53 dargestellt.

In [58] und [59] wird auf Basis eines theoretischen Modells, das durch praktische Experimente gestützt wird, die Einschwimmkraft eines 0603-Zweipolers zwischen $2,5 \times 10^{-9}$ N und $3,5 \times 10^{-9}$ N geschätzt. Aufgrund der deutlich größeren Kontaktfläche des TSSOP-10-Bauelementes ist eine höhere Einschwimmkraft zu erwarten. Selbst bei einer 20-fachen höheren Selbstzentrierungskraft von angenommen 60×10^{-9} N würde bei einer Scherkraft von 3 N kein Einschwimmen stattfinden.

Diese Annahme kann durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden. Bild 53 zeigt anhand repräsentativer Bauelemente die Verhinderung des Einschwimmeffektes mittels Klebstofffixierung. Wie erwartet, schwimmen die Bauelemente im Fall der UV-Vorbehandlung nicht ein. Interessanterweise kann selbst für den Fall ohne UV-Behandlung kein Einschwimmen festgestellt werden. Der Klebstoff wird während der Vorheizphase offensichtlich ausreichend vernetzt, so dass in der Liquidusphase des Lotes die Selbstzentrierung verhindert wird.

5.4.4 Zusammenfassende Bewertung

Aufgrund der Nähe zum Standard-SMT-Prozess stellt das Fixieren der Bauelemente mittels Klebstoffs ein vielversprechendes Verfahren für die Low-Cost-Fertigung dar. Das enge Prozessfenster für die Klebstoffhöhe mit $200\ \mu\text{m}$ bis $300\ \mu\text{m}$ bei einem maximal zulässigen Klebstoffdepotdurchmesser von $1000\ \mu\text{m}$ konnte nur von Klebstoff E mittels Jetten eingehalten werden. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass der Schrumpf des Klebstoffes durch die UV-Härtung keinen Einfluss auf die optische Kopplung hat, da während der Härtung das Bauelement durch den Greifer fixiert ist.

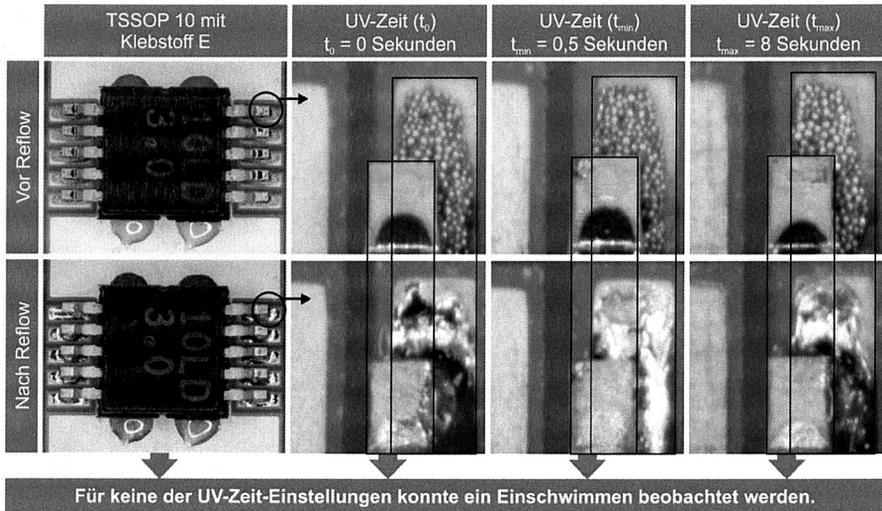


Bild 53: Verhinderung des Einschwimmeffektes mit Klebstoff E unter Berücksichtigung von drei unterschiedlichen UV-Zeiten

Untersuchungen zur Selbstzentrierung zeigen, dass das Verschwimmen des Bauelementes auch ohne UV-Behandlung verhindert werden kann. Somit stellt sich gerade vor dem Hintergrund kurzer Prozesszykluszeiten die Frage, ob überhaupt eine UV-Behandlung notwendig ist. Bei einer erforderlichen Positionsgenauigkeit des Lasers zur Einkoppelstelle von weniger als $20\ \mu\text{m}$ muss diese Frage mit ja beantwortet werden. Erschütterungen der Leiterplatte können das Bauelement verschieben, wenn auch nur um wenige Mikrometer, so dass sich die Einkopplung verschlechtert. Bei Bauelementen, die nahe der Positionstoleranzgrenze bestückt sind, kann eine ungewollte Verschiebung zu einer Koppeldämpfung außerhalb der geforderten Spezifikation von $-3\ \text{dB}$ führen. Die Anhärtung des Klebstoffes mittels UV-Licht garantiert mit einer Scherkraft von $3\ \text{N}$ eine ausreichend hohe Festigkeit direkt nach der Freigabe des Bauelementes. Außerdem begünstigt die Vorhärtung mittels UV-Licht die Formstabilität des Klebstoff-

depots während des Reflowprozesses, so dass sowohl ein Nachschumpfen als auch ein Verfließen des Klebstoffes verhindert wird. Die ermittelte UV-Aktivierung von 0,5 Sekunden steht einer zeiteffizienten Massenfertigung nicht entgegen.

5.5 Schutz des optischen Strahlengangs

Der Schutz des optischen Strahlengangs vor Umgebungseinflüssen stellt eine weitere Herausforderung der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik dar. Die Freistrahlstrecke, die aufgrund des Spaltes zwischen Leiterplatte und Bauelement zugänglich ist, erfordert eine hermetische Kapselung, um das Eindringen von Staub und Feuchtigkeit zu verhindern. Nur so kann die fehlerfreie Datenübertragung gesichert werden. Ein möglicher Ansatz zum Schutz des optischen Strahlengangs stellt die Kapselung mit einem Underfillklebstoff dar. In Anlehnung an die Applikation des Fixierklebstoffes zeigt sich das Jetting-Verfahren, wie in Bild 54 dargestellt, auch für den Auftrag eines Kapillarklebstoffes geeignet.

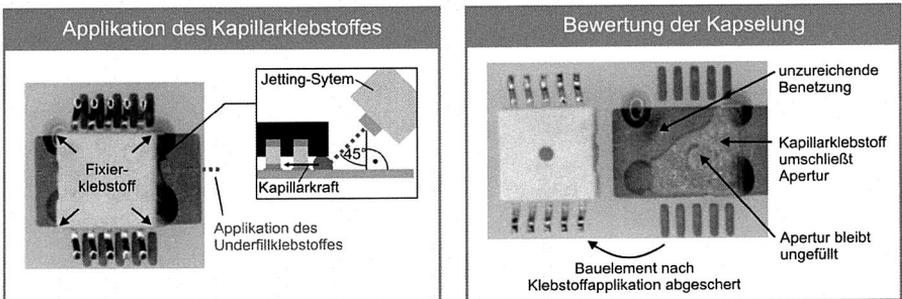


Bild 54: Schutz des optischen Strahlengangs mittels eines Kapillarklebstoffes

Wird ein Kapillarklebstoff mit dem Mikrodosiersystem in den Spalt zwischen Bauelement und Substrat appliziert, fließt der Klebstoff aufgrund der Kapillarkräfte, wie rechts in Bild 54 dargestellt, unter das Bauelement. Der optische Strahlengang bleibt dabei ungefüllt. Prozesstechnisch stellt die Applikation mit geeigneten Jetting-Parameter (vgl. Abschnitt 5.4) keine Herausforderung dar. Kritisch könnte sich jedoch die Ausgasungen des Klebstoffes und des damit verbundenen Niederschlages auf die optischen Flächen zeigen und bedarf weiterführender Untersuchungen.

5.6 Lösungskonzept für eine durchgängige Prozesskette für die elektrooptische AVT in Standard-SMT-Bestückautomaten

Mit den vorherigen Abschnitten wurden Eigenschaften und Optimierungspotenziale der Einzelprozesse zur hochpräzisen Montage elektrooptischer Bauelemente auf elektrooptische Leiterplatten beschrieben. Eine weitere Herausforderung liegt darin, die Einzelprozesse seriell zu verketteten und unter Berücksichtigung aller Einzelanforderungen ei-

nen erweiterten Bestückablauf bereitzustellen, der in einen Standard-Bestückautomaten integriert werden kann. Zwei wesentliche Erkenntnisse konnten aus den vorangegangenen Überlegungen und Experimenten abgeleitet werden. Die teilaktive Montage stellt eine wirtschaftliche Lösung mit geringem Aufwand zur Integration in einen Bestückautomaten dar. Bei der teilaktiven Montage toleranzbehafteter Bauelemente ist die unmittelbare Fixierung nach dem Freigeben der optischen Bauelemente durch das Greifersystem zu gewährleisten. Das Fixieren mittels schnellhärtenden Dualbond-Klebstoffen erweist sich als geeignet. Des Weiteren bietet der Auftrag mittels Jetten Vorteile hinsichtlich der Volumentreue und der Integration des Klebstoffauftrages in den Bestückautomaten aufgrund der geringen Baugröße der Jet-Ventile. Auf Basis dieses Ergebnisses kann eine geeignete Prozesskette, die für eine Realisierung empfohlen wird, abgeleitet werden (vgl. Bild 55).

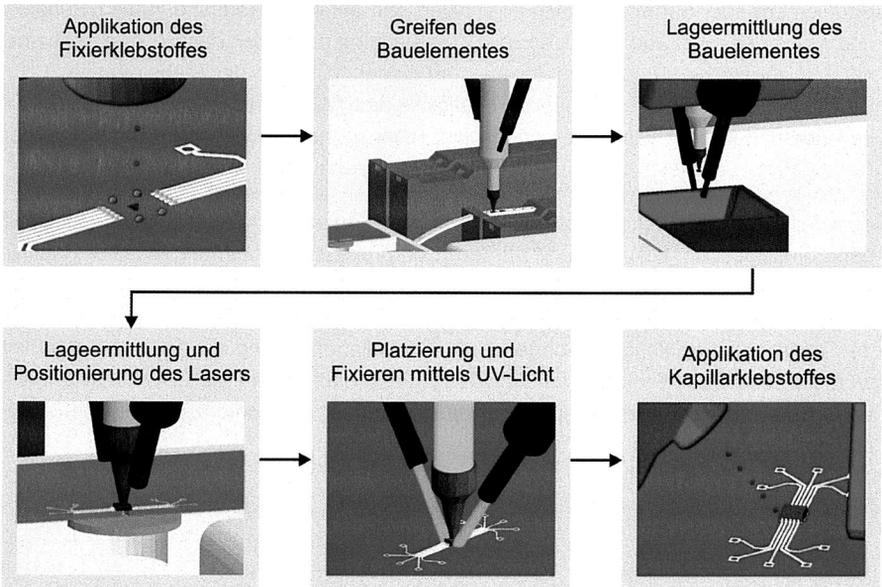


Bild 55: Einzelsequenzen des modifizierten Montageprozesses (vgl. [17])

Die im Schablonendruckprozess mit Lotpaste bedruckte Leiterplatte wird über den Leiterplattentransport in den Arbeitsbereich des Bestückautomaten gefahren, im Bestücknest fixiert und anschließend optisch zentriert. Vier Klebstoffpunkte werden an der Position der Bauelementecken mit Hilfe eines integrierten Mikro-Dispensierers appliziert. Hierfür muss der Klebstoff eine hohe Thixotropie aufweisen, so dass eine ausreichende Höhe des Klebstoffpunktes bei geringem Depotdurchmesser prozessiert werden kann. Nur so kann eine optimale Benetzung der Gehäuseecken gewährleistet

werden, ohne dass Klebstoff in die bereits aufgetragene Lotpaste fließt und sich mit dieser vermengt. Ebenso ist durch optimierte Jet-Parameter die Satellitenbildung zu vermeiden, um Verunreinigungen des optischen Strahlengangs zu verhindern.

Im nächsten Prozessschritt wird die Leiterplatte in den Bestückbereich weitertransportiert und dort erneut optisch zentriert. Zusätzlich wird die Lage der Einkoppelstelle mittels lokaler Referenzmarken auf der LWL-Ebene ermittelt. Nach dem Greifen des Bauelementes aus der Zuführeinheit erfolgt dessen optische Zentrierung an der stationären Bauelementkamera. Zur Ermittlung der Laserlage wird das Bauelement an einem Feinmessplatz elektrisch kontaktiert und optisch aktiviert, so dass mit Hilfe eines in den Feinmessplatz integrierten laser beam profiler die optimale Kopplung identifiziert wird.

Auf Basis der Messdaten der optischen Zentrierung und des Feinmessplatzes wird das Bauelement über der Koppelstelle positioniert und auf die Leiterplatte in die Lotpasten- und Klebstoffdepots abgesenkt, so dass der Klebstoff die Ecken des Bauelementes benetzt. Während der Greifer das Bauelement nieder hält, wird der Klebstoff mittels UV-Licht angehärtet. Bei ausreichender Festigkeit des Klebstoffes kann das Bauelement bei Vibrationen oder Erschütterungen nicht mehr verrutschen noch im nachfolgenden Reflow-Prozess verschwimmen. Der optische Strahlengang ist fixiert.

Zum Schutz vor Umwelteinflüssen wird im letzten Prozessschritt der optische Strahlengang umschlossen. In Anlehnung an den Fixierprozess kann ein angepasster Kapillarklebstoff seitlich unter dem Bauelement zwischen zwei Klebstoffdepots gejetet werden. Aufgrund der Kapillarwirkung fließt der Klebstoff unter das Bauelement und umschließt den optischen Strahlengang, ohne in die Leiterplattenöffnung zu fließen. Schließlich wird die bestückte Leiterplatte in den Reflowofen gefahren, wo die Umschmelzung der Lotpaste erfolgt und andererseits der Fixierklebstoff an den lichtunzugänglichen Stellen und der Kapillarklebstoff durchhärtet.

6 Prototypische Umsetzung der teilaktiven Bestückung in einem SMT-Bestückautomaten

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebene automatisierte Montagetechnologie wurde an einem Hochleistungsbestückautomaten Siplace HF erprobt und qualifiziert. Hierfür wurde ein prototypischer Bestückautomat elektrisch, mechanisch und softwaretechnisch so modifiziert, dass die notwendigen Prozessabläufe realisiert werden können. Nachfolgend wird vom Grundaufbau des Bestückautomaten ausgehend die hardwaretechnische Erweiterung mit dem präzisen Bestückkopf, den Mikrodosierventilen zum Klebstoffauftrag zusammen mit dem UV-Gerät und insbesondere der Aufbau, die Funktion und die Integration des Feinmessplatzes zur Messung der Laserlage beschrieben. In Abschnitt 6.2 ist die in der Steuersoftware realisierte Maschinenkinematik gezeigt und in Abschnitt 6.3 um die Zusatzfunktionen des Feinmessplatzes erweitert.

6.1 Grundaufbau und Modifikation des Bestückautomaten

Für die Realisierung der automatischen Montage optischer Bauelemente auf elektrooptische Leiterplatten eignet sich ein High-End Bestückautomat mit hoher Positioniergenauigkeit. Zusätzlich ist ausreichend Raum zur Integration zusätzlicher Module für eine erweiterte Funktionalität und eine flexible Softwareanpassung erforderlich. Der kommerziell erhältliche Bestückautomat Siplace HF weist diese Grundvoraussetzung auf und steht als prototypischer Aufbau mit einer spezifischen Entwicklungssoftware zur Ansteuerung der einzelnen Maschinenkomponenten zur Verfügung (Bild 56).

6.1.1 Aufbau der Basismaschine

Der Bestückautomat besteht aus einem Maschinenrahmen aus Guss mit integrierter Stromversorgung und pneumatischer Druckluftverteilung. Die Bereitstellung der Bauelemente erfolgt über Standard-Zuführmodule, die auf mobile Förderertische platziert werden. Er verfügt über zwei Bestückbereiche, die über einen fünfgliedrigen Leiterplattentransport verbunden sind. Die Fixierung der Leiterplatten im Leiterplattentransport erfolgt mittels eines Hubtisches, so dass diese von unten nach oben gegen einen festen Anschlag geklemmt werden. Somit stellt die Leiterplattenoberseite unabhängig von ihrer Dicke stets die Referenzhöhe und damit auch die Bestückebene dar. Beide Arbeitsbereiche sind jeweils mit einem CFK-Ausleger (kohlefaserverstärkter Kunststoff) ausgestattet und werden über direkte Linearmotoren (Y-Achse) angetrieben. Die Ausleger bewegen ebenfalls über einen direkten Linearantrieb (X-Achse) einen Schlitten mit einer montierten Trägerplatte, die im Bestückbereich 1 das Jet-System für den Klebstoffauftrag und im Bestückbereich 2 einen Hochpräzisionsbestückkopf trägt. Die Positionierung der Linearmotoren erfolgt über direkte Wegmessung mittels eines Linearmaßstabes mit einer Auflösung von 1 $\mu\text{m}/\text{digit}$.

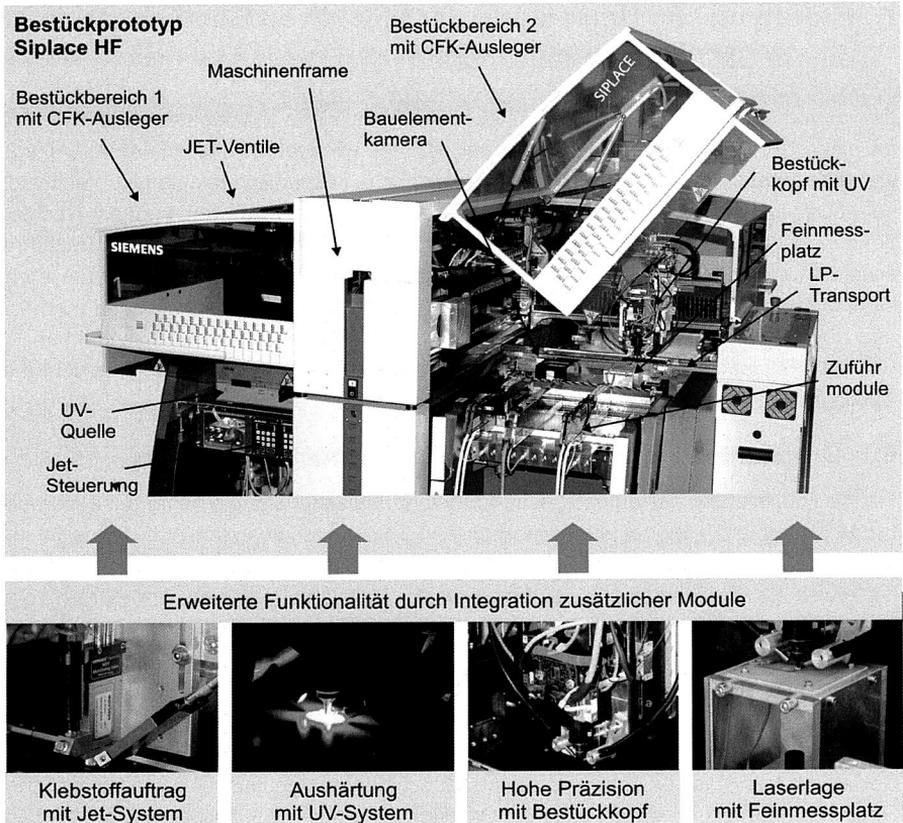


Bild 56: Für die Realisierung der teilaktiven Bestückung wird zusätzliche Funktionalität in den prototypischen Bestückautomaten Siplace HF integriert.

Pro Achse kann eine maximale Beschleunigung von 4 m/s^2 und eine maximale Geschwindigkeit von $2,5 \text{ m/s}$ erzielt werden. Unter diesen Voraussetzungen werden mit den leichten, steifen Portalen gemäß den Herstellerangaben nach [31] Positioniergenauigkeiten von $6,08 \mu\text{m}$ (3σ) für die X-Achse und $8,67 \mu\text{m}$ (3σ) für die Y-Achse erreicht. Eine Steigerung der Positioniergenauigkeit ist durch Begrenzung der Beschleunigung auf 1 m/s^2 und der Geschwindigkeit auf 1 m/s nach [125] zu erwarten. Kapitel 7 zeigt die Genauigkeitsuntersuchungen für diese Achsparameter.

Auf der Unterseite der Kopfträgerplatte im zweiten Arbeitsbereich ist eine digitale Multicolor-Kamera für die Leiterplattenlageerkennung montiert. Sie besitzt drei verschiedene miteinander kombinierbare Beleuchtungsmodi und ermöglicht so eine optimale Lichtein-

stellung zur Erkennung sowohl der Referenzmarken auf der elektrischen Lage als auch der Passmarken auf der tieferliegenden optischen Lage. Für die optische Zentrierung der Bauelemente verfügt die Maschine zusätzlich über eine digitale hochauflösende Kamera, die im Arbeitsbereich 2 stationär montiert ist. Sie bietet insgesamt sechs einzeln ansteuerbare Beleuchtungsebenen. Die Bildauswertung erfolgt über die PC-basierte Software SIPLACE VISION und ermöglicht das Teachen von Passmarken und von Bauelementstrukturen. SMD-spezifische Auswertelgorithmen ermöglichen das Erkennen charakteristischer Merkmale der elektronischen Bauelemente. [31]

6.1.2 Erweiterte Funktionalität

Für die Ansteuerung des Bestückautomaten über eine HMI wird eine firmenspezifische kommerziell nicht verfügbare Entwickler-Softwareplattform eingesetzt, welche die individuelle Integration erweiterter Prozessabläufe und die Ansteuerung zusätzlicher Hardware ermöglicht. Die grundlegende Steuerungshierarchie ist in Bild 57 dargestellt.

