

Tobias Tiedje
Additive photostrukturierte Polymerhausung von
optoelektrischen Baugruppen mittels Stereolithographie

DRESDNER BEITRÄGE
ZUR AUFBAU- UND VERBINDUNGS-
TECHNIK DER ELEKTRONIK

Herausgegeben von
Karlheinz Bock
Klaus-Jürgen Wolter
Thomas Zerna

Band 10

Tobias Tiedje

**Additive photostrukturierte
Polymerhausung von optoelektrischen
Baugruppen mittels Stereolithographie**

TUD*press*

2024

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Additive photostrukturierte Polymerhausung von optoelektrischen Baugruppen mittels Stereolithographie“ am 12.12.2023 als Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden eingereicht und am 07.06.2024 verteidigt.

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann (TU Dresden)
1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karlheinz Bock (TU Dresden)
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowotnick (Universität Rostock)
Weiteres Mitglied:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Richter (TU Dresden)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-739-1

© TUDPress

Thelem Universitätsverlag und
Buchhandel GmbH & Co. KG
Dresden und München
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor.

Printed in Germany.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Additive photostrukturierte Polymerhausung von
optoelektrischen Baugruppen mittels
Stereolithographie**

Dipl.-Ing.

Tobias Tiedje

der FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIONSTECHNIK der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEURS

(Dr.-Ing.)

Kurzfassung

Optoelektrische Baugruppen spielen eine entscheidende Rolle in der modernen Welt und finden in einer Vielzahl von Anwendungen Verwendung. Diese Baugruppen kombinieren die Optik mit der Elektronik und ermöglichen die Konvertierung von optischen Signalen in elektrische Signale und umgekehrt. Insbesondere in der Automobilbranche müssen diese Komponenten zusätzlich hohe Zuverlässigkeitsstandards erreichen, um beispielsweise beim Autonomen Fahren eingesetzt zu werden. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Gewährleistung einer kontaminationsfreien Oberfläche der aktiven Bereiche der optoelektrischen Baugruppen. Üblicherweise wird dies durch die Anwendung einer Verkapselung in Verbindung mit einer Glasabdeckung erreicht. In gängigen kommerziellen Verfahren erfolgt diese Verkapselung in der Regel am Ende des Fertigungsprozesses. Dadurch kann es während der vorherigen Fertigungsschritte leicht zu einer Verschmutzung der aktiven Bereiche kommen. In dieser Arbeit werden optoelektrische Baugruppen verwendet, wobei bereits im Wafer-Level-Verbund eine Glaskappe auf den aktiven Bereich montiert wird, die sie vor einer Kontamination der anschließenden Fertigungsschritte schützt. Aufgrund der frühzeitigen Montage der Glaskappe bleiben nachfolgend hergestellte Anschlussleitungen wie Drahtbonds ungeschützt. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung eines Hausungsverfahrens, um die Anschlussleitungen derartig hergestellter optoelektrischer Baugruppen zu schützen. Ein vielversprechender Lösungsansatz ergibt sich aus der Entwicklung eines stereolithographischen Prozesses und der Verwendung eines angepassten Hausungsmaterials. Besonders die Auswahl der Bestandteile des Hausungsmaterials ist entscheidend, um die geforderten Zuverlässigkeitsstandards zu erfüllen. Aus diesem Grund beinhaltet diese Arbeit eine gründliche Untersuchung des Hausungsmaterials, seiner Bestandteile und Eigenschaften. Erste Zuverlässigkeitsuntersuchungen von gehausten optoelektrischen Baugruppen zeigen vielversprechende Ergebnisse für das entwickelte Hausungsverfahren und das angepasste Hausungsmaterial.

Abstract

Optoelectronic assemblies play a crucial role in the modern world and are used in a wide range of applications. These assemblies combine optics with electronics and enable the conversion of optical signals into electrical signals and vice versa. In the automotive industry in particular, these components must additionally achieve high reliability standards in order to be used in autonomous driving, for example. A key influencing factor is ensuring a contamination-free surface of the active areas of the optoelectronic assemblies. This is usually achieved by using encapsulation in conjunction with a glass cover. In common commercial processes, this encapsulation is usually performed at the end of the manufacturing process. This can easily lead to contamination of the active areas during the previous manufacturing steps. In this work, optoelectronic assemblies are used, where a glass cap is already mounted on the active area at the wafer-level, which protects them from contamination during the subsequent fabrication steps. Due to the early assembly of the glass cap, subsequently manufactured electrical connections such as wire bonds remain unprotected. This work focuses on the development of a packaging process to protect the electrical connections of such manufactured optoelectronic assemblies. A promising approach results from the development of a stereolithographic process and the use of an adapted packaging material. In particular, the selection of the constituents of the packaging material is crucial to meet the required reliability standards. For this reason, this work includes a thorough investigation of the packaging material, its constituents and properties. Finally, in this thesis, initial reliability studies of packaged optoelectrical assemblies show promising results for the developed packaging process and the adapted packaging material.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Konzept Polymerhausung für optoelektrische Baugruppen	3
2.1	Klassische Verkapselungsverfahren von elektronischen Baugruppen	4
2.1.1	Molding.....	5
2.1.2	Glob Topping	7
2.1.3	Potting – Verguss.....	8
2.1.4	Printing - Drucken	8
2.2	Einschätzung der herkömmlichen Verkapselungsverfahren für optoelektrische Baugruppen mit einer direkten Glasabdeckung.....	8
2.3	Ablauf der photostrukturierten Polymerhausung für optoelektrische Baugruppen	10
3	Stereolithographie und photostrukturiertes Hausen.....	12
3.1	Stereolithographieverfahren	12
3.2	Aufbau der eingesetzten Stereolithographieanlagen	14
3.3	Photostrukturiertes Hausen eines technologischen Demonstrators	16
4	Stereolithographische Materialien zur Hausung optoelektrischer Baugruppen	18
4.1	Vernetzung von Photoharzen.....	18
4.2	Anforderungen an das Hausungsmaterial und deren Bestandteile	19
4.3	Einschätzung kommerzieller Materialien für stereolithographisches Hausen von optoelektrischen Baugruppen.....	21
4.4	Photoinitiatoren	22
4.4.1	Arten der Photoinitiatoren und -polymerisation	22
4.4.2	Wahl des Photoinitiators.....	23
4.5	Monomere und Oligomere.....	26
4.5.1	Typisch eingesetzte stereolithographische Monomere und Oligomere.....	26
4.5.2	Wahl der Monomere und Oligomere	27
4.6	Füllstoffe.....	29
4.6.1	Einfluss der Füllstoffe bezogen auf die thermomechanischen Eigenschaften.....	29
4.6.2	Wahl der Füllstoffe	31
5	Entwickelte Herstellungsmethode der gefüllten Photoharze und der Versuchskörper	34
6	Untersuchung der Photoharze und -polymere	36
6.1	Bewertung der Monomere und Oligomere.....	36
6.1.1	Erste Untersuchung der Monomere und Oligomere	36
6.1.2	Zweite Untersuchung der Monomere und Oligomere.....	37
6.1.3	Vergleich der beiden Untersuchungen.....	41
6.2	Untersuchung des Einflusses weiterer Monomere und Oligomere auf H ₁₄₀ H ₆₀	42
6.3	Rheologische Eigenschaften	44
6.3.1	Fließeigenschaften	44
6.3.2	Untersuchung der Viskosität von Photoharzmischungen	45
6.4	Zusammenfassung Photoharze und -mischungen	46
7	Untersuchung an partikelgefüllten Photoharzen und -polymeren	48
7.1	Viskosität von partikelgefüllten Photoharzen	48
7.1.1	Untersuchung des Füllgehaltseinflusses	48
7.1.2	Untersuchung des Einflusses der Silanisierung auf die Homogenität und Viskosität gefüllter Pasten in Abhängigkeit der Partikelgröße.....	50
7.1.3	Untersuchung des Temperatureinflusses	52
7.1.4	Zusammenfassung Viskosität partikelgefüllter Photoharze zur Hausung von optoelektrischen Baugruppen.....	53
7.2	Untersuchung vom Einfluss des Füllgehalts und der Partikelgrößen.....	53
7.3	Thermomechanische Untersuchungen	56
7.3.1	Thermoiré - Untersuchungen	56
7.3.2	Reflow-Tests an Keramikverbundproben.....	59

