

**Experimentelle Entwicklung von Bondprozessen
mit niedrigschmelzenden eutektischen
Legierungen auf flexiblen Substraten mit niedriger
Glasübergangstemperatur**

Januar 2013

Bachelorarbeit

and. Bachelor of Science Sonda Moakhar ep Bouguecha

Matr.-Nr.: 2706720

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Erstbetreuerin: MSc. Meriem Ben-Salah Akin
Zweitbetreuer: Dipl. Ing. Johannes Rittinger

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Formelzeichnungen und Abkürzungen	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Chipbonden	3
2.1.1 Unterteilung der Bondprozesse nach der Arbeitstemperatur	4
2.1.2 Bondmetalle	5
2.1.3 Eutektisches Bonden	7
2.1.3.1 Prozessablauf.....	7
2.1.3.2 Temperaturverlauf	7
2.2 Eutektische Legierungen und ihre Anwendung in der Verbindungstechnik ...	9
2.2.1 Vorteile der eutektischen Legierungen.....	9
2.2.2 Phasendiagramme.....	9
2.2.3 Beispiele von eutektischen Legierungen für das Chipbonden	10
2.2.4 Bleifreie eutektische Verbindung mit niedrigen Schmelztemperaturen (unter 200 °C).....	12
2.2.4.1 Eutektische Zinn-Zink-Legierung Sn91Zn9	12
2.2.4.2 Eutektische Bismut-Zinn-Legierung Bi58Sn42	13
2.2.4.3 Eutektische indiumbasierte Binär-Legierungen	15
2.3 Metallisierung der Bondpartner	18
2.4 Polymere	19
2.4.1 Allgemeine Eigenschaften	19
2.4.2 Einteilung der Polymerwerkstoffe.....	23
2.4.2.1 Duroplaste	23
2.4.2.2 Elastomere	24
2.4.2.3 Thermoplastische Elastomere	24
2.4.2.4 Thermoplaste	24
2.4.3 Polymere für die Herstellung von flexiblen Leitern	25
3 Aufgabenstellung.....	27

4	Aufbau der Versuche.....	28
4.1	Vorbereitung der Chips und Substrate	29
4.1.1	Reinigung und Ätzen.....	30
4.1.1.1	Si-Wafer	30
4.1.1.2	Polymer-Wafer	31
4.1.2	Beschichtung	32
4.1.3	Belackten der beschichteten Si-Wafer	33
4.1.4	Vereinzeln und Endreinigen	34
4.2	Eutektisches Bonden.....	34
4.2.1	Bonden im Ofen unter mechanischem Druck	34
4.2.2	Bonden mittels Flip-Chip-Bonder	35
4.2.2.1	Thermokompressionsbonden.....	36
4.2.2.2	Ultraschallbonden.....	36
4.3	Prüfung der Qualität der Bondverbindungen	38
4.3.1	Mechanische Festigkeit mittels Schertest	38
4.3.1	Optische Prüfung	39
4.3.2	EDX-Analyse.....	39
4.3.3	Messung des elektrischen Widerstandes.....	40
4.3.4	Thermoschocktest.....	41
5	Eutektisches Bonden auf starren Substraten	43
5.1	Einfluss der Rauheit	43
5.2	Eutektisches Bonden mit In-Sn-Legierung	46
5.2.1	Schertest.....	46
5.2.2	Optische Untersuchung	49
5.2.3	Messung des elektrischen Widerstandes.....	52
5.2.4	Einfluss des Thermoschocktests.....	53
5.3	Eutektisches Bonden mit In-Bi-Legierung.....	55
5.3.1	Bi-Beschichtung	55
5.3.2	Schertest.....	57
5.3.3	Optische Untersuchungen	59
5.3.4	Messung des elektrischen Widerstandes.....	60
5.3.5	Einfluss des Thermoschocktests.....	60

6	Eutektisches Bonden auf flexiblen Substraten	62
6.1	Eutektisches Bonden mit In-Sn-Legierung auf PC-Substraten	64
6.1.1	Untersuchungen zum Einsatz von Cr als Haftvermittler	64
6.1.2	Einfluss des Kontaktdruckes auf die Bondverbindung	65
6.2	Eutektisches Bonden mit In-Bi-Legierung auf PC- und PMMA-Substraten .	67
6.2.1	Thermokompressionsbonden.....	67
6.2.2	Ultraschallbonden	68
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	70
	Literaturverzeichnis	74

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Temperaturverlauf beim Anlegieren	8
Abb. 2 : Vergleich der Bond- und Schmelztemperaturen, nach [Ask12, Cha06, Che97, Chi02, Cho00, McC94, Put05, Sen02, Tak02, Vet02].....	8
Abb. 3: Phasendiagramm nach [Wei12]	10
Abb. 4: Phasendiagramm von Sn-Zn-System [Wan07]	13
Abb. 5: Phasendiagramm vom Sn-Bi-System [Wan07]	14
Abb. 6: Phasendiagramm vom In-Sn-System [Wan07]	16
Abb. 7: Einfluss der Zusatzkomponenten Ag, Bi, Sb und Zn auf die Schmelztemperatur der entstandenen Ternär-Legierung [Ohn00]	16
Abb. 8: Phasendiagramm vom In-Bi-System nach [Per02].....	17
Abb. 9: Phasendiagramm von In-Ag-System [Che97]	18
Abb. 10: Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls verschiedener Polymere [Dom08].....	23
Abb. 11: Vergleich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten [Dom08]	25
Abb. 12: Beispielsanwendungen von flexiblen Substraten [Won09].....	26
Abb. 13: Aufbau der Bondpaarung	28
Abb. 14: Vorbereitung der Chips und Substrate	29
Abb. 15: Am IMPT zur Verfügung stehende Sputteranlage (SENVAC).....	30
Abb. 16: Angewandte Ionenstrahlätzanlage (COMMONWEALTH SCIENTIFIC CORPORATION - ION BEAM ETCHING).....	31
Abb. 17: Am IMPT vorhandene Aufdampfanlage (LAB500PLUS - LEYBOLD)	32
Abb. 18: Am IMPT zur Verfügung stehende Trennschleifmaschine (DISCO - DAC551).....	34
Abb. 19: Am IMPT vorhandener Ofen (LHG PRÄZITHERM - 2860 SR)	35
Abb. 20: Werkzeuge zur Erzeugung des mechanischen Drucks beim Bonden	35
Abb. 21: Am IMPT vorhandener Flip-Chip-Bonder (FINETECH - FINEPLACER® LAMBDA).....	36
Abb. 22: Thermokompressionsbondmodul	36
Abb. 23: Schallfrequenzbereiche	37

Abb. 24: Ultraschallbondmodul.....	37
Abb. 25: Schematische Darstellung des Schertests	38
Abb. 26: Angewandte Schertestanlage (ROYCE - SYSTEM 552).....	38
Abb. 27: Messmikroskop (NIKON - MM-400)	39
Abb. 28: Rasterelektronmikroskop (JEOL - JSM-6400F).....	40
Abb. 29: Messung des elektrischen Widerstandes	41
Abb. 30: Angewandte Thermoschockkammer (VÖTSCH – TEMPERATUR- UND KLIMAPRÜFANLAGE DER SERIE VT ³)	41
Abb. 31: Temperaturverlauf im Thermoschocktest	42
Abb. 32: Mit einer drucksensitiven Folie ermittelter mechanischer Druck im Schließwerkzeug	43
Abb. 33: Einfluss der Rauheit der In-Beschichtung auf die Bondkontaktfläche	44
Abb. 34: Einfluss der Rauheit der zweiten Beschichtungskomponente Bi oder Sn auf die Bondkontaktfläche	45
Abb. 35: Aufbau der Bondpaarung für die eutektische In-Sn-Legierung.....	46
Abb. 36: Einfluss der Bondzeit auf die Scherfestigkeit	47
Abb. 37: Einfluss der Bondtemperatur auf die Scherfestigkeit.....	48
Abb. 38: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch eutektisches Bonden	48
Abb. 39: Einfluss der Haftbeschichtung auf die Indium-Migration.....	50
Abb. 40: Benetzung der Oberfläche [Mat03]	50
Abb. 41: Schlechte Benetzung des flüssigen Indiums auf Tantal	51
Abb. 42: Einfluss der Bondtemperatur auf die Thermomigration von Indium.....	51
Abb. 43: Einfluss der Bondzeit auf die Thermomigration von Indium	52
Abb. 44: Vergleich zwischen Bonden im Ofen und mit Flip-Chip-Bonder	52
Abb. 45: Einfluss der Bondzeit auf den elektrischen Widerstand.....	53
Abb. 46: Einfluss der Bondtemperatur auf den elektrischen Widerstand.....	53
Abb. 47: Einfluss des Thermoschocktests auf die Scherfestigkeit.....	54
Abb. 48: Einfluss des Thermoschocktests auf dem elektrischen Widerstand.....	55
Abb. 49: Einfluss der Bondtemperatur auf die Scherfestigkeit.....	57
Abb. 50: Einfluss der Bondzeit auf die Scherfestigkeit	58
Abb. 51: Einfluss der Erhöhung der Bondzeit auf die eutektische Reaktion	59