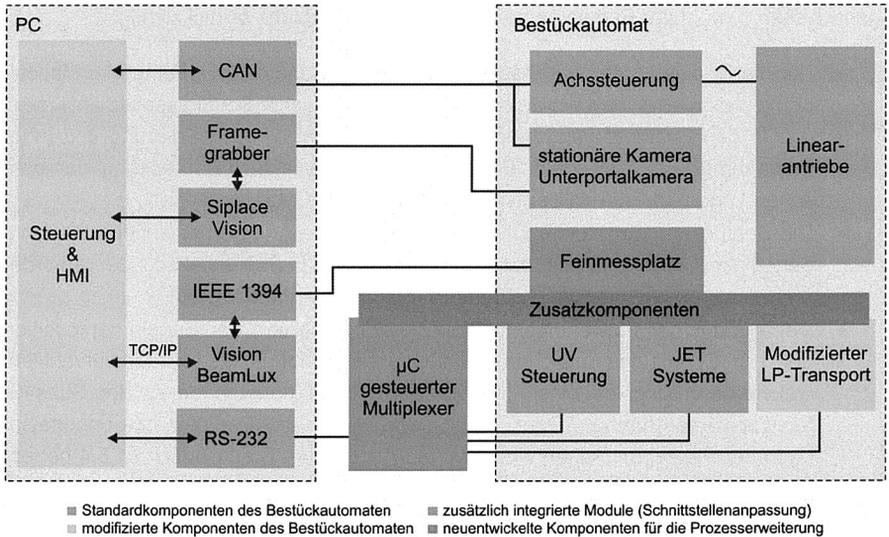


Bild 57: Steuerungshierarchie des Bestückautomaten

Die Kommunikation zwischen der Maschine und der Steuersoftware erfolgt über einen CAN-Bus. Die Übertragung der Kamerabilder an die Steuersoftware Siplace Vision erfolgt über eine systemoptimierte Framegrabber-Karte. Der zusätzlich integrierte Feinmessplatz ist über eine Firewire-Schnittstelle (IEEE 1394) mit dem Steuer-PC verbunden. Die aufgenommenen Bilder des Feinmessplatzes werden in der kommerziellen Software BeamLux dargestellt. Zur Bestimmung der Laserspotposition werden über eine TCP/IP-Schnittstelle zwischen der übergeordneten Steuersoftware und dem

Visionsystem Beam Lux Daten zur Laserlage und Lichtintensität ausgetauscht. Die zusätzlichen Systeme für die UV-Applikation und den Klebstoffauftrag besitzen eine RS-232 Schnittstelle. Der Klebstoff- und Underfillauftrag erfolgt im Bestückbereich 1. Die Bestückung erfolgt im Bestückbereich 2. Nach der Bestückung muss somit die Leiterplatte wieder zurück in den Bestückbereich 1 transportiert werden. Über eine Modifikation des Leiterplattentransports, der standardmäßig nur in eine Richtung verfährt, lässt sich diese erweiterte Funktion implementieren. Die Ansteuerung der Zusatzfunktionen erfolgt anstatt über den CAN-Bus über eine RS-232-Schnittstelle. Für eine schlanke Steuerungshierarchie ist ein einheitlicher Befehlssatz zur Ansteuerung aller zusätzlichen Endsysteme entwickelt. Die Befehle werden an einen spezifisch entwickelten Mikrocontroller gesteuerten Multiplexer gesendet und von diesem in einen endgerätspezifischen Befehlssatz transformiert und übermittelt.

Die optische Bestückung mit einem SMD-Bestückautomaten erfordert die Integration zusätzlicher Komponenten für eine erweiterte Funktionalität, welche die optischen Eigenschaften sowohl der Bauelemente als auch der Leiterplatte berücksichtigt:

- Für die Ermittlung der Laserlage des optischen Sendebauelementes im Maschinenkoordinatensystem wurde ein spezifischer optischer Feinmessplatz entwickelt und in den Bestückablauf integriert. Dieser erlaubt die Kontaktierung und Inbetriebnahme eines optischen Bauelementes zur exakten Vermessung der optischen Lage und Prüfung der typischen optischen Charakteristika.
- Die Bestückung der elektrooptischen Bauelemente erfordert eine hohe Bestückgenauigkeit bei reproduzierbarer Bestückkraft. Zur Sicherstellung der Anforderungen wurde ein spezifischer Bestückkopf integriert und erprobt.
- Der Auftrag der notwendigen Klebstoffe zur Fixierung der Bauelementposition und zum Schutz des optischen Strahlengangs erfolgt mittels Mikrodosierventilen, welche berührungslos feinste Mengen an Klebstoff punktgenau auf den Substraten applizieren können. Dabei stellt die Fixierung der Bauelemente unmittelbar nach der Platzierung einen wesentlichen Aspekt dar. Die in Abschnitt 5.4 behandelte Fixiermethode mittels UV-Klebstoffen erfordert somit zusätzlich die Integration einer UV-Lichtquelle mit Lichtführung zum Bestückkopf, wo das UV-Licht gezielt auf die applizierten Klebstoffpunkte strahlt.

Nachfolgend werden die erforderlichen Zusatzmodule und deren Maschinenanbindung erläutert. Dabei wird der Beschreibung des entwickelten Feinmessplatzes eine Sonderstellung eingeräumt und in Abschnitt 6.3 ausführlich dargestellt.

6.1.3 Hochpräziser Bestückkopf mit integrierter UV-Einheit

Zur Erzielung einer hohen Bestückgenauigkeit mit einer hohen Prozesszuverlässigkeit ist neben den hochgenauen Hauptachsen ein präziser Bestückkopf notwendig. Hierfür wurde im Rahmen des Forschungsprojektes AMOB (Automatisierte Montage optischer

Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleiter [31]) in Kooperation mit den Firmen Siemens AG, Aerolas GmbH und SKF Linearsysteme GmbH ein Bestückkopf mit verbesserter Bestückgenauigkeit und präziser Bestückkraftkontrolle wie in Bild 58 dargestellt aufgebaut und im Rahmen dieser Arbeit für den Montageprozess der optischen Bauelemente erprobt. Der Bestückkopf besitzt durch die Vertikalachse Z und der Drehachse Phi zwei Freiheitsgrade. Die direkt angetriebene Z-Achse wird auf hochsteifen vibrationsarmen Linearführungen mit einer Genauigkeit von $5\ \mu\text{m}$ (3σ) positioniert, wobei Verfahrensgeschwindigkeiten von $1\ \text{m/s}$ und Beschleunigungen von $5\ \text{m/s}^2$ möglich sind. Die implementierte Rückholfeder sichert die Position der Z-Achse für den stromlosen Fall, so dass bei einer Bewegung der Hauptachsen ein Crash verhindert wird. Die luftgelagerte Dreheinheit ist an die Linearachse montiert. Über ein Ventil ist die Einstellung der pneumatischen Vorspannung zur Begrenzung der Bestückkraft zwischen $0,05\ \text{N}$ und $15\ \text{N}$ möglich.

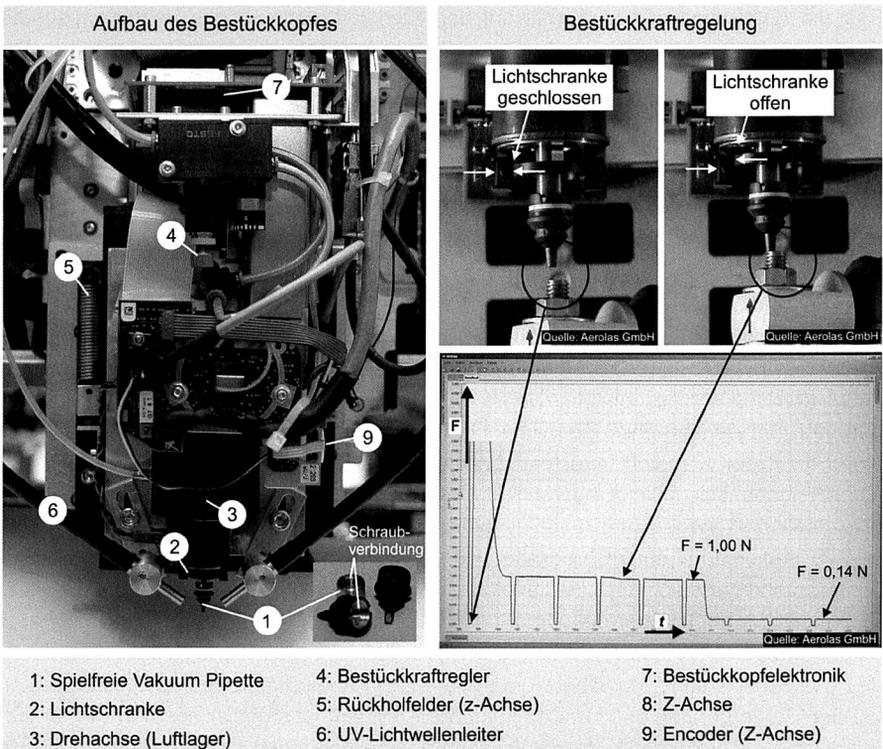


Bild 58: Aufbau des Bestückkopfes und Konzept der Bestückkraftregelung (vgl. [31])

Die Bestückkraftbegrenzung wird durch ein kraftkonstantes Einfedern der Pipette bis zu 2 mm realisiert. Der Anschlag der Pipette wird mittels eines elektrischen Signals einer Lichtschranke detektiert. Trifft die Pipette mit dem gegriffenen Bauelement auf die Leiterplatte, bewegt sich die Z-Achse weiter, während die Pinole in das Luftkissen der Drehachse hineinfährt und die Lichtschranke öffnet. Über das elektrische Signal der Lichtschranke wird dadurch der Stopp des Motors getriggert. Das kraftkonstante Luftpolster der Pinole garantiert eine konstant wirkende Kraft in Bestückrichtung. Die Greifereinheit funktioniert nach dem Venturiprinzip und erzeugt ein Vakuum von -900 mbar bis hin zu einem Staudruck von 250 mbar an der Pipette. Zur weiteren Reduzierung von Spielungenauigkeiten sind die Pipetten dahingehend modifiziert, dass diese mittels einer Schraubverbindung mit der Pinole gefügt werden. Die Adapter stellen passgenaue Inserts dar, die in die Pipette eingeklebt sind und dadurch eine spielfreie Verbindung bieten.

Für die Applikation des UV-Lichts auf den Klebstoff während des Bestückprozesses sind zusätzlich mechanische Halterungen für die UV-Lichtwellenleiterkabel montiert. Die Lichtwellenleiter werden über den Kabelschlepp entlang der Hauptachsen bis zur Pipette geführt und über die Vorrichtung an die Position des Bauelementes (Pipettenspitze) ausgerichtet. Die Einstellung der UV-Licht-Intensität und Bestrahlungszeit erfolgt manuell am Bedienpanel des Steuergerätes. Das Öffnen des Shutters für die UV-Licht-Applikation erfolgt über einen Befehl im Programmablauf.

6.1.4 Integrierte Systeme für den berührungslosen Klebstoffauftrag

Zum Auftrag des Fixierklebstoffes und eines Kapillarklebstoffes für den Schutz des optischen Strahlengangs sind zwei Mikrodosierventile, wie in Bild 59 dargestellt, in den Arbeitsbereich 1 integriert. Das Mikrodosierventil für den Auftrag des Kapillarklebstoffes ist im Winkel von 45° ausgerichtet. Somit kann Klebstoff direkt in den Spalt zwischen bestückten Bauelement und Leiterplattenoberseite appliziert werden. Über die Kapillarwirkung fließt der Klebstoff unter das Bauelement und umschließt somit den optischen Strahlengang. Das Mikrodosierventil für den Auftrag des Fixierklebstoffes ist normal zur Prozessfläche ausgerichtet. Eine dynamische Ausrichtung der Höhe ist aufgrund der Jet-Technologie mit einem Arbeitsbereich von bis zu 10 mm nicht notwendig. Der Arbeitsabstand lässt sich über die Langlöcher der Montageplatte einstellen. Die Druckluftbereitstellung erfolgt über den Druckluftverteiler des Bestückautomaten. Zur separaten Druckluftregulierung und Abschaltung der Druckluft ist zusätzlich ein Ventil vorgeschaltet. Die Sensor- und Aktorkabel werden über den Kabelschlepp des Bestückautomaten zu den Steuergeräten geführt. Das Mikrodosiersystem ist modular aus den vier Grundmodulen Sensorelektronik, Aktuatorsystem, Fluidikmodul und Düseneinheit aufgebaut. Die Steuereinheit ist extern über eine RS-232-Schnittstelle steuerbar und enthält das Schaltnetzteil, Heizregler zur Einstellung der Düsentemperatur und eine Mikroprozessoreinheit zur Ansteuerung des Aktuatorsystems. Mittels einer präzisen Adaption des

Öffnungs- und Schließverhalten des Ventils über ein piezogesteuertes Stößel lassen sich Klebstoffvolumen, Tropfenabrissverhalten und kinetische Energie einstellen. Das Zeit-Weg-Diagramm des Stößels, wie in Bild 59 dargestellt, zeigt die Jet-Parameter.

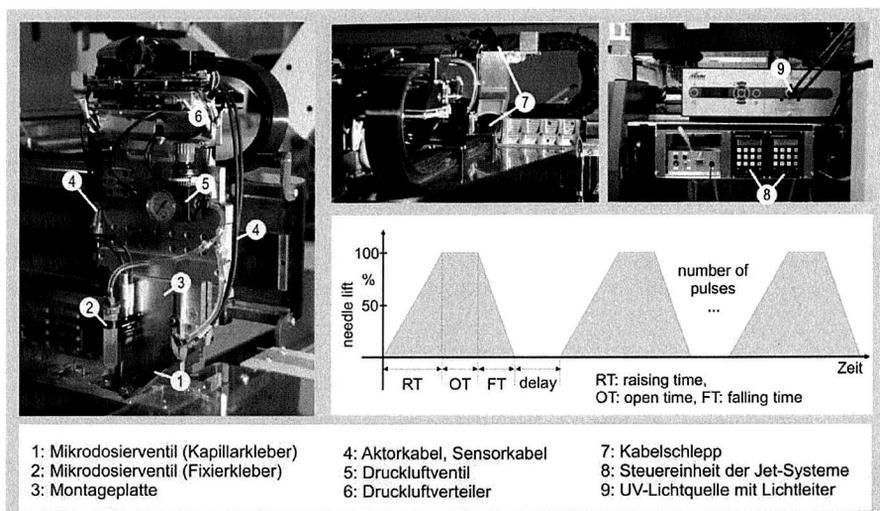


Bild 59: Integration und Funktion der Mikrodosiersysteme

Die Dosiermenge lässt sich durch die Anzahl der Pulse einstellen. Die Flugeigenschaften der Tropfen und die mögliche Ausbildung von Satelliten sind durch die fünf Parameter, Zeit der steigenden Flanke (RT), Öffnungszeit (OT), Zeit der fallenden Flanke (FT), Verzögerungszeit zwischen den Pulsen (Delay) und dem Stößelhub (NL) bestimmt. Ferner ist die Ausbildung von Satelliten vom Abstand zur Prozessfläche abhängig. Die entsprechenden Prozessuntersuchungen wurden ausführlich in Abschnitt 5.4 behandelt. Das System ist in den Bestückautomaten so integriert, dass alle Prozessparameter bis auf den Arbeitsabstand direkt aus der Steuersoftware einstellbar sind und somit verschiedene anwendungsspezifische Klebstoffe verarbeitet werden können.

6.2 Maschinenkinematik

Die Realisierung der automatisierten Bestückung von optischen Bauelementen auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern erfordert die Entwicklung eines erweiterten Bestückprozesses auf Basis eines Vier-Achs-Portalsystems, wie bei Standard-Bestückautomaten der Flachbaugruppenfertigung standardmäßig eingesetzt wird. Für die Maschinenkinematik ergibt sich somit zusammen mit dem zusätzlichen Feinmessplatz zur optischen Zentrierung der Laserlage ein System bestehend aus insgesamt fünf relativ zueinander stehenden Koordinatensystemen (Bild 60).

Zunächst wird kurz der erweiterte Bestückablauf erläutert und anschließend die mathematischen Zusammenhänge der realisierten Kinematik vertiefend dargestellt. Die Leiterplatte wird über den Leiterplattentransport in den Bestückbereich gefahren und im Bestücknest positionssicher mit einem Klemmmechanismus fixiert. Das Bestücknest bezeichnet den Ort des Leiterplattenanschlages in X-Richtung am feststehenden Leiterplattentransport. Die Erfassung der Leiterplattenlage erfolgt mittels der optischen Zentrierung mit der Leiterplattenkamera, die am Bestückkopf montiert ist. Hierfür werden entsprechende Passmarken auf der Leiterplatte angefahren, deren exakte Position mit der Leiterplattenkamera gemessen und daraus die korrigierten Bestückpositionen berechnet. Mit der Pipette, die sich in einem festen horizontalen Abstand zur Leiterplattenkamera (Nozzle-Offset) befindet, werden die Bauelemente aus der Zuführung an der Abholposition mittels Vakuum gegriffen. Aufgrund der Verpackungstoleranzen weisen die Bauelemente einen Versatz zur Abholposition auf und werden somit nicht mittig von der Pipette gegriffen. Für die optische Zentrierung wird das zu bestückende Bauelement über der stationären Leiterplattenkamera positioniert, in den Fokusbereich abgesenkt und der Versatz des Bauelementes bezüglich der Pipette gemessen.

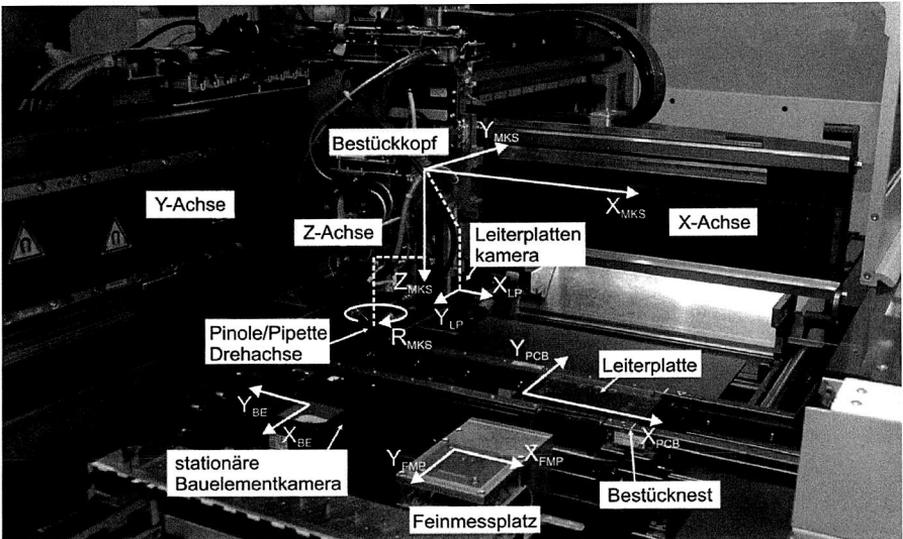


Bild 60: Darstellung der modulspezifischen Koordinatensysteme innerhalb des Bestückautomaten

Zur Ermittlung der Laserlage wird anschließend das Bauelement auf dem spezifischen Feinmessplatz positioniert, der Laser über die Ansteuerelektronik aktiviert und der Versatz bezüglich der Pipette vermessen. Zur Bestückung des Bauelementes wird die Pipette unter Berücksichtigung des Laserversatzes zur Zielbestückposition bewegt und

schließlich auf die Leiterplatte in die Lotpasten- und Klebstoffdepots abgesenkt. Nach der Fixierung des bestückten Bauelementes durch Anhärten des Fixierklebstoffes mittels UV-Licht wird der Bestückvorgang durch Freigabe des Bauelementes abgeschlossen.

Bei der Bestückkinematik wird zwischen Kalibrierdaten, CAD-Daten, Messdaten und Stelldaten unterschieden.

- **Kalibrierdaten** stellen konstante Größen des Bestücksystems dar. Dazu zählen Position, Drehlage und Skalierung der jeweiligen Kamera-Systeme, Position des Bestücknests, Abholposition und Position der Pipette bezüglich der Leiterplattenkamera (Nozzle-Offset). Die Daten werden mittels einer automatischen Kalibrierung einmalig ermittelt und bleiben während des Bestückvorgangs unverändert.
- **CAD-Daten** sind auftragsspezifische Nutzengrößen wie Leiterplattendimension, Vektor von der Leiterplattenecke zum Nullpunkt der Bestückkoordinaten, Bestückpositionen der jeweiligen Bauelemente und Marken im Leiterplatten-Koordinatensystem. Auf Basis der CAD-Daten werden die tatsächlichen Markenpositionen bestimmt und die korrigierten Bestückpositionen für jede Leiterplatte ermittelt und dadurch Fertigungs- und Positioniertoleranzen der Komponenten kompensiert.
- **Messdaten** stellen die von den Kamera-Systemen erfassten Versatzwerte der Markenpositionen, der Bauelementpositionen und im Fall der optischen Bestückung der Laserposition dar. Sie werden im jeweiligen Kamera-Koordinatensystem erfasst und müssen zur Weiterverarbeitung ins Maschinen-Koordinatensystem transformiert werden.
- **Stelldaten** sind die resultierenden Achspositionen, um z. B. die Pipette oder ein Bauelement an eine Zielposition zu platzieren. Die erforderliche Achsposition wird in Abhängigkeit der Kalibrierdaten, der CAD-Daten und der Messdaten ermittelt.