7.3.3	CTE-Untersuchungen.....	64
7.4	Mechanische Untersuchungen.....	68
7.4.1	Schertest Untersuchungen.....	68
7.4.2	Dynamisch-Mechanische Analyse.....	71
7.4.3	Zugversuch Untersuchungen.....	72
7.4.4	Vergleich DMA und Zugversuch.....	73
7.4.5	Zugversuch von H ₄ 90H ₉ 10 in Abhängigkeit von Alterungsbelastungen.....	74
7.5	Zusammenfassung der Untersuchung an partikelgefüllten Photopolymeren.....	76
8	Demonstratoren.....	77
8.1	Simulation.....	77
8.1.1	Technologischer Keramikdemonstrator.....	78
8.1.2	Optoelektrische Baugruppe - Bildsensor.....	82
8.2	Demonstratoraufbau und Charakterisierung.....	85
8.2.1	Keramischer Technologiedemonstrator.....	85
8.2.2	Optoelektrischer dreizeiliger Photosensor.....	87
8.2.3	Optoelektrischer Bildsensor.....	89
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	92
A 1	Einordnung der Stereolithographiematerialien innerhalb der Polymere.....	94
A 2	Photoinitiatoren und Photopolymerisation.....	95
A 2.1	Freie radikalische Photoinitiatoren.....	95
A 2.2	Radikalische Photopolymerisation.....	95
A 2.3	Kationische Photoinitiatoren.....	98
A 2.4	Kationische Photopolymerisation.....	99

Abkürzungen und Zeichen

A	Fläche
AEC-Q	Qualifikationsstandard des Automotive Electronics Council
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AlN	Aluminiumnitrid
APS	engl. Average Particle Size, Durchschnittliche Partikelgröße
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
B ₂ O ₃	Boroxid
BaO	Bariumoxid
BAPO	Phenyl-bis-(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide
BBOT	2,5-bis(5-tert-butyl-benzoxazol-2-yl)thiophene
BDK	2,2-dimethoxy-2-phenyl-acetophenone benzil dimethyl ketal
BDMM	2-benzyl-2-(dimethylamino)-4-morpholino butyropfenone
BGA	Ball-Grid-Array
BN	Bornitrid
CQ	DI-camphorquinine
CSP	Chip-Scale Package
CTE	Coefficient of thermal expansion - thermischer Ausdehnungskoeffizient
d ₅₀ , d ₉₉	Entsprechender Durchmesser bei der die Verteilungssumme 50% bzw. 99% entspricht
DETX	2,4-diethyl thioxanthone
DLP	Digital Light Processing
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse
DMHA	2,2-dimethyl-2-hydroxy acetophenone
DPMA	Deutsche Patent und Markenamt
dv	Änderung der Geschwindigkeit
dy	Änderung des Abstands
EHA	2-ethylhexyl-4-dimethylamino-benzoate
EMK	4,4'-bis(diethylamino)-benzophenone ethyl Michlers ketone
E-Modul	Elastizitätsmodul
FEP	Perfluorethylenpropylen
FR4	Flame retarded (flammenhemmend) Leiterplattensubstrat
F _t	Tangentialkraft
H _k ; H _l	Harz mit der k-ten oder l-ten laufenden Harznummer aus Tabelle 9
H _m	Harz mit m-ten Nummer aus Tabelle 9
IAVT	Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik
ITX	2-isopropyl thioxanthone
l ₀	Ausgangslänge
LCD	Liquid Crystal Displays
LIDAR	Light Detection and Ranging
LTM	Diphenylphosphoryl-(2,4,6-trimethylphenyl)methanone
LVDT	engl. Linear Variable Differential Transformator, Induktiver Linearwegaufnehmer
m%	Masseprozent

