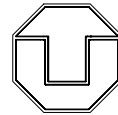




FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



INSTITUT FÜR FEINWERKTECHNIK

Forschungsvorhaben innerhalb des BMBF-Programms
„Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21.
Jahrhunderts“

Abschlußbericht zum BMBF-Verbundprojekt

Materialien und Verfahren für die Aufbau- und
Verbindungstechnik

Modularer optisch-elektrischer Schaltungsträger **MOES**

Zuwendungsempfänger (Unterauftragnehmer)	Technische Universität Dresden
Vorhabensbeschreibung der Teilaufgabe	B4: Material- und Verfahrenstechnik für den Schutz des elektrischen und optischen Schaltungsträgers
Laufzeit des Vorhabens	01.01.1998 – 31.03.2002
Förderkennzeichen	03N1038

Berichtszeitraum	01.01.1998 – 31.03.2002
------------------	-------------------------

Inhalt

1	EINLEITUNG UND GESAMTZIEL DES VORHABENS.....	3
1.1	AUFGABENSTELLUNG	4
1.2	STAND DER TECHNIK	4
1.2.1	<i>Elektrische Schaltungsträger (Atotech/Würth/IZM).....</i>	<i>4</i>
1.2.2	<i>Optische Schaltungsträger (Alcatel/mrt/IZM).....</i>	<i>6</i>
1.2.3	<i>Aufbau- und Verbindungstechnik (IZM/Heraeus).....</i>	<i>7</i>
1.2.4	<i>Interface (Harting/IZM)</i>	<i>7</i>
1.3	PLANUNG UND ABLAUF	8
1.4	ZUSAMMENARBEIT MIT DEN PROJEKTPARTNERN.....	9
1.5	ARBEITSPAKET DER TU DRESDEN	9
2	ANFORDERUNGEN AN HÜLLSYSTEM, VORAUSWAHL AUSSICHTSREICHER VERFAHREN	11
3	MECHANISCHES VERHALTEN DER ZU UMHÜLLENDE LEITERPLATTE.....	16
3.1	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON TWINFLEX® IM VERGLEICH ZU FR4-LEITERPLATTE	16
3.2	MECHANISCHES VERHALTEN VON PARTIELL VERSTEIFTEM TWINFLEX®.....	21
3.3	MECHANISCHES VERHALTEN VON TWINFLEX® BEI ZUSÄTZLICHER ABSTÜTZUNG IN DER FLÄCHE ..	23
4	VERTIEFENDE ANALYSE DER LÖSUNGSANSÄTZE	26
4.1	VAKUUMVERPACKEN.....	26
4.2	VERGIEßEN	28
4.3	EINLEGEN	30
5	REALISIERUNG DES DEMONSTRATORS B3	32
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	34
7	LITERATUR	35

1 Einleitung und Gesamtziel des Vorhabens

Die Leiterplatte (Schaltungsträger) verdankt ihren klassischen Aufbau der Überlegung, die Funktion der mechanischen Fixierung mit der Funktion der elektrischen Verbindung zu vereinen. Von den ersten Anfängen bis heute ist dieses Aufbauprinzip der Funktionenintegration Grundlage aller bisher realisierten Leiterplatten. Der Kompromißcharakter einer solchen Lösung hat jedoch auch grundsätzliche Nachteile:

- Die integrierten Funktionen sind nicht einzeln optimierbar,
- Die Funktionen beeinflussen sich gegenseitig, im allgemeinen negativ und sind damit unzuverlässiger,
- Der oder die verwendeten Werkstoffe sind nicht bis zur Grenzleistung belast- und ausnutzbar,
- Fertigungsbelastungen für einzelne Funktionen beziehen sich immer auf den gesamten Konstruktionskörper und die in ihm verwendeten Materialien.

Ausgehend von den oben genannten Limitationen hat das Verbundvorhaben das Ziel, die Trennung bisher integrierter Funktionen der elektrischen und mechanischen Verbindung zu erproben und zu bewerten und als wesentliche zusätzliche Funktion die Übertragung optischer Signale mit in die Leiterplatte aufzunehmen. Zusätzlich hat sich die Integration optischer Funktionen im Laufe des Projektes als für zukünftige Leiterplatten besonders bedeutende Zielsetzung erwiesen. Dies gilt speziell für die aus dem Bereich der Telekommunikation vorgesehenen Demonstratoren.

Um diese Ziele zu erreichen, stellt sich die Aufgabe der Schaffung der materialtechnischen und daraus resultierenden erforderlichen verfahrenstechnischen Voraussetzungen für die Realisierung eines Schaltungsträgersystems mit optimierter modularer Funktionalität als Basisträger für starre, starr-flexible und flexible Baugruppen zur Erfüllung der gegenwärtig einschätzbaren Funktionsanforderungen. Das Prinzip der Funktionentrennung läßt dabei die getrennte Optimierung aller einzelnen Funktionen zu. Unter materialwissenschaftlichen Aspekten eröffnen sich damit die Möglichkeiten

- des Einsatzes wesentlich kostengünstigerer Werkstoffe, speziell von Kunststoffen, die keine multifunktionalen Eigenschaften mehr aufweisen müssen, sondern i.a. monofunktional ausgelegt werden können,
- der Ausschöpfung des vorhandenen Leistungspotentials und Nutzung bisher verdeckter Eigenschaften der in der Leiterplattentechnik verwendeten Materialien,
- des Einsatzes speziell angepaßter Werkstoffe, z. B. für das Dielektrikum, die optische Signalübertragung, die Wärmeabführung, die Montage und das Versteifungssystem.

Abgeleitet von den übergeordneten Zielen des Forschungsprojektes sind folgende Teilziele zu erreichen:

- Material- und Verfahrensentwicklung für einen optischen Schaltungsträger,
- Materialanpassung und Verfahrensentwicklung für einen elektrischen Schaltungsträger,
- Material- und Verfahrensentwicklung für den modularen Aufbau des Schaltungsträgers und die Montage von Baugruppen,
- Material- und Verfahrensentwicklung für die Systemkonfiguration der Baugruppe.

Ein weiteres Teilziel ergibt sich aus der Notwendigkeit, die im Rahmen des Vorhabens neu zu entwickelnden bzw. zu modifizierenden Materialien und ausgewählten Verfahrensschritte zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Entwicklung für alle Teilvorhaben nach einheitlich definierten Umweltgesichtspunkten zu analysieren und zu bewerten. Die Optimierung der Materialien unter ökologischen Aspekten soll in einem engen Zusammenhang zur Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses betrachtet werden, ohne dass Abstriche an der technischen Funktionalität gemacht werden müssen. Der Erfolg der vorstehenden Forschungsarbeit wird an elektrischen und optisch-elektrischen Demonstratoren nachgewiesen.

1.1 Aufgabenstellung

Um die im Gesamtziel global genannten Eigenschaften in geeigneten Demonstratoren realisieren zu können, stellten sich Teilaufgaben, die von den Verbundpartnern in Zusammenarbeit zu lösen waren. Diese bestanden in den folgenden Teilvorhaben:

- Material- und Verfahrensentwicklung für den Schaltungsträger optisch/elektrisch
- Material- und Verfahrensentwicklung für den modularen Aufbau des Schaltungsträgers, die Montage und die Systemkonfiguration der konkreten Baugruppe
- Demonstratoraufbau

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Elektrische Schaltungsträger (Atotech/Würth/IZM)

Stetig steigende Anforderungen an die Verdrahtungsdichte elektronischer Systeme führten in der Vergangenheit zu immer komplexeren Aufbauten elektrischer Schaltungsträger. So sind heute mehrlagige Aufbauten von Leiterplatten mit mehr als 20 Lagen in der Verbindungstechnik z.B. für Hochleistungsrechner anzutreffen. Mit zunehmender Taktfrequenz derartiger Systeme mußten die Signalwege kurz gehalten werden, was sich in der Verbindungstechnik in Form von aufwendig hergestellten Multichipmodulen (MCM) in Feinleitertechnik darstellt. Die Module wiederum sind mittels viellagiger Mehrlagenleiterplatten miteinander verbunden. Anfangs waren die Kosten derartiger

Verbindungstechniken noch nicht von entscheidender Bedeutung, da allein diese Techniken erst derartige Hochleistungssysteme ermöglichen.

Inzwischen sind auch mittlere Systeme und selbst Personal Computer nur noch mit sehr hohen Verdrahtungsdichten zu realisieren, wobei in diesen Märkten das wirtschaftliche Umfeld wesentlich stärker wettbewerbsgeprägt ist als das der Hochleistungsrechner in der Vergangenheit. Somit mußten kostengünstigere Wege zur Erzielung hoher Verdrahtungsdichten gefunden werden.

Eine Möglichkeit besteht im Einsatz von Multichipmodulen, wobei diese jedoch in Techniken hergestellt werden, die einen deutlich geringeren Kostenaufwand als bei Hochleistungssystemen erfordern. So kommen gegenüber in der Vergangenheit benutzten Keramiken heute vermehrt polymere Werkstoffe als Dielektrika zum Einsatz. Die Leiterzüge werden nicht mehr durch aufwendige Techniken (z. B. Drucken von Metallpasten auf Keramik mit anschließendem Brennen oder Vakuumverfahren wie Sputtern) aufgebracht, sondern durch elektrochemische Abscheide- und Ätzverfahren, wie sie aus der Leiterplattentechnik bekannt sind.

Heutige Ansätze zur kostengünstigen Erzeugung hochverdichteter Strukturen auf Leiterplatten und Multichipmodulen liegen in der Herstellung von feinleitrigen Verdrahtungsebenen nur auf der Oberfläche einer sonst konventionellen Leiterplatte. Gemeinsam haben diese Verfahren die simultane Erzeugung der Löcher, die für die Verbindungen zum konventionellen Kern der Leiterplatte sowie für die Verbindungen der Feinverdrahtungslagen untereinander benötigt werden. Die Löcher werden bei diesen Verfahren durch Laser- oder Plasmabohren oder Fotostrukturierung erzeugt. Damit werden die Grenzen des mechanischen Bohrens überschritten und deutlich kleinere Löcher für die Lagenverbindung möglich. Platzsparende z-Achsenverbindungen sind wiederum eine wesentliche Voraussetzung für die Erhöhung der Verdrahtungsdichte auf dem Schaltungsträger.

Bei einer Hauptrichtung dieser Technologie werden als Dielektrikum fotosensitive Polymere verwendet. Durch die Fotostrukturierung werden in diesem Verfahren die Löcher zur Verbindung der Lagen erzeugt. Die Metallisierung der Oberfläche und der Löcher erfolgt mittels nasschemischer Verfahren. Die Leiterzüge werden durch Fotostrukturierung und Ätzen erhalten. Die mit diesen Techniken erreichbaren Haftfestigkeiten des abgeschiedenen Metalls auf dem Fotopolymer liegen im allgemeinen niedriger als die Metall/Epoxidharz-Haftung bei Leiterplattenlaminaten. Günstig ist die im wesentlichen auf Leiterplattentechniken beruhende Prozeßtechnik.

Der andere Hauptansatz geht von Kupfer/Polyimid-Verbundfolien aus, die auf eine konventionelle Leiterplatte laminiert werden. Der Einsatz als hochverdichtete flexible Schaltung ist ebenfalls möglich. Bei den Verbundfolien handelt es sich um Kupferfolien, die einseitig mit Polyimid beschichtet wurden. Durch Verkleben zweier derartiger Folien mit der Polyimidseite werden auch doppelseitig metallisierte Verbundfolien erzeugt. Die Löcher zur Kontaktierung des Leiterplattenkerns und der einzelnen Lagen werden dabei simultan durch Plasmabohren erzeugt. Als Ätzmaske dient dabei die Kupferschicht, in die durch

Fotostrukturierung und naßchemisches Ätzen die entsprechende Lochstruktur gebracht wurde. Die Leiterbahnstrukturierung erfolgt durch einen weiteren Foto- und Ätzprozeß. Die bei diesem Verfahren eingesetzten Kupferfolien können aus Gründen der Handhabbarkeit gewisse Dicken nicht unterschreiten. Bedingt durch die beim Strukturieren stets auftretende Unterätzung sind damit auch die minimalen Leiterzugsbreiten vorgegeben.

Neben dem Plasmaätzen wird das sogenannte Laserbohren zur Herstellung feiner Verbindungslöcher eingesetzt. Mit diesem Verfahren sind aufgrund des anisotropen Abtrages höhere Aspektverhältnisse der Bohrlöcher möglich.

Alle oben beschriebenen Ansätze gehen von mehr oder weniger klassischen, funktionsintegrierten Leiterplatten aus. Im Rahmen des Projektes sollen im Unterschied dazu, wie in den Arbeitsplänen beschrieben, die Hauptaspekte der Verdrahtungsverdichtung, wie miniaturisierte z-Achsenverbindungen und Feinstleitertechnik mit der Idee des funktional separierten Schaltungsaufbaus verbunden werden.

1.2.2 Optische Schaltungsträger (Alcatel/mrt/IZM)

Wie in der Einleitung und der Gesamtzielsetzung dargestellt, ist in der neuen Baugruppe ein optischer Schaltungsträger zu integrieren.

Die Vorteile dieser optischen Integration zeigen sich insbesondere in einem ultraschnellen Informationstransport, einer hohen Packungsdichte optischer und elektronischer Bauelemente sowie einer hohen elektromagnetischen Verträglichkeit und einem möglichen Einsatz der Baugruppe in der Sensortechnik. Durch einen hybriden optisch-elektrischen Aufbau einer Leiterplatte können die Kosten für die Verbindungstechnik und das Packaging in elektrischen und optischen Netzwerken entscheidend gesenkt werden. Darüber hinaus sind die Steuer- und Funktionseinheiten durch Anwendung eines angepaßten optischen Schaltungsbildes aus planaren optischen Wellenleitern mit eingebauten Verzweigern, Sendern und Empfängern zu verkleinern.