6.2.1 Beschreibung der umgesetzten automatischen Kalibrierung

Die automatische Kalibrierung stellt einen Programmablauf dar, mit welchem die Kalibrierdaten erfasst werden. Die Y-Achse stellt im Maschinensystem die Bezugsachse dar. Alle Daten werden bezüglich der Y-Achse in einem fiktiven kartesischen Koordinatensystem ermittelt. Die Gesamtkalibrierung erfolgt in folgender Reihenfolge:

- Skalierung und Ausrichtung der Leiterplattenkamera
- Winkel der X-Achse bezüglich der Y-Achse
- Lage der Pipette bzgl. der LP-Kamera (Nozzle Offset)
- Lage, Skalierung und Ausrichtung der Bauelementkamera

- Position des Bestückneests
- BE-Abholposition

Die Kalibrierung basiert auf der Verwendung eines Glasbausteins mit einer Referenzmarke, die sowohl von der LP-Kamera als auch von der BE-Kamera erfasst wird. Mittels einfachen Transformationen werden die Positionen der Komponentenkoordinatensysteme (BE-Kamera, LP-Kamera usw.) im Maschinenkoordinatensystem abgebildet. Alle ermittelten Kalibrierdaten werden in einer XML-Datei gespeichert und stehen somit im Bestückablauf dynamisch zu Verfügung.

Die Ermittlung des Nozzle-Offsets erfolgt in drei Schritten, wie in Bild 61 dargestellt. Im ersten Schritt wird die Lage des Kalibrierteils angefahren und die Position der Marke erfasst. Im zweiten Schritt wird die aktuelle Position um den Nominalwert des Nozzle-Offsets korrigiert, das Glasteil von der Pipette gegriffen, um 180° gedreht und wieder abgesetzt. Im dritten Schritt wird die Nominalposition des Kalibrierteils erneut angefahren und der Versatz des Fiducials gemessen.

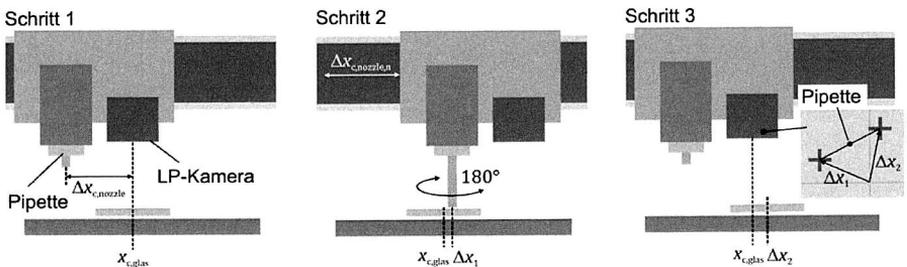


Bild 61: Kalibrierung des Nozzle-Offsets

Zur exakten Bestimmung des Nozzle-Offsets wird der Nominalversatz mit den ermittelten Werten überschrieben und der beschriebene dreistufige Kalibrierablauf mehrfach wiederholt, bis der Versatz kleiner als ein Mikrometer wird.

Die Kalibrierung der BE-Kamera basiert auf demselben Prinzip. Zunächst wird der Glasbaustein von seiner Abholposition gegriffen und mit dem vorher kalibrierten Nozzle-Offset an den Nominalort der BE-Kamera positioniert und in den Kamerafokus abgesenkt. Der Glasbaustein wird anschließend um 180° gedreht und im dritten Schritt erneut die Position der Fiducial auf dem Glasbaustein gemessen. Der Mittelpunkt der Gerade zwischen der Position der Fiducial stellt den Drehpunkt der Pipette dar. Dessen Position ist durch die vorher erfolgte Nozzle-Offset Kalibrierung bekannt, so dass daraus die Position der BE-Kamera abgeleitet werden kann. Aufgrund der eingeschränkten Positioniergenauigkeit der DP-Achse wird der Vorgang mehrfach wiederholt, bis der Versatz kleiner als ein Mikrometer wird.

Zur Kalibrierung des Bestücknestes wird eine Kalibrierleiterplatte mit hoher Maßhaltigkeit in den Bestückbereich eingefahren und geklemmt. Die Leiterplattenecke im Bestücknest wird mittels der LP-Kamera erfasst und stellt das Bestücknest dar. Die Bereitstellung der Bauelemente erfolgt über ein Tray, dessen Position ebenfalls über Referenzpunkte mittels der LP-Kamera bestimmt wird.

6.2.2 Realisierte optische Zentrierung der Leiterplatten und Bauelemente

Die Leiterplattenzentrierung erfüllt zwei Aufgaben und umfasst die Bestimmung der LP-Lage und die daraus abgeleitet korrigierten Bestückpositionen im Maschinenkoordinatensystem. Aufgrund der LP-Toleranzen wird der LP-Transport etwas breiter als die Leiterplatte eingestellt, um ein Verkannten der Leiterplatte zu vermeiden. Dies führt dazu, dass die Leiterplatte innerhalb einer bestimmten Streuung sowohl leicht verdreht als auch leicht versetzt im Bestückautomaten liegen kann. Des Weiteren weisen die gefertigten Leiterplatten eine toleranzbedingte Dehnung bzw. Stauchung oder auch Verzerrung des Leiterplattenbildes auf. Um die exakte Bestückposition bestimmen zu können, werden daher Lage und Verzerrung der Leiterplatte anhand der globalen Marken gemessen und die Bestückpositionen des idealen Leiterplattenkoordinatensystems in das Maschinenkoordinatensystem transformiert.

Das Bauelement wird für die Bestückung von der Pipette aus der Zuführeinheit abgeholt und auf der Leiterplatte auf der ermittelten Zielposition bestückt. Aufgrund der Verpackungstoleranzen wird das Bauelement nicht exakt mittig gegriffen, so dass es für eine präzise Bestückung vorher zentriert werden muss. Die Lage des Bauelementes wird mit der BE-Kamera optisch erfasst und anschließend lagekorrigiert auf die Leiterplatte platziert. Bei der Ausrichtung des Bauelementes in die Zieldrehlage kommt es aufgrund der exzentrischen Drehung zu einem zusätzlichen Versatz, der bei der Transformation berücksichtigt wird.

6.3 Funktion und Aufbau des Feinmessplatzes für die teilaktive Montage optischer Komponenten

Zur optischen Kopplung des VCSEL an die elektrooptische Leiterplatte stellt die teilaktive Justage die effizienteste Methode dar (vgl. Abschnitt 5.2). Hierbei zeigt sich das Verhältnis zwischen technischem Aufwand und erforderlicher Genauigkeit ausgewogen. Mit Hilfe des Feinmessplatzes werden im Bestückprozess die optischen Eigenschaften durch eine Laserprofilanalyse des Fernfeldes im relevanten Fokuspunkt bestimmt und zusätzlich der Versatz des Lasers relativ zur Pipette ermittelt, so dass das Bauelement anschließend lageoptimiert zum optischen Strahlengang auf die elektrooptische Leiterplatte bestückt wird, um eine verlustarme Lichtkopplung zu erreichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein geeigneter Feinmessplatz entwickelt und für den Einsatz im vorher beschriebenen Bestückautomaten aufgebaut. Nachfolgend werden zunächst die wesentlichen Funktionen und anschließend der Aufbau dargestellt und dessen Eig-

nung anhand einer Fähigkeitsanalyse belegt. Schließlich wird die realisierte mechanische, elektrische und steuerungstechnische Einbindung in den Automaten gezeigt.

6.3.1 Funktionen des Feinmessplatzes

Nachfolgende Auflistung stellen die wesentlichen Funktionen bzw. Anforderungen des Feinmessplatzes dar.

- Aktivierung Laserbauelement: Im Bestückprozess ist das VCSEL-Bauelement auf dem Feinmessplatz zu platzieren und elektrisch in Betrieb zu nehmen.
- Charakterisierung des Laserstrahls: Nach Inbetriebnahme des Lasers am Feinmessplatz ist das Laserprofil zu analysieren und der optimale Einkoppelpunkt zu identifizieren.
- Angepasste spektrale Empfindlichkeit: Die spektrale Empfindlichkeit muss auf die Wellenlänge des VCSEL abgestimmt sein. Im vorliegenden Fall beträgt die Wellenlänge des Lasers 850 nm.
- Flexible Fokuseinstellung: Die Auswertung des Laserprofils muss exakt in der Fokusebene des Umlenkelementes der zu bestückenden Leiterplatte erfolgen. Für den flexiblen Einsatz ist eine variable Fokuseinstellung erforderlich.
- Auswertzeit: Für eine durchsatzoptimierte Anwendung ist die gesamte Auswertzeit auf maximal eine Sekunde zu begrenzen.
- Messgenauigkeit: Der Versatz des Laserstrahls bezüglich der Pipette ist mit einer Genauigkeit von mindestens 5 μm (6σ) zu bestimmen.
- Dimension: Zur Integration des Feinmessplatzes in den Bestückautomaten sind die Abmessungen dem verfügbaren Arbeitsraum im Bestükbereich anzupassen.
- Einbauhöhe: Zur Minimierung der Toleranzkette ist die Bestükebene des Feinmessplatz auf die Bestükebene des Bestückautomaten und damit der zu bestückenden Leiterplatte anzupassen.

6.3.2 Realisierter Aufbau des Feinmessplatzes

Der Aufbau des Feinmessplatzes, wie in Bild 62 dargestellt, teilt sich in einen mechanischen, optischen und elektrischen Aufbau. Der Feinmessplatz ist ein autonomes Sensorsystem, welches in den Bestückautomaten mechanisch integriert ist und besitzt eine von der Steuersoftware des Bestückautomaten unabhängige Auswertesoftware des Laserstrahls. Der direkte Datenaustausch erlaubt die Integration des Messprozesses in den automatischen Bestückablauf.

Mechanischer Aufbau

Das Gehäuse des Feinmessplatzes erfüllt insgesamt drei Funktionen. Der Feinmessplatz wird über die Rückenplatte an das Maschinenbett in den Bestückautomaten eingebaut. Zusätzlich gibt das Gehäuse die notwendige mechanische Stabilität insbesondere während der Bestükaufgabe, so dass beim Platzieren des Bauelementes auf den

Feinmessplatz die Koplanarität zwischen Optik und Adapterplatine gewährleistet ist. Darüberhinaus schützt das Gehäuse vor Staub und vor Streulicht. Das optische System, die CMOS-Kamera zusammen mit dem Objektiv, ist mit einem präzisen Schnellspannsystem über eine Linearachse an der Rückenplatte montiert und lässt sich somit in vertikaler Richtung mikrometergenau positionieren.

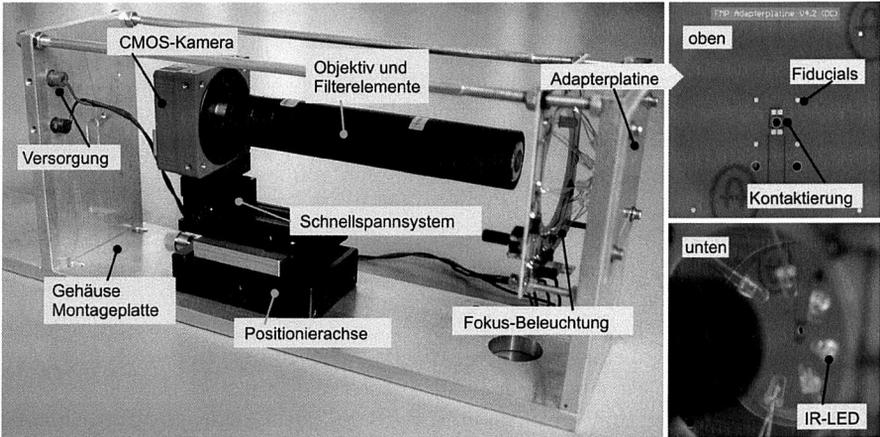


Bild 62: Aufbau des Feinmessplatzes zur Laserstrahlcharakterisierung im Bestückprozess

Kontaktierung und Aktivierung des Bauelementes

Zur Inbetriebnahme des Lasers wird das Bauelement am Feinmessplatz auf der Adapterplatine kontaktiert und anschließend aktiviert, so dass eine Analyse des Laserprofils im optischen System möglich ist.

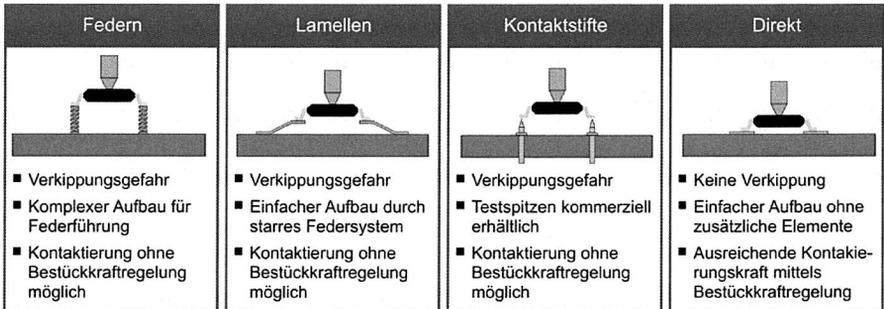


Bild 63: Alternative Kontaktierungsmethoden zur Aktivierung des Lasers am Feinmessplatz

Die elektrische Kontaktierung des Bauelementes stellt eine lose Verbindung dar und erfolgt durch Andrücken des Bauelementes auf die Kontaktpunkte der Adapterplatine. Dabei ist eine ausreichend hohe Bestückkraft erforderlich, so dass eine zuverlässige elektrische Kontaktierung gewährleistet ist. Die Bestückkraft darf jedoch den Elastizitätsbereich der Bauelementfüße nicht überschreiten, da es sonst zu einer Zerstörung des Bauelementes führen kann. Alternative Kontaktierungsmethoden sind in Bild 63 dargestellt.

Die Kontaktierung über Federn, Lamellen und Kontaktstifte kann bei der Platzierung des Bauelementes Unebenheiten ausgleichen, um so eine sichere Kontaktierung zu gewährleisten. Insbesondere die flexible, lose Kontaktierung mittels Kontaktstiften stellt bei der elektrischen Prüfung von Baugruppen eine etablierte Methode dar. Durch die Federwirkung wird die minimal erforderliche Anpresskraft erzielt. Neben dem konstruktionspezifischen Aufwand haben alle drei Methoden gemeinsam, dass durch ein nicht exakt zentrisches Greifen des Bauelementes eine einseitige Krafteinwirkung entsteht und somit die Gefahr für eine Verkipfung des Bauelementes besteht.

Eine weitere Variante, die elektrische Verbindung zwischen dem Bauelement und dem Feinmessplatz herzustellen, ist das direkte Anpressen der Leads des Bauelementes auf die Kontaktflächen der Adapterplatine. Im Kontext der Bestückaufgabe zeigt sich, dass die vorteilhafte Federwirkung der ersten drei Methoden auch bei dieser Variante existiert. Dies ist einerseits in der Federwirkung der Bauelementbeinchen und andererseits im gefederten z-Hub-Puffer des Greifers begründet, wobei die erforderliche Kontaktierungskraft über die Bestückkraft des Bestückautomaten eingestellt werden kann. Untersuchungen zur erforderlichen Kontaktierungskraft zeigen, dass die Werte im Bereich der typischen Bestückkräfte der SMT-Fertigung von ein bis fünf Newton liegen.

Bild 64 links zeigt das Kraft-Weg-Diagramm für die Einzelbelastung der Kontaktfüße eines repräsentativen Bauelementes gemäß des dargestellten Versuchsaufbaus. Der elastische Bereich eines Beinchen liegt zwischen 0 und 0,7 Newton bei einem Weg von 65 μm . Die maximal zulässige Bestückkraft für ein Bauelement mit zehn Kontaktfüßen beträgt somit 7 Newton, wobei sich das Bauelement um jeweils 9,3 μm bei Erhöhung der Bestückkraft um ein Newton senkt.

Bild 64 rechts zeigt das Kraft-Strom-Diagramm eines direkt kontaktierten Bauelementes auf die Kontaktpads einer Leiterplatte gemäß dem dargestellten Versuchsaufbau. Die erforderliche Mindestbestückkraft beträgt für das untersuchte Bauelement 0,9 Newton.

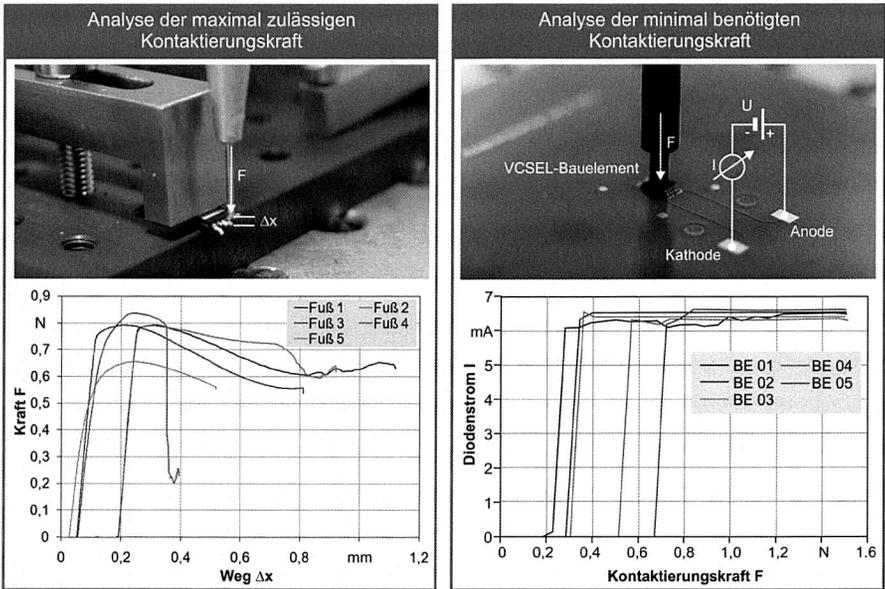


Bild 64: Untersuchung zur minimal und maximal zulässigen Kontaktierkraft bei der Inbetriebnahme des Lasers am Feinmessplatz

Optisches System

Das optische System des Feinmessplatzes dient primär zur Positionsbestimmung des Laserstrahls innerhalb des Maschinenkoordinatensystems. Für die ausschließliche Positionsbestimmung können optische Positionsdetektoren verwendet werden [1]. Man unterscheidet hierbei zwischen segmentierten und kontinuierlichen Detektoren. Segmentierte Positionsdetektoren bestehen aus zwei oder vier Segmenten, die durch einen feinen Spalt getrennt sind. Trifft ein Lichtfleck auf mehrere Segmente, so teilt sich die Lichtleistung nach den Intensitäten auf. Die Position des Lichtflecks relativ zum Zentrum ergibt sich aus dem Verhältnis der Photoströme. Kontinuierliche Positionsdetektoren bestehen aus einer großflächigen Photodiode ohne Totzonen. Die dabei gemessene Position eines Lichtflecks bezieht sich immer auf den Leistungsschwerpunkt. Eine Laserstrahlcharakterisierung ist mit solchen Systemen allerdings nicht möglich. In Abschnitt 4.4 wurde gezeigt, dass die Positionierung des Leistungsschwerpunktes des Lichtflecks nicht unbedingt den idealen Kopplungspunkt darstellt. Vielmehr interessiert der Ort einer definierten Fläche mit maximaler Lichtintensität. Eine solche Auswertung ist nur mit einem Kamerasystem basierend auf einem CCD-Sensor mit einer auf die spektralen Eigenschaften angepasste Optik möglich. Mit Hilfe einer professionellen Analysesoftware lassen sich somit die ideale Einkoppelposition durch Auswertung der exakten geometrischen Form und der Intensitätsverteilung auswerten. Der in Abschnitt

4.4 eingesetzte laser beam profiler zur Laserstrahlcharakterisierung (BeamLux II ML 1200) ist daher für den Einsatz im Feinmessplatz ideal geeignet. Eine Auswertung des Laserstrahls mit allen relevanten Größen ist innerhalb von Millisekunden möglich. Die mitgelieferte Software lässt sich außerdem über eine Standard TCP/IP-Schnittstelle steuern und ermöglicht den Datenaustausch mit anderen Programmen. Die Ortsauflösung von $0,6 \mu\text{m}$ ist zudem eine sehr gute Voraussetzung, um die geforderte Messgenauigkeit von $5 \mu\text{m}$ zu erfüllen, die zusätzlich von der Fokusslage und dem Messalgorithmus abhängt.

6.3.3 Fokuseinstellung über IR-Beleuchtung

Die Messgenauigkeit des Feinmessplatzes hängt im Wesentlichen von der richtigen Fokuseinstellung ab (vgl. Bild 65). Der Fokus der Kamera muss exakt auf die Einkoppelebene gerichtet sein, da es sonst bei Bauelementen mit geneigter Abstrahlung zu einem systematischen Messfehler kommt. Bei der Messaufgabe erweist es sich zusätzlich als problematisch, dass bei toleranzbehafteten Bauelementen die VCSEL-Ebene und bei toleranzbehafteten Leiterplatten die Einkoppelebene variiert, so dass der Strahlenabstand für ein Produktionslos nicht konstant ist. Für eine exakte Messung des idealen Koppelpunktes ist somit die Kenntnis über den Strahlenabstand notwendig, um den Fokus auf diese Ebene justieren zu können. Bild 66 zeigt zwei alternative Konzepte zur korrekten Fokussierung der Einkoppelebene.