MBF	Methyl benzoylformate
MCM	Multi-Chip-Modulen
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMP	2-methyl-4'-(methylthio)-2-morpholino-propiophenone
P_n	Partikel mit der n-ten Nummer aus Tabelle 11
p_n	Punktzahl für die jeweilige technischen Eigenschaften 1,2, bis n
REM	Rasterelektronenmikroskop
s	silanierte Partikel
Si_3N_4	Siliziumnitrid
SiC	Siliziumcarbid
SL	Stereolithographie
SLA	Laser - Stereolithographie
$\tan \delta$	Verlustfaktor
T_g	Glasübergangstemperatur
TMA	thermomechanische Analysen
TO - Gehäuse	Transistor Outline - Gehäuse
TPO	Diphenyl-(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide
TPO-L	Ethyl-(2,4,6-trimethylbenzoyl) phenyl-phosphinate
UV	Ultraviolett
v%	Volumenprozent
WLP	Wafer-Level-Packages
x	technische Wertigkeit
x_{ang}	angepasste technische Wertigkeit
$X_k ; X_l$	Gewichtsanteile des jeweiligen k-ten, oder l-ten Harzes
X_m	m% des jeweiligen m-ten Harzes bezogen auf das Gesamtgewicht der Mischung aus den Harze H_k und H_l
\dot{y}	Geschwindigkeitsgefälle
Z_n	m% des jeweiligen n-ten Partikel bezogen auf das Gesamtgewicht der Harze, TPO und Partikel
α	Koeffizient der thermischen Ausdehnung
Δl	Längenänderung
ΔT	Temperaturänderung
ΔV	Volumenänderung
η	Viskosität
ρ	Dichte
ρ_{un}	Dichte unvernetztes Zustand Harz
ρ_{ver}	Dichte vernetztes Zustand Harz
τ	Schubspannung
Φ	Füllgehalt
Φ	Volumenanteil

1 Einleitung

Eine vielversprechende Zukunftsvision bzw. teilweise schon Realität ist der Trend hin zum autonomen Fahren. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Hausungstechnologie für hochintegrierte optische Baugruppen, wie beispielsweise LIDAR-Sensoren (engl. **light detection and ranging**), die für das Autonome Fahren eingesetzt werden, entwickelt. Die Ausarbeitung „Autonomes und automatisiertes Fahren auf der Straße – rechtlicher Rahmen“ der wissenschaftlichen Dienste vom Deutschen Bundestag definiert: „Unter „autonem Fahren“ versteht man die fünfte und zugleich höchste Stufe des sog. automatisierten Fahrens. Diese Stufe 5 ist dadurch gekennzeichnet, dass die Fahrzeuge keinen Fahrer, sondern nur Passagiere haben. Abgesehen vom Festlegen des Ziels und Starten des Systems ist kein menschliches Eingreifen mehr erforderlich.“[1] Die niedrigeren Stufen des automatisierten Fahrens gehen vom assistierten Fahren (Stufe 1) bis hin zum vollautomatisierten Fahren (Stufe 4), wobei die Verantwortung und der Handlungsbedarf eines Fahrers abnehmen. Am 28. Juli 2021 trat ein neues „Gesetz zum autonomen Fahren“ [2] in Deutschland in Kraft. Dies ermöglicht den bundesweiten Einsatz des automatisierten Fahrens (Stufe 4) in festgelegten Betriebsbereichen im öffentlichen Straßenverkehr. Dabei muss der Betrieb allerdings noch dauerhaft durch eine natürliche Person überwacht werden, sodass aktuell die fünfte Stufe des automatisierten Fahrens in Deutschland noch nicht erlaubt ist. Das Ziel dabei ist, erste selbstfahrende Fahrzeuge in Deutschland einzuführen. Das autonome Fahren bietet zahlreiche Vorteile, die das Deutsche Patent und Markenamt (DPMA) folgendermaßen zusammenfasst: Energieeffizienteres Fahren, Mobilität im Alter, mehr Verkehrssicherheit und einen besseren Verkehrsfluss [3].

Zur Umsetzung des autonomen Fahrens werden diverse verschiedene Sensoren, Aktoren, Steuerungshardware sowie Softwarealgorithmen bis hin zu künstlicher Intelligenz benötigt. Dabei dienen die Sensoren als Basis, die die Datengrundlage für das autonome Fahren bildet. Die Abbildung 1 zeigt die aktuell eingesetzten Sensorarten im Automotivbereich. Ein Großteil der eingesetzten Sensoren fällt dabei auf die Bildsensoren, welche aus optoelektrischen Baugruppen bestehen. Der Bedarf an performanteren und höchstintegrierten optoelektrischen Baugruppen ist daher in der Zukunft von großer Bedeutung.



Abbildung 1: Derzeitig eingesetzte Bildsensorgeräte im Automobilbereich (nach [4])

Die optoelektrischen Baugruppen können aus verschiedenen Halbleitermaterialien aufgebaut sein und müssen durch angepasste Aufbau- und Verbindungstechnologien gegen applikationsspezifische Umgebungsbedingungen geschützt werden. Verschiedene Hausungstechnologien, die insbesondere den empfindlichen aktiven Sensorbereich der optoelektrischen Halbleiter schützen, haben sich dabei etabliert. Hierzu zählen Keramikgehäuse, wobei ein Deckglas auf dem Keramikrand mittels Klebstoff bzw. Bonden montiert wird. Laminataufbauten bilden mit einer Kunststoffkappe und einem Deckglas eine Hausungslösung. Für kleine optoelektrische Baugruppen mit einer geringen Zahl an Anschlussverbindungen bildet das klassische TO-Gehäuse aus Metall mit einem Deckglas eine herkömmliche Hausungslösung. Bei diesen gängigen Technologien wird die aktive Sensorfläche erst in einem der letzten Herstellungsschritte geschützt, sodass es durch die davorliegenden Herstellungsschritte zur Verschmutzung der aktiven Sensorfläche kommt und aufwendige Reinigungsschritte erforderlich sind. Die Offenlegungsschrift „Bildsensoranordnung mit optischer Abdeckung“ [5] beschreibt dabei einen neuartigen Ansatz zum Schutz der aktiven Sensoroberfläche. Die Abbildung 2 zeigt schematisch diese Anordnung. Dabei ist der optoelektrische Chip mittels einer Chipverbindung ganzflächig mit dem Substrat verbunden. Die elektrischen Verbindungen werden mit Hilfe von Drahtbonds zwischen Chip und Substrat realisiert. Der aktive Sensorbereich des optoelektrischen Chips ist durch eine direkt montierte Glaskappe geschützt. Dies kann bereits direkt nach der Chipherstellung im Wafer-Level-Verbund erfolgen. Die zuvor beschriebenen herkömmlichen Hausungslösungen schützen in der Regel auch die Drahtbonds; dies ist durch den neuen Ansatz nicht mehr gegeben. Im Vergleich zu den herkömmlichen Aufbauvarianten bietet die neuartige Anordnung eine deutliche Reduzierung der Bauteilhöhe, was die Performance der optoelektrischen Baugruppen erhöht und eine weitere Miniaturisierung erlaubt.