Abb. 52: Einfluss der Bondtemperatur auf die eutektische Reaktion	60
Abb. 53: Einfluss des Thermoschocktests auf die Scherfestigkeit.....	61
Abb. 54: Temperatur- und Druckverlauf beim Bonden auf flexiblen Substraten mit dem Flip-Chip-Bonder	64
Abb. 55: Einfluss des Haftvermittlers auf die Scherfestigkeit der Bondverbindung...	65
Abb. 56: Einfluss des Bonddruckes auf die Scherfestigkeit	66
Abb. 57: Einfluss des Bonddruckes auf dem Gefüge	67
Abb. 58: Vergleich Zwischen der Korngrößen der In-Sn- und In-Bi-Legierung.....	68
Abb. 59: Einfluss der Zyklenanzahl beim Ultraschallbonden auf flexiblen Substraten auf die Scherfestigkeit der Verbindung.....	68
Abb. 60: Einfluss des Ultraschallbondens auf die Verbindung zwischen Indium und flexiblem Substrat	69

Formelzeichnungen und Abkürzungen

Ag	Silber
Au	Gold
Bi	Bismut
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
E-Modul	Elastizitätsmodul
F_m	Maximale Scherkraft
HV	Haftvermittler
In	Indium
Pb	Blei
PC	Polycarbonate
PMMA	Polymethylmethacrylat
R_m	Zugfestigkeit
sccm	Standardkubikzentimeter pro Minute
Si	Silizium
Sn	Zinn
Ta	Tantal
T_e	Eutektische Temperatur
T_f	Fließtemperatur
T_g	Glasübergangstemperatur
Zn	Zink
α	Thermischer linearer Ausdehnungskoeffizient
σ	Elektrische Leitfähigkeit
ρ	Dichte
τ	Scherfestigkeit
D_A	Schichtdicke Legierungskomponente A
D_B	Schichtdicke Legierungskomponente B
m_A	Gewichtsanteil der Legierungskomponente A im eutektischen Punkt
m_B	Gewichtsanteil der Legierungskomponente B im eutektischen Punkt

ρ_A Dichte der Legierungskomponente A
 ρ_B Dichte der Legierungskomponente B

1 Einleitung

Flexible elektronische Systeme stellen aktuell einen bedeutenden Industriezweig dar [Won09]. In den 60er Jahren wurden erstmals dünne und somit flexible Solarzellen mit optimiertem Gewicht-Leistungsverhältnis für die Energieversorgungen von Satelliten entwickelt [Won09]. Damit ein System flexibel ist, müssen alle Komponenten funktionsgemäß ein gewisses Maß an Biegsamkeit haben. Heutzutage werden anstatt klassischer starrer Platten zunehmend flexible Substrate eingesetzt. Es werden zahlreiche neue Anforderungen an die flexiblen Substrate gestellt. Hierzu gehört - neben der Unzerbrechlichkeit und der Erhöhung der Elastizität - die Reduzierung der Masse und der Größe. Diese bestehen grundsätzlich aus Polymeren und haben im Gegensatz zu den starren Substraten eine niedrige Wärme- sowie Witterungsbeständigkeit.

Wichtig ist nicht nur die Herstellung von passenden Komponenten für flexible Mikrosysteme, sondern auch die verwendete Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), die eine zuverlässige und ökonomische Kopplung der verschiedenen Bauteile gewährleistet [Völ00]. Die AVT spielt eine bedeutende Rolle in allen fünf Ebenen der Fertigung von mikroelektronischen Systemen (Chip-, Chipträger-, Platine-, Board- und Verbindungsebene) [Völ00].

Diese Studie ist im Rahmen der zweiten Ebene Chipträgersebene (packaging level) zur Herstellung der Verbindungen zwischen Chip und Chipträger einzugliedern. Die Verbindungen erfolgten früher überwiegend durch Drahtbonden [Völ00]. Heutzutage gewinnen drahtlose Bondtechnologien (Komplettkontaktierung) - nicht nur aufgrund des geringen Flächenbedarfs, sondern ebenfalls dank ihrer besseren mechanischen, elektrischen und thermischen Qualität - zunehmend an Bedeutung. Im Vergleich zum Drahtbonden sind die direkten Montagetechniken, die eine sehr enge Verbindung zwischen Chip und Träger erlauben, beim Bonden auf flexiblen Substraten vorteilhaft. Ferner leisten sie eine bessere mechanische Verbindung bei der Integration von kleinen Chips und erhöhen die elektrische Leitfähigkeit. Nachteilig hierbei sind die eingeschränkten Inspektionsmöglichkeiten nach dem Zusammenbau und die thermische Belastung der Fügepartner.

1.1 Motivation

Eine wesentliche Problematik in der Anwendung von flexiblen Substraten zur Fertigung von elektronischen Systemen liegt in der temperaturbedingten Zersetzung der Polymerkettenbindung. In diesem Sinne ist die Fragestellung über eine zuverlässige Methode zur Befestigung der elektronischen Komponente auf flexiblen Substraten mit einer Arbeitstemperatur, die niedriger als die Glasübergangstemperatur des Substrates ist, entscheidend. Viele Verbindungstechniken, wie z.B. das Kleben, das Weichlöten sowie das eutektische und das anodische Bonden, können bei einer niedrigen Temperatur erfolgen. Sie haben jedoch unterschiedliche elektrische und mechanische Eigenschaften.

1.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht in der Grundlagenuntersuchung und Optimierung von eutektischen Bondprozessen (auch Anlegieren genannt) für die Befestigung von elektronischen Bauteilen auf flexiblen Substraten.

In diesem Zusammenhang sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen und zahlreiche Parametervariationen vorgesehen um möglichst stabile mechanische und elektrische Bondverbindung zwischen den Fügepartnern zu erreichen. Dafür werden Chips aus Silizium zunächst auf starren und dann auf flexiblen Substraten durch Anlegieren verbunden. Um eine zuverlässige Bondverbindung auf flexiblen Substraten mit niedrigen Glasübergangstemperaturen zu erzielen, werden die eutektischen Indium-Zinn- und Indium-Bismut-Legierungen zum Einsatz kommen. Die experimentelle Methodik basiert auf der Variation der Bondprozessparameter: Temperatur, Druck und Dauer um die Bondverbindung insbesondere hinsichtlich der mechanischen Stabilität zu optimieren. Hierbei wird diese durch die Scherfestigkeit beurteilt. Ferner wurde ebenfalls der elektrische Widerstand der Verbindung gemessen um die elektrische Eigenschaft der Verbindung zu bewerten.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst in die Thematik des Bondens eingeführt. Dann wird das eutektische Bonden näher beschrieben. Ferner werden Kenntnisse über eutektische Legierungen und insbesondere für das Niedrigtemperaturbonden zusammengefasst dargestellt. Schließlich folgen die Klassifizierung der Polymere und die Beschreibung ihres Einsatzes zur Herstellung von flexiblen Leitern.