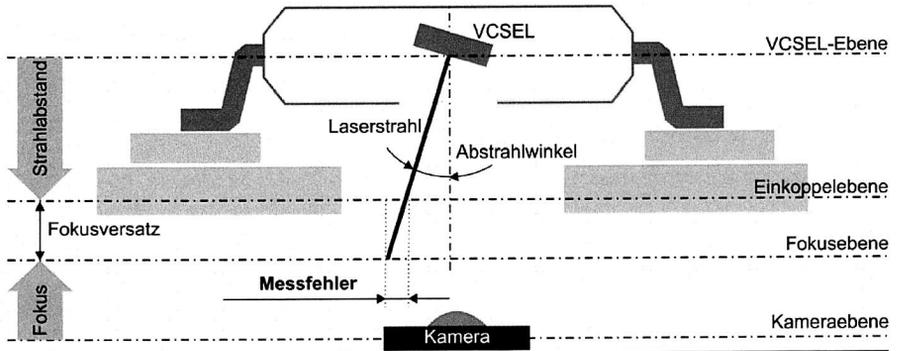


Bild 65: Steigerung der Messgenauigkeit durch korrekte Fokuseinstellung

Bei der ersten Variante (Bild 66, links) wird in der Einkoppelebene eine Mattscheibe in die Adapterplatine des Feinmessplatzes integriert. Wird ein VCSEL am Feinmessplatz aktiviert, so wird der Laser an der Streuscheibe abgebildet. Dies hat den Vorteil, dass eine Auswertung exakt in der Ebene der Streuscheibe möglich ist. Nachteilig zeigt sich die Bildung von Speckles, die sich bei kohärenter Beleuchtung auf optisch rauen Flächen ausprägen, so dass eine Laserprofilauswertung nur eingeschränkt möglich ist. Mit

Hilfe des Matching-Verfahrens lässt sich jedoch die Position des Laserspotschwerpunktes in der Messebene bestimmen. Des Weiteren lassen sich die vertikalen Schwankungen der LWL-Ebene der zu bestückenden Leiterplatte nicht ausgleichen, da die Messebene durch die integrierte Mattscheibe festgelegt ist.

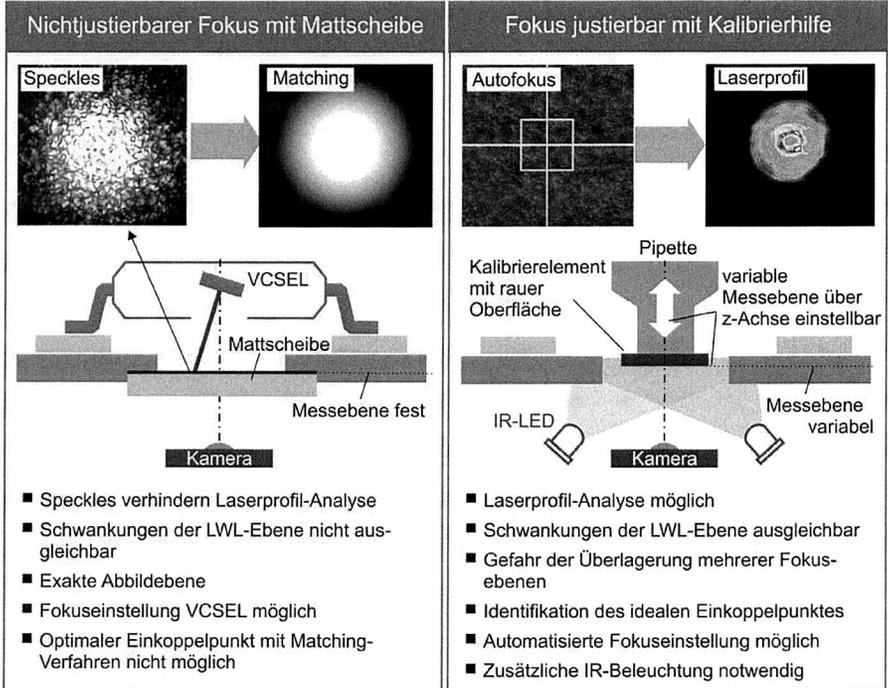


Bild 66: Alternative Konzepte für die Fokuseinstellung

Die zweite Variante (Bild 66, rechts) erlaubt eine variable Justierung der Messebene. Hierfür wird ein Kalibrierelement mit rauer Unterseite, welches im Bestückautomaten von der Pipette gegriffen ist, vertikal in der Messebene positioniert. Mit Hilfe des Autofokus lässt sich die Kamera so positionieren, dass die Messebene scharf eingestellt ist. Da das optische System mit entsprechenden Filtern auf eine spektrale Empfindlichkeit im IR-Bereich ausgelegt ist, ist für die Fokuseinstellung die Unterseite des Kalibrierteils mit IR-Licht anzustrahlen. Hierfür eignen sich z. B. verbaute IR-LED. Die Ermittlung der relevanten Messebene erfolgt mit einem Laser, welcher die optische Lage der zu bestückenden Leiterplatte erfasst. Diese Variante hat den Vorteil, dass eine Laserprofil-Analyse möglich ist und somit der ideale Koppelpunkt identifiziert werden kann. Durch den Einsatz des Objektivs wird eine spezifische Abbildungsebene (Fokus) adressiert, so dass wie beim Einsatz der Mattscheibe der Laser in einem spezifischen Arbeitsabstand

ausgewertet werden kann. Mit diesem Messverfahren lassen sich zusätzlich die Schwankungen der Einkoppelebenen auf den Leiterplatten ausgleichen, erfordern jedoch die Messung des optischen Arbeitsabstandes.

Aufgrund der überzeugenden Vorteile hinsichtlich der Laserprofilanalyse und der flexiblen Fokuseinstellung zeigt das zweite Konzept das größte Potenzial für die teilaktive Bestückung. Die Integration des zweiten Konzepts in den erweiterten Bestückablauf wird nachfolgend erläutert.

6.3.4 Drei-Stufige Kalibrierung des FMP auf Basis der Zwei-Punkt-Messung

Der Feinmessplatz stellt einen zusätzlichen Sensor innerhalb der Maschine dar und erfordert wie auch die anderen Sensoren (BE-Kamera, LP-Kamera usw.) eine Kalibrierung seiner Position, um einerseits den Feinmessplatz für den Messvorgang anfahren und andererseits die Messwerte in das MKS transformieren zu können.

Kalibrierungsablauf

Die Kalibrierung des Feinmessplatzes erfolgt in drei Stufen (vgl. Bild 67). Im ersten Schritt wird die Adapterplatine bezüglich des Kamerasystems justiert, im zweiten Schritt wird die Lage der Pads mittels lokaler Passmarken ermittelt und im dritten Schritt die Lage des Kamerasystems im Maschinenkoordinatensystem bestimmt.

Der Feinmessplatz ist so aufgebaut, dass die Adapterplatine bezüglich der Optik versetzt sein kann. Dies ist z. B. insbesondere beim Austausch der Kamera bzw. der Adapterplatine der Fall (vgl. Bild 67 „Ausgangssituation“). Die manuelle Ausrichtung der Adapterplatine bzgl. des Objektivs erfolgt mit Hilfe der LP-Kamera. Die Abbildung der Kontaktstelle des Feinmessplatzes mit der LP-Kamera macht einerseits die elektrischen Pads als auch die Linse des Objektivs, wie in Bild 67 dargestellt, sichtbar.

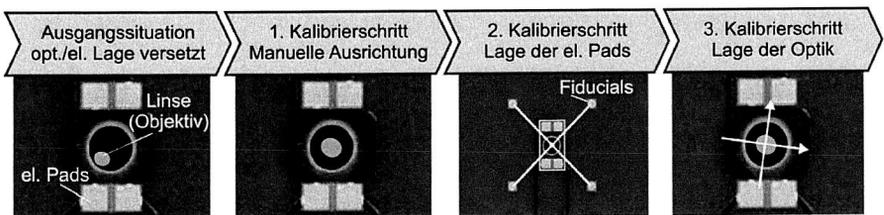


Bild 67: Dreistufige Feinmessplatz-Kalibrierung

Die Lage der Adapterplatine wird manuell so ausgerichtet, dass sich die Linse mittig zu den elektrischen Pads befindet. Bei einem kleinen Versatz zwischen Optik und Pads ist eine sichere Messung möglich, ein zu großer Versatz führt jedoch dazu, dass eine elektrische Kontaktierung nicht mehr möglich ist, bzw. sich der Laserstrahl bei der elektrischen Kontaktierung außerhalb des Kamerasichtfeldes befindet. Die Lage der Pads

wird anhand von lokalen Passmarken mit der LP-Kamera im zweiten Kalibrierungsschritt ermittelt. Dieser Schritt trägt nicht zur Genauigkeit des FMP bei, sichert jedoch die elektrische Kontaktierung. Im dritten Kalibrierschritt wird die Position des Kamerasystems des FMP mit der entwickelten Zwei-Punkt-Messung, die nachfolgend beschrieben wird, ermittelt. Die Zwei-Punkt-Messung ermöglicht die Position der Pipettenachse, die im MKS bekannt ist, als Referenzpunkt heranzuziehen und daraus die Position des Kamerasystems des FMP zu bestimmen.

Zweipunktmessung

Aufgrund der hohen Auflösung des Kamerasystems steht lediglich ein Sichtfeld von 800 µm x 600 µm zu Verfügung, so dass die Pipettenspitze nicht komplett auf der Kamera abgebildet werden kann. Mit der entwickelten Zwei-Punkt-Methode, wie in Bild 68 dargestellt, lässt sich die Position der Pipettendrehachse bestimmen.

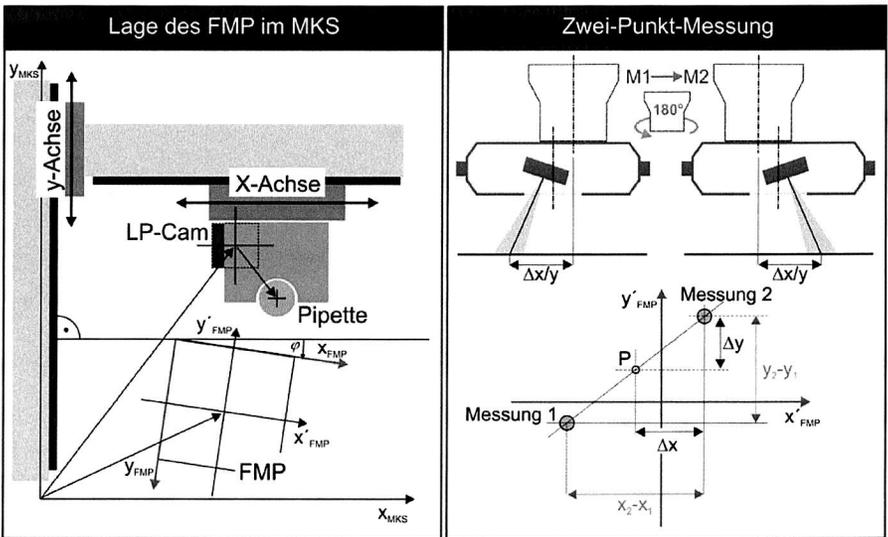


Bild 68: Prinzip der Zwei-Punkt-Messung zur Kalibrierung der Lage des Feinmessplatzes im Maschinenkoordinatensystem

Hierfür wird ein VCSEL-Bauelement von der Pipette gegriffen und auf der Adapterplatte platziert, so dass das VCSEL aktiviert wird. Der erzeugte Laserstrahl erzeugt einen Spot innerhalb des Sichtfeldes, dessen Position im Koordinatensystem des FMP gemessen wird (erste Messung, M1). Anschließend wird das Bauelement um 180° gedreht und erneut auf der Adapterplatte platziert und der Laser aktiviert. Aufgrund eines horizontalen Versatzes des Laserspots zur Pipette fällt der zweite Spot (zweite Messung, M2) nicht mit dem ersten zusammen. Der Mittelpunkt der Verbindungsgeraden der bei-

den gemessenen Punkte stellt die Drehachse der Pipette P dar. Die Lage des Kamerasystems des FMP stellt den Versatz zwischen P und dem Kameramittelpunkt dar. Die Zwei-Punkt-Messung eignet sich darüber hinaus zur Vermessung der Laserlage bezüglich der Pipettendrehachse im erweiterten Prozessablauf, wie folgt beschrieben.

6.3.5 Erweiterter Prozessablauf

Die Integration des zusätzlichen Messprozesses am FMP erfordert eine Modifikation des Bestückablaufs. Im Gegensatz zur elektrischen Bestückung muss das Bauelement bezüglich der optischen Lage in x- und y-Richtung ausgerichtet werden. Die Ausrichtung der Drehlage des Bauelementes muss jedoch bezüglich der elektrischen Lage erfolgen, so dass die Bauelementbeinchen parallel zu den elektrischen Pads liegen. Der modifizierte Bestückprozess ist in Bild 69 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

Prozessschritt 1: Im ersten Prozessschritt wird die Position und Drehlage der Leiterplatte anhand der globalen Passmarken auf dem elektrischen Layer ermittelt. Mit den gewonnen Koordinaten erfolgt eine exakte Bestimmung der LWL-Koppelstelle anhand der lokalen Marken auf dem optischen Layer. Aufgrund der Leiterplattentoleranzen fällt der elektrische Sollbestückpunkt nicht mit der LWL-Koppelstelle zusammen. Nach diesem Prozessschritt steht der korrigierte Soll-Bestückpunkt, welcher die Koppelstelle darstellt, und die Soll-Drehlage des Bauelementes, welche durch die Ausrichtung der elektrischen Pads gegeben ist, zur Verfügung.

Prozessschritt 2: Im zweiten Prozessschritt wird das Bauelement aus der Zuführung gegriffen und anschließend mit der Bauelementkamera optisch zentriert. Die optische Zentrierung liefert den Versatz des Bauelementes bezüglich der Pipette.

Prozessschritt 3: Aufgrund der Verpackungstoleranzen der Bauelementzuführung muss ein Prozessschritt zur Mittelpunktkorrektur durchgeführt werden, um im nächsten Prozessschritt bei der Zwei-Punkt-Messung die Kontaktierung am Feinmessplatz zu sichern. Hierfür wird das Bauelement auf eine Ablage innerhalb des Bestückers so abgesetzt, dass es im Winkel der Leiterplatte bzw. der zu bestückenden Pads bereits ausgerichtet ist. Anschließend wird die Mitte des Bauelementes angefahren und erneut von der Pipette gegriffen. Grundsätzlich kann dieser Prozessschritt bei ausreichender Präzision der Abholposition entfallen.

Prozessschritt 4 – 7: Mit dem vierten Prozessschritt beginnt die Auswertung der Laserlage am Feinmessplatz auf Basis der Zwei-Punkt-Messung. Hierfür wird das Bauelement mittig zum Feinmessplatz positioniert, wobei das Bauelement wie im vorherigen Prozessschritt parallel zu den LP-Pads ausgerichtet ist. Durch Anpressen des Bauelementes an die Kontakte wird das Bauelement aktiviert und die Lage des Laserspots relativ zur FMP-Kamera erfasst. Anschließend wird das Bauelement um 180° gedreht und erneut auf dem FMP platziert, elektrisch aktiviert und die Lage des abgebildeten Laser-

spots ermittelt. Der Auswertearithmus der Zwei-Punkt-Messung liefert den Versatz zwischen Laserspot und Pipette.

Prozessschritt 8: Unter Berücksichtigung der vorherigen Prozessschritte ist das Bauelement in seiner Drehlage nach der Zwei-Punkt-Messung bereits korrekt ausgerichtet, so dass die Bestückung des Bauelementes keine weitere Drehkorrektur benötigt. Die Zielposition des Bauelementes wird durch Addition der Sollbestückposition und des Laserversatzes berechnet. Schließlich wird das Bauelement zur Zielposition bewegt und schließlich abgesetzt.

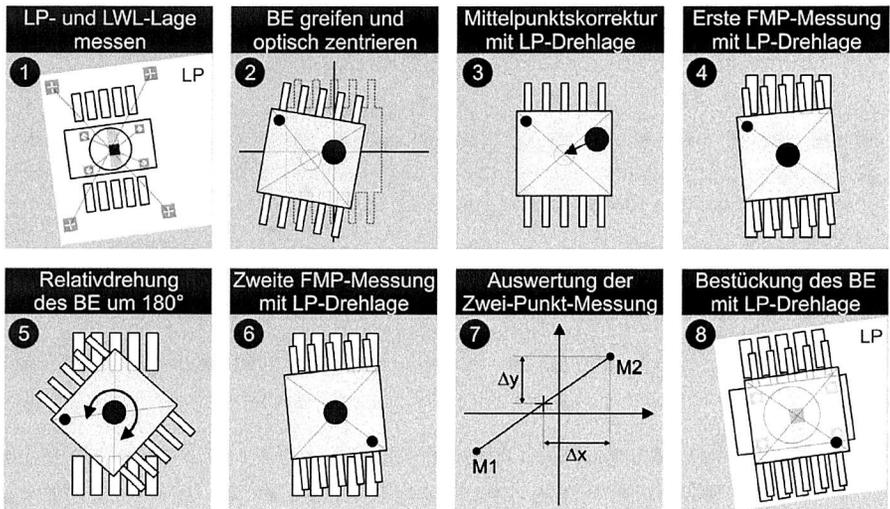


Bild 69: Modifizierter Bestückprozess zur Bestückung des VCSEL bezüglich der optischen Lage und Ausrichtung bezüglich der LP-Drehlage

Mit dem dargestellten modifizierten Ablauf ist eine sichere Bestückung toleranzbehafteter Bauelemente möglich, so dass der Laserstrahl mittig zur Einkoppelstelle ausgerichtet ist und die elektrischen Beinchen parallel zu den Anschlusspads der Leiterplatte liegen. Aufgrund der Bauelementtoleranzen ergibt sich zwangsläufig ein Versatz in x- und y-Richtung, der innerhalb der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Grenzen zulässig ist.

7 Qualifizierung der teilaktiven Bestückung

Die Koppeffizienz unterliegt einer Vielzahl verschiedener Einflüsse, ist jedoch maßgeblich durch den Bestückungsprozess bestimmt. Mit diesem Kapitel soll das Konzept der teilaktiven Bestückung abgesichert werden. Zunächst wird die Positionier- und Bestückgenauigkeit des realisierten Bestückautomatens ermittelt. Anschließend wird der Prozess der teilaktiven Bestückung auf Basis einer Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchung qualifiziert. Das Kapitel endet mit der Darlegung der Prozessfähigkeitsanalyse der entwickelten optischen Aufbau- und Verbindungstechnik und einer zusammenfassenden Diskussion.

7.1 Nachweis der Positionier- und Bestückgenauigkeit

Für den Nachweis der Positionier- und Bestückgenauigkeit werden zunächst die Prüfmittel und die Messmethode aufgezeigt, anschließend die Positionier- und Wiederholgenauigkeiten der Hauptachsen beschrieben und schließlich der realisierte Bestückalgorithmus hinsichtlich der Bestückgenauigkeit mittels präzisen Keramikbausteinen bewertet.

7.1.1 Messmittel und Messmethode

Die Aussagekraft einer Fähigkeitsanalyse hängt im Wesentlichen von der gewählten Messmethode ab. Wird bei einer Untersuchung z. B. eine unzureichende Genauigkeit festgestellt, so kann dies drei Ursachen haben: ein schlechter Bestückautomat, ungenaue Leiterplatten oder schlechte Bauelemente oder auch eine Kombination aus allen dreien. Bei der Verwendung realer Leiterplatten und Bauelemente, die stark toleranzbehaftet sind, ist eine Entmischung dieser Verursacher kaum möglich. Gezielte Korrekturmaßnahmen lassen sich jedoch nur mit der Kenntnis der genauen Ursache für die Ungenauigkeit durchführen. In der Praxis wird daher bei einer MFU die Leiterplatte durch eine hochgenaue Glasplatte ersetzt. Sie zeichnet sich durch ein präzises Raster aus runden ausgefüllten Referenzmarken aus. Bestückt werden Bauelementnachbildungen aus Keramik ohne Anschlussstrukturen. Somit ist eine hohe Messgenauigkeit von 1 µm möglich.

Versuchsaufbau

Bild 70 stellt den Versuchsaufbau dar. Als Messplatte dient eine kommerziell erhältliche Glaskalibrierleiterplatte der Firma Siemens. Sie wird in den Bestückbereich eingefahren und im Leiterplattentransport geklemmt. Für einen ausreichenden Kontrast zwischen den Referenzmarken und dem durchsichtigen Glas wird eine Beleuchtungseinheit unter die Glasplatte gelegt. Bei der Draufsicht erscheinen die Marken schwarz und die Umgebung weiß, wie in Bild 70 dargestellt. Das Rastermaß beträgt sowohl in x- als auch in y-Richtung 4 mm und der Durchmesser der Marke 1 mm. Die zu bestückenden Keramikbauteile haben eine Kantenlänge von 2 mm x 2 mm. Zur Bestimmung der Wie-

derholgenauigkeit kann die Position einer Marke mit der LP-Kamera mehrmals nacheinander angefahren werden. Der Versatz der Marke wird im Vision-System der LP-Kamera bestimmt. Zur Ermittlung der Positioniergenauigkeit muss zunächst der Bestükbereich optisch zentriert werden. Hierfür werden die Referenzmarken in den Ecken des Bestükbereichs verwendet. Die Bestückpositionen werden anschließend mit der LP-Kamera angefahren und der Versatz zum LP-Kameramittelpunkt ermittelt. Zur Bestimmung der Bestückgenauigkeit werden die Keramikbauteile auf die Sollbestückposition bestückt, so dass jedes bestückte Bauelement von acht Referenzmarken umgeben ist und die Bestückposition mittels optischen Systemen exakt ermittelt werden kann. Die Messmethode wird nachfolgend näher erläutert. Zunächst ist jedoch die Zuverlässigkeit des integrierten Vision-Systems der LP-Kamera zu qualifizieren.