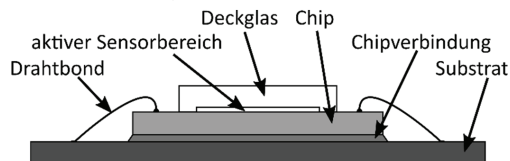


Abbildung 2: Schematische Anordnung eines Bildsensors mit optischer Abdeckung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines geeigneten neuartigen Hausungsverfahrens zum Schutz der Drahtbonds für optoelektrische Baugruppen, die eine direkte Abdeckung der aktiven Sensorfläche besitzen. Dabei soll die Gesamtbauhöhe nicht weiter erhöht werden, sodass eine minimale Aufbauhöhe erreicht wird. Aus diesem Grund können keine zusätzlichen Deckgläser bzw. Kappen zum Schutz der Drahtbonds verwendet werden und es bedarf einer Lösung, bei der die Drahtbonds mit einer Schutzhülle umschlossen werden. Hierfür wird in dieser Arbeit ein innovativer additiver strukturierter Stereolithographieprozess und die dazugehörige Entwicklung eines prozessangepassten gefüllten Photopolymers vorgestellt.

2 Konzept Polymerhausung für optoelektrische Baugruppen

Dieses Kapitel zeigt den Herstellungsablauf der in dieser Arbeit verwendeten optoelektrischen Baugruppen mit direkter Glasabdeckung und stellt den Bedarf der neuartigen Hausungslösung, dessen Konzept und insbesondere den Vergleich zu den herkömmlichen Verkapselungstechnologien in der Elektronikfertigung heraus.

Die Notwendigkeit einer photostrukturierten Polymerhausung für optoelektrische Baugruppen kommt durch eine veränderte Reihenfolge zur Herstellung der Baugruppen zustande. Bei vielen herkömmlichen optoelektrischen Baugruppen wird die aktive Fläche durch eine Kappe mit beispielweise einem Glas am Ende des Herstellungsprozesses geschützt. Dies führt dazu, dass es durch die diversen Prozessschritte während der Herstellung zur Verunreinigung der aktiven Fläche kommen kann, die anschließend mit aufwendigen Reinigungsprozessen wieder gesäubert werden muss. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz schützt zunächst die aktive Fläche mit Hilfe einer Glaskappe vor Verunreinigungen, bevor die weitere Montage der optoelektrischen Baugruppen erfolgt. Vorteilhafterweise wird die aktive Fläche der optoelektrischen Chips bereits im Wafer-Level-Verbund geschützt. Dies bietet eine zusätzliche Reinheit, da in den Halbleiterwerken höhere Reinraumanforderungen einzuhalten sind als bei den Fertigungsschritten der anschließenden Montageprozesse. Die Abbildung 3 zeigt schematisch den grundlegenden Prozessablauf der in dieser Arbeit verwendeten optoelektrischen Baugruppen.