Die Kostenreduzierungen erweitern das Feld des Einsatzes der integrierten Optik in der Informations- und Steuerungstechnik.

In der Forschung und Entwicklung gab und gibt es deshalb seit längerem Untersuchungen, planare Polymerwellenleiter für die optische Informationsübertragung einzusetzen. Dabei verwendete Materialien sind im wesentlichen Benzocyclobutene (BCB), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyimide (PI), sowie organical modified ceramics (ORMOCER). Erfolge mit diesen Materialien wurden fast ausschließlich für die Monomode-Technik erzielt. Planare Multimode-Wellenleiter, in hybrider Leiterplattentechnik und für höhere Temperaturbelastungen geeignet, sind bis auf ein zu unserem Forschungsvorhaben zeitlich parallel laufendes FuE-Projekt der Fa. DaimlerChrysler für Backplanes im Aerospace-Bereich (Optische Hochleistungsnetze für Prozessorcluster) im Rahmen des OptoSys-Förderschwerpunktes bisher in keinen nennenswerten Anwendungen bekannt geworden. Entweder sind Schichtdicken bis zu 50 µm mit den o.g. Materialien nicht herstellbar oder nicht aushärtbar, oder die Materialien nehmen zu viel Wasser auf.

Da für die Herstellung optischer Wellenleiter transparente Materialien für Kern und Mantel mit unterschiedlichen Brechungsindizes benötigt werden, besteht der materialwissenschaftliche Schwerpunkt in der Entwicklung geeigneter Werkstoffe unter Nutzung des Zusammenhangs zwischen dem Brechungsindex und den molekularen Eigenschaften isotroper Materialien.

Für ideale Mischungen aus mehreren Substanzen ergeben sich - vereinfachend - drei grundsätzliche Möglichkeiten, den Brechungsindex eines gegebenen Materials zu verändern:

- Änderung der Refraktion durch Änderung der molekularen Struktur einer oder mehrerer Komponenten,
- Änderung der Dichte des Materials ohne Änderung der summarischen chemischen Zusammensetzung,
- Änderung der relativen Konzentration der einzelnen Komponenten des Materials.

1.2.3 Aufbau- und Verbindungstechnik (IZM/Heraeus)

Wenn es um die Realisierung von elektrischen Verbindungen (z. B. Lötverbindungen) in der Elektronikindustrie geht, werden heute zum überwiegenden Teil Sn63Pb37-Lote eingesetzt. Flußmittel, Reinigungsverfahren, Lötprozesse und -geräte sowie die Metallisierung der Komponenten sind auf diesen Werkstoff abgestimmt. Auch die Bauelementespezifikationen sind in der Regel so ausgelegt, daß sie den entsprechenden Lötprozeß, insbesondere die Schmelztemperatur von 183 °C und die erforderlichen Temperaturprofile zulassen. Darüber hinaus sind zur Zeit eine Reihe weiterer Legierungen gebräuchlich, bei denen die Zusammensetzung nur leicht verändert ist (z. B. Sn62Pb36Ag2), um bestimmte physikalische Parameter wie die Scherfestigkeit der Verbindung zu modifizieren. Weiterhin werden spezielle Legierungen angeboten, die für Anwendungen geeignet sind, bei denen eine hohe Temperaturbelastung während des Betriebes auftritt (z.B. Sn96,5 Ag3,5, Schmelzpunkt: 221 °C; oder Sn95 Ag5, Schmelzbereich: 221 - 245 °C). Geeignete Werkstoffe für die im vorgeschlagenen Verbundvorhaben geplante Substratkonzeption (elektrisch, elektrisch/optisch) sind z. Zt. nicht verfügbar. Die dafür vorgesehenen Materialien erlauben nur geringe Prozeßtemperaturen (< 150 °C). Auf diesem Gebiet besteht daher Handlungsbedarf. Mit der Entwicklung von Werkstoffen für die Niedrigtemperaturmontage, die bei erhöhten Temperaturen zuverlässige Weichlotverbindungen garantieren, soll mit der Entwicklung von Reaktionsloten Rechnung getragen werden

1.2.4 Interface (Harting/IZM)

Unter Interface sind die Schnittstellen zum Schaltungsträger, insbesondere elektrische und optische Steckverbindungen zu verstehen. Während es seitens der elektrischen Steckverbinder bereits eine weite Verbreitung mit einigen standardisierten Leiterplattensteckverbindern gibt, sind optische Steckverbindungen zur Kopplung an einen optisch-elektrischen Schaltungsträger bisher nur als Konzepte aus anderen Forschungsvorhaben bekannt.

Seitens der elektrischen Leiterplattensteckverbindungen besteht die Kopplung zum Schaltungsträger entweder in einer Lötverbindung, wobei verzinnte Lötkontakte des Steckverbinders in Lötäugen des Schaltungsträgers durchgesteckt und verlötet werden. Ein weiteres sehr verbreitetes Verfahren ist die Einpresstechnik. Dabei enthalten die Kontaktenden eines jeden elektrischen Kontaktes eine plastisch verformbare Öse, die in eine innen metallisierte Durchführung in der Leiterplatte eingepresst wird. Vorteil gegenüber dem Löten ist ein gasdichte Verbindung und eine hohe mechanische Stabilität.

Kaum zur Anwendung kommen bisher elektrische Steckverbindungen in SMT-Technik. Insbesondere wenn es sich um so genannte "Blind mating"- Steckverbindungen zwischen einer Mutterbaugruppe und mehreren Tochterbaugruppe handelt. Die Vorteile einer solchen Steckverbindung liegen in den besseren Übertragungseigenschaften hochfrequenter Signale. Nachteil ist die gegenüber einer Einpressteckverbindung geringere mechanische Stabilität und das Verhalten im Reflow-Lötprozess. Bisherige Kontaktierungstechniken zwischen Steckverbinder und Schaltungsträger sind auf starre Schaltungsträger ausgerichtet. Beim Übergang zu flexiblen Schaltungsträgern ist auch bei den steckbaren Verbindungselementen eine Funktionentrennung zwischen der elektrischen Kontaktierung und der mechanischen Stabilität zur Aufnahme der Steckkräfte anzustreben.

Die in heutigen Steckverbindern verwendeten Kunststoffmaterialien sind nicht kompatibel zu zukünftigen Lötprozessen. Zur Zeit werden Kunststoffe wie Polybutylenterephthalat (PBT) oder Polyamid (PA) für Steckverbinder eingesetzt, erste Ansätze mit Flüssigkristallpolymeren (LCP) existieren. Zukünftig müssen, insbesondere wegen der bevor stehenden bleifreien Lote und deren höherer Löttemperaturen, neue hoch temperaturfeste Kunststoffe eingesetzt werden.

Seitens der optischen Steckverbindungen gibt es als Serienprodukte bisher nur Steckverbindungen für verschiedene Arten optischer Fasern. Optische Steckverbindungen zur Leiterplatte sind bisher auf dem Markt nicht vorhanden, da es bisher keine optisch-elektrischen Schaltungsträger als Serienentwicklung gibt. Zur Kopplung der bisher ansatzweise entwickelten Varianten für optisch-elektrische Schaltungsträger gibt es bisher keine echte Lösung, da im Gegensatz zum elektrischen Steckverbinder sehr viel höhere Toleranzanforderungen bestehen. Für eine optische Kopplung zum Schaltungsträger sollten 5µm Toleranz erfüllt werden, um eine geringe optische Dämpfung sicherzustellen.

1.3 Planung und Ablauf

Gemeinsam mit allen Projektpartnern erfolgte in Abstimmung mit der Projektzielsetzung die Auswahl der eingesetzten Materialien und Verfahren soweit nicht schon in der Zielsetzung direkt benannt. Die genaue Bearbeitung der einzelnen Aufgabenstellungen wurde in dafür aus den betreffenden Partnern gebildeten Arbeitsgruppen festgelegt. Diese waren im einzelnen:

- AG Schaltungsträger (AlcatelAtotech, mrt, IZM, Würth)
- AG Aufbau – und Verbindungstechnik (Heraeus, IZM)
- AG Physical Design (Alcatel, Atotech, Harting, TU Dresden, Würth)

- AG Demonstrator (Alcatel, Harting, Heraeus, IZM, Würth, TU Dresden)
- Die Koordination des Vorhabens oblag einem Steuerungsgremium, in dem alle Partner vertreten waren.

1.4 Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

Beteiligte Partner am Gesamtprojekt und deren Arbeitsanteile:

- Alcatel SEL AG: Design der Demonstratoren, Qualifizierung der Montagetechnik, Charakterisierung der optischen Wellenleiter, Aufbau der Demonstratoren
- Atotech Deutschland GmbH: Direkte Metallisierung flexibler Substratmaterialien, Integration Laserbohrtechnik in Prozeß, Projektkoordination
- Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: Evaluierung naßchemischer Metallisierungsverfahren, Strukturierung und Charakterisierung optischer Wellenleiter, Charakterisierung niedrigschmelzender Lote, ökologische Bewertung
- Harting KGaA: Entwurf und Herstellung neuartiger Stecker für die Anwendung im Vorhaben
- Microresist technology GmbH: Entwicklung und Herstellung von Polymermaterialien für die optischen Wellenleiter
- W.C. Heraeus GmbH: Entwicklung und Herstellung niedrig schmelzender Reaktionslote
- Würth Elektronik GmbH & Co. KG: Herstellung der elektrischen Schaltungsträger, Lamination von optischem und elektrischem Schaltungsträger
- Technische Universität Dresden (Unterauftragnehmer): Entwicklung, Rechnermodellierung und Herstellung von Baugruppenumhüllungen

1.5 Arbeitspaket der TU Dresden

Dieser Bericht beschreibt die Arbeitsergebnisse der TU Dresden, Institut für Feinwerktechnik, die im Rahmen des Verbundprojektes MOES erreicht wurden. Die TU Dresden war als Unterauftragnehmer in das Teilprojekt B4 „Material- und Verfahrenstechnik für den Schutz des elektrischen und optischen Schaltungsträgers“ einbezogen. Im Bericht ergeben sich daraus viele Querbeziehungen zu den Berichten der Projektpartner, insbesondere bezüglich Demonstrator B3 zu den Berichten von Alcatel SEL und Würth Elektronik.

Zusätzlich zu den im Bericht beschriebenen Arbeiten wurden seitens der TUD verschiedenste meßtechnische Untersuchungen für diverse Projektpartner durchgeführt, wie beispielsweise Abzugstests und Verformungsmessungen an Leiterplatten, Rauigkeitsmessungen an optischen Wellenleitern sowie Ultraschall- und Röntgenuntersuchungen zum Erkennen von Delaminationen / Lunkern etc.

Im Teilprojekt B4 waren die material- und verfahrenstechnischen Voraussetzungen für die Systemkonfiguration künftiger elektronisch-optischer Baugruppen zu schaffen:

- Werkstoffe und Verfahren für die Versteifung und Stabilisierung des Schaltungsträgers,
- Werkstoffe und Verfahren für die Wärmeabführung vom Schaltungsträger und
- Werkstoffe und Verfahren für den EMV-Schutz und den Schutz vor weiteren Umgebungseinflüssen.

Die zentrale Idee des MOES-Projektes ist, die Eigenschaften eines Schaltungsträgers dadurch zu verbessern, daß die bisher integrierten Teilfunktionen von separaten Funktionsträgern, übernommen werden. Dies betrifft insbesondere die Funktionen elektrische und optische Schaltung, Versteifung, Wärmeableitung sowie den Schutz gegenüber Umwelteinflüssen (Abbildung 1). Kennzeichnend ist die weitestgehende Trennung der Teilfunktionen.

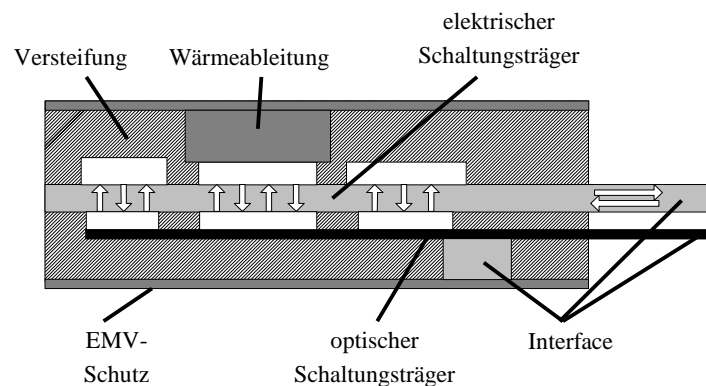


Abbildung 1:

Modular aufgebauter optisch-elektrischer Schaltungsträger mit Funktionsmodulen [MOES98]

Dagegen integriert die klassische Leiterplatte durch ihren Aufbau mehrere solcher Funktionen. Insbesondere sind in ihr elektrische Verbindungen und Stützsystem realisiert. Zusätzlich können Schutzfunktionen integriert sein, z.B. Wärmeabführung durch innere wärmeableitende Kerne bzw. durchgängige Kupferschichten und EMV-Schutz. Im allgemeinen beeinflussen sich integrierte Funktionen. Im Falle der Leiterplatte sind mit der Funktionenintegration technologische Vorteile als auch folgende technologische und funktionelle Nachteile verbunden:

- Die Leiterplatte ist für die integrierten Funktionen nicht einzeln optimierbar. Die Gestaltparameter liegen daher für jede der integrierten Funktionen fern vom Optimum.
- Die integrierten Funktionen beeinflussen sich im Betrieb. Dies hat negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit.
- Die Leiterplatte mit allen integrierten Teilfunktionen muß die hohen chemischen und thermischen Beanspruchungen beim Herstellen, Bestücken und Lötten über sich ergehen lassen.