2.1 Chipbonden

Beim Chipbonden steht die Güte der mechanischen und elektrischen Verbindung zwischen Chip und Substrat im Vordergrund. Für eine stabile Verbindung erfolgen diese Verfahren meistens unter erhöhten Temperaturen. Bondprozesse sind sehr vielfältig. Die bekanntesten Verfahren sind [Nic01]:

- Fusionbonden,
- anodisches Bonden,
- Bonden unter Verwendung niederschmelzender Gläser (Anglasen),
- eutektisches Bonden (Anlegieren) und
- adhäsives Bonden (Kleben).

Die einzustellenden Prozessparameter beim Bonden hängen u.a. von den angewandten Substratmaterialien ab. Im Allgemeinen können Trägersubstrate oder Leiterplatten nach ihrer Flexibilität in drei Gruppen unterteilt werden [Gau06]:

- starr
- flexibel und
- Starrflex-Leiterplatten.

Starre Substrate werden überwiegend aus Schichtpressstoffe hergestellt. Diese bestehen aus einem Isolierträgermaterial (wie z.B. Papier, Keramik und Glasgewebe) und einem Bindemittel (wie z.B. Phenolharz, Polyimidharz und Polyester). Die

flexiblen Leiterplatten bestehen dagegen grundsätzlich aus Polymeren. Starrflex-Leiterplatten stellen eine Kombination zwischen starren und flexiblen Anteilen dar.

Das Bonden auf flexiblen Substraten (meistens aus Polymeren) ist noch in der Entwicklungsphase und hat überwiegend zwei Hauptanforderungen zu erfüllen [Che00]:

- Die Oberflächen der zu verbindenden Elemente sind eben zu gestalten um einen engen Kontakt zu verwirklichen.
- Das Bonden ist bei niedrigen Temperaturen durchzuführen um eine Schädigung der wärmesensitiven Materialien und der integrierten Schaltungen zu vermeiden.

2.1.1 Unterteilung der Bondprozesse nach der Arbeitstemperatur

Verbindungstechniken bei niedrigen Temperaturen (unter 200 °C) sind für die neue Generation von Mikrosystemen von entscheidender Bedeutung. Sie sind insbesondere für das Zusammenfügen von elektronischen Bauteilen, die keine hohe Temperaturen beim Bonden vertragen können (wie z.B. Optoelektronik, Bildsensoren und Laserdioden), sowie bei der Verwendung von niedrigschmelzenden Substraten unumgänglich.

Im Allgemeinen soll die Arbeitstemperatur beim Fügen von elektronischen Bauteilen niedriger als die jeweilige Schmelztemperatur bzw. Glasübergangstemperatur (bei flexiblen Polymersubstraten) der zu verbindenden Komponenten sein [Soh07].

Dziuban hat die Bondprozesse nach der Arbeitstemperatur in drei Gruppen unterteilt [Dzi06]:

- Hochtemperaturbonden erfolgt in der Regel bei Temperaturen über 700 °C.
- Mitteltemperaturbonden wird durchgeführt in einem Temperaturbereich zwischen 200 °C und 500 °C.
- Niedrigtemperaturbonden geschieht bei Temperaturen unter 200 °C.

Das Bonden auf flexiblen Substraten erfolgt generell bei Temperaturen unterhalb 200 °C und gehört somit zur dritten Gruppe (Niedrigtemperaturbonden). Zu dieser Gruppe gehört das Ultra-Niedrigtemperaturbonden, das unter 100 °C erfolgt.

2.1.2 Bondmetalle

Zur Vermeidung von Leistungsverlusten beim Bonden werden Metalle mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit verwendet [Völ00]. Zudem soll die Verbindung fest, dicht und korrosionsbeständig sein [Bab13]. Um thermische Spannungen an den Verbindungsstellen zu vermeiden, ist die Anwendung von Metallen mit an den Substraten angepassten Wärmeausdehnungskoeffizienten nötig [Völ00].

Die Metalle, die sich beim Bonden etabliert haben, sind in Tabelle 1 aufgelistet. Ferner sind neben der Schmelztemperatur T_m ihre folgenden Eigenschaften bei Raumtemperatur eingegeben:

- Die dichte ρ ,
- Die Zugfestigkeit R_m ,
- Ausdehnungskoeffizient α und
- die elektrische Leitfähigkeit σ .

Diese Metalle werden miteinander legiert um neue Eigenschaften zu erzeugen.

Tabelle 1: Eigenschaften von etablierten Bondmetallen [Bar12, Hug13, Kie08]

Metall	Symbol	Schmelztemperatur T_m [°C]	Dichte ρ [g/cm ³]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Ausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}/K$]	elektrische Leitfähigkeit σ [MA/(V·m)]
Indium	In	156	7,31	1,88	29	12,5
Zinn	Sn	232	7,3	15	27	8,8
Bismut	Bi	271	9,78	5	14	0,769
Blei	Pb	327	11,3	10 - 15	29	5
Silber	Ag	960	10,53	137	19,5	63
Gold	Au	1064	19,3	131	14,2	45,7
Kupfer	Cu	1083	8,94	200 - 360	17	58 - 59,1

2.1.3 Eutektisches Bonden

Das eutektische Bonden (Anlegieren) bezeichnet das Bonden mittels einer eutektischen Legierung und findet generell Anwendung in der Herstellung von integrierten Schaltungen und hermetischen Gehäusen in der Mikrosystemtechnik (micro-electro-mechanical systems, MEMS) [Che00].

2.1.3.1 Prozessablauf

Vor jedem Bondprozess werden die Kontaktflächen von Chip und Träger für eine gute Verbindung gereinigt [Völ00]. Danach werden beide Kontaktflächen mit den Komponenten der eutektischen Legierung dünn beschichtet. In einigen Fällen können dünne Folien zwischen Chip und Träger statt Beschichtungen angewandt werden. Die Fügepartner werden danach aufeinander exakt positioniert. Im weiteren Verlauf werden die Fügepartner gegeneinander gedrückt und auf eine bestimmte Temperatur (Bondtemperatur) erhitzt. Aus dem atomischen Kontakt zwischen den Komponenten sowie der Überschreitung der eutektischen Temperatur resultiert die Aktivierung der Diffusionsvorgänge zwischen der Komponenten [Sob11]. Dabei tauschen die Atome der verschiedenen Komponenten ihre Stellen interstitiell oder substitutionell um. Die eutektische Legierung schmilzt bei einer Temperatur, die niedriger als die Schmelztemperatur der reinen Komponenten ist. Der eingestellte Kontaktdruck beschleunigt die Diffusionsvorgänge, die bis zur Sättigung andauern.

Das Bonden ist empfohlen unter Schutzgasatmosphäre durchzuführen um die Oxidation der verwendeten Bondmetalle zu vermeiden. Wenn die Temperatur unter der eutektischen Temperatur sinkt, erstarrt die Legierung. Dabei werden die Fügepartner durch atomare Bindungen miteinander verbunden.

Die Bondzeit und -temperatur sind die Hauptparameter für die Einstellung eines gleichmäßigen eutektischen Gefüges.