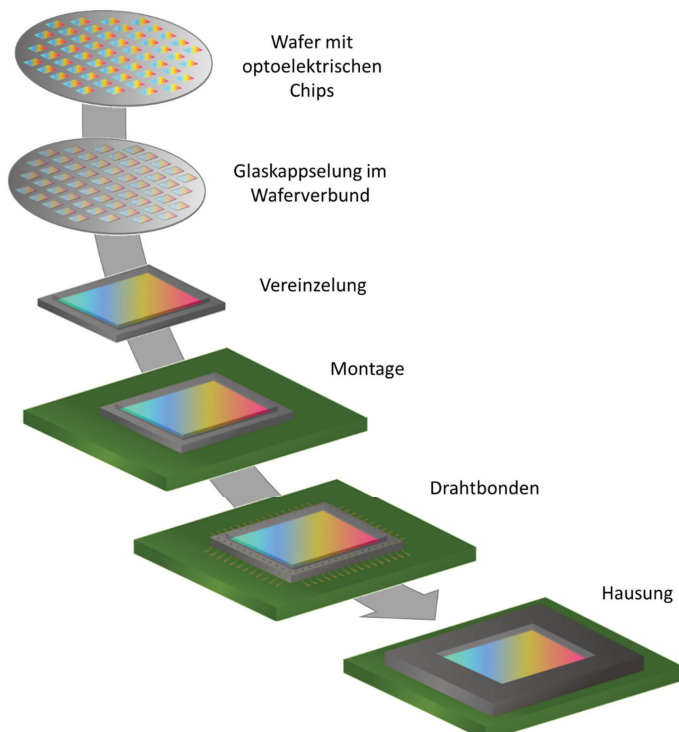


Abbildung 3: Prozessablauf einer gehäuseten optoelektrischen Baugruppe

Die optoelektrischen Chips werden in einem Halbleiterwerk als Wafer gefertigt und anschließend wird ein Glas im Wafer-Level-Verbund zum Schutz der aktiven Flächen unter hohem Druck und Schutzgas-Atmosphäre aufgeklebt. Die resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Glas und Wafer beträgt nur wenige Mikrometer. Durch die geringe Klebstoffdicke wird die Diffusion von Gas und Flüssigkeiten verringert, sodass eine nahezu hermetische Abdichtung um den aktiven Bereich der Sensorfläche erreicht wird. Anschließend wird der Wafer vereinzelt und dabei entstehen die optoelektrischen Chips mit direkter Glasabdeckung. Im nächsten Schritt zur Herstellung einer optoelektrischen Baugruppe erfolgt die Montage eines Chips auf einem strukturierten Leiterplattensubstrat über herkömmliche Chipbondverfahren. Die elektrische Verbindung zwischen Substrat und Chip erfolgt mit Hilfe von Drahtbonds. Im letzten Schritt werden die Drahtbonds gegenüber Umwelteinflüssen mit Hilfe des neuartigen Verfahrens gehäust. Dabei muss die Glasfläche frei bleiben, damit der optoelektrische Chip in seiner Performance nicht beeinträchtigt wird.

Da sich auf der aktiven Fläche der optoelektrischen Chips auch möglicherweise Mikrolinsen befinden, kann je nach Anforderung die aktive Fläche des Sensors entweder vollflächig mit Glas abgedeckt oder als eine Glaskappe ausgeführt werden. Ein Hohlraum auf dem Chip der Glaskappe sorgt dafür, dass die Funktion der Mikrolinsen nicht durch den Klebstoff oder durch das Glas selbst beeinträchtigt wird. Die Abbildung 4 zeigt im Querschnitt schematisch die beiden Glasaufbauvarianten für die optoelektrischen Baugruppen. Dabei wird das Glas einmal vollflächig und bei der zweiten Ausführung mit Glaskappe lediglich der Rand der Kappe verklebt. Es ist ersichtlich, dass die Drahtbonds innerhalb der Polymerhausung liegen müssen, damit diese gegen Umwelteinflüsse und abschließende Prozessreinigungsschritte durch die Hausung geschützt werden. Aus diesem Grund muss die Drahtbondhöhe niedriger sein als die Oberkante des Glases, sodass diese beim Hausen komplett umschlossen wird. Weiterhin muss das Hausungsverfahren mit einem möglichst geringen Druck auskommen, sodass bei der Ausführung mit Glaskappe diese während des Hausens nicht beeinträchtigt oder sogar beschädigt wird.

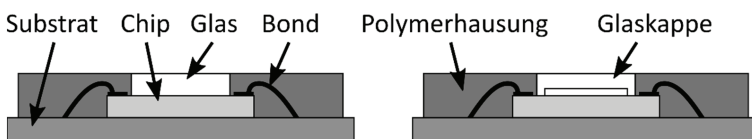


Abbildung 4: Optoelektrische Baugruppen mit zwei unterschiedlichen Glasausführungen

2.1 Klassische Verkapselungsverfahren von elektronischen Baugruppen

Dieses Kapitel stellt eine Übersicht und Prozessdarstellung der klassisch eingesetzten Verkapselungsverfahren für elektronische Baugruppe vor. Es dient als Grundlage für die Einschätzung der Eignung der klassischen Verfahren für das Verkapseln von optoelektrischen Baugruppen mit einer direkten Glasabdeckung im folgenden Kapitel 2.2.

Zum Verkapseln von elektronischen Baugruppen werden herkömmlich verschiedene polymerbasierte Verfahren eingesetzt. Dabei wird eine passende Hausungstechnologie für eine elektronische Baugruppe in Abhängigkeit von Kosten, Produktionsvolumen, Anwendungsvoraussetzungen, Zuverlässigkeit, Hausungsmaterial und Gestalt der Hausung ausgewählt. Bauteilbezogene Anforderungen können einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl des Hausungsverfahrens nehmen.

Die Anforderungen können beispielsweise durch die Bauteildicke, Kavitäten, Hohlräume, Wölbungen bzw. Umverdrahtungstypen beeinflusst werden. Die Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die gängigen Verkapselungsverfahren¹. Die meisten Verfahren können entweder in ein formgebendes oder ein additives Fertigungsverfahren eingeteilt werden. [6]

Verkapselungstechnologien				
Molding	Glob Topping	Underfilling	Potting	Printing
Transfer Molding	Glob-Top	Flow	1-Part	Stencil Printing
Injektion Molding	Dam & Fill	No-Flow	2-Part	Cavity Printing
Compression Molding				
Reaction-Injection Molding				

Abbildung 5: Übersicht herkömmlicher Verkapselungstechnologien für elektrische Baugruppen (nach [6])

Bei den Unterfüllungstechnologien wird der Spalt, in dem sich die elektrischen Verbindungen befinden, zwischen einem Chip und einem Substrat gefüllt, um primär den thermomechanischen Unterschied der beiden Materialien zu reduzieren. Da diese Technologien nicht direkt zum Verkapseln geeignet sind, werden sie in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. [6]

2.1.1 Molding

Beim Moldingverfahren werden Formen zum Ausprägen der Gestalt eingesetzt. Dabei kommen bei elektrischen Baugruppen hauptsächlich Transfer, Injektion, Compression und Reaktion-Injektion Molding zum Einsatz. Das gängigste Moldingverfahren für integrierte Chips ist das Transfer Molding. Die Abbildung 6 zeigt schematisch den Prozess vor und nach dem Transfer Molding. Die elektrische Baugruppe wird mittels einer oberen und unteren Form fest umschlossen, die eine Formkavität bildet und damit die Gestalt der Hausung definiert. Das Moldmaterial liegt in Pelletform im Transfergefäß vor und wird durch Aufheizen aufgeschmolzen und anschließend flüssig. Der Transferkolben presst mit hohem Druck die aufgeschmolzene Moldmasse durch die Gusskanäle bis zur Formkavität bzw. bis zu den elektrischen Baugruppen. Durch anschließendes Abkühlen erstarrt die Moldmasse. Nach dem Öffnen der Formen werden die gehausten elektrischen Baugruppen mittels der Auswurfstifte aus der Form gedrückt. Abschließend erfolgt durch weitere Nachbearbeitungsschritte, wie beispielsweise das Abtrennen der Moldmasse aus den Gusskanälen, die abschließende Gestalt der gehausten elektrischen Baugruppen. [6], [7]

¹ Die Namen der Verfahren werden in Englisch angegeben, da diese teilweise geläufiger in der Industrie sind.