Das Konzept der getrennten Funktionen wurde im Zwischenbericht vom Juli 1999 bereits ausführlich beschrieben. Es erfordert eine Material- und Technologieauswahl für die einzelnen Funktionsmodule unter Berücksichtigung ihrer wechselseitigen Beziehungen.

Die äußere Umhüllung der Elektronik war von der TU Dresden zu entwickeln und herzustellen, die Testung erfolgte insbesondere am Demonstrator B3 (vgl. Abschlußbericht Alcatel, Seite 2 Bild 2: „Zuordnung der Teilprojekte zu den Demonstratoren“ / Seite 14ff „Demonstrator B3“).

2 Anforderungen an Hüllsystem, Vorauswahl aussichtsreicher Verfahren

Das Hüllsystem muß (abhängig vom geplanten Einsatz der Baugruppe) verschiedene Funktionen erfüllen:

Stützfunktion und mechanischer Schutz

- Halterung der (flexiblen) Leiterplatte durch möglichst flächiges Abstützen (bzw. in engem Raster)
- Aufnehmen der äußeren und inneren Stützkräfte, Belastungen etc.
- Realisierung mechanischer Bezugspunkte bei Herstellung (Montageprozesse, Abgleich etc.) und Anwendung
- weitgehende Spielfreiheit
- Formstabilität auch bei externen Belastungen
- Schutz der Elektronik durch Dämpfung äußerer dynamischer Einflüsse (Stöße etc.)
- Aufnahme / Abstützung von Anzeige- und Bedienelementen
- möglichst spannungsfrei in der Leiterplattenebene (d.h. Abbau / Kompensation von Toleranzen / thermisch bedingten Dimensionsänderungen der Leiterplatte)
- geringe Druckkräfte senkrecht zur Leiterplattenebene sind zulässig

Klimatischer Schutz

- widerstandsfähig gegenüber hohen und tiefen Temperaturen
- ggf. Gasdichtigkeit

EMV-Schutz

- vollständige fugenfreie elektrische Abschirmung (metallisch)

Wärmeableitung

- Wärmetransport nach außen durch Leitung und/oder Konvektion

Außerdem sind Fertigungsaspekte zu beachten

- wenige Verfahrensschritte
- einfache, toleranzausgleichende Montage
- kostengünstige Werkstoffe und Verfahrensschritte

- keine technologisch bedingten Ruhezeiten (z.B. Aushärten)
- universell für verschiedene Leiterplattenabmessungen, Bestückungen etc.
- Möglichkeit der Prüfung / Kalibrierung / Reparatur (Demontage) der Elektronik

und externe Anschlüsse herzustellen

- Durchführung elektrischer Leiter
- Durchführung optischer Leiter

sowie elektrische Aspekte zu beachten

- elektrisch isolierend
- HF-tauglich (geringe Dielektrizitätskonstante, kleiner Verlustfaktor → geringe parasitäre Kapazitäten, geringer Einfluß auf Leitungsimpedanzen etc.)

Eine nähere Betrachtung der mechanischen Aspekte zeigt, daß es günstig ist, die mechanische Stütz- und Schutzfunktion auf zwei Strukturelemente aufzuteilen. Ein inneres Element realisiert eine nachgiebige, spielfreie und dämpfende Fixierung der Folienleiterplatte, ein äußeres sorgt für hinreichende Steifigkeit des Gesamtsystems und trägt die elektrischen, optischen und mechanischen Schnittstellen. Hüllsystem und Leiterplatte müssen miteinander verbunden werden. Die in Normen [DIN8593, DIN8580, VDI2251] und Veröffentlichungen [Rot] systematisierten Fügeverfahren wurden analysiert, inwieweit sie eine solche Gestaltung ermöglichen und ob sie ein zweiteiliges Hüllsystem gestatten. Es scheiden alle Verfahren aus, die nur rein formschlüssige und daher spielbehaftete Verbindungen erzeugen, außerdem solche, die nur Punkt- oder Linienkontakt der Verbindungspartner schaffen, ebenfalls solche, die mit hohen thermischen Beanspruchungen beim Fügen einhergehen. Von den Verfahren, die Kraftschluß erzeugen, sind weiterhin diejenigen nicht anwendbar, die erhebliche Spannungen in der x-y-Leiterplattenebene erzeugen. Dies betrifft Verfahren, die Kräfte durch Keile vervielfachen. Nach dieser Auswahl verbleiben eine Reihe von Verfahren, die kraft- oder formschlüssige Verbindungen schaffen (Abbildung 2).


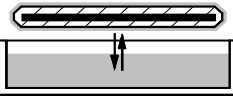
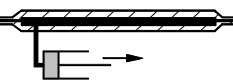
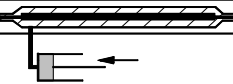
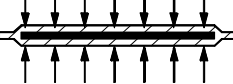




Gruppe	Untergruppe	Prinzip	Eigenschaften	Probleme
Zusammen- setzen	Einlegen, Einsetzen		Formschluß, fugenbehaftet, Spiel in xy-Ebene, Druckkräfte in z-Richtung	vorgefertigte Formteile erforderlich, Fügeverfahren für Fuge, Dimensionierung wegen Deckelwölbung
Füllen	Tränken, Imprägnieren		Formschluß, fugenfrei, spielfrei, im Prinzip spannungsfrei	saugfähige, anliegende Hülle erforderlich,
An- und Einpressen	Klemmen	durch Unterdruck 	Kraftschluß, fugenbehaftet, aber dicht, spielfrei, Druckkräfte in z-Richtung	Langzeitstabilität und Dichtigkeit der Hülle, Gestaltung Interface
		durch Überdruck 	Kraftschluß, fugenbehaftet, aber dicht, spielfrei, Hülle gleitend Druckkräfte in z-Richtung	
		durch Schrumpfen 	Kraft- oder Formschluß fugenbehaftet, aber dicht, spielfrei, Druckkräfte in z-Richtung	
Fügen durch Urformen	Umspritzen 	Formschluß, fugenfrei, spielfrei	technologisch aufwendig, hohe thermische Bean- spruchungen und Drücke beim Fügen, Schrumpfspannungen	
	Vergießen 	Formschluß, fugenfrei, spielfrei, im Prinzip spannungsfrei		Medienabgabe beim Aushärten
	Ummanteln 	Formschluß, fugenfrei, spielfrei, im Prinzip spannungsfrei		technologisch aufwendig, hohe thermische Bean- spruchungen
Fügen durch Umformen	Wickeln 	Formschluß, quasi fugenfrei, spielfrei, im Prinzip spannungsfrei	technologisch aufwendig, für große Formate unge- eignet	

Abbildung 2: Geeignete Fügeverfahren für die Umhüllung der Folienleiterplatte

Ihre zu erwartenden funktionellen und technologischen Eigenschaften wurden analysiert:

Einlegen/Einsetzen. Die Leiterplatte wird formschlüssig in eine vorgefertigte, steife Hülle eingelegt. Das notgedrungen auftretende Spiel muß durch elastische Elemente ausgeglichen werden, die in z-Richtung Kräfte aufbringen. Die Fuge kann mit verschiedenen Fügeverfahren verschlossen werden. Durch lösbare oder unlösbare Verbindungen lassen sich unterschiedliche Anforderungsprofile berücksichtigen. Bei hinreichender Steifigkeit der Hülle kommen auch Fügeverfahren in Betracht, die punktartige Verbindungen schaffen, z.B. Schrauben- oder Schnappverbindungen.

Die Trennung der mechanischen Funktionen in eine äußere harte Schale und eine innere weiche Bettung der Leiterplatte läßt sich realisieren, z.B. durch kompressible Zwischenlagen. Wegen des zu erwartenden relativ großvolumigen Aufbaus bedarf das Entwärmungsproblem besonderer Aufmerksamkeit. Durchbrüche in der Umhüllung sind sicherlich zu realisieren, ebenso eine wiederholte Demontage und Remontage bei Abgleichen oder Reparaturen.

Ein Vorteil dieses Umhüllungsprinzips liegt in seiner technologischen Einfachheit und Variabilität. Nachteilig ist, daß für jedes Leiterplattenformat und Schnittstellen-Layout eigens entworfene und gefertigte Gehäusebauteile erforderlich sind.

Tränken/Imprägnieren. Die Versteifung des Aufbaus ließe sich durch das Tränken zuvor aufgebracht saugfähiger Hüllwerkstoffe realisieren. Die Funktionen blieben dabei räumlich unvollständig getrennt, weil verwirklicht in einer saugfähigen Unterlage und einem eingelagerten Werkstoff. Ein Entfernen der Hülle wäre prinzipiell nur möglich, wenn kein stoffschlüssiger Kontakt zur Leiterplatte entsteht. Die Remontage einer entfernten Hülle scheint ausgeschlossen. Technologisch problematisch ist die Anbringung des notwendigen saugfähigen Materials. Die bestückte Leiterplatte selbst ist nicht tränkbar. Das Verfahren wurde daher nicht weiter in Betracht gezogen.

Klemmen durch Unterdruck. Bei diesem Verfahren wird der äußere Luftdruck benutzt, um eine Hülle mit Normalkräften an die Oberfläche der bestückten Leiterplatte zu pressen. Die Hülle formt sich dabei mehr oder weniger an der Leiterplatte ab. Unter dem Gesichtspunkt der Kräfte ist dieses Prinzip günstig, da lediglich Normalkräfte auftreten, die überall gleich groß sind. Der Aufbau stabilisiert sich durch die Andruckkräfte, die im Verbund von Leiterplatte und Hüllfolie Reibungskräfte erzeugen. Unter mechanischen Gesichtspunkten ist lediglich eine dünne Hüllfolie erforderlich, die einen kleinvolumigen Aufbau gestattet. Die Umhüllung, die luftdicht und evakuiert sein muß, kann immer nur im Ganzen angelegt und verschlossen werden. Problematisch ist, ihre Langzeitstabilität zu garantieren und elektrische sowie optische Leiter durch die Hülle zu führen. Eine Trennung der mechanischen Funktionen tritt nicht ein, dennoch wurde das Prinzip weiter verfolgt.

Klemmen durch Überdruck. Unter fertigungstechnischen und funktionellen Gesichtspunkten ist ein Klemmen mit Überdruck einem Klemmen mit Unterdruck gleichzustellen. Jedoch hat das Überdruckprinzip den Nachteil, eine unter erhöhtem Druck formstabile äußere Hülle zu erfordern und die flexible Leiterplatte nicht abzustützen (z.B. gegen Stöße). Es wurde deshalb ausgeschlossen.

Schrumpfen. Das Umhüllen mit Schrumpffolien stützt die Leiterplatte in einer dem Klemmen durch Unterdruck vergleichbaren Weise. Jedoch werden in der Hüllfolie auch tangentiale Kräfte erzeugt, so daß ein Verwerfen und Wölben der Leiterplatte zu erwarten ist. Die Temperaturen beim Schrumpfen der Folie sind hoch. Das Prinzip wurde aus diesen Gründen nicht weiterverfolgt.

Umspritzen. Beim Umspritzen wird die fertig bestückte Leiterplatte mit einem thermisch aktivierten Stoff umgeben, der anschließend abkühlt und dabei erstarrt. Zum Umspritzen sind hoher Druck und hohe Temperaturen notwendig, außerdem treten beim Erstarren Schrumpfspannungen auf. Dadurch ist das Verfahren nur für relativ kleine Leiterplatten geeignet (vergleiche Untersuchungen der TU Dresden im BMBF-Verbundprojekt „Mechmodul“ [Mech]). Das Verfahren ist für die Leiterplatte mit hohen Beanspruchungen verbunden. Zwar wird die Hülle aus formlosem Stoff hergestellt, erfordert daher keine an die Leiterplatte angepaßten vorgefertigten Teile, benötigt aber teure Werkzeuge, die nur bei großen Stückzahlen vertretbar sind. Daher wurde dieses Prinzip als für dieses Projekt ungeeignet eingeschätzt. Es findet jedoch seinen umfangreichen Einsatz auf Gebieten, wie Sensorik, Kfz-Elektronik, Militärtechnik.

Vergießen. Nach diesem Prinzip wird die Leiterplatte durch einen aushärtenden Stoff umgossen. Vergießen ist ein in der Elektroniktechnologie häufig angewendetes Verfahren, so daß sowohl Verfahren und Anlagen für unterschiedliche Aufgaben als auch ein breites Spektrum vergießfähiger Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften, angepaßt an eine Vielzahl von Aufgaben, zur Verfügung stehen. Durch mehrschichtigen Aufbau des Vergusses läßt sich eine Funktionentrennung realisieren. Außerdem bietet sich die Möglichkeit, durch einen Verguß in mehreren Schritten eine automatisierte Rückseitenbestückung zu unterstützen. Das Prinzip wurde weiterverfolgt.

Ummanteln. Dieses Verfahren wird beispielsweise zum Herstellen von Kabelisolationen angewandt. Ähnlich wie beim Umspritzen wird ein thermisch aktivierter Werkstoff aufgetragen, wodurch ebenfalls Schrumpfspannungen auftreten. Es wurde daher nicht weiterverfolgt.

Umwickeln. Hierbei wird eine Hülle geschaffen aus einem auf Rolle vorliegenden bandförmigen Ausgangsmaterial. Vergleichbare Verfahren sind Umspinnen oder Umweben. Der Versteifungseffekt durch solche Verfahren ist gering. Es müssten daher entweder aushärtende Stoffe verwendet werden, oder nachträglich durch Tränken oder Imprägnieren mit solchen Stoffen stabilisiert werden. Problematisch erscheint das Umwickeln großer Formate (unzureichende Steifigkeit der zu umwickelnden flexiblen Leiterplatte. Umwickeln und vergleichbare Verfahren werden daher nicht weiterverfolgt.