2.1.3.2 Temperaturverlauf

Für eutektische Reaktionen ist ein langsamer Temperaturanstieg gefolgt von einem Anlassen bei der Bondtemperatur vorteilhaft. Dadurch bleiben weniger reine Stoffe in

der Verbindungsstelle als bei einer schnelleren Erhitzung [Fan12]. Der typische Temperaturverlauf beim Bonden ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

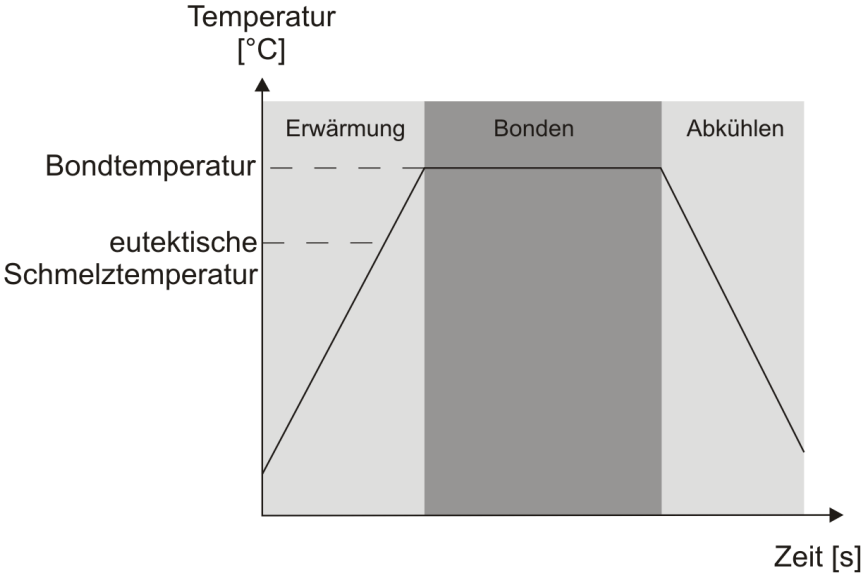


Abb. 1: Temperaturverlauf beim Anlegieren

Generell ist die Arbeitstemperatur beim Bonden höher als die Schmelztemperatur, so dass die jeweiligen Komponenten der eutektischen Legierung miteinander thermisch reagieren. In Abb. 2 sind die Bond- und Schmelztemperaturen für einige binäre und ternäre eutektische Legierungen dargestellt.

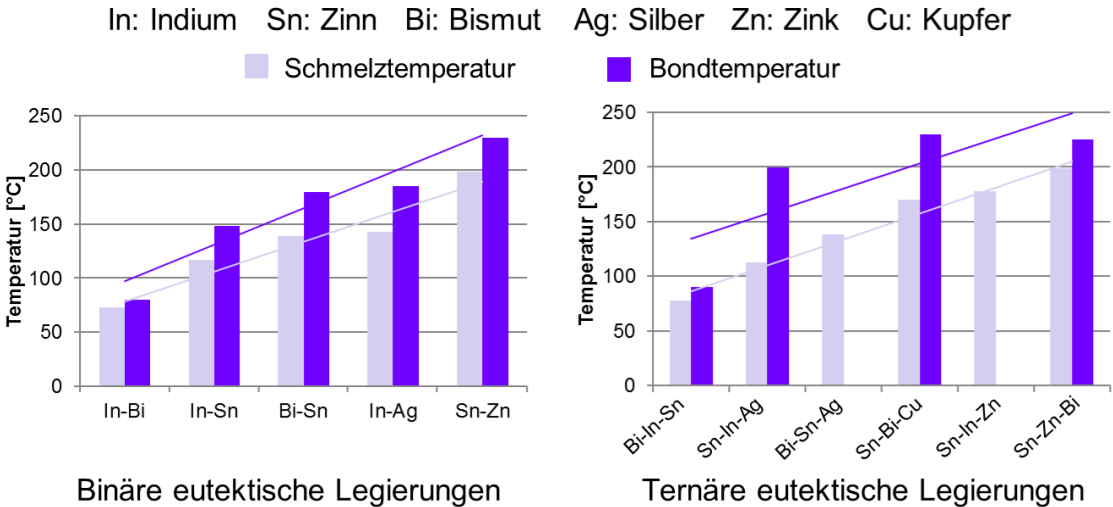


Abb. 2 : Vergleich der Bond- und Schmelztemperaturen, nach [Ask12, Cha06, Che97, Chi02, Cho00, McC94, Put05, Sen02, Tak02, Vet02]

Bei Anwendungen auf thermisch sensitiven Komponenten ist die Reduzierung der Bondtemperatur von großer Bedeutung.

2.2 Eutektische Legierungen und ihre Anwendung in der Verbindungstechnik

Eine eutektische Legierung besteht aus zwei oder mehreren Elementen, die eine vollständige Löslichkeit im flüssigen Zustand und eine vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand aufweisen [Bar12]. Im eutektischen Punkt erstarren die Legierungskomponenten gleichzeitig. Eutektische Legierungen werden aufgrund ihrer Eigenschaften für das Chipbonden eingesetzt.

2.2.1 Vorteile der eutektischen Legierungen

Eine eutektische Legierung hat im Vergleich zu ihrer Komponenten einen niedrigen Schmelzpunkt. Zum Beispiel, die Schmelztemperatur der eutektischen Sn-Pb-Legierung Sn63Pb37 (Sn: 63% und Pb: 37% in Gewichtsprozente) beträgt 183 °C während der Schmelztemperatur von Zinn (Sn) bzw. von Blei (Pb) bei 232 °C bzw. 327 °C liegt. Aus diesem Grund sind eutektische Legierungen gut geeignet um die Bondtemperaturen zu senken.

Im eutektischen Punkt erstarren alle Legierungskomponenten gleichzeitig und kristallisieren schneller als bei anderen (nicht eutektischen) Legierungen. Infolgedessen bildet sich ein feinkörniges Gefüge. Daher weisen eutektische Legierungen im Vergleich zu den nicht eutektischen Systemen bessere mechanische Eigenschaften bzw. höhere Festigkeiten und Zähigkeiten auf [Bar12].

Darüber hinaus sind eutektische Legierungen aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur sowie des nichtvorhandenen Erstarrungsintervalls sehr gut gießbar. Es bilden sich bei der Erstarrung kaum Risse oder Blasen [Bar12].

2.2.2 Phasendiagramme

Das Phasendiagramm (oder Zustandsschaubild) zeigt bei einem bestimmten Druck die Zusammensetzung eines Gefüges bei verschiedenen Temperaturen und

Konzentrationen der unterschiedlichen Komponenten. In Abb. 3 ist beispielhaft ein Phasendiagramm von zwei Werkstoffen A und B dargestellt. Das Eutektikum ist dadurch abgebildet, dass, bei der Abkühlung, die Schmelze homogen erstarrt, ohne sich in zwei Phasen zu zerlegen. die Temperatur der eutektischen Reaktion heißt eutektische Temperatur (T_e). Es entsteht ein ausgewogenes Gefüge mit neuen Eigenschaften.

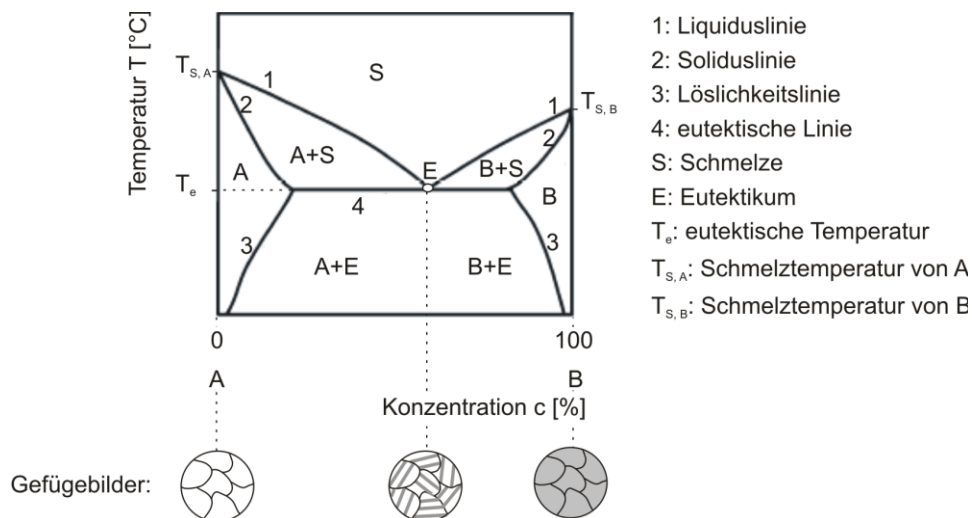


Abb. 3: Phasendiagramm nach [Wei12]

2.2.3 Beispiele von eutektischen Legierungen für das Chipbonden

In der Verbindung von elektronischen Bauteilen wurden bislang häufig Sn-Pb-Legierungen verwendet. Sie haben folgende Eigenschaften [Put01]:

- eine relativ niedrige Schmelztemperatur
- gute elektrische Leitfähigkeit,
- gute Verbindung mit Kupfer und
- gute mechanische Eigenschaften, insbesondere die Ermüdungsbeständigkeit.