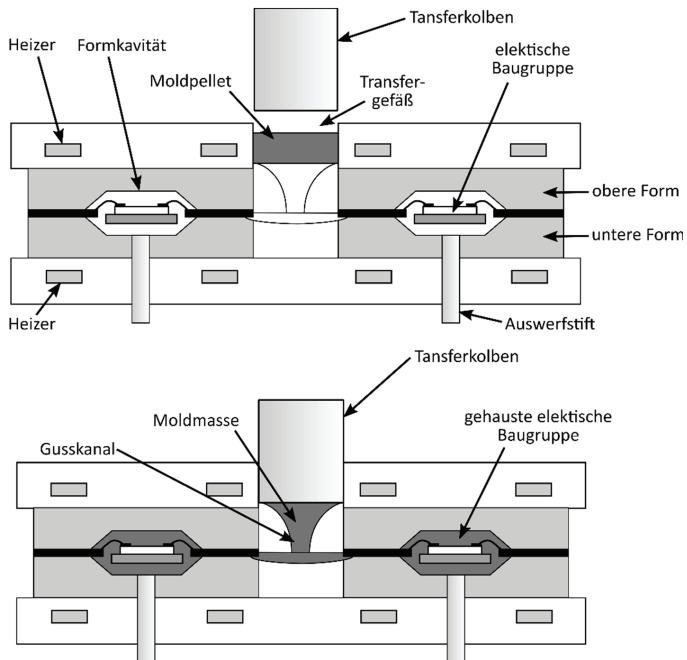


Abbildung 6: Schematische Darstellung vor (oben) und nach (unten) dem Transfer Molding (nach [6])

Das Injektion Molding ähnelt dem Transfer Moldingverfahren. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass kein Transferkolben die aufgeheizte flüssige Moldmasse in die Moldformen, sondern beispielsweise eine geheizte Förderschnecke mit hohem Druck die Moldmasse zur Formkavität presst. Außerdem unterscheiden sich die Verfahren im Wesentlichen bei den Prozess-, Wartungs-, Reinigungs- und Nachbearbeitungsschritten. [6]

Das Reaktion-Injektion Molding unterscheidet sich vom herkömmlichen Injektion Molding dadurch, dass das Ausgangsmaterial bei Raumtemperatur flüssig ist. Als Ausgangsmaterial kommen Polyurethan- und Epoxidharze zum Einsatz. Diese bestehen meist aus mehreren Komponenten (beispielsweise Harz und Promotor), die in einem Mischkopf zusammengebracht werden. Das flüssige Harzgemisch lässt sich mit vergleichsweise niedrigem Druck durch eine Förderschnecke in die Form zu den elektrischen Baugruppen spritzen. Mittels Wärme löst der Promotor anschließend die chemische Reaktion aus, wodurch das Harzgemisch vernetzt und dabei in einen festen Zustand übergeht. Abschließend werden die Formen geöffnet und die gehaute Baugruppe wird wie beim Injektion Molding durch die Auswerfstifte aus der Form gedrückt. [6]

Das Compression Molding ist insbesondere für dünne Packages, Multi-Chip-Module und Wafer-Level Packages geeignet. Die Abbildung 7 zeigt den schematischen Ablauf der Verkapselung eines Multi-Chip-Moduls mit Flip-Chips und Lötverbindungen mittels Compression Molding. Das Multi-Chip Modul wird wie bei den anderen Moldingverfahren in einer Form fixiert und anschließend erfolgt das Auftragen der Moldmasse. Diese kann alternativ als Flüssigkeit, Folie oder Granulat vorliegen. Anschließend verschließt die obere Form durch einen hohen Kraft- und Wärmeeintrag die Formkavität.

Dabei verteilt sich die Moldmasse in der Formkavität und verkapselt das Multi-Chip-Modul. Die Kompression wird in einer Klemmung gehalten und nach dem Aushärten und Abkühlen der Moldmasse werden die Formen geöffnet und die Packages herausgelöst. [6], [8]

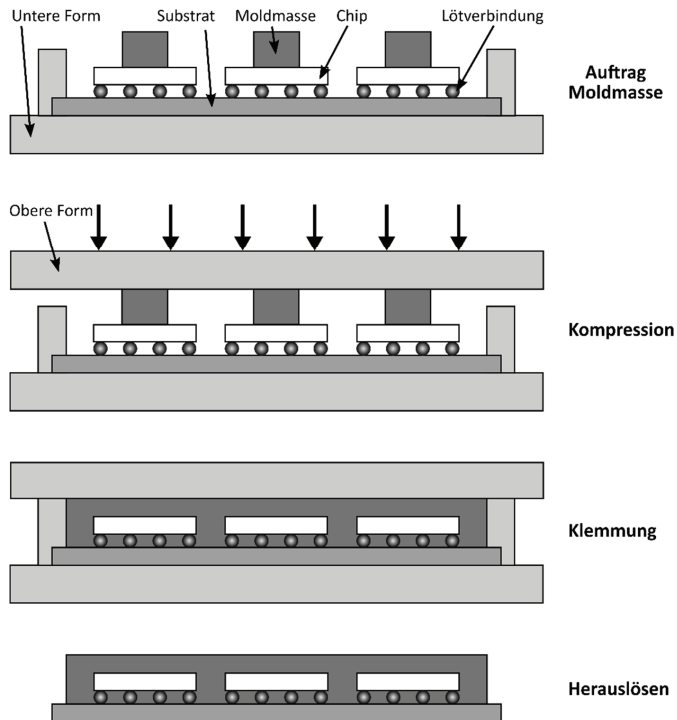


Abbildung 7: Schematischer Ablauf der Verkapselung eines Multi-Chip-Moduls mit Flip-Chips und Lötverbindungen mittels Compression Molding (nach [6])