Nach dem Ausscheiden ungeeigneter Fügeverfahren verblieben die Lösungsansätze **Vergießen, Einlegen** und **Vakuumverpacken**. Die weiteren Untersuchungen wurden auf diese beschränkt. Gegenüber den anderen beiden Verfahren unterstützt das Vergießen die automatisierte Rückseitenbestückung flexibler Leiterplatten.

3 Mechanisches Verhalten der zu umhüllenden Leiterplatte

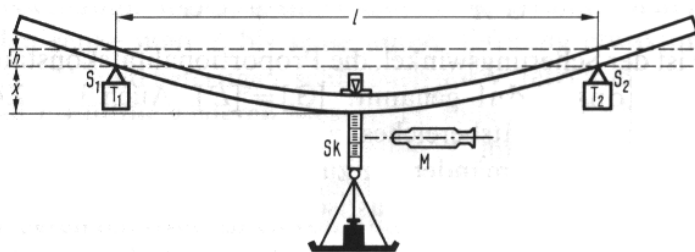
3.1 Mechanische Eigenschaften von TWINflex® im Vergleich zu FR4-Leiterplatte

Um Aussagen zu den mechanischen Wirkungen der verschiedenen Umhüllverfahren treffen zu können, mussten zuvor die materialspezifischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe ermittelt werden. Von Interesse war insbesondere das Verhalten der flexiblen Leiterplatte (bestückt und unbestückt). Die Untersuchungen bezogen sich auf TWINflex®

Die Abbildung 3 zeigt die Anordnung zum Messen des E-Moduls im Biegeversuch. Ein Balken wird auf zwei Schneiden S_1 und S_2 aufgelegt und in der Mitte (bei $\frac{l}{2}$) mit einer Kraft F beaufschlagt. Durch Messen der Durchbiegung x kann E ermittelt werden:

$$E = \frac{l^3}{4h^3b} \frac{F}{x}$$

Gl. 1



l Abstand der Schneiden S_1 und S_2 ; S_k Mikrometerskala, deren Verschiebung durch das Mikroskop M beobachtet wird

Abbildung 3:
Anordnung zum Messen des Elastizitätsmoduls mit Hilfe der Durchbiegung eines Balkens [Wal]

Bei der praktischen Durchführung der Messungen mit TWINflex-Streifen konnten mit dieser Methode keine gut reproduzierbaren Werte ermittelt werden. Dies ist vor allem auf zwei Gründe zurückzuführen:

- Die zur Durchbiegung notwendigen Kräfte sind sehr klein ($0,02N \dots 0,05N$) – dadurch ist die mechanische Stabilität der Anordnung gegenüber äußeren Einflüssen nicht ausreichend
- Um einen Einfluß der Wegmessung auf das Meßobjekt zu vermeiden, muß diese Messung berührungslos erfolgen.

Es wurden Biege-Elastizitätsmodul E_{Biege} von TWINflex von $3500 \dots 4500 \text{ N/mm}^2$ gemessen.

Zusätzlich wurde der Elastizitätsmodul mittels Zugversuch bestimmt (Abbildung 4).

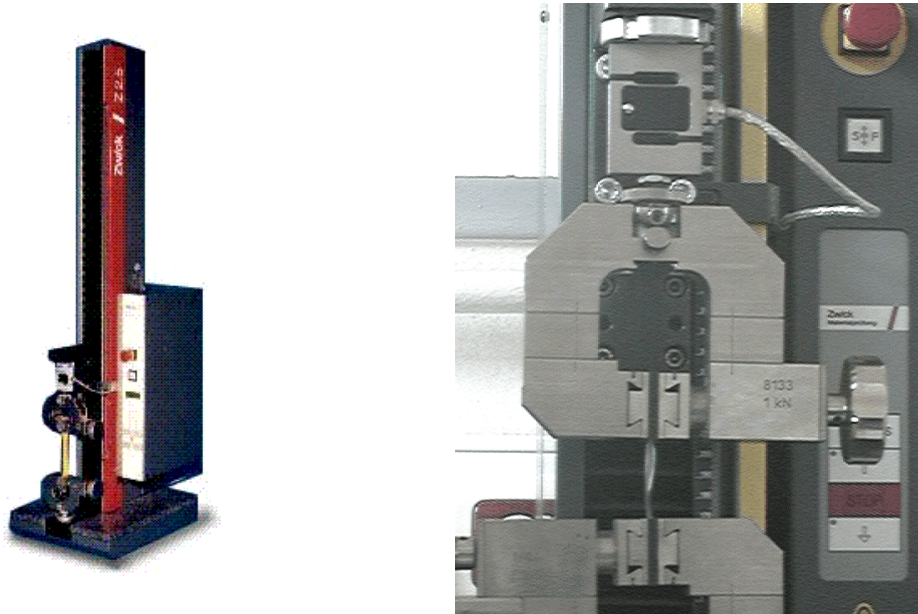


Abbildung 4 Anordnung zum Messen des Elastizitätsmoduls mit Hilfe des Zugversuches (Zugmaschine *zwicki 1120* der Fa. Zwick GmbH & Co.)

Abbildung 5 zeigt den Streubereich der mit Zugversuch ermittelten Dehnungs-Kraft-Kennlinien verschiedener Meßstreifen (freie Meßlänge 35,7mm; Streifenbreite 1,0mm). Die aus der Steigung im annähernd linearen Anfangsbereich bis ca. 0,3mm Dehnung (entspricht 1% Dehnung) der Kurven errechneten E-Module bestätigen die Ergebnisse des Biegeversuchs. Die Streuung der Meßwerte resultiert aus unterschiedlichen Leiterzug-Geometrien der Teststreifen.

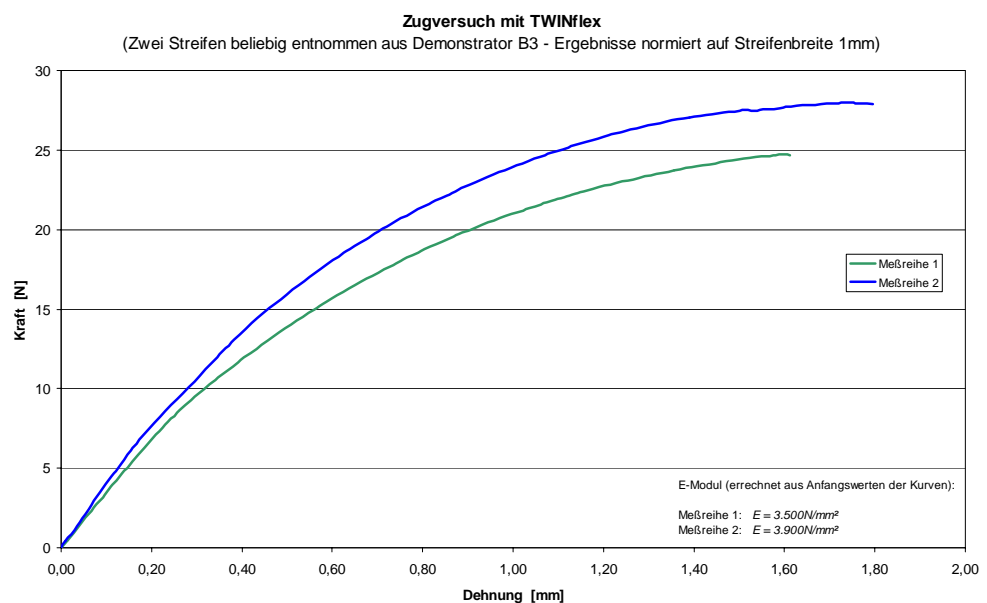


Abbildung 5 Dehnungs-Kraft-Kennlinie von 4-lagigem TWINflex-Material

In Abbildung 6 sind die Elastizitätsmodule von TWINflex und FR4 sowie des Basismaterials Polyamid von TWINflex und Kupfer gegenübergestellt.

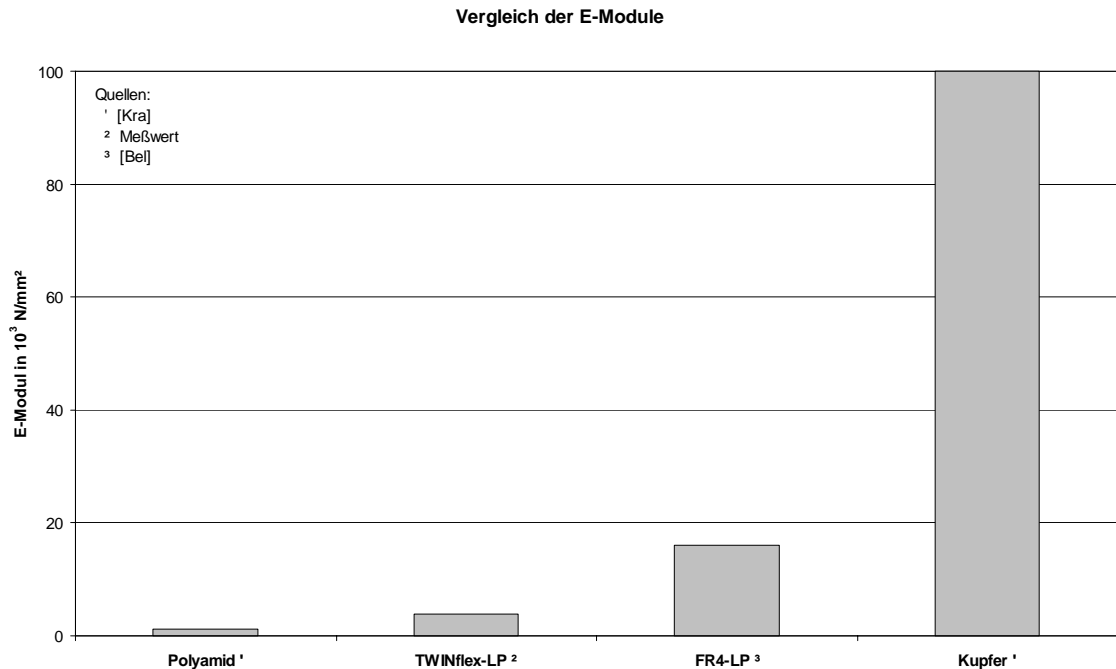


Abbildung 6 Vergleich der Elastizitätsmodule verschiedener relevanter Materialien

Eine TWINflex-Leiterplatte weist im Vergleich zu einer FR4-Leiterplatte neben dem deutlich kleineren Elastizitätsmodul auch noch eine wesentlich geringere Dicke auf. Ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften verschiedener Leiterplatten kann deshalb nur über die Biegesteifigkeit EI (Gl. 2) erfolgen.

Berechnung der Biegesteifigkeit:

$$EI = \frac{1}{12} Ebh^3 \quad \text{Gl. 2}$$

Abbildung 6 veranschaulicht den großen Unterschied der Biegesteifigkeit von 2- und 4-lagiger TWINflex-Leiterplatte zur herkömmlicher FR4-Leiterplatte. Eine Übertragung der üblichen Verfahren der Halterung bzw. Lagerung von FR4-Leiterplatten auf TWINflex ist deshalb nicht möglich.

Aufgrund der geringen Biegesteifigkeit einer flexiblen Leiterplatte wird deren Durchbiegung deutlich von der Art der Lagerung der Leiterplatte, der Biegesteifigkeit der Bauelemente und deren Anordnung sowie von den Lötstellen beeinflusst. Eine Berücksichtigung aller dieser Einflüsse bei der Abschätzung der Durchbiegung würde zu einer sehr zeitaufwendige Analyse führen und wäre nur für ein konkretes Objekt möglich. Diese Ergebnisse könnten nicht auf eine andere Baugruppe übertragen werden. Für die Beurteilung der mechanischen Stabilität der Leiterplatte wird deshalb ein vereinfachter Ansatz genutzt. Bei diesem Ansatz wird die gesamte Masse der bestückten Leiterplatte gleichmäßig auf dem Trägermedium verteilt. Der

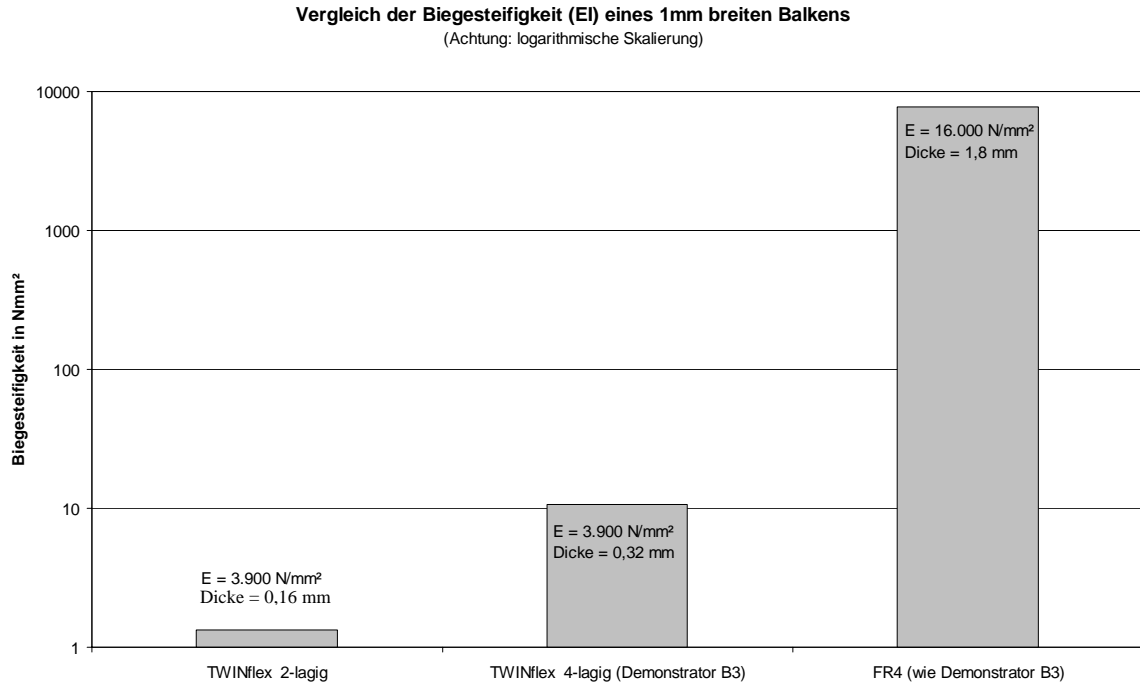
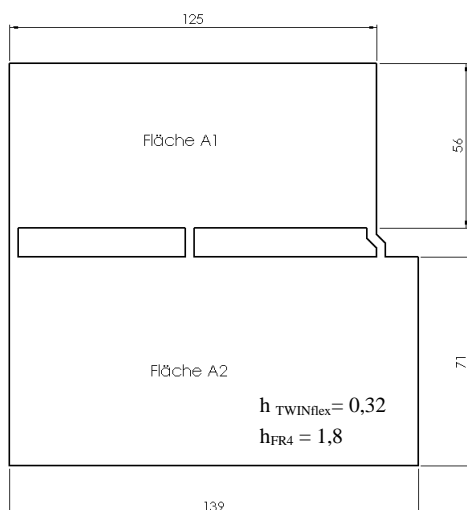