Zudem sind sie kostengünstig.

Wie bereits erwähnt, wird die eutektische Sn-Pb-Legierung Sn63Pb37 bezeichnet. Diese Legierung erstarrt bei 183 °C [Put01]. Durch Zulegieren von 2 % Silber (Ag) sinkt die Schmelztemperatur der neu entstandenen Legierung Sn62Pb36Ag2 auf 179 °C. Ferner nehmen die Duktilität und die thermomechanische Beständigkeit zu [Put01].

Blei ist jedoch giftig. Daher werden in der elektronischen Industrie immer mehr bleihaltige Lote mit bleifreien Loten ersetzt. Die meist verwendeten eutektischen bleifreien Legierungen bei der Chipmontage setzen sich aus Zinn (Sn) und einem Edelmetall wie Gold (Au), Silber (Ag) oder einem Halbedelmetall wie Kupfer (Cu) zusammen [Tu07]. Zudem werden andere Metalle wie Bismut (Bi), Indium (In), Zink (Zn), Antimon (Sb) und Germanium (Ge) zulegiert um bestimmte mechanische, thermische und elektrische Eigenschaften zu erreichen. Im Folgenden werden einige Beispiele aufgelistet und erläutert:

- Die eutektische Zinn-Silber-Legierung SnAg_{3,5} hat im Vergleich zu Sn₆₃Pb₃₇ eine höhere Schmelztemperatur ($T_e = 221 \text{ °C}$) und kann Cu- und Ni-Oberflächen schlechter benetzen. Diese Legierung stellt die Basis für weitere Bondlegierungen dar. Hierzu werden drei Beispiele aufgeführt.
 - Die ternäre Legierung SnAg_{3,4}Bi_{4,8}: Hierbei senkt der Zusatz von 4,8 % Bismut (Bi) die Schmelztemperatur auf 201 °C [Put01].
 - Die ternäre Legierung SnAg_{3,5}Cu_{0,9}: Durch das Zulegieren von 0,9 % Kupfer (Cu) verbessern sich die thermomechanischen Eigenschaften. Die eutektische Temperatur liegt bei 217 °C [Tu07].
 - Die quartäre Legierung Sn_{96,2}Ag_{2,5}Cu_{0,8}Sb_{0,5}: ist sehr verbreitet auf dem Gebiet des Lötens. Sie weist im Vergleich zu ihrer Basislegierung SnAg_{3,5} gute Benetzbarkeits- und Materialermüdungseigenschaften auf. Ihre eutektische Temperatur beträgt 217 °C [Bat07].
- Die eutektische Zinn-Kupfer-Legierung SnCu_{0,7} hat einen sehr kleinen Anteil von 0,7 % an Kupfer (Cu) und ist somit schwierig zu realisieren. Darüber hinaus besteht das Risiko der Entstehung von Zinn-Whisker, -Pest und Kristallzwilling [Put01]. Die Schmelztemperatur beträgt 227 °C.
- Die eutektische Gold-Zinn-Legierung Au₇₀Sn₃₀ hat ihren eutektischen Punkt bei 280 °C. Sie hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine gute mechanische Festigkeit, ist jedoch sehr kostenintensiv [Mat93].
- Die eutektische Gold-Antimon-Legierung Au₉₈Sb₂ hat eine hohe Schmelztemperatur von 360 °C. Die Benetzbarkeit von Cu-Oberflächen mittels dieser Legierung ist nicht ausreichend untersucht. [Tu07].

- Die eutektische Gold-Germanium-Legierung Au₈₈Ge₁₂ erstarrt bei 356 °C. Diese Legierung hat relativ schlechte mechanische Eigenschaften [Tu07]. Ferner kann bei ihrer Herstellung die Oxidation von Germanium (Ge) vorkommen.

2.2.4 Bleifreie eutektische Verbindung mit niedrigen Schmelztemperaturen (unter 200 °C)

Das Bonden auf flexiblen Substraten erfolgt bei einer Temperatur unterhalb 200 °C und gehört somit zur Gruppe des Niedrigtemperaturbondens. Die hierbei eingesetzten Bondmaterialien spielen bei der Bestimmung der Bondprozess-temperatur eine wesentliche Rolle. Um diese Bondtemperatur möglichst stark zu senken werden überwiegend niedrigschmelzende Materialien verwendet. Darüber hinaus wird das eutektische Bonden zu Hilfe genommen. Ein Grund hierfür ist, dass die Prozess-temperatur unterhalb der Schmelztemperaturen der jeweiligen Komponenten liegt. In Tabelle 2 sind die bekanntesten bleifreien eutektischen Binär-Niedrigschmelztemperaturlegierungen dargestellt. Wie es hier deutlich zu erkennen ist, basieren diese Legierungen auf In, Sn und Bi.

Tabelle 2: Eutektische binäre Legierungen mit niedrigen Schmelztemperaturen

<i>System</i>	<i>Zusammensetzung [Gewicht-%]</i>	<i>Schmelztemperatur [°C]</i>
Sn-Zn	Sn ₉₁ Zn ₉	198,5
Bi-Sn	Bi ₅₈ Sn ₄₂	139
In-Bi	In ₆₆ Bi ₃₄	73
In-Sn	In ₅₂ Sn ₄₈	117
In-Ag	In ₉₇ Ag ₃	143

Im Folgenden werden diese Legierungen näher beschrieben.

2.2.4.1 Eutektische Zinn-Zink-Legierung Sn₉₁Zn₉

Zinn (Sn) ist ungiftig und dünnflüssig. Ferner hat es eine niedrige Schmelztemperatur und gute chemische Beständigkeit und Gieß-eigenschaften. Deswegen ist er für Löt-

und Bondprozesse gut geeignet [Bar12]. Zink (Zn) ist günstig, oxidiert jedoch schnell in der Luft und ist deswegen schlecht benetzbar [Bar12]. Zinn und Zink bilden zusammen, wie es in Abb. 4 dargestellt ist, die eutektische binäre Niedrigschmelztemperaturlegierung ($T_e = 198,5 \text{ °C}$) Sn91Zn9 [Tu07].

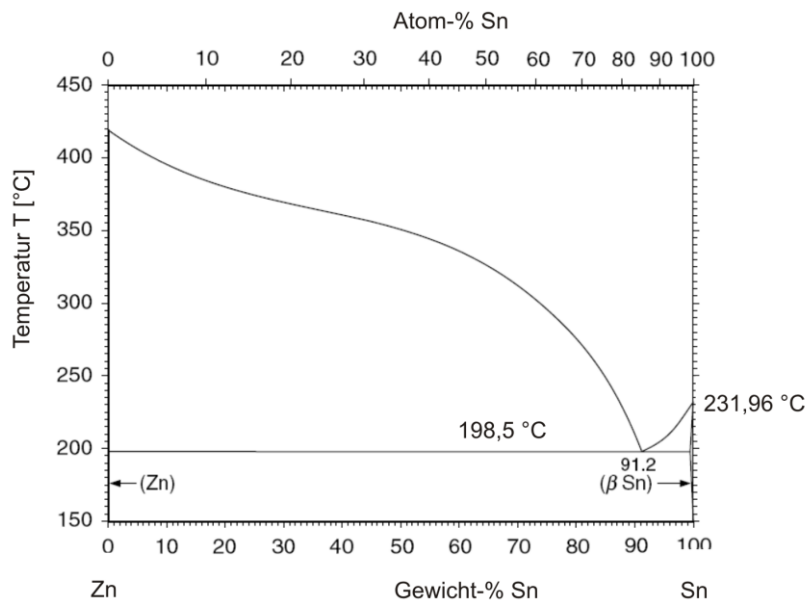


Abb. 4: Phasendiagramm von Sn-Zn-System [Wan07]

Meistens wird Bismut (Bi) dieser Legierung addiert um die Benetzbarkeit sowie die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern [Bat07]. Als Beispiel hierfür die ternäre Legierung Sn89Zn8Bi3, die bei 199 °C erstarrt und sehr oft bei Lotarbeiten wegen ihrer gut mechanischen Festigkeit verwendet wird [Sug07]. Allerdings trotz des Zusatzes von Bismut sind alle Legierungen, die Zink enthalten, korrosionsbehaftet und haben daher kurze Lebensdauer.