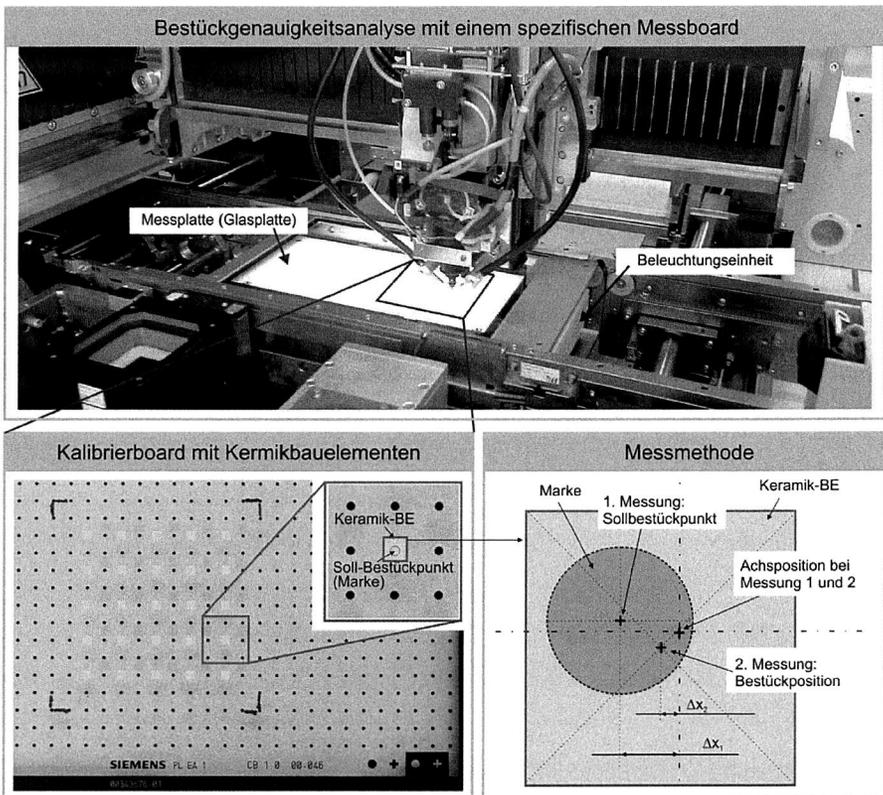


Bild 70: Messmethode zur Bestimmung der Bestückgenauigkeit

Zur Qualifizierung der Zuverlässigkeit des Visionssystems wird die Position einer Marke mit der LP-Kamera angefahren und bei feststehenden Achsen dessen Position mehr-

fach nacheinander vermessen. Bild 71 zeigt das Ergebnis der Wiederholgenauigkeitsuntersuchung des Visionssystems.

Mit dieser Messmethode ist die Bestimmung der Positionier- und Wiederholgenauigkeit der Hauptachsen möglich. Die Abweichung zwischen den einzelnen Messpunkten liegt im Submikrometerbereich, so dass die Auswertung der Wiederhol- und Positioniergenauigkeit mittels der LP-Kamera durchgeführt werden kann.

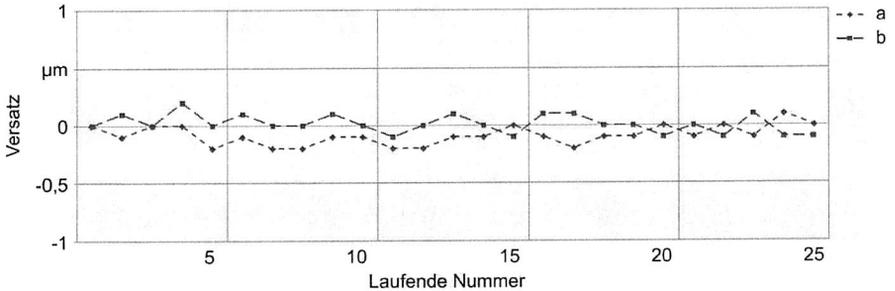


Bild 71: Wiederholgenauigkeit des Visionssystems, a: x-Versatz, b: y-Versatz

Eine Herausforderung stellt die Messung der Bestückgenauigkeit dar. Für eine effiziente Qualifizierung wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, die Bestückgenauigkeit mit dem Bestückautomaten selbst zu ermitteln. Hierfür ist eine zweistufige Messung notwendig, die eine hohe Wiederholgenauigkeit der Hauptachsen voraussetzt. Des Weiteren muss das bestückte Bauelement von der Leiterplattenkamera erfassbar sein, so dass dessen Position bestimmt werden kann. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich gemäß Bild 70 die Bestückposition bezüglich der Sollbestückposition im Bestückautomaten bestimmen. Im ersten Schritt wird die Sollbestückposition, die den Mittelpunkt einer Marke auf dem Raster darstellt, angefahren und der Versatz der Marke zum LP-Kameramittelpunkt erfasst. Anschließend nach der Bestückung des Bauelementes auf die Sollbestückposition, also auf die Marke, wird in einem zweiten Messschritt die Bestückposition des ersten Schrittes mit der LP-Kamera erneut angefahren und der Versatz des bestückten Bauelementes mit der Leiterplattenkamera bestimmt. Wie in Bild 70 dargestellt, wird der Bestückversatz zwischen Keramikbauteil und Referenzmarke mit

$$\Delta x_{BE} = \Delta x_2 - \Delta x_1 \tag{7.1}$$

berechnet, wobei Δx_2 der Versatz des Bauelementes und Δx_1 der Versatz der Referenzmarke bezüglich der Achsisposition (LP-Kamera) ist. Den Nachweis für die Messfähigkeit dieser Methode liefert eine Vergleichsmessung mit einem hochpräzisen Koordinatenmessgerät Video Check IP 400 der Firma Werth. Die Bestückpositionen der insgesamt 25 bestückten Bauteile (vgl. Bild 70) sind anhand der umliegenden Refe-

renzmarken ermittelt, da die „bestückte Referenzmarke“ vom Bauteil überdeckt ist. Die Messergebnisse beider Messmethoden sind in Bild 72 dargestellt.

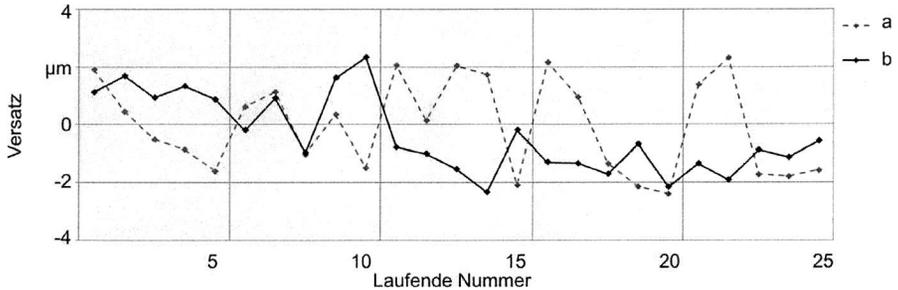


Bild 72: Differenz der Messergebnisse des Bestückautomatens und des Koordinatenmessgerätes (WERTH), Differenz a) für x-Versatz und b) für y-Versatz

Die Vergleichsmessung zeigt die hohe Präzision der zweistufigen integrierten Messmethode. Für den x-Versatz ergibt sich für die Differenz beider Messmethoden eine Standardabweichung von $\sigma_x = 1,6 \mu\text{m}$ und für den y-Versatz $\sigma_y = 1,3 \mu\text{m}$. Nachfolgend ermittelte Messergebnisse basieren auf der in Bild 70 dargestellten zweistufigen Messmethode.

7.1.2 Wiederhol- und Positioniergenauigkeit der Hauptachsen

Die Wiederholgenauigkeit der Hauptachsen wird mit reduzierter Beschleunigung der Hauptachsen durchgeführt. Zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit wird eine beliebige Marke auf der Glasplatte mit der Leiterplattenkamera mittig angefahren und der Versatz der Marke bestimmt. Anschließend wird die Achse um 100 mm versetzt und er die Position erneut angefahren und der Versatz vermessen. Dieser Zyklus wird insgesamt 25-mal durchgeführt. In Anlehnung an [81] wird der Punkt aus negativer Richtung, aus positiver Richtung und alternierend aus positiver und negativer Richtung angefahren. Die resultierenden Messreihen sind in Bild 73 dargestellt. Für die x- und y-Achse ergibt sich eine Wiederholgenauigkeit $2,12 \mu\text{m}$ (3σ).

Die Bestückgenauigkeit ist durch drei wesentliche Faktoren bestimmt: Positioniergenauigkeit auf den Sollbestückpunkt, exakte Kalibrierung (Nozzle-Offset und BE-Kameraposition) und Haftfestigkeit des gegriffenen Bauelementes an der Pipette. Eine hohe Bestückgenauigkeit kann also nur mit ausreichend hoher Positioniergenauigkeit erzielt werden. Die Positioniergenauigkeit auf den Sollbestückpunkt setzt sich aus der Positioniergenauigkeit der Achsen, der Messfähigkeit des Visionsystems zur Erfassung der Referenzmarken und des zugrundeliegenden Algorithmus zur Berechnung der Bestückposition zusammen.

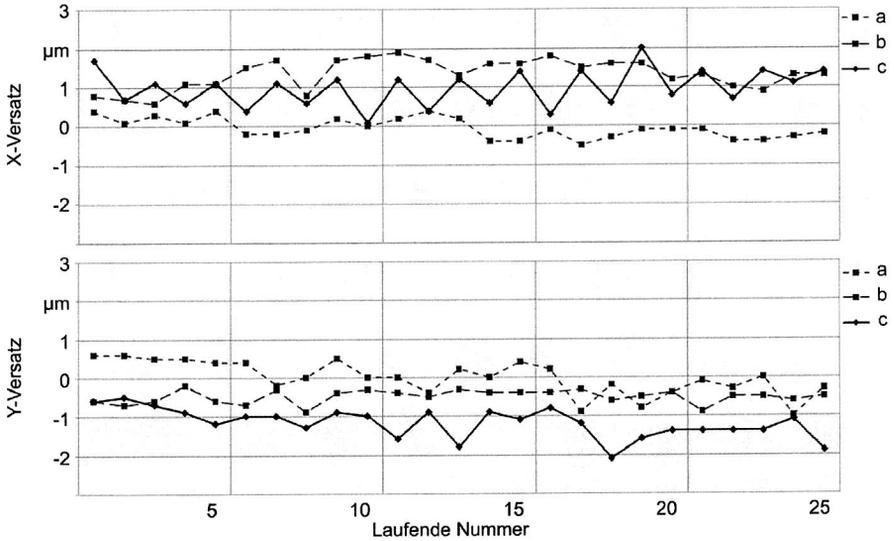


Bild 73: Wiederholgenauigkeit der Hauptachsen (X, Y), a: Positionierung aus negativer Richtung, b: Positionierung aus positiver Richtung, c: Positionierung alternierend aus negativer und positiver Richtung

Für die Ermittlung der Positioniergenauigkeit wird, wie in Bild 70 dargestellt, der Bestückbereich der Glasplatte anhand der optischen Marken zentriert und jede Bestückposition (entspricht einer Referenzmarke) mit der LP-Kamera angefahren und der Versatz in x- und y-Richtung bestimmt. In der SMT werden bei Bestückung von Fine-Pitch-Bauelementen lokale Referenzmarken zu Steigerung der Bestückgenauigkeit eingesetzt. Eine weitere Messreihe untersucht diesen Fall zusätzlich. Die lokalen Referenzmarken stellen zwei zum Sollbestückpunkt benachbarte, diagonal gegenüberliegende Marken des Rasters dar. Die aufgenommenen Messreihen für den x-Versatz und y-Versatz sind in Bild 74 dargestellt. Die Messreihe a bildet die Positioniergenauigkeit bei der Leiterplattenzentrierung mit globalen Marken ab und die Messreihe b die Positioniergenauigkeit bei Verwendung lokaler Marken.

Die Positionierung in x-Richtung mit globalen Marken weist eine hohe Genauigkeit von $3,0 \mu\text{m}$ (3σ) auf und für die Positionierung lokalen Marken $2,4 \mu\text{m}$ (3σ). Der y-Versatz weist bei der Bestückung mit globalen eine Drift mit zunehmender x-Position aus. Eine mögliche Ursache ist ein Messfehler bei der Bestimmung der Leiterplattenrotation. Bei Verwendung lokaler Marken entfällt die Drift und ergibt eine Positioniergenauigkeit von $3,6 \mu\text{m}$ (3σ). Für eine hohe Bestückgenauigkeit optischer Bauelemente sind daher präzise lokale Marken erforderlich.

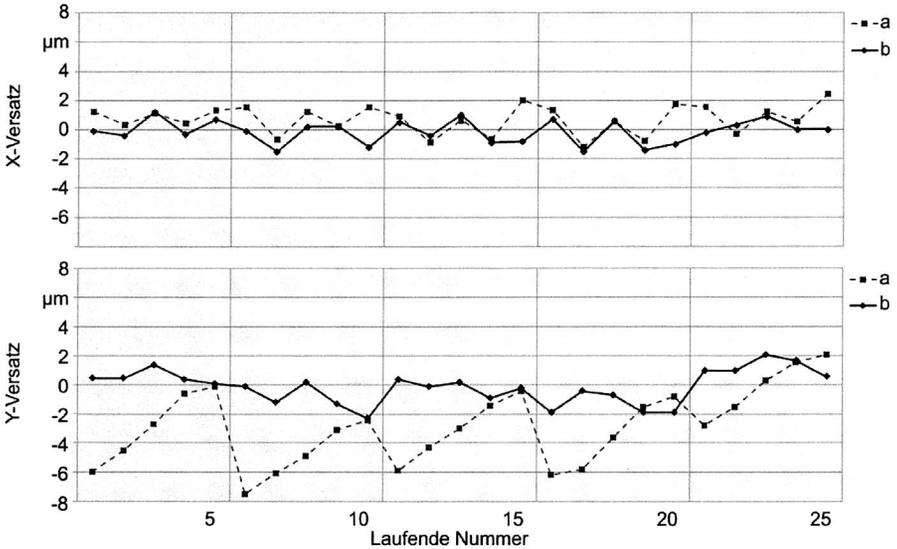


Bild 74: Positioniergenauigkeit der Hauptachsen (X, Y), a: Positionierung mit globalen Marken, b: Positionierung mit lokalen Marken

7.1.3 Bestückgenauigkeit

Zur Qualifizierung der Bestückgenauigkeit des modifizierten Bestückautomaten werden unter idealisierten Bedingungen pro Messreihe jeweils 25 Keramikbauteile gemäß Bild 70 im Markenraster der Glasplatte bestückt. Zur Sicherstellung einer hohen Bestückgenauigkeit wird eine automatische Kalibrierung, wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben ist, durchgeführt. Insgesamt werden vier verschiedenen Bestückalgorithmen ausgewertet:

- globale Marken mit Standard-Algorithmus (gl-M, Standard)
- globale Marken mit Zweipunkt-Messung (gl-M, 2P-M)
- lokale Marken mit Standard-Algorithmus (lk-M, Standard)
- lokale Marken mit Zweipunktmessung (lk-M, 2P-M)

Die entsprechenden Messreihen sind in Bild 75 dargestellt. Die Bestückung mit dem Standard-Algorithmus unter Verwendung globaler und lokaler Marken entspricht dem Bestückablauf elektrischer Bauelemente. Für die Bestückung optischer Bauelemente mit der Forderung nach einer hohen Bestückgenauigkeit wird die Bauelementzentrierung mittels der Zwei-Punkt-Messung eingesetzt. Sie ist in Abschnitt 6.3.4 und 6.3.5 für optische Komponenten beschrieben. Die Zwei-Punkt-Messung erfolgt für die optischen Komponenten am Feinmessplatz. Für den direkten Vergleich der Algorithmen kann die

Methode der Zweipunktmessung, wie nachfolgenden beschrieben ist, auf die Bestückung elektrischer Bauelemente übertragen werden.

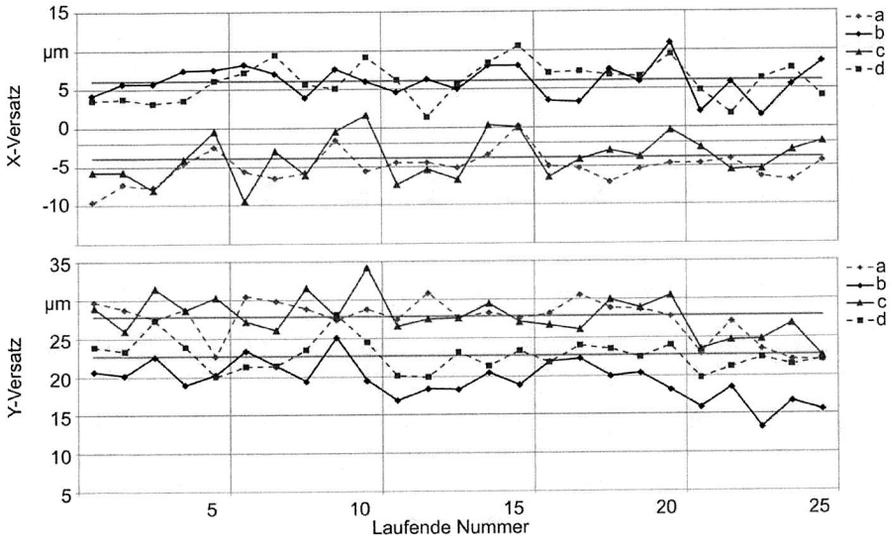


Bild 75: Resultierende Bestückgenauigkeit bei alternativen Bestückmethoden, a: globale Marken mit Standard-Algorithmus, b: globale Marken mit Zweipunkt-Messung, c: lokale Marken mit Standard-Algorithmus, d: lokale Marken mit Zweipunktmessung

Die optische Zentrierung der Keramikbauelemente mit der BE-Kamera erfolgt bei der Zwei-Punkt-Messung dreistufig. Im ersten Schritt wird die Drehlage des Bauelementes erfasst und in die Solldrehlage ausgerichtet. In dieser Lage wird der Versatz mit der BE-Kamera erfasst, anschließend um 180° gedreht und nach erneuter Lagemessung der Versatz bezüglich der Pipette bestimmt. Die anschließende Bestückung erfolgt durch Positionierung der Achse auf die Zielposition, die sich additiv aus Sollposition, Nozzle-Offset und Bauelement-Offset (Zweipunktmessung) zusammensetzt. Eine Drehung des Bauelementes nach der optischen Zentrierung, die weitere Ungenauigkeiten einbringen würde, ist nicht mehr notwendig.

Die Messergebnisse zeigen, dass trotz der Kalibrierung die Mittelwert μ der Messreihen einen deutlichen Versatz von bis $6,1 \mu\text{m}$ in X-Richtung und $27,8 \mu\text{m}$ in Y-Richtung besitzen. Diese systematische Abweichung lässt sich durch Korrektur der Kalibrierdaten minimieren. Nach dieser Offset-Korrektur sind drei weitere Bestückdurchgänge für alle vier Algorithmen durchgeführt. Die resultierende Standardabweichung und der verbleibende mittlere Versatz ist in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Angaben stellen die

Streuung für 3σ dar, so dass das Potenzial der Produktionsanlage zur Erfüllung der Anforderung an den Bestückprozess direkt abgeleitet werden kann. Die erforderliche Bestückgenauigkeit beträgt $\pm 20 \mu\text{m}$, also $10 \mu\text{m}$ (3σ).

Tabelle 7: Messergebnis der Bestückgenauigkeit vor und nach der Offsetkorrektur

		Initialbestückung		Offsetkorrektur Bestückung 1		Offsetkorrektur Bestückung 2		Offsetkorrektur Bestückung 3	
		3σ [μm]	μ [μm]						
x-Versatz	gl-M, Standard	6,0	-5,1	6,9	0,6	8,3	4,6	9,4	4,2
	gl-M, 2P-M	6,6	6,0	7,2	3,8	8,8	4,5	6,6	4,3
	lk-M, Standard	8,7	-3,9	7,8	0,7	9,1	4,7	9,9	5,0
	lk-M, 2P-M	7,2	6,1	7,2	2,5	9,6	4,4	8,2	4,8
y-Versatz	gl-M, Standard	8,1	27,5	6,6	1,5	7,2	-1,3	7,4	-1,5
	gl-M, 2P-M	7,8	19,5	7,2	-2,6	8,6	-3,0	8,3	-3,4
	lk-M, Standard	8,7	27,8	5,7	0,5	7,8	2,2	7,4	-0,1
	lk-M, 2P-M	6,3	22,7	6,9	-3,1	8,3	-5	8,6	-3,6

Die Bestückmethode unter Verwendung lokaler Marken und der Zweipunkt-Messung zeigt wider Erwarten keine signifikante Verbesserung gegenüber den anderen Algorithmen. Sie ist aber für die Bestückung optischer Bauelemente auf realen elektrooptischen Leiterplatten prozessbedingt erforderlich. Die Ergebnisse zeigen das hohe Potenzial des Bestückautomaten, die Forderung nach einer Bestückgenauigkeit von $\pm 20 \mu\text{m}$ zu erfüllen.

7.2 Maschinen- und Prozessfähigkeitsnachweis der teilaktiven Bestückung mit optischen Bauelementen

Basierend auf den theoretisch entwickelten Methoden für eine MFU und PFU, die in Abschnitt 5.3.4 beschrieben sind, wird nachfolgend die Fähigkeit des aufgebauten Bestückautomaten, optische Bauelemente mit der Methode der teilaktiven Bestückung zu platzieren, untersucht.

7.2.1 Maschinenfähigkeitsuntersuchung

Für den Nachweis der Maschinenfähigkeit für die optische Bestückung wird auf eine spezifische hochpräzise Leiterplatte, wie bei der Standard-MFU notwendig ist, verzichtet. Anstelle der Leiterplatte dient der Feinmessplatz selbst als zu bestückende Leiterplatte und zugleich als Messsensor im Sinne der teilaktiven Bestückung. Dies ermöglicht eine zuverlässige Überprüfung der Gültigkeit der Kalibrierdaten und des Bestückprozesses. Die modifizierte optische Bestückung erfolgt, wie in Abschnitt 6.3.5 beschrieben, auf einer eingefahrenen Leiterplatte. Anstatt jedoch im letzten Prozess-

schritt das Bauelement auf die Leiterplatte zu bestücken, wird dieses auf die exakte Position des FMP (Kamera-Mittelpunkt) bestückt. Hierfür wird eine fiktive Leiterplatte, die den Feinmessplatz einschließt, verwendet. Bild 76 zeigt die integrierte Messumgebung.