Abbildung 7: Vergleich der Biegesteifigkeit EI verschiedener Leiterplatten-Materialien
(Achtung: logarithmische Skalierung)

Einfluß der Biegesteifigkeit der Bauelemente wird dabei nicht betrachtet. Die Berechnungen erfolgen entsprechend den Theorien der Festigkeitslehre von Balken (2-dimensionale Probleme) und Platten (3-dimensionale Probleme) mit jeweils angreifender konstanter Linien- bzw. Flächenlast. Dazu werden für zwei Einsatzmöglichkeiten eines elektronischen Gerätes die für die Durchbiegung der Leiterplatte ungünstigsten Fälle (worst cases) betrachtet:

- Ruhelage des elektronischen Gerätes; waagerechte Position der Leiterplatte – Es wirkt die einfache Fallbeschleunigung der Erde ($a_{1,x} = 9,81 \frac{m}{s^2}$) senkrecht zur Leiterplatten-Oberfläche.
- Stöße / Schwingungen auf das elektronische Geräte; waagerechte Position der Leiterplatte – Es wirkt die 10-fache Fallbeschleunigung der Erde ($a_{10,x} = 98,1 \frac{m}{s^2}$) senkrecht zur Leiterplatten-Oberfläche.

Nachfolgend sollen die daraus resultierenden mechanischen Belastungen am Beispiel des Demonstrators B3 (Fläche A2) diskutiert werden.



		A1	A2
TWINflex	Fläche	7000 mm²	9870mm²
	Masse Bauelemente	18g	23g
	Masse unbestückt	7,6g	9,4g
FR4	Masse bestückt	26g	32g
	Masse unbestückt	20g	42g
	Masse bestückt	38g	65g

Abbildung 8: Daten des Demonstrators B3

Bereits ein erster Überschlagn zeigt, daß eine zusätzliche Versteifung der Twinflex-Leiterplatte notwendig ist, wenn die bisherige Montagevariante (Befestigung am Rand der Leiterplatte) beibehalten werden soll.

Eine Möglichkeit der Versteifung der TWINflex-Leiterplatte besteht darin, sie auf eine flächige FR4-Trägerschicht aufzubringen. Für diese Variante sind mehrere praktische Umsetzungen vorstellbar:

- TWINflex-Schicht wird einseitig auf eine FR4-Fläche laminiert (Abbildung 9 - Variante A)
 - ⇒ FR4-Platte übernimmt nur mechanische Funktion
 - ⇒ Elektrische Funktion wird komplett von TWINflex übernommen
 - ⇒ Eingeschränkter Platz für Bauelemente, da nur einseitig bestückbar
 - ⇒ Mechanische Stabilität entspricht einer FR4-Leiterplatte
 - ⇒ Problemlose automatische Bestückung
- Auf eine FR4-Platte wird beidseitig eine TWINflex-Schicht laminiert (Abbildung 9 - Variante B)
 - ⇒ FR4-Platte übernimmt mechanische und elektrische Funktionen, dadurch „lange Leitungen“ zwischen beiden TWINflex-Schichten
 - ⇒ Beidseitig bestückbar
 - ⇒ Mechanische Stabilität entspricht einer FR4-Leiterplatte
 - ⇒ Problemlose automatische Bestückung
- TWINflex wird einseitig auf eine FR4-Fläche laminiert und FR4-Trägerschicht hat Aussparungen für Bauelemente (Abbildung 9 - Variante C)
 - ⇒ FR4-Platte übernimmt nur mechanische Funktion
 - ⇒ Elektrische Funktion wird komplett von TWINflex übernommen
 - ⇒ Eingeschränkt beidseitig bestückbar
 - ⇒ Mechanische Stabilität ist abhängig von Anzahl und Geometrie der Aussparungen

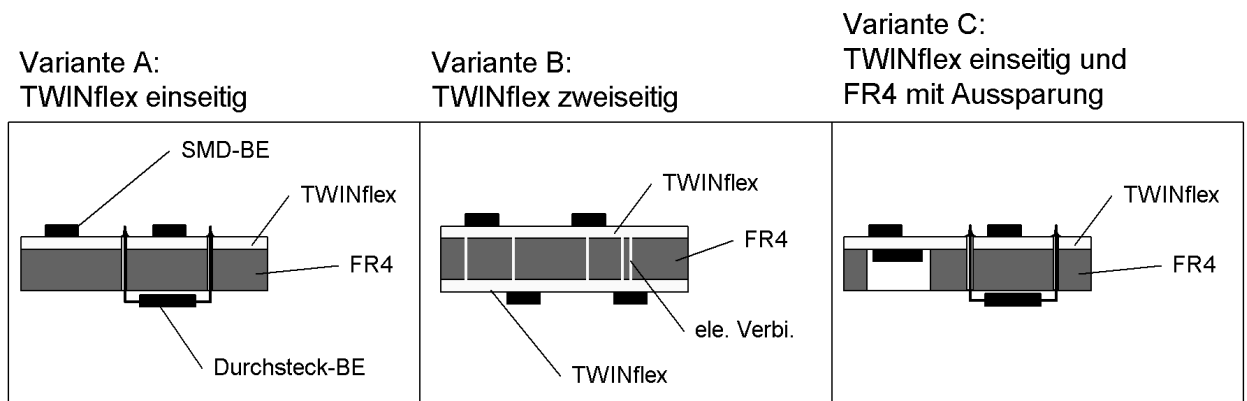


Abbildung 9 Varianten einer FR4-verstärkten TWINflex-Leiterplatte

Die mechanischen Eigenschaften der Varianten A und B entsprechen einer FR4-Leiterplatte und sind somit bekannt. Bei Variante C kann eine Aussage diesbezüglich nur in Abhängigkeit von baugruppenspezifischen Aussparungen getroffen werden.

3.2 Mechanisches Verhalten von partiell versteiftem TWINflex®

Die Anzahl und Größe der Aussparungen ist bei jeder Baugruppe unterschiedlich. Deshalb ist eine exakte Berechnung mit speziellen Formen der Trägerschicht nicht allgemeingültig. Durch die Aussparung in der Trägerschicht verringert sich die Biegesteifigkeit EI (Gl. 2) der Leiterplatte. Unter der Annahme einer Vielzahl kleiner Aussparungen (für die Montage einzelner elektronischer Bauelemente) läßt sich Abhängigkeit des Flächenverhältnisses der Aussparungen zur Gesamtfläche der FR4-Schicht die Durchbiegung der Leiterplatte bestimmen.

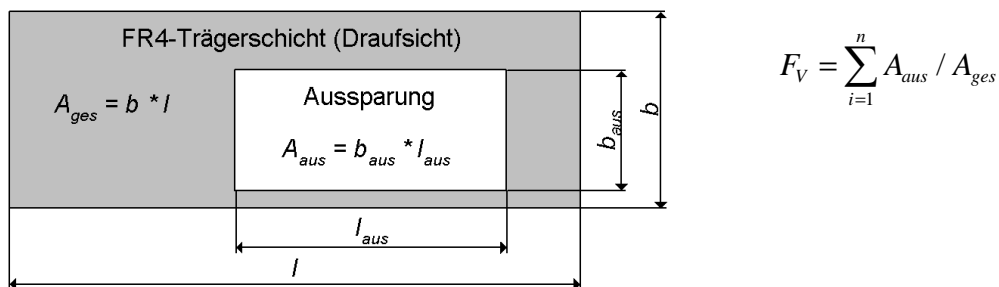


Abbildung 10: Flächenverhältnis Aussparung zu Gesamtfläche

Die Leiterplatte ist an zwei gegenüberliegenden Seiten auf ein Gehäuse o.ä. aufgelegt (z.B. eingeschoben) und wird durch ihre Eigenmasse belastet (siehe Abbildungen 11 und 12) Diese Konstellation kann im 2-dimensionalen mit der Durchbiegung f eines Balkens mit konstanter Streckenlast und endlicher Breite b des Balkens berechnet werden.

$$f_{\max} \left(\frac{l}{2} \right) = \frac{5Fl^3}{384EI} \quad [\text{Kra}] \quad \text{Gl. 3}$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad \text{Gl. 4}$$

durch Einsetzen von Gl. 4 in Gl. 3 erhält man

$$f_{\max} \left(\frac{l}{2} \right) = \frac{5Fl^3}{32Ebh^3} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Kraft F berechnet sich aus der Masse der bestückten Leiterplatte (für Demonstrator B3, Fläche A_2 $m_{A_2_Bestückt} = 32g$.

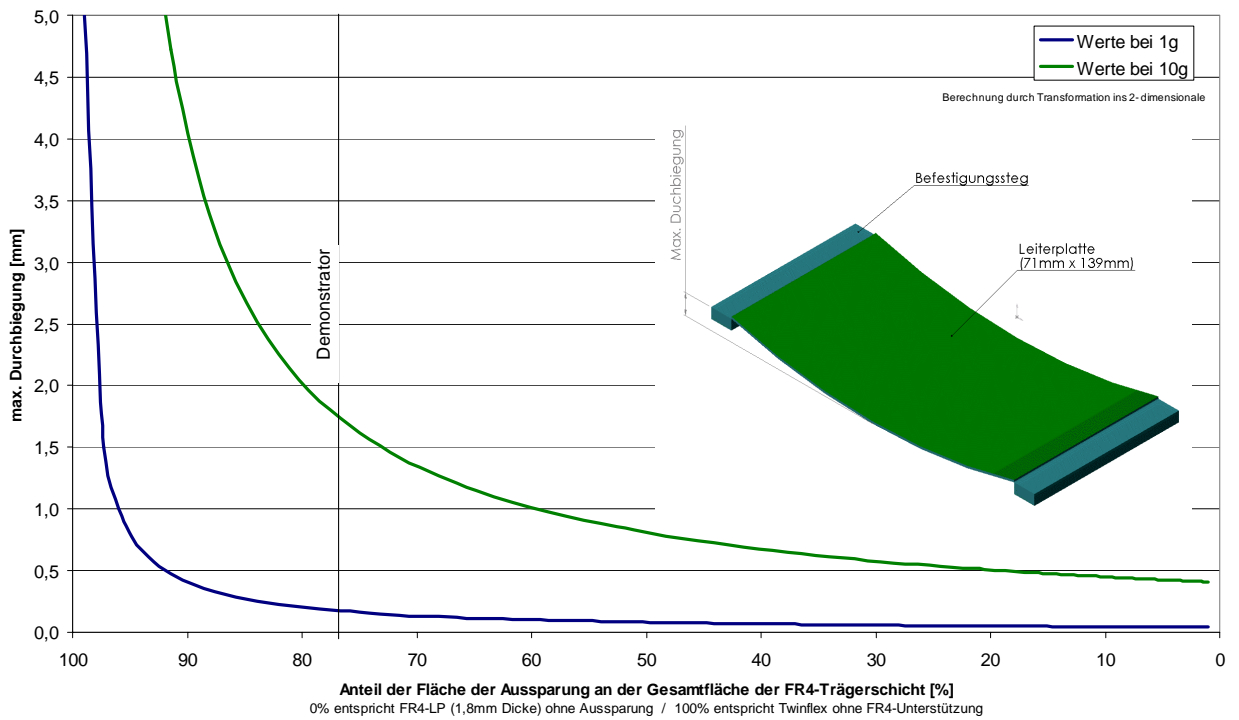


Abbildung 11 Durchbiegung einer FR4-verstärkten TWINflex-Leiterplatte am Beispiel Demonstrator B3, Fläche A2 längs gelagert