2.2.4.2 Eutektische Bismut-Zinn-Legierung Bi58Sn42

Bismut (Bi) charakterisiert sich durch seine gute Benetzbarkeit sowie seine niedrige Schmelztemperatur [Bat07]. Es zählt zu den wenig giftigen Schwermetallen [NN01]. Trotz dieser Vorteile hat sich Bismut in der Elektronikindustrie nicht durchgesetzt [Bat07]. Dies liegt u.a. daran, dass Bismut in Verbindung mit Blei gewonnen wird.

Bismut bildet mit Zinn (Sn) die eutektische Binär-Legierung Bi₅₈Sn₄₂, die bei 139 °C erstarrt (Abb. 5).

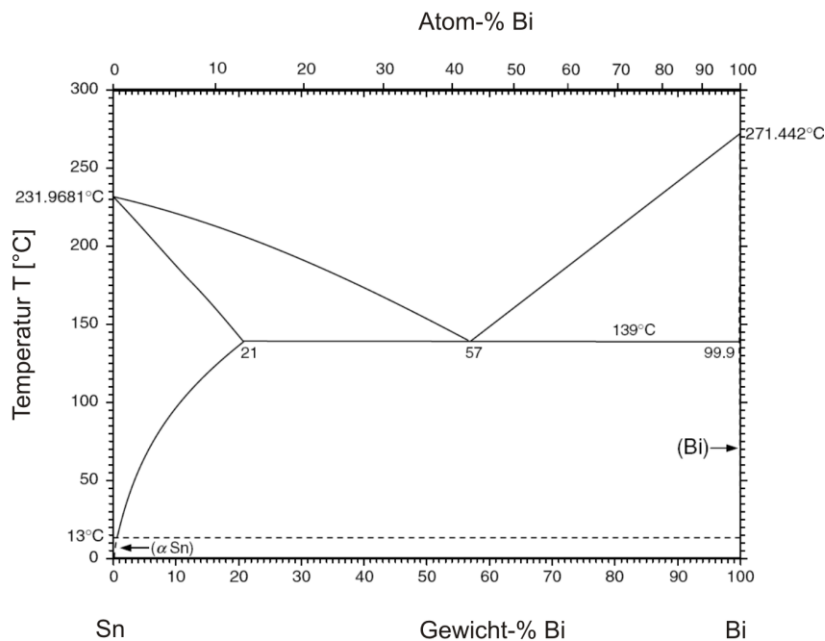


Abb. 5: Phasendiagramm vom Sn-Bi-System [Wan07]

Durch das Zulegieren von Silber (Ag) - wie im Falle der ternären Legierung Bi_{56,3}Sn_{42,7}Ag₁ mit der eutektischen Schmelztemperatur von $T_e = 138,4$ °C - kann die Duktilität verbessert werden [Lu09].

Ebenfalls der Zusatz von Kupfer (Cu) in Sn-Bi-Legierung verbessert die Duktilität [Tak02], verlangsamt jedoch die Kornvergröberung [Lu09]. Das Eutektikum SnBi_{42,8}Cu_{0,04} dieses ternären Systems hat den Schmelzpunkt bei 138,8 °C. Die Zusammensetzung der SnBiCu-Legierung wurde im Rahmen experimenteller Untersuchungen im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften optimiert [Tak02]. Die Legierung SnBi₄₀Cu_{0,1} hat die beste Festigkeit sowie Ermüdungsbeständigkeit nachgewiesen.

Durch das Zulegieren von Indium in Sn-Bi-Legierungen kann der Schmelzpunkt deutlich gesunken werden. Als Beispiel hierzu erstarrt die Legierung BiSn₄₀In₂ bei 129,68 °C [Sha13a].

Die quartäre Legierung BiSn₃₈In₂Ag₂ wurde experimentell untersucht [Sha13a]. Während der Zusatz von Indium die Schmelztemperatur auf 131 °C senkt, trägt der

Zusatz von Silber zur Reduktion des elektrischen Widerstandes bei. Diese Legierung hat im Vergleich zur binären Bi-Sn-Legierung und zu den ternären Bi-Sn-Ag- sowie Bi-Sn-In-Legierungen eine bessere Benetzung sowie bessere mechanische Eigenschaften.

2.2.4.3 Eutektische indiumbasierte Binär-Legierungen

Indium (In) hat eine sehr hohe Duktilität und eine niedrige Schmelztemperatur von 157 °C [Hum05]. Trotz seiner hohen Anschaffungskosten wird es als Basiskomponente bei eutektischen Niedrigschmelztemperaturlegierungen eingesetzt. Die bekannten Metalle, die mit Indium legiert werden können, sind Blei, Silber, Zinn, Gold und Bismut [Hum05, Soh07]. In der Industrie sind indiumbasierte Legierungen - trotz relativ langer Lebensdauer, hoher Beständigkeit und guten mechanischen Eigenschaften - weniger verbreitet als die zinnbasierte Legierungen [Che97].

- Indium-Zinn-Legierungen

In-Sn-Legierungen haben generell eine niedrige mechanische Festigkeit [Lam02]. Das System In-Sn hat die eutektische Zusammensetzung In_{50,9}Sn_{49,1} mit dem Schmelzpunkt 117 °C [Mas91].

In der Praxis wird jedoch eher die Legierung In₅₂Sn₄₈ verwendet [Lam02]. Diese schmilzt bei 120 °C. Neben der Schmelze und den beiden terminalen Festphasen enthält das In-Sn-System - wie es im Phasendiagramm (Abb. 6) deutlich zu erkennen ist - zwei Zwischenphasen, beide formen sich durch peritektische Reaktionen aus der Schmelze und einer Festphase. Bei einer Temperatur von 120 °C zerfällt die erstarrende Schmelze der Legierung In₅₁Sn₄₉ in zwei Zwischenphasen β und γ [Bat07].

Durch den Zusatz von Silber (Ag), Bismut (Bi), Antimon (Sb) und Zink (Zn) in In-Sn-Legierung können ternäre Legierungen für Lötanwendungen hergestellt werden [Ohn00]. Abb. 7 zeigt den Einfluss des Zusatzes der jeweiligen Komponente auf die Schmelztemperatur der entstandenen Ternär-Legierungen [Ohn00].

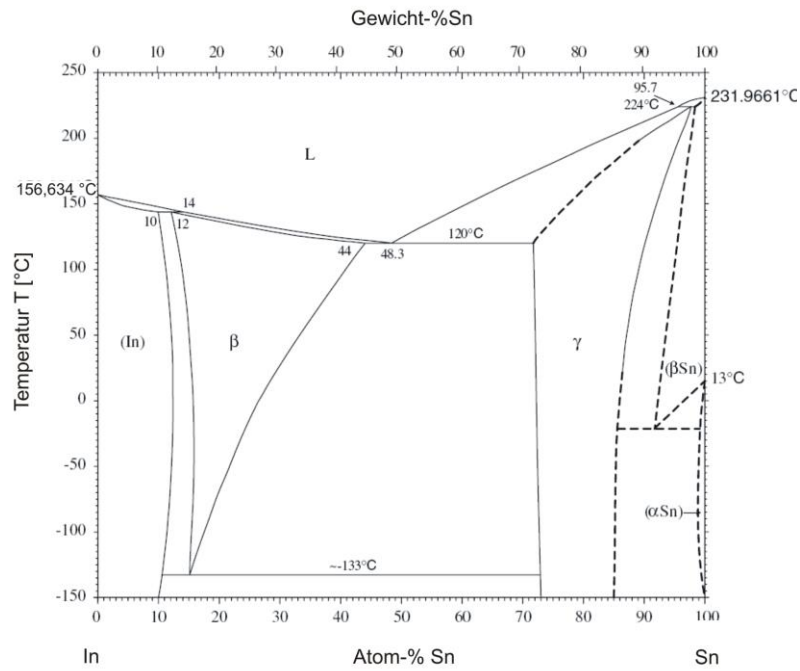


Abb. 6: Phasendiagramm vom In-Sn-System [Wan07]