2.1.2 Glob Topping

Das Glob Topping wird im Wesentlichen für die direkte Verkapselung von Chips auf Leiterplatten wie beispielsweise Chip-On-Board bzw. Flip-Chips eingesetzt. Dabei wird eine flüssige Moldmasse auf dem Chip mittels Dispensens appliziert und anschließend thermisch oder durch UV-Energie ausgehärtet. Hierbei lassen sich zwei Arten unterscheiden, der Glob-Top und der Dam & Fill. Die Abbildung 8 veranschaulicht schematisch diese beiden Verfahren. Beim Glob-Top wird tropfenförmig die Moldmasse auf das Substrat mit dem Chip appliziert. Dagegen wird beim Dam & Fill zunächst ein Damm aus einer hochviskosen Moldmasse mittels eines Dispensers aufgebaut. Aufgrund der zähen Eigenschaften der Dammoldmasse lässt sich diese Paste schichtweise aufeinander applizieren. Anschließend wird mit einer niedrigviskosen Moldmasse der Bereich innerhalb des Damms ausgefüllt (Fill). Abschließend wird die flüssige Moldmasse thermisch oder über UV-Energie ausgehärtet. [6]

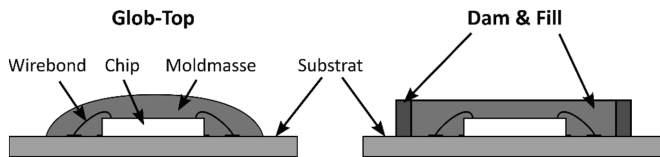


Abbildung 8: Schematische Darstellung Glob-Top und Dam & Fill (nach [6])

2.1.3 Potting – Verguss

Beim Potting bzw. Verguss wird in der Regel eine komplette Baugruppe in einem Gehäuse vergossen. Die Abbildung 9 zeigt schematisch ein vergossenes Multi-Chip-Modul in einem Gehäuse. Die Leiterplatte des Moduls wird in dem Gehäuse fixiert und anschließend die flüssige Moldmasse in das Gehäuse gegossen oder dispenst. Abschließend erfolgt das Aushärten der Moldmasse, was entweder thermisch, durch Feuchtigkeit oder durch UV-Energie erfolgen kann. Die Vergusstechnologie lässt sich in zwei Arten unterscheiden, die sogenannten Ein- und Zwei-Komponentensysteme. Die Ein-Komponentensysteme beinhalten bereits das gemischte Harz und einen Härter und können direkt verwendet werden. Bei den Zwei-Komponentensystemen wird das Harzgemisch und der Härter erst unmittelbar vor dem Verguss zusammengemischt. Der wesentliche Unterschied zwischen den Systemen besteht in der Verwendungsdauer, also wie lange die Moldmasse gelagert werden kann. Aufgrund der Trennung des Härters vom Harzgemisch halten die Zwei-Komponentensysteme im Vergleich zu den Ein-Komponentensystemen meist um ein Vielfaches länger. [6]

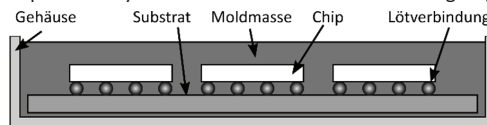


Abbildung 9: Schematische Darstellung vergossenes Multi-Chip-Modul in einem Gehäuse

2.1.4 Printing - Drucken

Bei der Verkapselung elektronischer Bauelemente mittels Drucken werden Schablonen- und Kavitätendruck eingesetzt. Dabei werden meist kleine und dünne Packages mit diesen Techniken verkapselt. Es kommt überwiegend bei Ball-Grid-Arrays (BGA), Chip-Scale Packages (CSP), Multi-Chip-Modulen (MCM), Wafer-Level-Packages (WLP) und bei Leuchtdioden zum Einsatz. Beim Schablonendruck definieren die Öffnungen die Bereiche, die verkapselt werden. Hingegen werden beim Kavitätendruck bauteilbezogene Kavitäten oder Kavitäten, die zuvor durch photostrukturierte Lacke aufgebaut worden sind, gefüllt. Die flüssige Moldmasse wird mit Hilfe eines Rakels in die Öffnungen der Schablone bzw. in die Kavitäten bewegt. Anschließend wird die Moldmasse mittels thermischer oder UV-Energie ausgehärtet. Abschließend wird die Schablone bzw. der photostrukturierte Lack wieder entfernt. [6]

2.2 Einschätzung der herkömmlichen Verkapselungsverfahren für optoelektrische Baugruppen mit einer direkten Glasabdeckung

Die herkömmlichen Verkapselungsverfahren können nur bedingt für eine direkte Hausung von einem optoelektrischen Chip mit einer direkten Glasabdeckung eingesetzt werden. Die Abbildung 10 veranschaulicht schematisch die möglichen Hausungsergebnisse für die unterschiedlichen Verfahren.

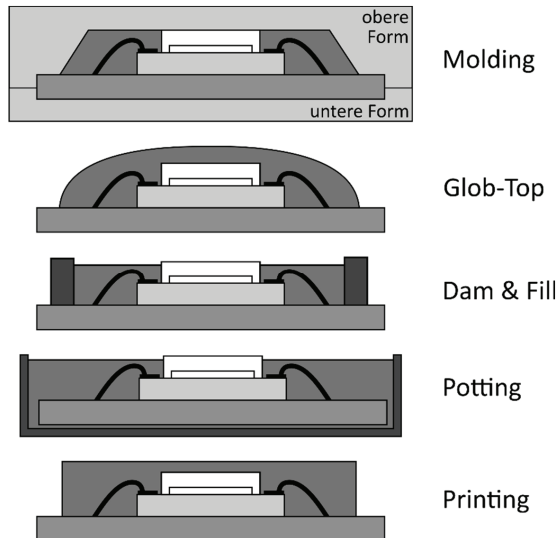


Abbildung 10: Hausung einer optoelektrischen Baugruppe mit direkter Glasabdeckung mit unterschiedlichen Verpackungsverfahren