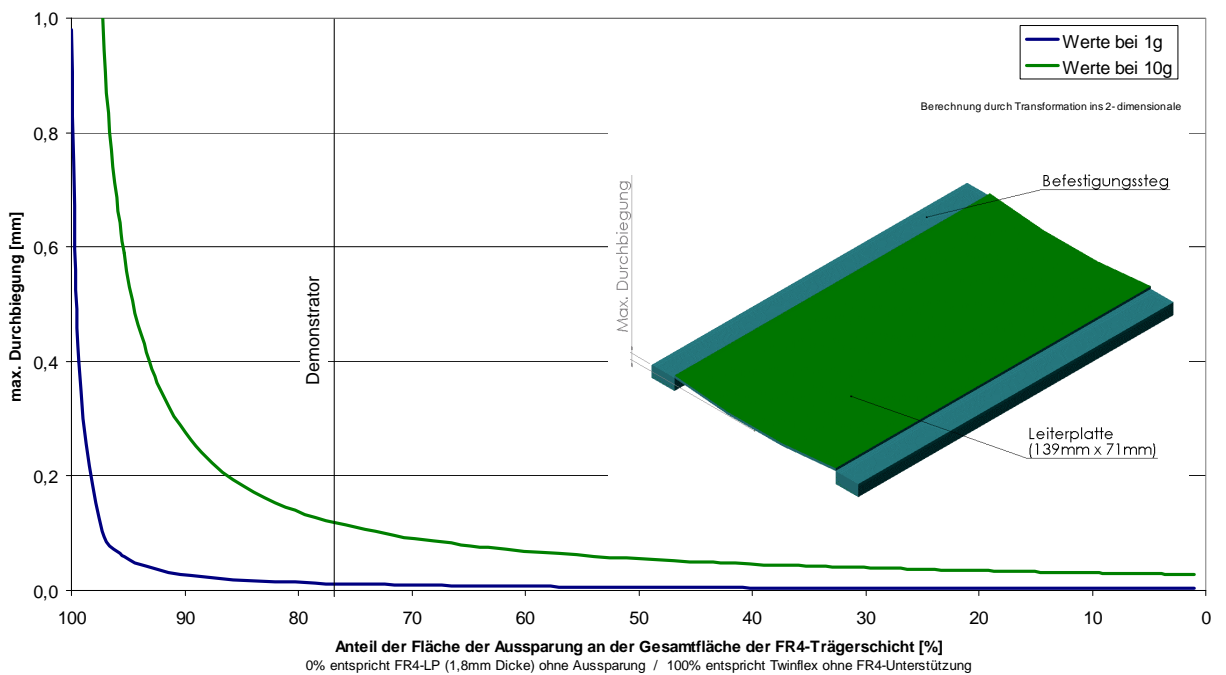


Abbildung 12 Durchbiegung einer FR4-verstärkten TWINflex-Leiterplatte am Beispiel Demonstrator B3, Fläche A2 quer gelagert

In beiden Diagrammen ist zu sehen, daß die Durchbiegung einer reinen TWINflex-Leiterplatte sehr groß ist. Die Kennlinien zeigen aber, daß Leiterplatten mit einem Flächenverhältnis A_{aus}/A_{ges} von kleiner $\sim 80\%$ akzeptable mechanische Eigenschaften aufweisen. Aufgrund nicht vorhandener Normen bzw. Vorschriften ist es jedoch schwer, einen zulässigen Grenzwert für die Durchbiegung bzw. den Biegeradius festzulegen. Mit dem Standard IPC-MIL-950 sind zulässige Grenzwerte für die Verwölbung und Verwindung von nicht flexiblen Multilayer-Leiterplatten gegeben. In Anlehnung an diese Norm sind in Abbildung 13 die Kennlinien aus der Abbildung 11 und Abbildung 12 nochmals normiert dargestellt.

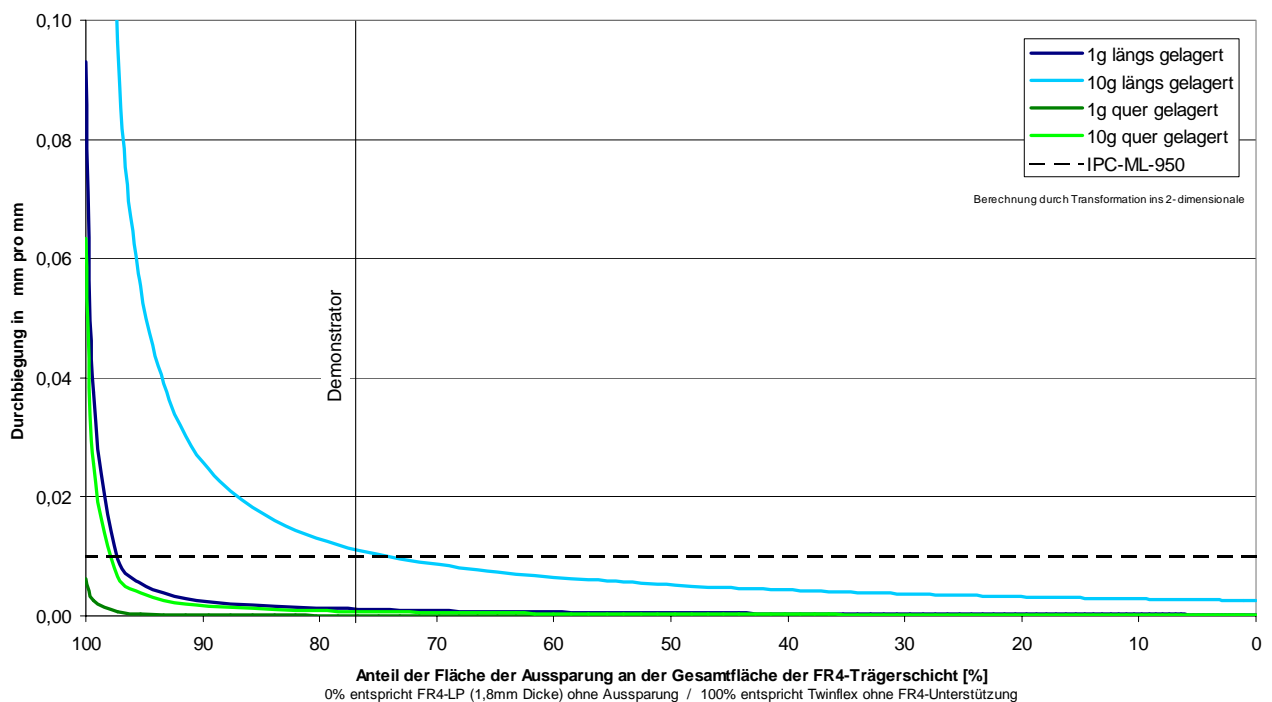


Abbildung 13 Normierte Durchbiegung einer FR4-verstärkten TWINflex-Leiterplatte
(in Anlehnung an IPC-MIL-950)

3.3 Mechanisches Verhalten von TWINflex® bei zusätzlicher Abstützung in der Fläche

Die vorhergehenden Diagramme zeigen deutlich, daß die Lagerung einer reinen TWINflex-Leiterplatte in einer Art Leiterplatteneinschub aufgrund der zu großen Durchbiegung nicht möglich ist. Dies bedeutet, daß die Leiterplatte zusätzlich noch in der Fläche abgestützt werden muß. Prinzipiell sind hier drei verschiedene Varianten vorstellbar:

- Flächiges Lagern – Einlegen der Leiterplatte zwischen zwei Negativformen bzw. zwischen Schüttgut oder mit Flüssigkeit gefüllte Kissen
- Eingeschränkt flächiges Lagern – Abstützen der Leiterplatte-Fläche durch Stege oder Gitter
- Punktuell Lagern – Abstützen der Leiterplatten-Fläche durch einzelne Stifte

Punktuelles Lagern

Die Leiterplatte wird auf Stifte gelegt, die über die gesamte Fläche verteilt sind. Abbildung 14 zeigt einen solchen Aufbau bei quadratischer Anordnung der Lagerstifte.

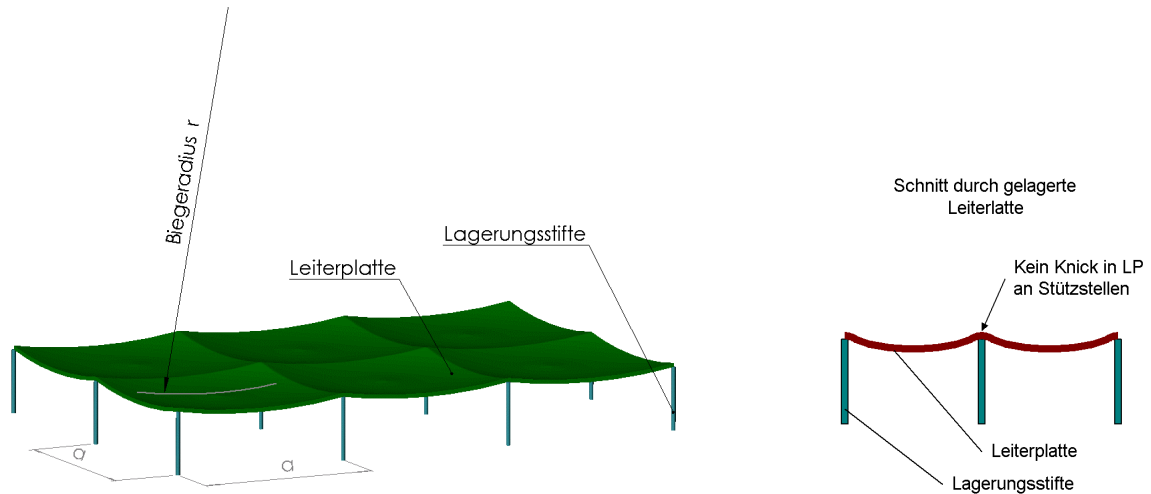


Abbildung 14 Prinzipieller Aufbau einer punktuellen Lagerung auf in quadratischem Raster angeordneten Stiften

(Die Knicke zwischen den Stützstellen im 3D-Bild sind darstellungsbedingt. Die wahre Kontur entspricht der 2D-Skizze.)

Die Berechnung derartiger 3-dimensionaler Probleme kann mit der Plattentheorie von *Kirchhoff* erfolgen. Für den Sonderfall der quadratischen Anordnung der Stützstellen und gleichmäßig verteilter Flächenbelastung p kann die Durchbiegung durch eine Fourier-Reihe dargestellt werden. [Göl]

$$f(x, y) = \frac{16p}{K\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \sin \frac{n\pi}{a} y}{\left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 \right]^2 \cdot mn} \quad \text{Gl. 6}$$

mit K (Biegesteifigkeit der Platte in Nmm)

$$K = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Gl. 7}$$

$$m = 1,3,5,\dots \quad \text{und} \quad n = 1,3,5,\dots$$

Die maximale Durchbiegung der Leiterplatte ist bei $x = y = \frac{a}{2}$, wodurch sich Gl. 6 vereinfachen läßt. Die Reihe konvergiert nach etwa 8 Gliedern und liefert:

$$f_{\max} \left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2} \right) = \frac{16 \cdot p \cdot a^4}{K \cdot \pi^6} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi}{2} \cdot \sin \frac{n\pi}{2}}{(m^2 + n^2)^2 \cdot m \cdot n} \quad \text{Gl. 8}$$

$$f_{\max} \approx 0,00406 \frac{pa^4}{K} \quad \text{Gl. 9}$$

Die Abbildung 15 zeigt den berechneten Verlauf der maximalen Durchbiegung. Mit diesem Ergebnis kann der mittlere Biegeradius der Leiterplatte bestimmt werden (Abbildung 16).