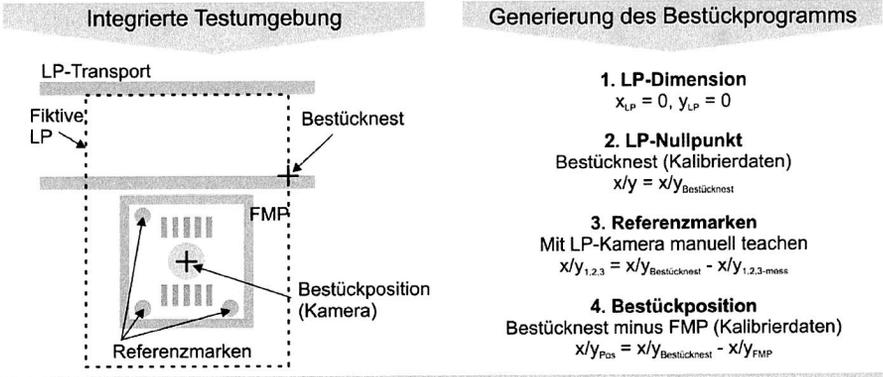


Bild 76: Die Maschinenfähigkeit für die optische Untersuchung wird mit Hilfe des FMP auf Basis eines spezifischen Bestückprogramms durchgeführt.

Das Bestückprogramm besteht aus vier Informationsgruppen: Die Leiterplattendimension, der Vektor vom Leiterplatten-Nullpunkt zur Leiterplattenecke, die Position der Referenzmarken und die Bestückposition bezüglich des LP-Nullpunktes. Die Leiterplattenabmessung wird Null gesetzt, wobei der LP-Nullpunkt auf der fiktiven LP-Ecke liegt und somit der Koordinate des Bestücknests entspricht. Die Positionen der Referenzmarken auf der fiktiven Leiterplatte müssen manuell geteacht werden. Hierfür werden die entsprechenden Marken mit der LP-Kamera angefahren und deren Position im MKS bestimmt. Die Positionen der Marken bezüglich des LP-Nullpunktes ergeben sich aus der Differenz zwischen der Position des Bestücknests und der einzelnen Markenposition. Die Bestückposition wird durch die Differenz des Bestücknests und der FMP-Position, die in den Kalibrierdaten hinterlegt sind, berechnet.

Mit dem erzeugten Bestückprogramm wird das optische Bauelement im optischen Bestückprozess mit der Zwei-Punkt-Messung auf den Feinmessplatz, wie in Abschnitt 5.3.4 (vgl. Bild 44) dargestellt, bestückt. Bei jeder Messung wird der Schwerpunkt des abgebildeten Laserprofils im Fernfeld in der eingestellten Fokusebene bestimmt. Die Mitte der Verbindungsgerade zwischen der Messung 1 und 2 stellt den Pipettendrehpunkt dar. Die Korrektur für die Bestückung resultiert aus dem Abstand zwischen dem Pipettendrehpunkt und der Position des Laserprofilschwerpunktes der zweiten Messung. Im letzten Schritt wird das Bauelement auf die Sollposition (Kameramittelpunkt des FMP) unter Berücksichtigung der gemessenen Korrektur bestückt. Für die statistische Absicherung der optischen MFU werden acht verschiedene, zufällig

ausgewählte Sendebaulemente mit unterschiedlichen Laserprofilen verwendet. Bild 77 zeigt die jeweiligen Laserprofile in der gleichen Fokusebene, die dem Arbeitsabstand (VCSEL – Koppelstelle) entspricht. Die gestrichelte Linie stellt den idealen Umriss der Einkoppelstelle der Leiterplatte (70 µm x 70 µm) dar.

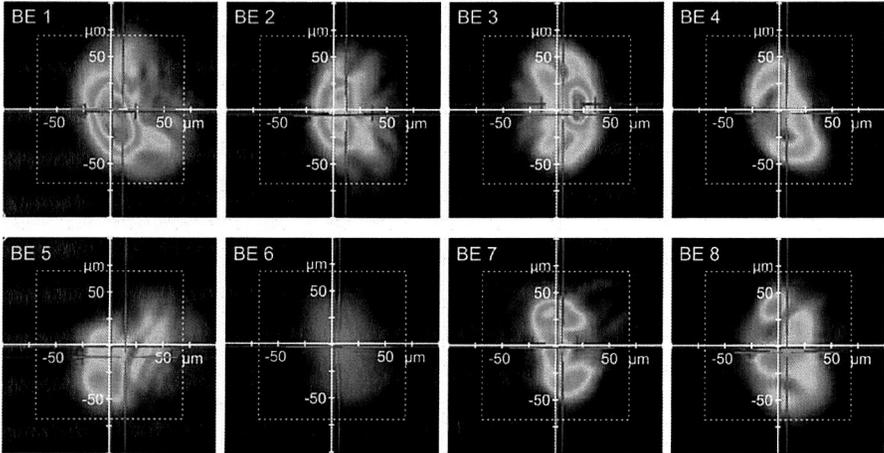


Bild 77: Laserprofile von acht untersuchten Sendebaulementen im Sollbestückpunkt

Die Untersuchungsergebnisse weisen die Maschinenfähigkeit für die geforderte Bestückaufgabe nach. Bild 78 zeigt links im X-Y-Diagramm die normalverteilten Bestückpositionen des Laserschwerpunktes im Sollbestückpunkt (Kameramittelpunkt). Mit den systematischen Versätzen von 1,55 µm in X-Richtung und -0,5 µm in Y-Richtung bei einer Standardabweichung von 0,85 µm für die X-Position und 1,42 für die Y-Position ergeben die Fähigkeitsindizes

$$c_{p,x} = \frac{(OSG - USG)}{6\sigma} = 5,88 \quad (7.2)$$

$$c_{p,y} = 3,5 \quad (7.3)$$

$$c_{pk,x} = \frac{\min(OSG - \mu_x, \mu_x - USG)}{3\sigma} = 5,5 \quad (7.4)$$

$$c_{pk,y} = 3,18 \quad (7.5)$$

mit $OSG = 20 \mu\text{m}$ und $USG = -20 \mu\text{m}$. Bild 78 zeigt rechts die Mittelwerte der Bestückpositionen der verwendeten Bauelemente 1 bis 8. Die Variation der Ergebnisse liegt in der Zweipunktmessung begründet. Für die erste Messung wird das Bauelement auf den Feinmessplatz platziert und in Betrieb genommen, so dass sich ein spezifisches Laserprofil mit seinem Schwerpunkt ausprägt. Für die zweite Messung wird das Bau-

element dekontaktiert, um 180° gedreht und anschließend wieder platziert. Das sich ausprägende Laserprofil weist eine leichte Abweichung gegenüber der ersten Messung auf, so dass sich eine profilabhängige, gerichtete Abweichung der Bestückposition, die sich im Mittel aufhebt, ergibt.

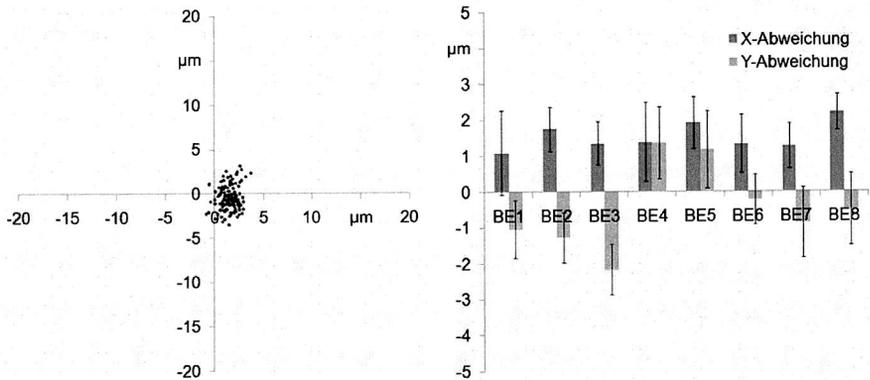


Bild 78: Erzielte Ergebnisse der optischen Bestückung

7.2.2 Prozessfähigkeitsuntersuchung

Die geführte Fähigkeitsuntersuchung unter idealisierten Bedingungen berücksichtigt weder die Schwankungen der Leiterplattenzentrierung noch die optischen und geometrischen Merkmale der elektrooptischen Leiterplatte. Die Prozessfähigkeitsuntersuchung für die Bestückung optischer Bauelemente auf elektrooptischen Leiterplatten umfasst alle den Bestückprozess betreffenden Haupteinflussgrößen auf die emittierte Lichtleistung an der Auskoppelstelle gemäß Bild 79.

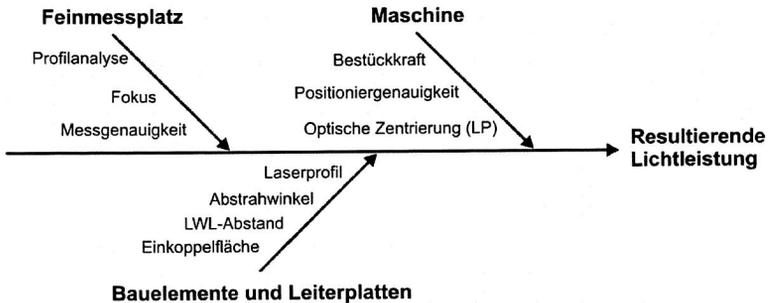


Bild 79: Bestückrelevante Haupteinflussgrößen auf die übertragene Lichtleistung

Die Bestückung des Bauelementes auf die Leiterplatte erfolgt mit der teilaktiven Bestückung analog zur vorher beschriebenen Maschinenfähigkeitsuntersuchung. Das Bauelement wird in diesem Fall jedoch auf eine reelle elektrooptische Leiterplatte bestückt und die Einkoppelgüte mit Hilfe eines Lichtleistungssensors an der Auskoppelstelle bewertet. Bild 80 zeigt den Versuchsaufbau. Die einzelnen Prozessschritte sind nachfolgend detailliert beschrieben.

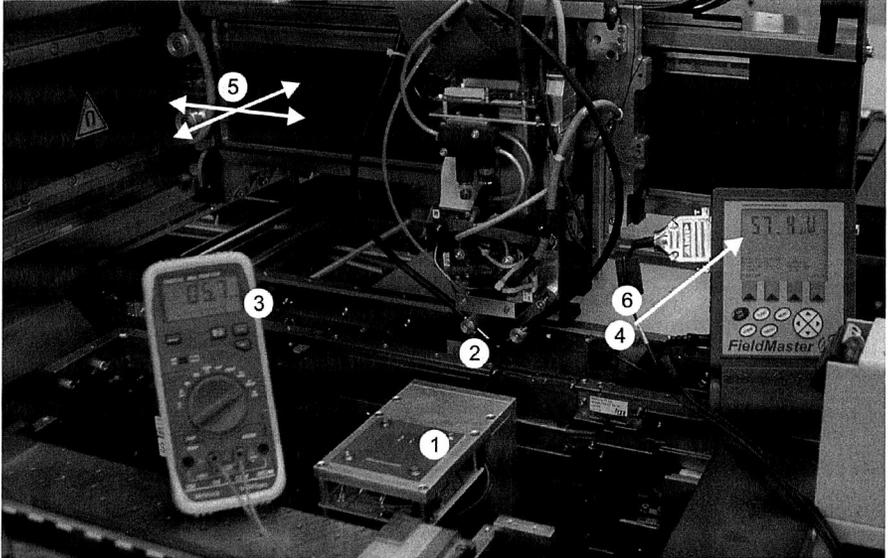


Bild 80: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Prozessfähigkeit des Bestückvorgangs

(1) Optische Zentrierung und Zweipunktmessung: Im ersten Prozessschritt wird die Leiterplatte anhand der Referenzmarken optisch zentriert. Für die Qualifizierung der optischen Zentrierung ist eine Auswertung der ermittelten Bestückposition erforderlich (vgl. Bild 81). Die optische Zentrierung des Bauelementes erfolgt am Feinmessplatz nach dem Prinzip der Zwei-Punkt-Messung.

(2) Bestückung: Im zweiten Prozessschritt wird das Bauelement auf die Zielposition mit definierter Bestückkraft bestückt und in der Position durch den Greifer fixiert.

(3) Prüfung der Ansteuerung des Lasers: Die Landeflächen des bestückten VCSEL sind an einer Spannungsversorgung angeschlossen, so dass bei Kontakt des Bauelementes mit der Leiterplatte das Bauelement aktiviert wird und das emittierte Licht in die Einkoppelstelle strahlt. Der Diodenstrom wird über ein Messgerät erfasst und dient als Referenzwert für die nachfolgenden Prozessschritte.

(4) Messung der Lichtleistung: Die empfängerseitige Lichtleistung wird mit einem Lichtleistungssensor, der auf der Leiterplatte fixiert ist, gemessen. Die Positionstreu des Lichtsensors ist über den gesamten Versuch einzuhalten, da kleinste Verschiebungen zu abweichenden Messergebnissen führen.

(5) und (6) Korrektur der Bestückposition: Im letzten Prozessschritt wird die Lage des Bauelementes solange korrigiert, bis die Bestückposition mit maximaler Lichtübertragung (Übertragungspotenzial) erreicht ist. Die Endposition gegenüber der Bestückposition stellt den Bestückversatz dar.

Die korrekte optische Zentrierung der Leiterplatte (Bild 81) im ersten Prozessschritt stellt die Grundlage für eine gute Einkopplung des Lichts in den Lichtwellenleiter dar. Links im Bild 81 ist die im Bestückbereich geklemmte Leiterplatte dargestellt, wobei die LP-Kamera mittig über der ermittelten Sollbestückposition (Senderseite) positioniert ist. Zur Überprüfung der optischen Zentrierung der Leiterplatte muss die Koppelstelle sichtbar gemacht werden. Hierfür wird empfängerseitig Licht eingekoppelt. Das Licht wird über den Lichtwellenleiter zur Senderseite transportiert und dort zur Leiterplattenoberseite hin emittiert. Der so erzeugte Lichtspot (entspricht der Koppelstelle) kann von der Kamera erfasst werden, um dessen Position zu bewerten. Bild 81 rechts zeigt die korrekte Positionsermittlung der Koppelstelle mittels optischer Zentrierung der Leiterplatte: Der Kameramittelpunkt (Fadenkreuz) liegt exakt mittig zur Koppelstelle. Deutlich wird die Abweichung zwischen der optischen und elektrischen Lage, so dass bei einer Standardbestückung bezüglich der elektrischen Pads eine Einkopplung nicht möglich wäre.

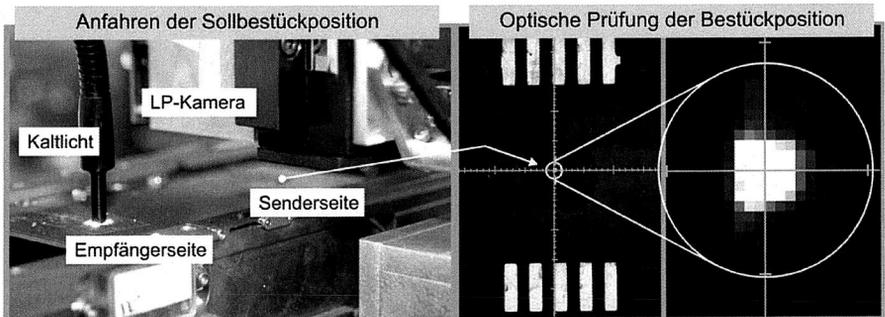


Bild 81: Optische Prüfung der Sollbestückposition

Das Ergebnis der beschriebenen Prozessfähigkeitsuntersuchung ist in Bild 82 dargestellt. Die Diagramme zeigen für unterschiedliche Leiterplatten und Bauelemente die erzielte Bestückposition relativ zum gesamten Einkoppelprofil. Das Einkoppelprofil ist durch Lichtleistungslinien dargestellt. Wird das Bauelement entlang einer Konturlinie positioniert, wird stets die gleiche Lichtleistung eingekoppelt.

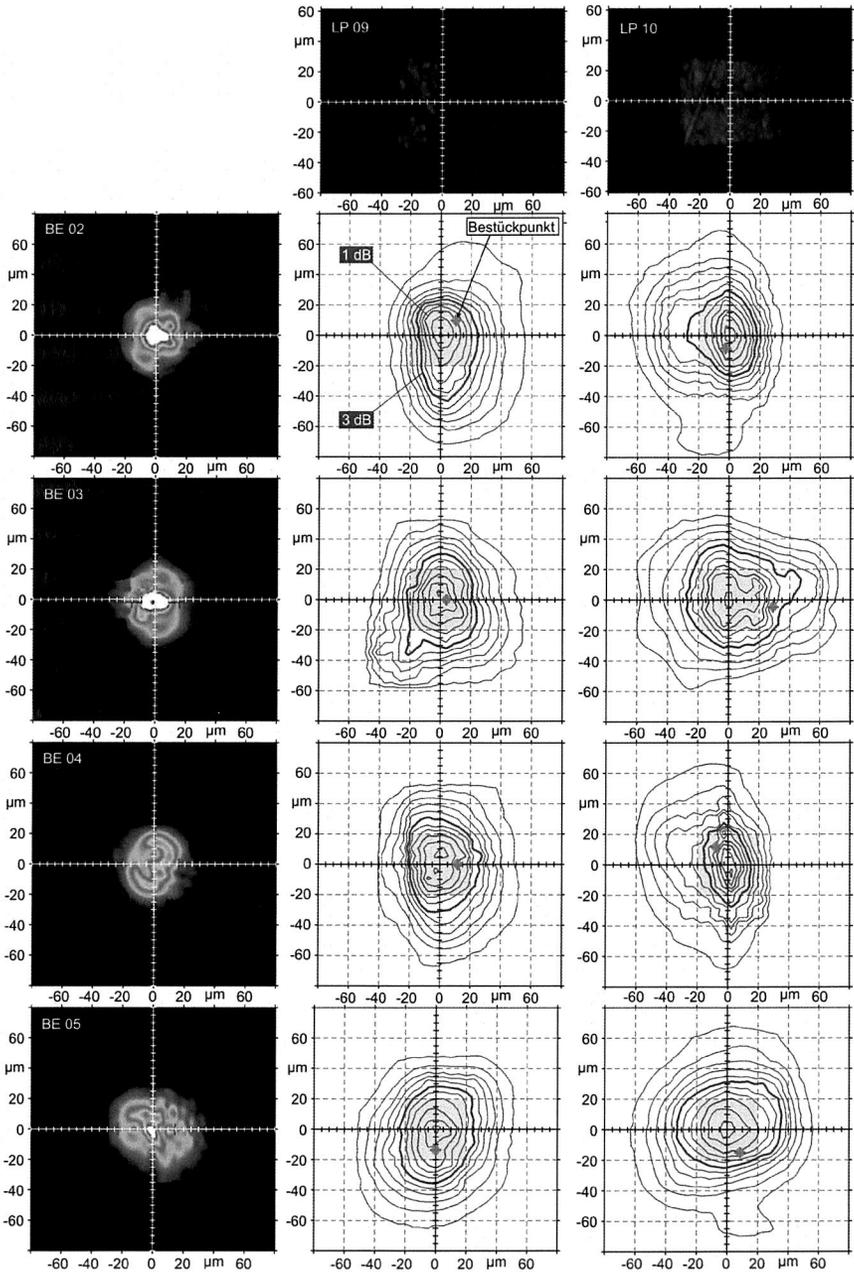


Bild 82: X-Y-Einkoppelprofile für Leiterplatten mit integrierter Umlenkung

Von außen nach innen nimmt mit jeder Konturlinie die Leistung um 10% zu. Der Toleranzbereich für eine maximale Dämpfung von 3 dB stellt die 50%-Kontur dar und für eine maximale Dämpfung von 1 dB die 80%-Kontur. Der resultierende Bestückbereich von $\pm 20 \mu\text{m}$ in X- und Y-Richtung ist grau ausgefüllt.

Jede Bauelement-Leiterplatten-Kombination weist einen spezifischen Versatz bezüglich des idealen Einkoppelpunktes. Die Streuung der Bestückposition bei wiederholter Bestückung eines Bauelement-Leiterplattenpaares ist deutlich geringer als die Streuung im Vergleich zum Gesamtversuch. Die Ursache für dieses schlechte Ergebnis ist auf eine systematische Messabweichung des Feinmessplatzes zurückzuführen. Als Ursachen kommen ein falscher Fokus oder eine unzureichende Charakterisierung des Laserprojekts in Frage.

Charakteristisch ist der einseitig größere Gradient der Einkoppelleistung in negativer x-Richtung für LP 09 und in positiver x-Richtung für LP 10. Theoretisch wäre eine leichte Positionskorrektur des Sollbestückortes entgegen des Gradienten empfehlenswert. In der Praxis ist jedoch diese Abhängigkeit mit der teilaktiven Bestückung nicht vollständig messbar. Eine Aufnahme eines spezifischen Bauelement-Leiterplatten-Einkoppelprofil ist mit einer Messdauer zwischen ein bis zwei Stunden wirtschaftlich nicht umsetzbar. Ideal zeigt sich das Einkoppelprofil für BE 05. Die nahezu konzentrischen Leistungslinien sind vermutlich auf ein Bauelement ohne Abstrahlneigung zurückzuführen. Ein Ausgleich der Abstrahlneigung ist nur durch weitere Freiheitsgrade der Bestückkopfkine matik zur Verkipfung des Bauelementes möglich. Diese Lösung widerspricht jedoch dem Ansatz der Bestückung mit einem Standardbestückautomaten.