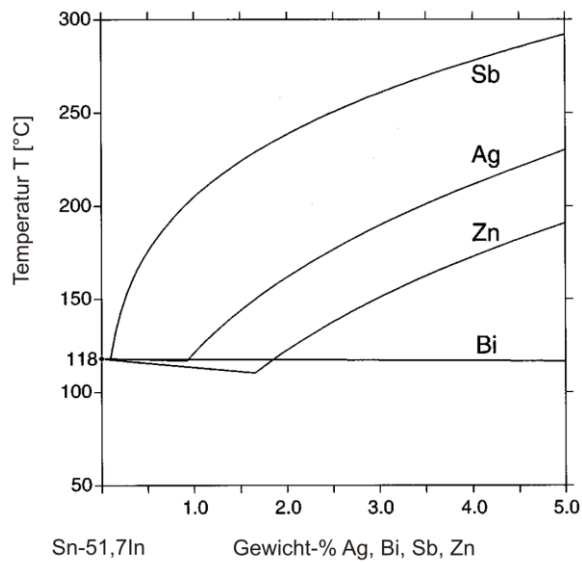


Abb. 7: Einfluss der Zusatzkomponenten Ag, Bi, Sb und Zn auf die Schmelztemperatur der entstandenen Ternär-Legierung [Ohn00]

- Indium-Bismut-Legierungen

Abb. 8 zeigt, dass In-Bi-System drei Eutektika bildet. Das erste liegt bei einer Konzentration an Indium zwischen 34,5 % und 36 % und hat seinen Schmelzpunkt bei ca. 110 °C. Mit dieser Zusammensetzung ist die In-Bi-Legierung bei Raumtemperatur nicht stabil und scheidet eine Bi- oder Bi-reiche-Phase ab [Fle84]. Das zweite besteht aus einer Konzentration an Indium von 51,8 % bis 53 % und erstarrt bei 89 °C [Per02]. Das dritte hat die Zusammensetzung In₆₆Bi₃₄ und eine Schmelztemperatur von 73 °C und wird als Bondlegierung genutzt [Lam02].

Durch den Zusatz von Zinn (Sn) in In-Bi-Legierung kann die mechanische Festigkeit der Bondverbindung verbessert werden. Die ternäre In-Bi-Sn-Legierung hat zwei Eutektika [Fab07]. Ausschließlich das zweite bei 77 °C mit der Zusammensetzung Bi_{57,2}In_{24,8}Sn₁₈ ist für Bondarbeiten relevant [Sen02].

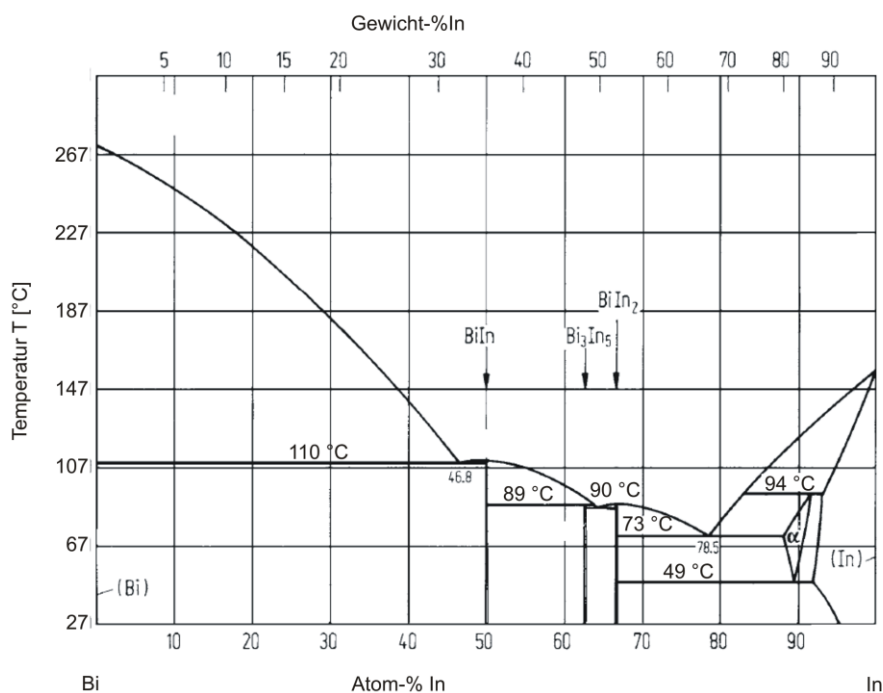


Abb. 8: Phasendiagramm vom In-Bi-System nach [Per02]

- Indium-Silber-Legierungen

Indium ist schnell oxidierbar. Daher wird es oft mit Gold oder Silber legiert [Che97]. Ferner durch den Zusatz von Silber verbessern sich die mechanische Festigkeit

sowie die Ermüdungsbeständigkeit nach vielen thermischen Zyklen [Bin08]. Jedoch mit Zunahme des Silberanteils sinken die elektrische und thermische Leitfähigkeit der entstandenen Legierungen [Ask12].

Das Phasendiagramm vom In-Ag-System ist in Abb. 9 dargestellt. Im Eutektikum ist der Anteil an Indium 97%. Hierbei beträgt die Schmelztemperatur 144 °C [Che97].

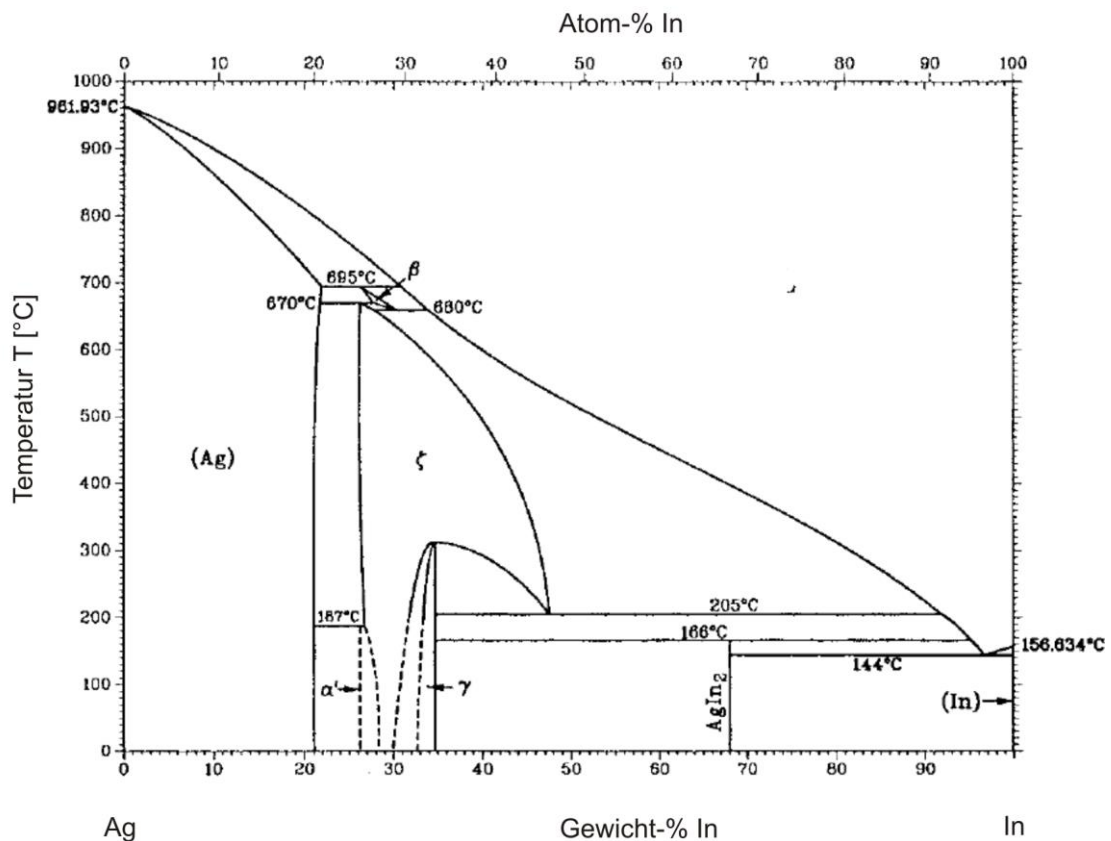


Abb. 9: Phasendiagramm von In-Ag-System [Che97]

2.3 Metallisierung der Bondpartner

Die Metallisierung der Bondpartner ist das Einbringen von einer dünnen Schichte aus Metall auf die Oberfläche der jeweiligen Komponente (Chip oder Substrat). Die wesentlichen Beschichtungsmethoden in der Mikroelektronik sind Galvanisieren, PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition) und die CVD-Verfahren (Chemical Vapor Deposition) [Dil05, Völ00].