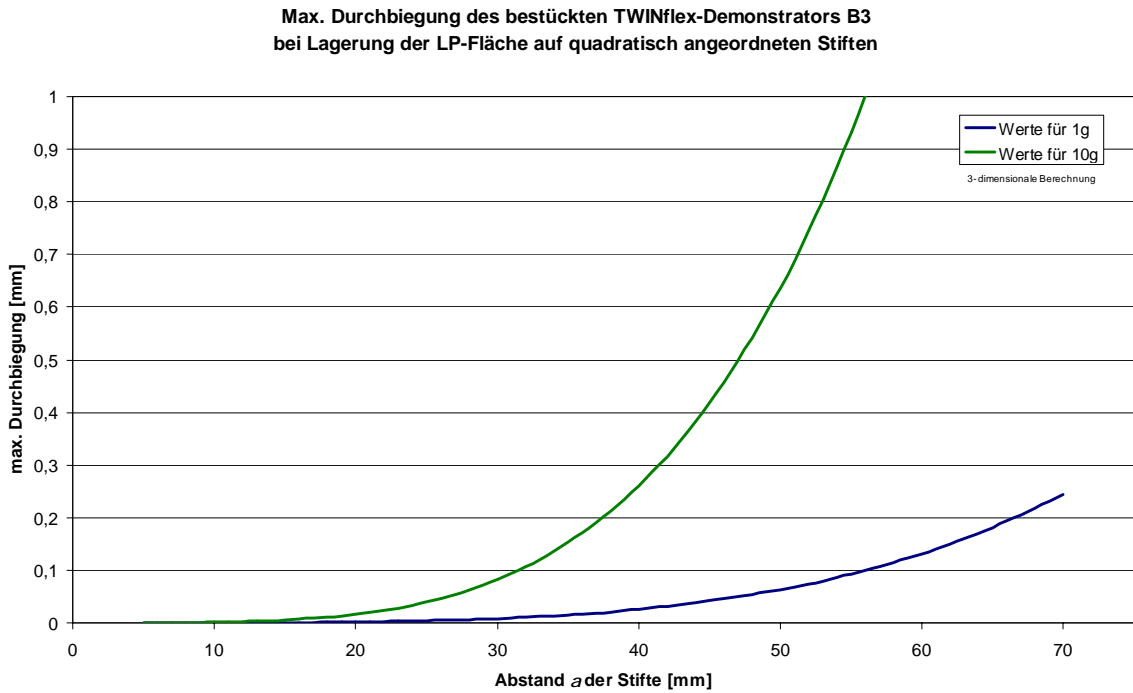


Abbildung 15: Durchbiegung des bestückten Demonstrators B3, Fläche A2 nach Gl. 9

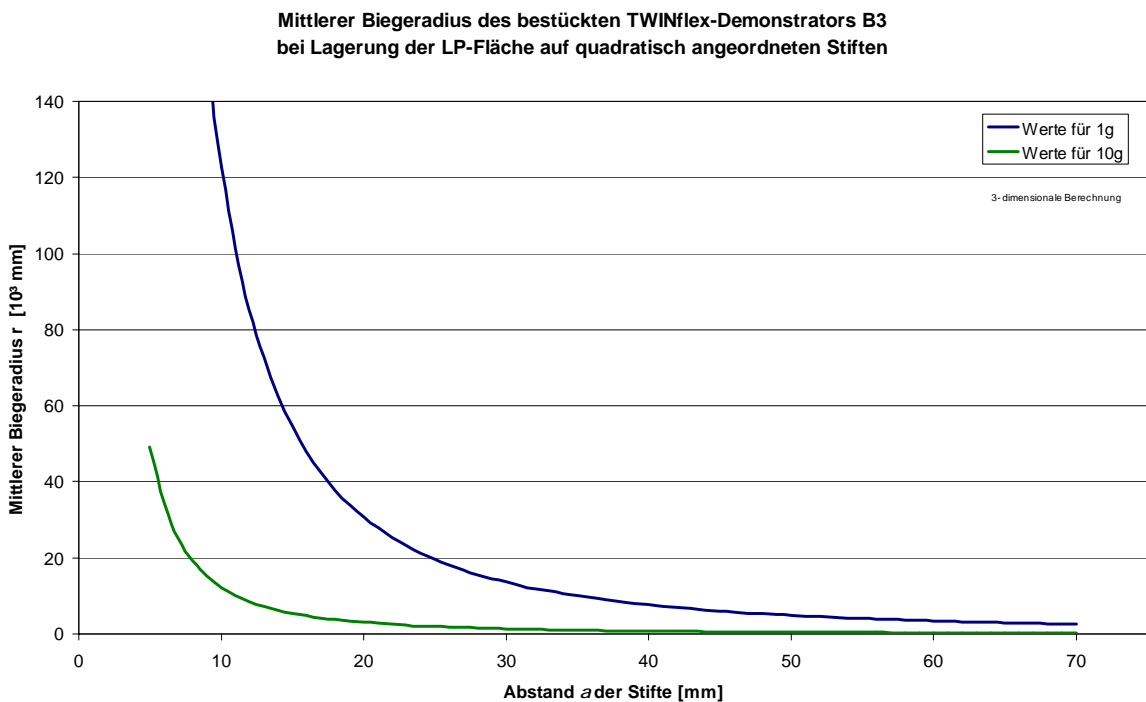


Abbildung 16: Mittlerer Biegeradius des bestückten Demonstrators B3, Fläche A2

4 Vertiefende Analyse der Lösungsansätze

4.1 Vakuumverpacken

Das Prinzip des Vakuumverpackens beruht darauf, die bestückte Folienleiterplatte zwischen zwei flächigen Hüllelementen durch Evakuierung der Luft und anschließende hermetische, stoffschlüssige Verbindung der Hüllelemente kraftschlüssig und lagestabil zu fixieren (Bild xx).

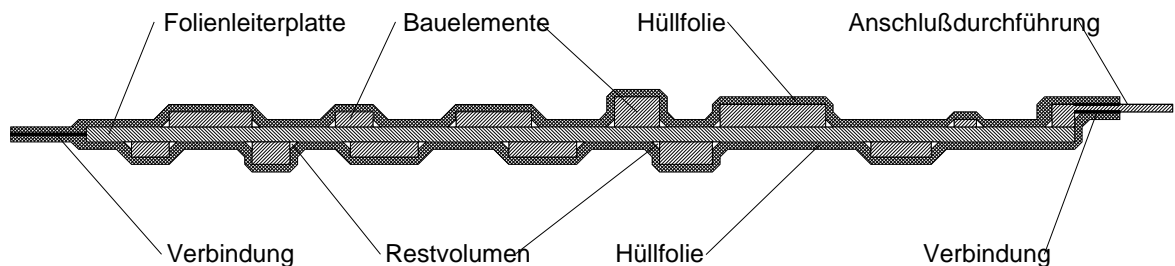


Abbildung 17: Aufbau des Hüllsystems mit Unterdruckverbindung

Die beiden Hüllelemente können gleichartig, aber auch unterschiedlich in ihrer mechanischen Stärke und in der Materialauswahl sein. Die Anwendbarkeit dieses Prinzips für kleinere (scheckkartengroße) Leiterplatten wurde an der TU Dresden im Rahmen von [AUTECH] untersucht.

Das Lösungskonzept bietet folgende prinzipiellen Vorteile:

- Die Unterdruckverbindung zweier relativ dünner Hüllelemente stabilisiert eine dazwischen liegende Folienleiterplatte mechanisch, wobei das Gesamtsystem eine Stärke von kleiner 1mm erreichen kann.
- Die Folienleiterplatte kann beliebig beidseitig mit Bauelementen bestückt sein; ein innenliegender Träger mit Durchkontaktierungen ist nicht erforderlich.
- Die hermetisch geschlossene Unterdruckverbindung gewährleistet einen weitgehenden Schutz der Leiterplatte gegenüber chemischen und klimatischen Einflüssen und verbessert damit die Langzeitstabilität (Korrosion, Beläge, Oberflächenwiderstände etc.)
- Die kraftschlüssige Verbindung zwischen Folienleiterplatte und Hüllelementen gewährleistet gegenüber dynamischen mechanischen Beanspruchungen (Schwingungen, Stöße) einen höheren Schutz im Vergleich zur klassischen Leiterplatte, da jedes Bauelement durch die Unterdruckverbindung eine hohe Lagestabilität erhält.
- Die elektronische Baugruppe ist manipulationsgeschützt.
- Nach dem Öffnen der Hülle ist eine zerstörungsfreie Zerlegung der Baugruppe in die Aufbaubestandteile möglich, wobei eine Remontage (z.B. nach einer Reparatur) jederzeit möglich ist; die vollständige Recyclingfähigkeit ist damit gegeben.
- Der Verbund kann durch Metallisierung des Hüllelements EMV-geschützt werden.

- Die Zuverlässigkeit elektrischer Kontaktverbindungen erhöht sich durch den ständigen Andruck in Kontaktrichtung. Dies hat besonders für Leitklebverbindungen Bedeutung. Zentrale Bedeutung für das Aufbauprinzip hat die Unterdruckverbindung. Die Steifigkeit des Aufbaus kommt durch das Vakuum im Innern zustande, das sich jedoch mit der Zeit durch Gasdiffusion verschlechtert. Reine Kunststoffumhüllungen kommen deshalb nicht in Frage. Metallische Umhüllungen sind bei hohen Frequenzen, wie in MOES angestrebt, problematisch (parasitäre Kapazitäten bei geringem Abstand der Metallisierung zur Leiterplatte).

Bei größeren Baugruppen, wie sie für MOES erforderlich sind, reichen die mittels Vakuum erreichbaren Versteifungseffekte nicht aus.

Problematisch ist auch die hermetisch dichte Durchführung von Anschlüssen. Die einzige bisher bekannte Lösung dieses Problems ist ein Kontaktfenster für elektrische Kontakte (Abbildung 18). Eine Lösung für die Durchführung von Wellenleitern wurde nicht gefunden.

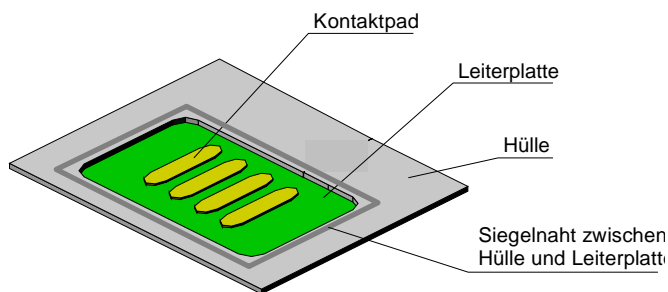


Abbildung 18: elektrische Kontaktierung über Kontaktfenster

Es muß zusammenfassend konstatiert werden, daß das Vakuumverpacken für Scheckkarten-Anwendungen sicherlich einsetzbar ist, für MOES aber keine gangbare Lösung darstellt.

4.2 Vergießen

Eine detaillierte Analyse über die Einsetzbarkeit von Vergußsystemen und Schutzlacken, deren mechanische Wirkung auf Bauelemente und Leiterplatte, mögliche Verfahrensvarianten der Einbindung des Vergießens in den Fertigungsablauf beidseitig gemischt bestückter (SMT und Durchsteckbauelemente) Leiterplatten, sowie die Nutzung des Vergusses zur Versteifung bereits während des Fertigungsprozesses, kann im Zwischenbericht der TU Dresden 2001 [MOES01] nachgelesen werden. Hier soll nur eine kurze Zusammenstellung wesentlicher Eigenschaften verschiedener Systeme gegeben werden:

Polyester-Systeme

- große Wärmeentwicklung beim Härten
- hohe Schrumpfspannungen

Epoxid-Harze

- mäßige Wärmeentwicklung beim Härten
- haften auf unterschiedlichsten Oberflächen
- eingesetzt als Beschichtungsmasse für unempfindliche Bauteile, wärmeleitende Vergußmassen, Underfiller
- große Härte

Silikonkautschuk-Vergußmassen

- härten ohne nennenswerte Temperaturerhöhung aus
- dauertemperaturbeständig bis 180°C,
- hochelastisch und schneidbar, Schnitte vergußfähig (Reparaturfähigkeit)
- additionsvernetzende Systeme ohne niedermolekulare Abspaltprodukte
- teuer
- problematische: Wirkung auf elektrische Kontakte

Polyurethan-Systeme

- lassen sich an unterschiedlichste Anforderungen anpassen
- beim Härten geringe Wärmeentwicklung
- geringer Schwund (kleiner als bei Epoxidharzen) wegen des später einsetzenden Gelpunktes und der niedrigeren Eigenerwärmung
- nicht so temperaturbeständig wie Silikonkautschuk (bis 120°C Dauerbeständigkeit)

Aus mechanischen Gründen (Verguß großflächiger dünner Leiterplatten) kommen für MOES nur relativ ‚weiche‘ Materialien (d.h. Silikon und Polyurethan) in Frage. Insbesondere die bisher verfügbaren optischen Wellenleiter sind mechanisch sehr empfindlich. Silikon wurde wegen seiner Wirkung auf elektrische Kontakte ausgeschlossen und deshalb verschiedene kommerziell verfügbare Polyurethan-Vergußmassen auf Anwendbarkeit getestet. Hierbei kam es häufig zu unerklärlichen mechanischen Beschädigungen (d.h. rechnerisch mittels Finite-Element-Methode nicht nachvollziehbar) vergossener Baugruppen beim Temperaturwechseltest. Nach längerer Ursachensuche mußte konstatiert werden, daß die Datenblattangaben aller Hersteller bezüglich unterer Einsatztemperaturgrenze nicht stimmen. Meist wird als Einsatzgrenze -40°C angegeben, alle getesteten Materialien wiesen jedoch

eine untere Glasübergangstemperatur T_g im Bereich von -5°C bis -10°C auf, verbunden mit einem drastischen Anstieg des Elastizitätsmoduls (Bereich 3 Zehnerpotenzen) unmittelbar unter T_g auf und waren aus diesem Grund nicht einsetzbar. Problematisch ist auch die geringe Temperaturbeständigkeit (Lötprozeß).

4.3 Einlegen

Dieses Prinzip ist bereits Gegenstand eines vorangegangenen Gemeinschaftsprojektes der Würth Elektronik GmbH & Co. KG und dem Institut für Feinwerktechnik der TU Dresden gewesen und in [AUTECH99] veröffentlicht. Es ist unter dem Namen TWINflex-B bekannt.

Es wurde eine Vielzahl möglicher Aufbauweisen unter den Gesichtspunkten der Funktion, Einsatzbedingung, Fertigung, Aussehen, Kosten, Festigkeit und Recyclingfähigkeit miteinander verglichen. Unterschieden wurde zwischen rein formschlüssigen Verbindungen zwischen Leiterplatte und Gehäusefüllung sowie kraft-formschlüssigen. Folgende Varianten wurden ausgewählt und näher untersucht:

1. form-kraftschlüssige Verbindung durch (Abbildung 19)

- keramikgefüllte Elastomereinlagen,
- thermoplastische Elastomere und
- Kombination eines Form- und Druckelements sowie

2. rein formschlüssige Verbindung durch (Abbildung 20)

- Silikonkautschuk-Vergußmassen,
- granuliert oder pulverisierte Materialien sowie
- Hüllschalen mit zur Foliensystemoberfläche negativer Oberflächenstruktur.