Beim Molding definieren die Moldformen die Gestalt des Packages. Die größte Herausforderung für die Herstellung einer optoelektrischen Baugruppe liegt bei der Freistellung des Glasbereichs. Technisch wäre es mit großem Aufwand möglich, die Formen den optischen Baugruppen anzupassen. Aus diesem Grund wären die Einrichtungskosten relativ hoch und würden sich erst ab einer hohen Stückzahl von Baugruppen rentieren. Ebenfalls könnten bereits kleine Designänderungen der Baugruppengestalt erhebliche Kosten verursachen, da die hochpräzisen Moldformen angepasst bzw. ersetzt werden müssten. Geringe Bauteiltoleranzen könnten bereits dazu führen, dass sich ein Spalt zwischen Glasoberkante und der oberen Form bildet, sodass die Glasoberseite während des Moldprozesses mit verpackelt würde und damit die Funktion des Packages nicht mehr gegeben wäre. Weiterhin wird im Prozess mit einem hohen Druck und bei hohen Temperaturen die Moldmasse transferiert bzw. komprimiert. Dies könnte zu Schädigungen insbesondere an der Glaskappe der optoelektrischen Baugruppe führen. Beim Abkühlen der Moldmasse könnte es zu Verspannungen des Gesamtaufbaus kommen, die einen negativen Einfluss auf die optischen Parameter der optoelektrischen Baugruppe haben könnten.

Der klassische Glob-Top stellt ein kostengünstiges Hausungsverfahren dar. Hierbei wird die flüssige Moldmasse direkt auf die Baugruppe disperst und es wird neben den Bonddrähten auch der Glasbereich mit abgedeckt und abschließend vollflächig ausgehärtet. Aus diesem Grund eignet sich dieses Verfahren nicht, um den Glasbereich der optoelektrischen Baugruppen freizulassen, und damit würde die Funktion der optoelektrischen Baugruppe nicht mehr gegeben sein.

Ebenso wie das Glob-Top-Verfahren gehört das Dam & Fill zu den kostengünstigeren Verpackungsverfahren. Um eine optoelektrische Baugruppe mit dem Dam & Fill Verfahren zu verpackeln, muss zunächst ein Damm aus einer hochviskosen Moldmasse aufgebaut werden.

Anschließend kann der Bereich zwischen dem Damm und dem Glas-Chip-Verbund mit einer niedrigviskosen Moldmasse aufgefüllt werden. Herkömmliche Dam & Fill Anwendungen sehen hier meist eine komplette Kapselung der Baugruppe innerhalb des Damms vor, sodass ein zusätzlicher Prozessaufwand entsteht, um genau den Zwischenbereich zu füllen. Außerdem kann der Innenbereich nicht vollständig bis zur Glasoberkante aufgefüllt werden, damit die niedrigviskose Moldmasse nicht auf die Glasoberkante fließt. Aus diesem Grund müsste die Bonddrahthöhe weiter reduziert werden, was einen zusätzlichen technischen Aufwand nach sich zieht, um eine komplette Verkapselung zu gewährleisten. Insgesamt sind die Parameter und Toleranzen beim Dam & Fill durch den gegebenen Dispensprozess im Hinblick auf die finale Gestalt des Packages als grob einzuschätzen.

Das Potting Verfahren bzw. beim Verguss von Baugruppen werden die kompletten Baugruppen inklusive des Substrats in einem Gehäuse verkapselt. Dies dient eher dem Schutz vor Umwelteinflüssen eines kompletten Moduls oder Systems und wird weniger für einzelne Baugruppen verwendet. Aus diesem Grund müssten die zahlreichen elektrischen Anschlüsse der optoelektrischen Baugruppe aus dem Gehäuse geführt werden, was einen zusätzlichen Aufwand darstellt. Die Moldmasse kann wie beim Dam & Fill nur bis kurz unter die Glasoberkante gefüllt werden, um eine Verkapselung der Glasoberfläche zu verhindern. Aus diesem Grund ist das Potting Verfahren für die Hausung von optoelektrischen Baugruppen mit direkter Glasabdeckung weniger geeignet.

Beim Printing bzw. beim Drucken könnte die Moldmasse mit Hilfe des Schablonendrucks in einem bestimmten Bereich um die optoelektrische Baugruppe aufgetragen werden. Da jedoch beim Auftragen der Moldmasse die Rakel entlang der Schablone und somit auch über die Glasoberfläche fahren müssen, würde diese unumgänglich durch Moldmasse abgedeckt werden. Beim vollflächigen Aushärten der Moldmasse würde diese dann mitverkapselt werden, sodass die Funktion der optoelektrischen Baugruppe nicht mehr gegeben wäre.

Die Tabelle 1 fasst qualitativ die Eigenschaften und die Möglichkeiten der herkömmlichen Verfahren für die direkte Polymerhausung von optoelektrischen Baugruppen mit einer direkten Glasabdeckung zusammen. Dabei wird ersichtlich, dass die herkömmlichen Verkapselungsverfahren für diese Hausungsanwendung nicht optimal erscheinen.

Tabelle 1: Zusammenfassung zur Eignung der herkömmlichen Verkapselungsverfahren für eine optoelektrische Baugruppe mit direkter Glasabdeckung

Verfahren	Hausung auf Substrat	Kosten	Freistellung Glasoberseite	Prozess- bzw. Aushärtetemperatur	Prozessdruck	Prozessaufwand
Molding	Ja	Mäßig	Bedingt	Hoch	Hoch	Hoch
Gob-Top	Ja	Gering	Nein	Mittel	Niedrig	Gering
Dam & Fill	Ja	Gering	Bedingt	Mittel	Niedrig	Mittel
Potting	Nein	Mäßig	Bedingt	Mittel	Niedrig	Mittel
Printing	Ja	Gering	Nein	Mittel	Niedrig	Gering

2.3 Ablauf der photostrukturierten Polymerhausung für optoelektrische Baugruppen
Der neuartige Ansatz der photostrukturierten Polymerhausung für optoelektrische Baugruppen lässt sich im Prinzip in vier Prozessschritte unterteilen, Auftrag des Hausungsmaterials, Kompression,