Trotz der Einschränkungen durch die Messtechnik und Maschinenkinematik ist eine verbesserte Prozessfähigkeit durch eine Fokuskorrektur zu erwarten. Diese These kann durch eine Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Bestückgenauigkeit und Fokusabstand bestätigt werden. Bild 83 zeigt die Bestückabweichung für LP 09 in x- und in y-Richtung für insgesamt vier unterschiedliche Bauelemente (BE 02, 03, 04 und 05, vgl. Bild 82) in Abhängigkeit des Fokusabstandes. Die Untersuchung bestätigt die Möglichkeit der Fehlerreduktion durch Minimierung des Fokusversatzes (vgl. Abschnitt 6.3.3). Für die X-Richtung ergibt sich bei einem Fokusabstand von $725 \mu\text{m}$ die geringste Streuung mit einer Standardabweichung von $\sigma_x = 4.14 \mu\text{m}$ und für die Y-Richtung bei einem Fokusabstand von $750 \mu\text{m}$ eine Standardabweichung von $\sigma_y = 4.93 \mu\text{m}$. Nach Bild 83 ist ersichtlich, dass beim idealen Fokus die Abweichung nicht gegen Null geht. Dies ist auf Messunsicherheiten am Feinmessplatz und Schwankungen im Package der Bauelemente zurückzuführen.

Eine weitere Einflussgröße auf den Fokusabstand ist durch die Bestückkraft gegeben. In Abhängigkeit der Bestückkraft wird ein Bauelement bei der Kontaktierung durch die

Anpresskraft unterschiedlich stark nach unten gedrückt, so dass sich der Fokusabstand dadurch ändert.

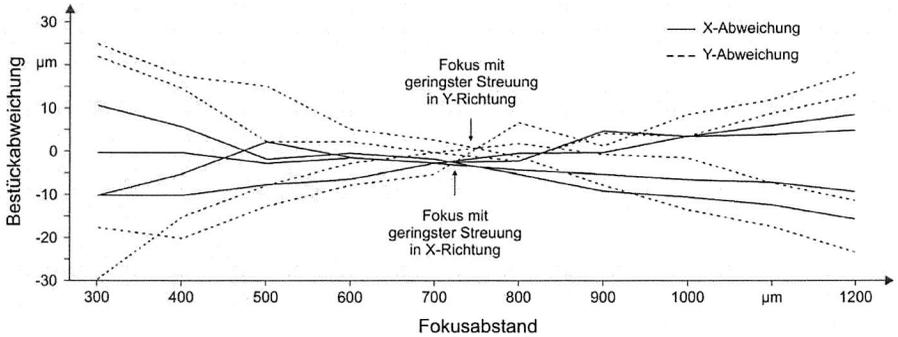


Bild 83: Bestückgenauigkeit in Abhängigkeit des Fokusabstandes des Feinmessplatzes für vier unterschiedliche Bauelemente auf einer Leiterplatte

Die Auswirkung auf die Bestückgenauigkeit und damit Koppelqualität ist signifikant. Bild 84 zeigt für acht verschiedene Bauelemente die Messergebnisse der relativen Positionsabweichung des Laserschwerpunktes bei Variation der Anpresskraft (Bestückkraft) am Feinmessplatz zwischen $F_B = 1\text{ N}$ und $F_B = 5\text{ N}$.

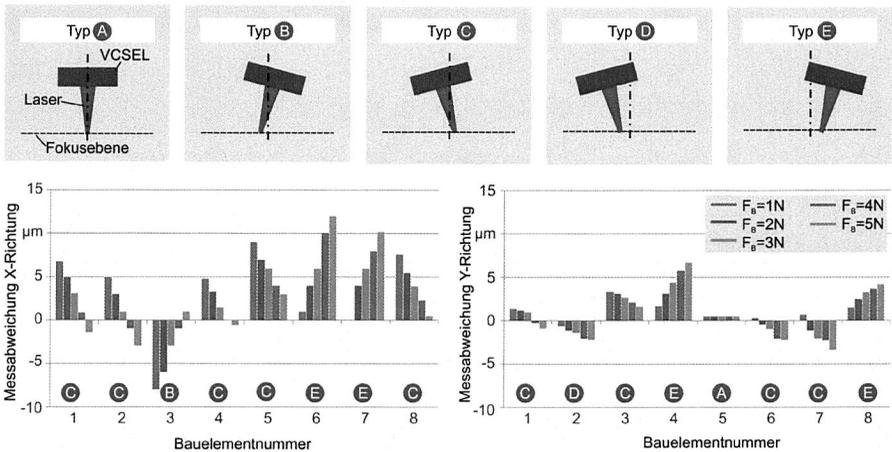


Bild 84: Messabweichung der Laserlage in Abhängigkeit der Bestückkraft

Zur Interpretation der Messergebnisse sind insgesamt fünf Fälle zu unterscheiden. Typ A beschreibt ein Bauelement mit normaler Abstrahlung. Typ B und Typ E strahlen in negativer Richtung und Typ C und Typ D strahlen in positiver Richtung. Durchstrahl der

emittierte Laser die Mittelpunktsachse des Feinmessplatzes, so ändert sich das Vorzeichen bei Variation der Fokusebene (Typ B und Typ C). Aufgrund der robusten Zweipunktmessung ist resultierende Bestückgenauigkeit unabhängig von den dargestellten Fällen. Zur Erzielung ist jedoch die Einhaltung einer konstanten Bestückkraft zwingend erforderlich. Eine Variation der Bestückkraft um nur vier Newton kann bereits zu einer Abweichung von bis zu 10 µm führen.

Abschließende Bestückuntersuchungen unter Berücksichtigung der relevanten Einflussgrößen insbesondere durch Einhaltung der konstanten Bestückkraft und des optimalen Fokusabstandes erbringen den Nachweis für die Prozessfähigkeit der teilaktiven Bestückung. Für ein optimiertes Bestückergebnis wurde zuvor eine automatische Maschinenkalibrierung und Offsetkorrektur durchgeführt. Die Referenz für den Fokusabstand stellt LP-09 dar und ist auf 725 µm justiert. Die Bestückkraft beträgt $F_B = 3,0 \text{ N}$. Bild 85 zeigt die resultierenden Ergebnisse der Bestückung von 12 zufällig ausgewählten Bauelementen auf vier unterschiedlichen Leiterplatten einerseits für den optimal gewählten Fokusabstand und andererseits für einen Fokusabstand mit gezielter Abweichung des Fokusabstandes um -325 µm. Die zugehörigen Verteilungsparameter und Fähigkeitsindizes sind in Tabelle 8 angegeben.

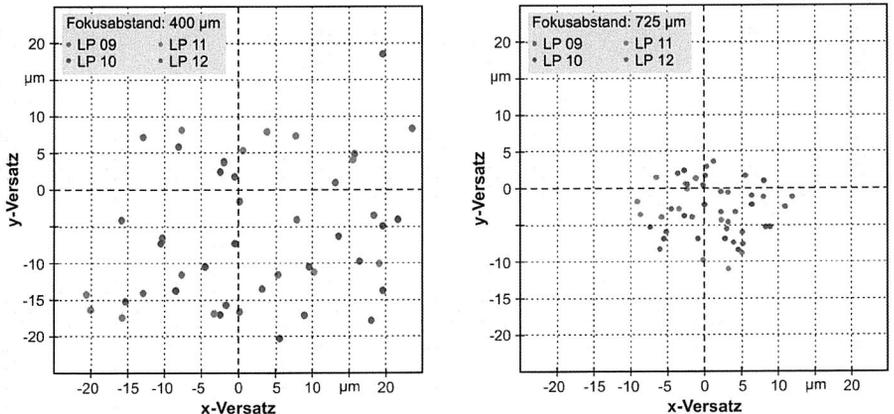


Bild 85: x-y-Bestückdiagramme für unterschiedliche Fokuseinstellungen am FMP

Die Untersuchung bestätigt den signifikanten Einfluss des Fokusabstandes auf die Bestückgenauigkeit. Bei falschem Fokus am Feinmessplatz ist die Bestückung der optischen Bauelemente nicht prozesssicher, da sich der Fokusfehler in einer breiten Streuung bemerkbar macht. Dies ist auf den variierenden Abstrahlwinkel des Lasers zurückzuführen. Bestätigt wird diese Abhängigkeit durch die annähernd gleichen Standardabweichungswerte der Leiterplatte 09 und 12, deren Lichtwellenleiterabstand zur Bestückoberfläche sich nur um 8 µm unterscheidet. Die Leiterplatten 10 und 11

weisen aufgrund ihres um $30\ \mu\text{m}$ abweichenden Lichtwellenleiterabstandes eine höhere Standardabweichung auf.

Tabelle 8: Qualitätsmerkmale für USG= $-20\ \mu\text{m}$ und OSG = $20\ \mu\text{m}$

		LP 09		LP 10		LP 11		LP 12		Gesamt	
		$\Delta h = 0\ \mu\text{m}$		$\Delta h = 33\ \mu\text{m}$		$\Delta h = -27\ \mu\text{m}$		$\Delta h = 8\ \mu\text{m}$			
		Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
f = $400\ \mu\text{m}$	$\mu\ [\mu\text{m}]$	3,29	-4,54	4,95	-10,27	-2,39	-3,26	0,76	-4,43	1,65	-5,62
	s [μm]	12,65	8,78	11,45	6,50	14,04	13,50	12,63	13,65	12,63	11,04
	Cp	0,53	0,76	0,58	1,02	0,47	0,49	0,53	0,49	0,53	0,60
	Cpk	0,44	0,59	0,44	0,50	0,42	0,41	0,51	0,38	0,48	0,43
f = $725\ \mu\text{m}$	$\mu\ [\mu\text{m}]$	3,91	-2,09	1,36	-4,92	-2,63	-4,27	-0,05	-3,22	0,65	-3,62
	s [μm]	4,06	3,34	5,53	3,87	4,49	5,00	4,43	4,72	5,10	4,29
	Cp	1,64	2,00	1,21	1,72	1,49	1,33	1,50	1,41	1,31	1,56
	Cpk	1,32	1,79	1,12	1,30	1,29	1,05	1,50	1,19	1,26	1,27

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Prozessfähigkeit im Grenzbereich befindet. Dies setzt voraus, dass der Bestückautomat regelmäßig (z. B. nach zehn Bestückzyklen) neu kalibriert werden muss, um stets innerhalb der geforderten Spezifikation zu arbeiten. Dieses Verfahren zum Erhalt einer hohen Bestückgenauigkeit wird bei kommerziell erhältlichen Bestückautomaten bereits angewendet [74]. Außerdem muss der Fokus des Feinmessplatzes dem Arbeitsabstand (VCSEL – Koppelstelle) gleich sein. Um dies zu gewährleisten, ist ein zusätzlicher Prozessschritt zur Erfassung der vertikalen Position des LWL und automatischen Einstellung des Fokus erforderlich. Unter Berücksichtigung dieser Forderungen kann bestätigt werden, dass die teilaktive Bestückung hohes Potenzial zeigt.

8 Zusammenfassung

Aufgrund der rasanten Entwicklung der Informationstechnologien, getrieben durch das Internet und durch multimediale Anwendungen, werden zukünftig Bandbreiten im oberen Gbit/s-Bereich prognostiziert. Bereits heute sieht sich die Technologie der elektrischen Datenübertragung vor große Herausforderungen gestellt, die Übertragungskapazitäten von 10 Gbit/s auf Leiterplattenebene zu realisieren. Im Gegensatz dazu bietet die optische Datenübertragung mittels integrierten Lichtwellenleitern hohes Potenzial, den zukünftigen Forderungen zu genügen. Sie bringt weitere Vorteile durch Einsparung von Bauraum und Gewicht als auch durch Reduktion der Schaltungskomplexität mit sich. Trotz dieser Vorteile und intensiver Forschungsaktivitäten fand die optische Datenübertragung auf Boardebene bisher nicht ihren Durchbruch.

Die internationale Forschungsarbeit der letzten zwölf Jahre brachte vielfältige Aufbaukonzepte für elektrooptische Baugruppen hervor. Besonders herausfordernd zeigt sich die hohe Justagegenauigkeit zur Sicherstellung der Strahlführung. Die bisherigen Ansätze zur Lösung dieses Problems stellen präzise Bauelemente mit mechanischen Anschlagstrukturen dar, die weitestgehend inkompatibel zur vollautomatisierten Fertigung von elektronischen Baugruppen und teuer sind. Daher war es Ziel dieser Dissertation, massenfertigungstaugliche Sender- und Empfängerbauelemente zu entwickeln, angepasste Fertigungsverfahren für die Surface Mount Technologie (SMT) zu konzipieren und eine Produktionsanlage prototypisch aufzubauen und zu qualifizieren.

Angesichts der fehlenden Verfügbarkeit elektrooptischer Komponenten wurden im Sinne einer Low-Cost-Fertigung gehäuste Bauelemente mit 850 nm VCSEL entwickelt und prototypisch aufgebaut. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde die Entwicklung der in dieser Arbeit verwendeten elektrooptischen Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern für die Abstimmung der elektrischen und optischen Schnittstellen begleitet. Für die Analyse der optischen Bauelementeigenschaften und Koppelcharakteristika wurde ein Messplatz konzipiert. Mit umfangreichen Untersuchungen konnten verschiedene fertigungsspezifische Einflussfaktoren auf die Leistungsverteilung der Laserprofile identifiziert werden. In Abhängigkeit des VCSEL-Stroms, der thermischen Belastung durch den Reflowprozess und der Umgebungstemperatur ändert sich die Leistungsverteilung und beeinflusst dadurch die Kopplung. Die Analysen zeigten, dass der emittierte Laser für eine effektive Kopplung fokussiert werden muss. Des Weiteren stellt der Laserschwerpunkt nicht den idealen Koppelpunkt dar.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik abgeleitet. Die Bestückung der elektrooptischen Bauelemente erfordert neben der Ausrichtung der elektrischen Anschlussflächen zueinander eine gesicherte optische Kopplung mit einer Justagegenauigkeit von weniger als 20 μm . Des Weiteren ist die Fixierung der Bauelemente direkt nach der Platzierung erforderlich.

Auf Basis theoretischer Überlegungen wurden drei grundlegende Konzepte für die Bestückaufgabe hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen diskutiert. Es zeigte sich, dass die teilaktive Bestückung im Gegensatz zur passiven und aktiven Bestückung ganzheitlich betrachtet die effizienteste Lösung darstellt. Hierbei wird im Bestückablauf die Laserlage im aktiven Zustand gemessen und anschließend das Bauelement passiv bestückt. Sie ist durch eine moderate Maschinenerweiterung, durch kosteneffiziente Bauelemente und durch eine akzeptable Koppeffizienz gekennzeichnet. Auf Basis recherchierter Einflussgrößen auf die Bestückgenauigkeit wurden Maßnahmen zur Erhöhung der Maschinenfähigkeit bestehender Bestückautomaten abgeleitet.

Die Verfahren zur Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchung der Elektronikfertigung lassen sich nicht direkt auf die Montage optischer Bauelemente übertragen. Mithilfe eines methodischen Vorgehens wurden hierfür neue Ansätze entwickelt. Während für den Nachweis der Maschinenfähigkeit ein tragbares Konzept abgeleitet werden konnte, zeigt sich der Nachweis der fortlaufenden Prozessfähigkeit schwierig, da die Qualitätsmerkmale im laufenden Produktionsprozess nicht gemessen werden können.

Für die Fixierung der Bauelemente konnte mit Hilfe einer Technologiematrix das Verbindungsverfahren Kleben-Löten mit höchstem Potenzial identifiziert werden. Mittels experimenteller Untersuchungen wurde die Eignung von fünf verschiedenen Klebstoffen, die sowohl licht- als auch thermisch induziert härten, geprüft und hinsichtlich der spezifischen SMT-Prozesse charakterisiert. Es zeigte sich, dass nur ein Klebstoff die Anforderungen an die Formstabilität und die Prozesszeit im vollen Umfang erfüllt. Des Weiteren konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Klebstoffschumpfung keinen signifikanten Einfluss auf die optische Kopplung hat.

Für den Nachweis der Maschinen- und Prozessfähigkeit wurde die Funktionalität eines kommerziell erhältlichen Hochleistungsbestückautomaten durch Integration von Jet-Systemen für den Klebstoffauftrag, eines UV-Systems, eines Sensors zur Lageerfassung des Lasers und eines Präzisionsbestückkopfes erweitert. Die Steuersoftware mit den zugrundeliegenden kinematischen Abläufen wurde von Grund auf neu in der Programmiersprache C++ implementiert. Die entwickelte Bedienoberfläche ermöglicht durch das modulare Konzept die bequeme Programmierung individueller Bestückabläufe. Einen Schwerpunkt dieser Arbeit stellte die Entwicklung des Feinmessplatzes dar, mit dem die Inbetriebnahme des Lasers zur Lageerfassung bezüglich der Vakuumpipette im Bestückprozess möglich ist. Abschließend konnte mittels einer spezifischen Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchung das hohe Potenzial der teilaktiven Bestückung nachgewiesen werden. Somit wurde mit Abschluss dieser Arbeit ein wichtiger Beitrag für den Abbau von Hemmnissen für die Technologie elektrooptischer Baugruppen geleistet.

9 Summary

Because of the rapid development of information technologies, which is driven by internet and multimedia applications, high data transfer rates in the upper ranges of Gbit/s are expected. Today the electrical signal transmission is already facing a lot of challenges to realize data rates up to 10 Gbit/s on printed circuit boards (PCB). The optical data transmission using integrated optical waveguides is a promising technology and offers the possibility of high data rate transmission. It brings benefits by saving space and weight as well as reducing circuit complexity. Despite these advantages and extensive research activities the optical data transmission on board level could not yet prevail on the market. One of the reasons is the missing packaging technology for automated mass production. Therefore it was the aim of this dissertation to develop SMT capable optical transmitter (VCSEL) and receiver (PIN diodes) components, to design adapted manufacturing processes, to build up a prototypical assembly machine and to validate the designed assembly process.

Analysis showed that the optical coupling depends on several manufacturing parameters. The VCSEL-current, thermal stress by the reflow process and the environmental temperature influence the laser beam profile and thus the coupling efficiency. It has been demonstrated that the laser centroid is not necessarily the ideal coupling point. Based on these findings requirements for the automated assembly were derived. On the one hand the placement accuracy is 20 microns and on the other hand the optical components have to be fixed directly after placing due to the self centering effect during the reflow process.

Based on theoretical considerations three basic placement concepts were validated concerning technical and economic aspects. The semi-active placement is most promising because of its high accuracy and simple setup. Before placing the component onto the optical printed circuit board it is contacted electrically to a specific sensor and the laser position is measured. To guarantee a fixation directly after the placement a fast curing adhesive is necessary. The fixation process using a uv- and thermal curing adhesive was analyzed. The findings show that the requirements for the adhesive form stability and curing time with less than 1 second can be fulfilled.

The continuous process chain was realized with a commercial placement machine by integrating a laser sensor and a special placement head with a uv-light source. The process capability of the novel semi-active placement concept could be demonstrated. With this doctoral thesis an important contribution was accomplished to reduce the barriers to introduce electro-optical printed circuit boards.