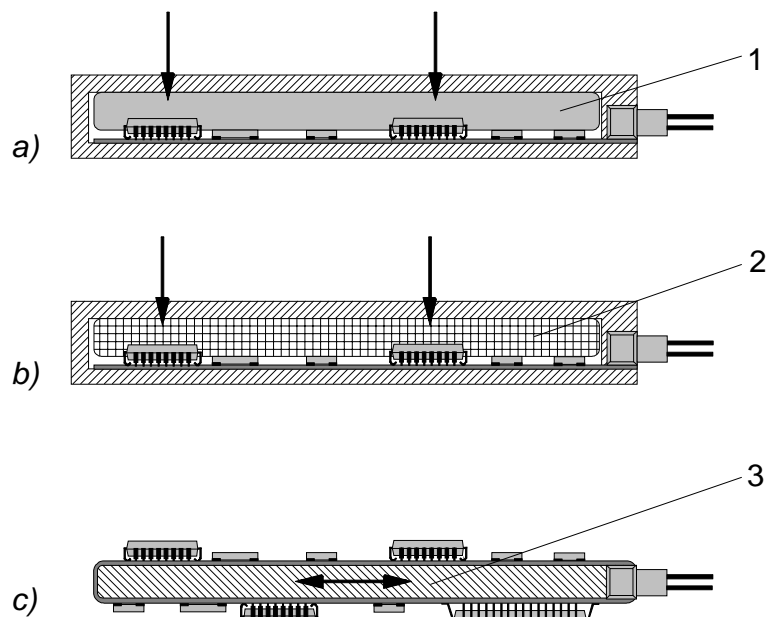


Abbildung 19: TWINflex-B-System mit form-kraftschlüssiger Verbindung durch

- (a) keramikgefüllte Elastomereinlagen
- (b) thermoplastische Elastomere
- (c) Druckelemente

1 - Elastomereinlage, 2 - thermoplastisches Elastomer, 3 - Druckelement

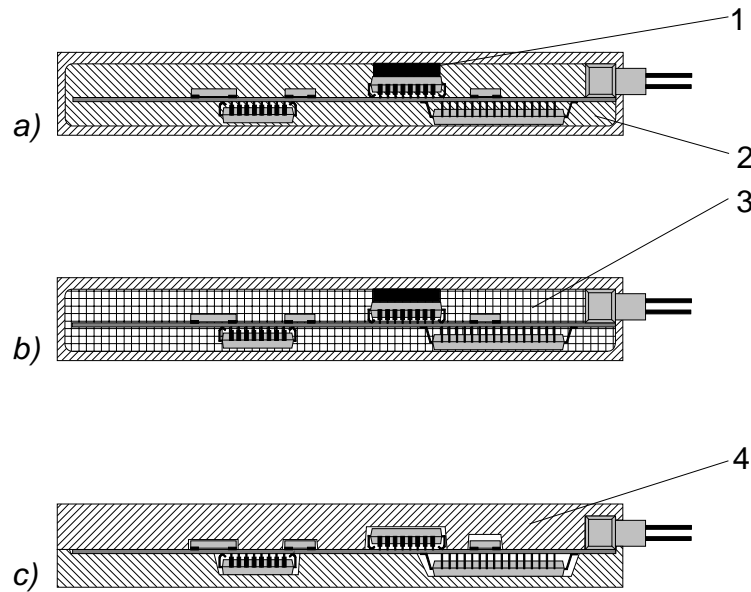


Abbildung 20: TWINflex-B-System mit formschlüssiger Verbindung durch
(a) Silikonkautschukmassen
(b) Granulate oder Pulver
(c) Gehäuseschalen mit strukturierter Oberfläche
1 - Wärmesenke, 2 - Silikonkautschuk, 3 - Granulat oder Pulver,
4 - Gehäuseschalen mit zur Foliensystemoberfläche negativer Oberflächenstruktur

Es wurden folgende Schwerpunkte des Einsatzes elastischen Füllmaterials untersucht:

- Auswirkungen der mechanischen Druckbeanspruchung auf die Scherung an den Lötstellen bei oberflächenmontierten Bauelementen, sowie auf die Wölbung des Gehäuses,
- Auswirkungen auf die Entwärmung,
- Auswirkungen dynamischer mechanischer Beanspruchungen.

Dabei wurde festgestellt, daß der optimale Anpreßdruck in z-Richtung anwendungsspezifisch ist, aber einen Wert von 60N/mm^2 nicht überschreiten soll. Eine weitere Erhöhung bringt keine wesentliche Verbesserung der Entwärmung mehr, erhöht aber stärker die Scherbeanspruchung der Lötstellen.

Bei Abstützung von Bauelementen unterschiedlicher Bauhöhe kann ein Ausgleich durch die Elastizität der Zwischenschicht erfolgen. Obige Begrenzung des Anpreßdruckes erfordert bei Bauelementen deutlich unterschiedlicher Bauhöhe (z.B. Mischbestückung SMD und Durchsteckbauelemente) unterschiedliche Schichtdicken der Zwischenlagen.

zurückführen und dadurch recyceln. Die Herstellung angepaßter Formen ist durch Verschweißen der Schaumstoffpartikel mittels Wasserdampf als Wärmeträger möglich. Die Kosten für die Form sind deshalb relativ gering. Vorteilhaft ist außerdem die Verfügbarkeit von fünf verschiedenen Formteildichten und damit verbunden von verschiedenen Elastizitätsmoduln. Problematisch ist der zur Zeit noch unzureichende Flammenschutz. Für die Herstellung des Prototyps des Demonstrators B3 wurde auf die Herstellung einer Form verzichtet und das Material direkt aus Platten verschiedener Stärke zugeschnitten.

- Entwärmung der Laserdiode durch direkten Kontakt zum Gehäuse (erforderte partielle Layout-Änderung zwecks Bestückung der Laserdiode auf entgegengesetzter Leiterplattenseite) durch Ausnutzen der Flexibilität der Leiterplatte. Dadurch konnte die Einbringung zusätzlicher Kühlkanäle in die elastischen Zwischenschichten vermieden werden.

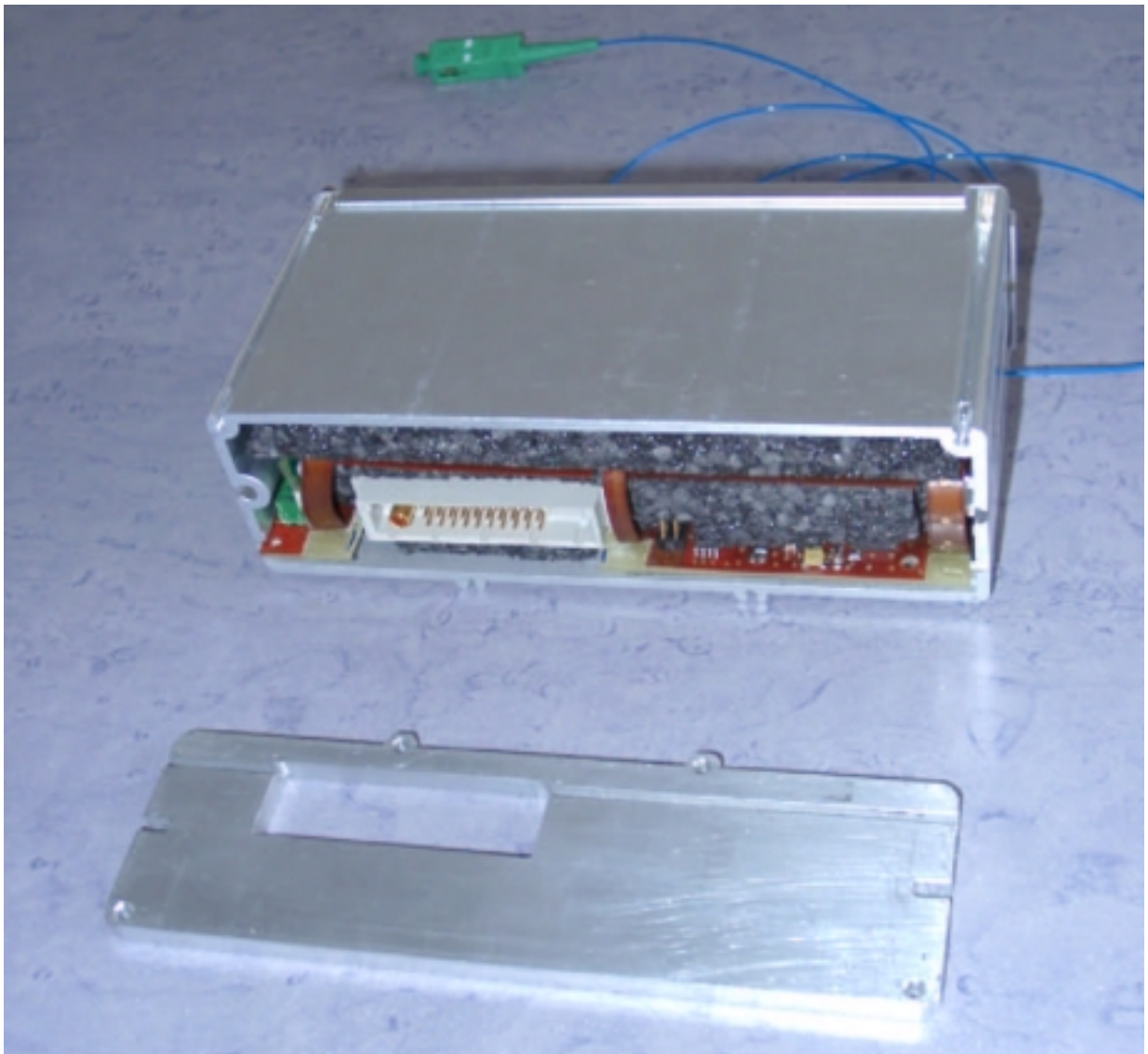


Abbildung 22: Demonstrator B3 mit Abstützung der Leiterplatte durch flexible Zwischenlagen

6 Zusammenfassung

Das Ziel des BMBF-Projektes MOES war die Entwicklung von Materialien und Verfahren für zukünftige High-Performance-Leiterplatten. Der Schwerpunkt der Arbeiten der TU Dresden lag in der Entwicklung, Rechnermodellierung und Herstellung von Baugruppenumhüllungen.

Der Test am Demonstrator B3 zeigte die Realisierbarkeit von großflächigen Baugruppen mit flexibler Leiterplatte und Baugruppenumhüllung mit flexiblen Materialien. Es muß jedoch auch festgestellt werden, daß eine Übertragung eines existierenden Layouts (für FR4-Leiterplatten) auf ein völlig anderes Konzept (flexible Leiterplatte) nicht einfach möglich ist. Die größten Probleme ergaben sich aus den geänderten Wellenwiderständen der Leitungen. Aber auch aus mechanischer Sicht verursachte insbesondere die Größe des Demonstrators und seine Mischbestückung mit SMD-Bauelementen und Durchsteck-Bauelementen Probleme. Diese waren zwar für einen Prototypen lösbar, aber sicherlich nicht für eine Serienfertigung.

Für künftige Anwendungen des Aufbauprinzips sollten aus mechanischer Sicht folgende Einsatzbedingungen beachtet werden:

- Relativ kleine Leiterplatten (z.B. Scheckkartenformat) weisen auch bei Realisierung als flexible Leiterplatte eine genügende Steifigkeit für den Fertigungsprozeß (Bestückung) auf. Eine zusätzliche Versteifung durch Verguß (auch einseitig) ist möglich.
- Größere Leiterplatten (z.B. Europaformat) benötigen eine Versteifung, sinnvollerweise realisiert mit FR4. Für diese Versteifung reichen Flächenanteile von ca. 75% aus (unter der Voraussetzung einer Vielzahl relativ kleiner Aussparungen). Zweiseitige Bestückung, auch Kombinationen von SMD und Durchsteckbauelementen sind möglich. In der Umgebung externer Anschlüsse (Steckverbinder, Bedienelemente) sollten möglichst keine Aussparungen in der Versteifung sein.
- Die mechanische Halterung durch flexible Zwischenschichten ist insbesondere bei Bauelementen mit ähnlicher Höhe mit geringem Aufwand anwendbar. Bei Bestückung mit Bauelementen deutlich unterschiedlicher Bauhöhe müssen die Zwischenschichten als Negativform gestaltet werden. Dadurch erhöht sich der Aufwand deutlich.

7 Literatur

- [IKG] Ilberg, W.; Krötzsch, M.; Geschke, D.: Physikalisches Praktikum. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig 10. Auflage 1994
- [Str] Stroppe, H.: Physik. Fachbuchverlag Leipzig, Köln 10. Auflage 1994
- [Wal] Walcher, W.: Praktikum der Physik. B. G. Teubner Stuttgart 7. Auflage 1994
- [Göl] Göldner, H.: Lehrbuch Höhere Festigkeitslehre Band 1. VEB Fachbuchverlag Leipzig 2.Auflage 1984
- [Göl2] Göldner, H.; Pfefferkorn W.: Technische Mechanik. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1.Auflage 1987
- [Kos] Kostelnik, J.: Entwicklung neuer recyclinggerechter Leiterplatten. Dissertation TU Dresden 1995
- [Kra] Krause, W.: Grundlagen der Konstruktion. Carl Hanser Verlag München, Wien 7. Auflage 1994
- [Bel] Belopolsky, Y.: Interaction of Very High Density SMT Connectors with Advanced Multilayer Substrates. Online-Technical Library of FCI Electronics, 2000
(www.fciconnect.com/technical/technical_01_05.htm)
- [MOES98] Gesamtvorhabensbeschreibung BMBF-Verbundprojekt Materialien und Verfahren für die Aufbau- und Verbindungstechnik: Modularer optisch-elektrischer Schaltungsträger (MOES) 1998
- [DIN 8580] Entwurf DIN 8580, Jul. 1985: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- [DIN 8593] DIN 8593 Fertigungsverfahren Fügen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, Dez. 1969
- [VDI2251] VDI-Richtlinie 2251 Feinwerkelemente - Verbindungen - Übersicht. Düsseldorf: VDI-Verlag, August 1991
- [MIL-950]
- [Rot] Roth, K.: Systematik fester Verbindungen als Grundlage für ihre sinnvolle Anwendung und Weiterentwicklung. VDI-Zeitschrift 122 (1980) 10, S. 381-389
- [Mech] BMBF-Verbundprojekt „Hochintegriertes kompaktes Mechatronikmodul für Kfz“. Abschlußbericht vom 2001
- [AUTECH] BMBF-Projekt „Neues Aufbau- und Technologiekonzept für elektronische Baugruppen“ (AUTECH). Abschlußbericht TU Dresden 2000
- [MOES01] BMBF-Verbundprojekt ”Modularer Optisch-Elektrischer Schaltungsträger” (MOES). Zwischenbericht zum Teilprojekt B4 TU Dresden, 2001
- [AUTECH98] BMBF-Projekt "Neues Aufbau- und Technologiekonzept für elektronische Baugruppen" (AUTECH). Zwischenbericht TU Dresden, 1999