Literatur

- [1] Althaus, H. L. et al.: „Optical SMT-Packaging for Highly Efficient and Reliable Fiber Optic Components Including 1300nm VCSELs“, in Proc. 54th Electronic Components and Technology Conference 2004, vol. 1, 1.-4.06.2004, S. 192-198
- [2] Barabas, U.: „Optische Signalübertragung“, München: R. Oldenburg Verlag GmbH, 1993
- [3] Bellis, M.: „The Birth of Fiber Optics“, URL: <http://inventors.about.com/library/weekly/aa980407.htm> (16.03.2011)
- [4] Berger, C. et al.: "Optical links for printed circuit boards," Lasers and Electro-Optics Society, 2003. LEOS 2003. The 16th Annual Meeting of the IEEE, vol. 1, no., pp. 61- 62 vol.1, 27-28 Oct. 2003
- [5] Betschon, F. et al. "Mass Production of Planar Polymer Waveguides and their Applications" in Proc. of SPIE Vol 7607, 2010
- [6] Betschon, F.; Michler, M.; Craiovan, D.; Halter, M.; Dietrich, K.; Kremmel, J.; Franke, J.; Gmür, M.; Paredes, S.: "Mass Production of Planar Polymer Waveguides and their Applications", in: Proceedings SPIE Photonics WEST, Paper No. 7607-21, San Francisco, 2010
- [7] Betschon, F.; Michler, M.; Craiovan, D.; Halter, M.; Beyer, S.; Kremmel, J.; Franke, J.: „Integration planarer Polymerwellenleiter“, in: Systemintegration in der Mikroelektronik, VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach, S. 89-102, 2010
- [8] Beyrer, K.: „Die optische Telegraphie als Beginn der modernen Telekommunikation“ in: Teutenberg, H.-J.; Neusch, C. (Hrsg.): „Vom Flügeltelegraphen zum Internet – Geschichte der modernen Telekommunikation“, Stuttgart: Franz Steiner Verlag, 1998
- [9] Bierhoff, T. et al.: "All optical pluggable board-backplane interconnection system based on an MPX™-FlexTail connector solution", Photonics Society Winter Topicals Meeting Series (WTM), 2010 IEEE, Mallorca, 11.-13. Januar 2010, S. 91-92
- [10] BMBF: "OptoSys: Optische Verbindungssysteme", <http://www.pt-it.pt-dlr.de/de/1070.php>, (14.03.2011)
- [11] BMBF: Verbundfaltblatt Mikrosystemtechnik – Electrical Optical Circuit Board EOCB 1998 – 2001, Datei: <http://www.mstonline.de/foerderung/projektliste/pdf/EOCB.pdf>, (14.03.2011)
- [12] BMBF-Verbundprojekt: „Zuverlässigkeit von SMD-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich“, Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes, 1996
- [13] Brand, A.: „Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)“, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach Verlag, Bamberg, 1996
- [14] Braun, E.: "BIGFON" in Informatik-Spektrum (1978), Heft 10, Springer-Verlag, S. 216-221

- [15] Chang, W. C.; Yarn, K. F.; Chuang, W. C.: "Polymer Nano-Bragg Grating Waveguide using Mems Process" in: Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, vol. 4, no. 1, 2009, S.199-204
- [16] Christoph, F.: „Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion“, Dissertation Universität-Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003, S. 132
- [17] Craiovan D., Rösch M., Feldmann K.: „Entwicklung einer spezifischen Montage-technologie zur Herstellung elektrooptischer Baugruppen“, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten – EBL 2008, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [18] Craiovan D.; Rösch M.; Feldmann K.: "System Solutions for the Precise Assembly of Electro-Optical Components", International Symposium on Photonic Packaging, Fraunhofer IZM & VDI/VDE-IT, 2006
- [19] Craiovan, D., Rösch, M., Feldmann, K.: „Die elektrooptische Baugruppe – eine Herausforderung für die Aufbau- und Verbindungstechnik“, in PLUS 10. Jahrgang, Band 10, Heft 6 (2008), S. 1187 – 1194
- [20] Craiovan, D.: „Analyse der Bestückgenauigkeit in Abhängigkeit verschiedener Produktionsparameter“, in Tagungsband: „Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik - Fachseminar zur Elektronikproduktion“, Nürnberg, 27.11.2007
- [21] Daele, P. van, Hendrickx, N., Steenberge, G. van, Bosmann, E.: Coupling Light to and from Optical Boards, 2nd International Symposium on Photonic Packaging, Munich, 2008
- [22] Dangel, R. et al.: "Polymer Waveguide based board-level optical interconnect technology for datacom applications" IEEE Trans. Advanced Packaging, 31, pp. 759-767 (2008).
- [23] Dangel, R. et al.: "Polymer-Waveguide-Based Board-Level Optical Interconnect Technology for Datacom Applications," IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol.31, no.4, 2008, S. 759-767
- [24] Demmer, P. et al.: „New Generation Interconnection Technology: Printed Circuit Boards with Integrated Optical Layers“, In Proc. 9th IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects, 10.-13. Mai 2005, S. 213- 215
- [25] Destouches, N., Blanc, D., Franc J., Tonchev S., Hendricks, N. Van Daele, P. Parriaux, O.: "Efficient and tolerant resonant grating coupler for multimode optical interconnections", Optics Express, Vol. 15, No. 25, pp. 16870 – 16879
- [26] Dietrich, E.; Schulze, A.: „Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozess-qualifikation“, 6. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009
- [27] Djebari, M.: „Photoempfänger für Pikosekunden-Laserimpulsradar“, Dissertation, Universität Kassel, 2000
- [28] Doany, E. et al.: "160 Gb/s bidirectional polymer-waveguide board-level optical interconnects using CMOS-based transceivers," IEEE Trans. Advanced Packaging, 32, pp. 345-359 (2009)
- [29] Feldmann K., Rösch, M., Craiovan, D.: Konzeption, Umsetzung und Qualifizierung der automatischen Montage elektrooptischer Bauelemente, V. ITG Work-

- shop Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2007, S. 55-59
- [30] Feldmann, K., Craiovan, D., Rösch, M., „Development of Specific Technologies and Assembly Systems for the New Challenge of Electro-Optical Devices“, *Annals of the CIRP Vol 56/1/2007*, ELSEVIER Ltd., 2007, S. 29-32
- [31] Feldmann, K.; Craiovan, D.; Rösch, M.: „Automatisierte Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern“, Abschlussbericht, Bayerische Forschungsstiftung (AZ: 548/02), 2006
- [32] Feldmann, K.; Rösch, M.; Craiovan, D.: „Automated assembly of electro-optical components onto circuit boards with integrated optical waveguides“ in: *WGP Production Engineering Research and Development*, Heft 2 (2008), S. 97-102
- [33] Fischer, U. H. P.: „Optoelectronic Packaging“ VDE-Verlag, 2002
- [34] Franke, J., Craiovan, D.: „Herausforderungen und Lösungen für die Montage optischer Komponenten in der SMT-Fertigung“, in *Proc. Kunststoffe in optischen Systemen*, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 2010
- [35] Franke, J.; Craiovan, D.: „Modified Assembly Systems and Processes for the Mounting of Electro-Optical Components“, in: S. Lee (Hrsg.) *Frontiers of Assembly and Manufacturing*, Springer Berlin Heidelberg, S.113-126, 2010
- [36] Franke, J.; Craiovan, D.; Pfeffer, M.: „3D-Montage mit Standard-SMT-Bestückautomaten“, in *PLUS 11. Jahrgang*, Band 11, Heft 12 (2009), S. 2864 – 2871
- [37] Franke, M.; Schiefelbein, F.-P.: „Optical Interconnects on Printed Circuit Board Level – Results Based on the German Funded Project OPTICON“ in *Proc. 54th Electronic Components and Technology Conference*, vol. 2, 1.-4. Juni 2004, S. 1542-1564
- [38] Generaldirektion PTT (Hrsg.): „Hundert Jahre Elektrisches Nachrichtenwesen in der Schweiz 1852-1952 (Band 1 Telegraph)“, Bern Generaldirektion PTT, 1952
- [39] Goodwill, D. J.; Kabal, D.; Palacharla, P.: „Free space optical interconnect at 1.25 Gb/s/channel using adaptive alignment“ in *Proc. Integrated Optics Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, 21.-26.02.1999, pp. 259–261
- [40] Graf, J.: „Entwicklung und Untersuchungen zur Herstellung verlustarmer passiver Wellenleiter und verstärkender Wellenleiter“, Dissertation, Saarbrücken 1999
- [41] Habenicht, G.: „Kleben“, 6. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, S. 756 – 761
- [42] Hanke, H.-J. (Hrsg.): „Baugruppenttechnologie der Elektronik – Leiterplatten“, 1. Auflage, Berlin: Verlag Technik GmbH, 1994, S. 330-357
- [43] Hanke, H.-J.: „Baugruppenttechnologie der Elektronik - Hybridträger“, 1. Auflage. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1994
- [44] Haupt, M.; Oehr, C.: „Entwicklung von Antihafschichten auf Schablonen zur Optimierung von Druckprozessen in der Mikroelektronik“ in *Proc. Elektronische*

- Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik – Erfolg durch Innovation, 3. DVS/GMM-Fachtagung, Seeheim, 08.02.2006 – 09.02.2006
- [45] Heilmann, N.: "Anforderungen an die Verarbeitung von LEDs", 3. Elektronik-Technologie-Forum-Nord (ETFN), Hamburg, 26.-27. Januar 2011
- [46] Heilmann, N.; Lindloff, A.; Dold, C.; Friedrich, D.; Trodler, J.: „01005 Prozess-Technologie“, Siemens Automation & Drives Electronics Assembly Systems (Hrsg.), Siemens AG 2007
- [47] Hering, E.; Bressler, K.; Gutekunst, J.: „Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, 5. Ausgabe, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 218-231
- [48] Hung, K. C. et al.: "Study of self-alignment of μ BGA packages," in IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol.23, no.4, 2000, S. 631- 636
- [49] Hwang, J. S.: „Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing“. New York, McGraw-Hill Companies, Inc., 1976
- [50] Immonen, M.; Wu, J.; Kivilahti, J.; Karppinen, M.: "Fabrication of Polymer Optical Waveguides with Integrated Micromirrors for Out-of-Plane Surface Normal Optical Interconnects", Proc. IEEE Polytronic Conf. 2004, 2004
- [51] Jetter, M.; Roßbach, R.; Michler, P.: „Rote VCSEL für Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung über POF“ in: Photonik, Heft 1, 2008, S. 56 – 58
- [52] Kao, C.: "An Interview Conducted by Robert Colburn", IEEE History Center, 26 February 2004
- [53] Karppinen, M.: "Embedded optical interconnect on printed wiring board", Proc. of SPIE Photonics Europe, pp.150-64, April 2004
- [54] Karppinen, M.: "Parallel Optical Interconnect between Ceramic BGA Packages on FR4 Board using Embedded Waveguides and Passive Optical Alignments" in Proc. 2006 Electronic Components and Technology Conference, 2006
- [55] Klein, B.: "Toleranzverknüpfung durch Maßketten", in: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau, Oldenburg Verlag, München, 2006, S. 151-181
- [56] Kowatsch, M.: „Aufbaukonzepte“ in Scheel, W.: Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung.“ Templin/Uckermark: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2002, S. 33-47
- [57] Kowatsch, M.: Aufbaukonzepte. In: Scheel, W. (Hrsg.): Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung – Einführung. 2. überarbeitete Auflage, ISBN 3-9341442-12-5, Dr. Markus A. Detert, Templin/Uckermark, 2002, S. 33-47
- [58] Krammer, O.; Ilyevalli-Vitéz, Z.: "Investigating the self-alignment of chip components during reflow soldering", in: Periodica Polytechnica Electrical Engineering Volume 52, Number 1-2 (2008), S. 67-75
- [59] Krammer, O.; Sinkovics, B.; Illés, B.: „Predicting Component Self-Alignment in Lead-Free Reflow Soldering Technology by Virtue of Force Model“, in: Proc. Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dresden, 05.-07. September 2006, S. 617-623

- [60] Krimi, S.: „Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion“, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 59 – 63
- [61] Lamprecht, T. et al.: “Passive alignment of optical elements in a printed circuit board”, Electronic Components and Technology Conference, 2006. Proceedings. 56th ECTC, p.7, 30 May-2 June 2006
- [62] Lüntzsch, C.; Rösch, M.: „Nanobeschichtete Schablone mit Anti-Haft-Wirkung“ in PLUS 10. Jahrgang, Band 10, Heft 6 (2008), S. 1196-1201
- [63] Leiton: “LeitOn HF – Leiterplatten für Hochfrequenzanwendungen” URL: <http://www.leton.de/hochfrequenz-leiterplatten.html>, (16.03.2011)
- [64] Liu, Y. et al.: “Optoelectronic Integration of Polymer Waveguide Array and Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Through Micromirror Couplers”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 4, April 2001
- [65] Loquai, S.; Vinogradov, J.; Ziemann, O.: „Schnelle MSM-Photodioden für POF-Datenübertragung“ in Proceedings Kommunikationskabelnetze (ITG-FB 197), Köln: VDE Verlag, 12.-13. Dezember 2006
- [66] Lühe, F.: „Optische Signalübertragung mit Lichtwellenleitern - Einführung in die physikalischen Grundlagen“, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1993
- [67] Meinel, C., Sack, H.: „Kommunikation im Wandel – von der Höhlenmalerei zum WWW“ in: „WWW“, Berlin Heidelberg New York Springer-Verlag, 2004, S. 66-67
- [68] Miller, D. A. B.: „Physical Reasons for Optical Interconnection“ (Special Issue on Smart Pixels), in: J. Optoelectronics vol. 11 (1997) S. 155-168
- [69] Mohr, H.: „Fasern und Sensorik“ in: Liftin, G. (Hrsg.): “Technische Optik in der Praxis” 3. Auflage, Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005, S. 209-243
- [70] N. N.: “Datenblatt: Epoxy materials for optical microsystems and electronic devices”, micro reist technology, 2008
- [71] N. N.: „Datenblatt: “CuFe2P”, Deutsches Kupferinstitut
- [72] N. N.: „The International Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2008-2009. IPC – Association Connecting Electronics Industries, 2009
- [73] N. N.: Die Leiterplatte, Geschichtliche Entwicklung und Zukunftsprognosen, in VDE/VDI-Schlunungsblätter für die Leiterplattenfertigung, VDE/VDI 3711
- [74] N. N.: “FUJI NXT II Machine Specifications”, 2009
- [75] N. N.: „Pflichtenheft zur Fertigung von FR-Schaltungen“, Richter-Elektronik GmbH, 2009
- [76] N. N.: „Technisches Datenblatt: Bleifreie Lotpastenserie F640“, W. C. Heraeus
- [77] Nieweglowski, K., Rieske, R., Wolter, K.-J.: “Demonstration of Board-Level Optical Link with Ceramic Optoelectronic Multi-Chip Module“ in Proc. 2009 Electronic Components and Technology Conference, 2009

- [78] Norm DIN EN ISO 11146-1: 2005. Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Lasertrahlabmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen – Teil 1: Stigmatische und einfach stigmatische Strahlen
- [79] Norm DIN EN ISO 11146-2: 2005. Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Lasertrahlabmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen – Teil 2: Allgemein astigmatische Strahlen
- [80] Norm DIN ISO 21747: 2007-03: „Statistische Verfahren – Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen für kontinuierliche Qualitätsmerkmale“
- [81] Norm DIN ISO 230-2:1989-09 "Abnahmeregeln für Werkzeugmaschinen; Bestimmung der Positionierungsunsicherheit und der Wiederholbarkeit der Positionierung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen"; Identisch mit ISO 230-2:1988
- [82] Norm IPC 610 A, Revision D: 2005. Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen
- [83] Norm IPC-9850: 2002. Surface Mount Placement Equipment Characterization
- [84] Pichler, F.: „Die Einführung der Morse-Telegraphie in Deutschland und Österreich“ in Elektrotechnik & Informationstechnik (2006) 123/9, S. 402-208
- [85] Plickert, V.; Melchior, L.: „Abschlussreport: Entwicklung eines Opto-SMD-Package“ Optricon GmbH, 2006
- [86] Pospischil, R.: „Funktürme und ihre Geschichte“, URL: <http://www.dfm.de/htcms/ueber-funktuerme/turmgeschichten.html>, Datei: funktürme-und-ihre-geschichte.pdf, (16.03.2011)
- [87] Prasad, R. P.: „Surface Mount Technology – Principles and Practice“. New York, Library of Congress in Publication Data, 1989, S.387-421
- [88] Praun, Stefan von.: Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess. Dissertation Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 2003, S. 32
- [89] Rauner, M.; Schnabel, U.: "Licht rein, Licht raus", ZEIT online, URL: <http://www.zeit.de/2009/42/N-Nobelpreis-Physik>, 7.10.2009 09:17, (16.03.2011)
- [90] Reichl, H.: Leiterplatten mit integrierten aktiven und passiven Komponenten – Potential und Anforderungen, in Elektronik Praxis, <http://www.elektronik-praxis.vogel.de/index.cfm?pid=900&pk=121661> (19.05.2008)
- [91] Rho, B. S. et al.: "PCB-compatible optical interconnection using 45°-ended connection rods and via-holed waveguides" in Journal of lightwave technology, vol.22, no.9 (2004), S. 2128-2134
- [92] Roadmap, „The International Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2008-2009. IPC – Association Connecting Electronics Industries, 2009
- [93] Rösch, M.; Franke, J.; Lüntzsch, C.; Kleemann, G.: Characteristics and Potentials of Nano-Coated Stencils for Stencil Printing Optimization. In: Proceedings of SMTA International 2010. Orlando, FL, US, 2010, S. 816-822

- [94] Rothhaupt, A.: Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
- [95] Scheel, W.: "Baugruppentechologie der Elektronik – Montage", 1. Auflage. Berlin, Verlag Technik GmbH, 1997
- [96] Scheel, W.: „Die Zukunft der elektronischen Baugruppe“, EE-Kolleg, Mallorca, 09.-13. März 2005
- [97] Schiebel, G.: "Bestückung elektronischer Baugruppen" in Scheel, W. (Hrsg.): "Baugruppentechologie der Elektronik – Montage", 1. Auflage. Berlin, Verlag Technik GmbH, 1997
- [98] Schneider, M.: "Coupling Elements for Optical Circuit Boards with Precision Molded Alignment Structures", in Proc. 2008 Electronic Components and Technology Conference, 2008
- [99] Schröder, H. et al.: "Elektro-optische Leiterplatten auf Basis von Dünnglaslaminate mit integrierten optischen Wellenleitern" in: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008, DVS und VDE/VDI (GMM), Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 81-86
- [100] Schröder, H. et al.: „Temperaturstabile Wellenleiter und optische Kopplung für elektro-optische Leiterplatten“ in Tagungsband: Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Verbindungstechnik – Erfolg durch Innovation, 3. DVS/GMM-Fachtagung, Seeheim, 08.-09.02.2006
- [101] Schröder, H.: "Herstellung und Integration planarer optischer Wellenleiter in den Schaltungsträger" in Scheel, W. (Hrsg.): Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung. Templin/Uckermark: Dr. Markus A. Detert, 2002, S. 48-68
- [102] Schröder, H.; Bauer, J.; Ebling, F.; Scheel W.: „Polymer optical interconnects for PCB“ in: Proceeding Polytronic, Potsdam, 2001, S. 337-343
- [103] Siesicki, M.; Niewegowski, K.; Wolter, K.J.; Patela, S.; "Integrated optical waveguides for electrooptical PCB" in: Photonics and Microsystems, 2008 International Students and Young Scientists Workshop, 20.- 22.06.2008, S. 76-79
- [104] Sietmann, R.: „Neue Datenautobahn über den Teich“, URL: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Neue-Datenautobahn-ueber-den-Teich-37467.html>, Artikel von 21.03.2001 17:42, (16.03.2011)
- [105] Sprint Nextel; TAT-14 Cable Network: „TAT-14 Cable System“, URL: <https://www.tat-14.com/tat14/>, (17.03.2011)
- [106] Srobel, O.: „Optische Nachrichtenübertragung“ in Hering, E. (Hrsg.); Martin, R. (Hrsg.): „Photonik – Grundlagen, Technologie und Anwendung“, 1. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, S. 129-173
- [107] Steenberge, V. van et al.: "Laser ablated coupling structures for optical printed circuit boards", in Proc. of SPIE Photonics West Conference: Integrated Optics: Theory and Applications, 30.09.2005
- [108] Steenberge, V. van; Hendrickx, N.; Geernick, P.; Bosman, E. van; Put, P. van Daele, "Development of a technology for fabricating low-cost parallel optical in-

- terconnects“, Proc. of SPIE Photonics West Conference, Vol. 6126, S. 612603/1-612603/9, 2006
- [109] Strake, E.: „Grundlagen der optischen Signalübertragung“ in Scheel, W.: Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung.“ Templin/Uckermark: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2002, S. 14-32
- [110] Takahara, H.: “Optoelectronic Multichip Packaging Technologies and Optical Input/Output Interface Chip-Level Packages for the Next Generation of Hardware Systems“, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.9, No. 2, March/April 2003
- [111] Timbercon, Inc.: “History of Fiber Optics“, URL: <http://www.timbercon.com/history-of-fiber-optics>, (16.03.2011)
- [112] Tyndall, J.: “Notes of a course of nine lectures on LIGHT“, The Royal Institution of Great Britain, London: Longmans, Green and Co., 1870
- [113] Waldhäusl, R. et al.: “Efficient coupling into polymer waveguides by gratings“, Applied Optics, Vol. 36, No. 36, December 1997
- [114] Weck, M.; Brecher, C.: „Ziele und Methoden zur Erfassung der Maschineneigenschaften“ in Werkzeugmaschinen 5, VDI-Buch, 2006, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, S. 1-10
- [115] Weckenmann, A.; Schöpp, H.-J.; Müller, W.: Q-Tek Modul 8 – Statistical Process Control – Maschinen- und Prozessfähigkeit, Skript, FAU Erlangen, Lehrstuhl QFM, Erlangen, 2005
- [116] Weß, H.: “Die elektrische Telegrafie“, URL: <http://www.devcon3.de/elektrische-telegraphie.htm>, (16.03.2011)
- [117] Wohlrabe, H. (Hrsg.): „Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestückungsausrüstungen der SMT“, 2. Auflage, Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2001
- [118] Wohlrabe, H. (Hrsg.): „Qualitätsoptimierung bei der Fertigung elektronischer Baugruppen mittels statistischer Analysemethoden“, 1. Auflage, Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2009
- [119] Wolfesperger, H. A.: “Elektromagnetische Schirmung – Theorie und Praxisbeispiele“, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, S. 267-291
- [120] Wormuth, D., Zapf, J.: Grundlagen der Surface Mount Technologie, München, SIEMENS Dematic AG, 2001
- [121] Wrobel, Ch. P.: „Optische Übertragungstechnik in der Praxis: Komponenten, Installation, Anwendungen“, Bonn: Hüthing Verlag, 2004
- [122] Zerna, T.: „Montagegenauigkeit und Fähigkeit von Bestückautomaten“ in „Aufbau- und Verbindungstechnik für Elektronik-Baugruppen der Höchstintegration“, 1. Auflage 2008, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, S.150-151
- [123] Ziemann, O. et al.: „Optische Datenübertragung auch für kurze Entfernungen“ in Laser+Photonik, Heft 4 (2005), S. 36-41
- [124] Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P. E.; Daum, W.: „POF-Handbuch.“, 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, S. 359-385

- [125] Zolleiß, B.: „Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen.“ Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2007

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

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
Projektierung 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 CO₂-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
CO₂-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 CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Grapp
**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 Hopperditzel
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
Berührungslöse 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 CO₂-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 Programmp Optimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-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 Meißner
**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 Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
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 CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beilinger

**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 Schögl

**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 Kornell

**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
Laserstrahlformen 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 Negendanck

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

Band 133: Oliver Kreis

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

Band 134: Stefan Trautner

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

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahl-schneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen 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 Wölflick

**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 Schaltungsträger (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 Prozessauslegung 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 Prozessauslegung 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 978-3-87525-275-0

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-Bordnetzsysteme
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blank
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoren zur Schwerpunktlagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlenschweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke
**Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung
wickeltechnischer Produkte**
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam
**Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled
Tissue-Specific Laser Surgery**
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch
**Potenziale und Strategien zur Optimierung des
Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion**
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald
**Quasi-isothermes Laserstrahlintern von Hochtemperatur-Thermoplasten -
Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK**
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7

Band 223: Daniel Craiovan
**Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente
auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern**
165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011
ISBN 978-3-87525-324-5