- Beim Galvanisieren werden reinelementige metallische Schichten durch Elektrolyse auf leitenden Materialien abgeschieden.
- Bei den CVD-Verfahren werden durch eine chemische Reaktion Festkomponenten von Metallen oder Legierungen aus einer Gasphase auf einem Werkstoff aufgetragen. Die Prozesstemperaturen betragen normalerweise zwischen 500 °C und 1200 °C, können aber durch spezielle Verfahren wie das plasmaunterstützte CVD-Verfahren (PE-CVD) gesenkt werden. Dies ermöglicht die Verwendung dieser Methode zur Metallisierung von Kunststoffen.
- Die PVD-Verfahren sind hauptsächlich Verdampfungs- und Sputterverfahren. Sie unterscheiden sich von CVD-Verfahren indem das Beschichtungsmaterial durch physikalische Phänomene (u.a. Lichtbogen, Elektronenstrahl, Laser) in die Gasphase überführt wird. Die Prozesstemperaturen sind niedriger als bei den anderen Verfahren. Daher sind die PVD-Verfahren bevorzugt bei der Beschichtung von Polymeren.

2.4 Polymere

2.4.1 Allgemeine Eigenschaften

Kunststoffe sind makromolekulare Stoffe, die ganz oder teilweise organisch aufgebaut sind, d.h. Kohlen- und Wasserstoff enthalten [Deo03]. Ein Polymermolekül entsteht aus einer Kette von wiederholten Einheiten (Monomere) die chemisch oder physikalisch miteinander verbunden sind. Es gibt hauptsächlich zwei Arten von Bindungen zwischen den Bestandteilen von Polymeren [Wei12]:

- Primärbindungen: Diese stellen die starken Elektronenpaarverbindungen zwischen den Kettengliedern dar.
- Sekundärbindungen: Diese bezeichnen die schwachen Verbindungen zwischen den Ketten.

Die Makroskopischen Eigenschaften von Polymere - wie die Dauergebrauchstemperatur, die Wärmeformbeständigkeit oder die elektrische

Leitfähigkeit - sind abhängig von den Bindungskräften und -arten, die auf der mikroskopischen Ebene auftreten. Mit zunehmender Kettenlänge steigen die Sekundärbindungen und somit die Zugfestigkeit.

Durch die Erwärmung des Polymers werden die Schwingungen der einzelnen Atome stärker [Wei12]. Ferner gleiten die Ketten gegeneinander und dies führt zu einer Schwächung der Bindungen. Bei erhöhten Temperaturen versagen sogar die Primärbindungen und so verliert das Polymer seine wesentlichen physikalischen Eigenschaften.

Zur Charakterisierung von Polymeren werden die folgenden Eigenschaften betrachtet [Bar12, Dom08]:

- optisch (äußere Merkmale wie Oberflächenbeschaffenheit, Einfärbbarkeit und Durchsichtigkeit),
- chemisch (z.B. chemische Beständigkeit und Wasseraufnahme),
- physikalische (wie Dichte)
- mechanisch (wie Festigkeit, Spannungsdehnungsverhalten und Schlagzähigkeit),
- thermisch (z.B. Glasübergangs- und Dauergebrauchstemperatur, Wärmeformbeständigkeit sowie Wärmeleitfähigkeit) und
- elektrisch (wie Isolationswiderstand, elektrische Durchschlagfestigkeit, Kriechstromfestigkeit und Dielektrizität).

Bei der Herstellung von flexiblen Leitern aus Polymeren sind überwiegend die thermomechanischen Eigenschaften entscheidend. Hierzu zählt die Glasübergangstemperatur (T_g) eines Polymers. Unterhalb dieser Temperatur wird ein zäher Kunststoff glasartig spröde [Mar09]. Eine weitere wichtige Größe ist die Dauergebrauchstemperatur, welche die chemische Stabilität des Polymers bei erhöhten Temperaturen beschreibt [Mar09]. Ebenfalls von besonderer Bedeutung ist die thermisch bedingte Ausdehnung eines Polymers. Hierbei wird dieses Materialverhalten mit dem linearen Ausdehnungskoeffizienten α als Maß für die Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben (Gl. 1) [Mar09].

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \left[\frac{1}{K} \right]$$

Gl. 1

Hierbei stellt Δl die Längenänderung dar, l_0 die Anfangslänge und ΔT die Temperaturdifferenz.

Eine weitere wesentliche Größe zur Charakterisierung der mechanischen Festigkeit von Polymeren ist der Elastizitätsmodul (E-Modul). Die Bestimmung des E-Moduls kann statisch (z.B. mittels Zugversuch) oder dynamisch (z.B. mittels Ultraschallversuch) erfolgen.

In Tabelle 3 sind einige Beispiele von Polymeren mit dem entsprechenden Baustein aus den jeweiligen Monomeren eingetragen. Ferner sind einige mechanische und thermische Eigenschaften aufgelistet. Beim Bonden auf flexiblen Polymersubstraten darf die Bondtemperatur die Glasübergangstemperatur (T_g) nicht übersteigen.

Im Allgemeinen sind die Eigenschaften eines Polymers temperaturabhängig. In diesem Sinne ist es anzumerken, dass Polyethylen und Polypropylen bei Raumtemperatur zäh und flexibel sind. Dagegen sind Polystyrol und Polyvinylchlorid hart und spröde [Dom08].

In Abb. 10 ist der Verlauf des E-Moduls unterschiedlicher Polymere über die Temperatur dargestellt [Dom08]. Ferner zeigt das Bild die Anwendungs- und Hauptverweichungsbereiche dieser Polymere. Es ist zu sehen, dass der Anwendungsbereich von Duroplaste und amorphen Thermoplaste unterhalb der Glasübergangstemperatur liegt. In diesem Bereich haben sie relativ erhöhte E-Modulwerte. Manche Duroplaste können sogar oberhalb der Glasübergangstemperatur angewandt werden. Elastomere sind oberhalb des Glasübergangsbereiches anwendbar. Sie haben einen niedrigen E-Modul und sind bis zur Zersetzung gummielastisch. Ferner es ist zu erkennen, dass Elastomere und Duroplaste im Gegensatz zu den Thermoplasten nicht schmelzbar sind.

Tabelle 3: Eigenschaften von einigen Polymeren, nach [Dom08, Mar09]

Polymer	Baustein	Art	Glasübergangstemperatur T_g [°C]	E-Modul [N/mm ²]	Ausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}/K$]
Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)	C ₂ H ₄	teilkristallin	-110	200 - 500	250
Polypropylen (PP)	C ₃ H ₆	teilkristallin	0	1100 - 1300	150
Polystyrol (PS)	C ₈ H ₈	amorph	100	3200 - 3250	70
Polyvinylchlorid (PVC)	C ₂ H ₃ Cl	amorph	80	1000 - 3500	70 - 80
Polyethylenterephthalat (PET)	C ₁₀ H ₈ O ₄	teilkristallin	70	3100	70
Polyamid-6 (PA6)	C ₆ H ₁₁ NO	teilkristallin	50	1400	80
Polymethylmethacrylat (PMMA)	C ₅ H ₈ O ₂	amorph	106	3300	70
Polycarbonate (PC)	-	amorph	148	2100 - 2400	60 - 70

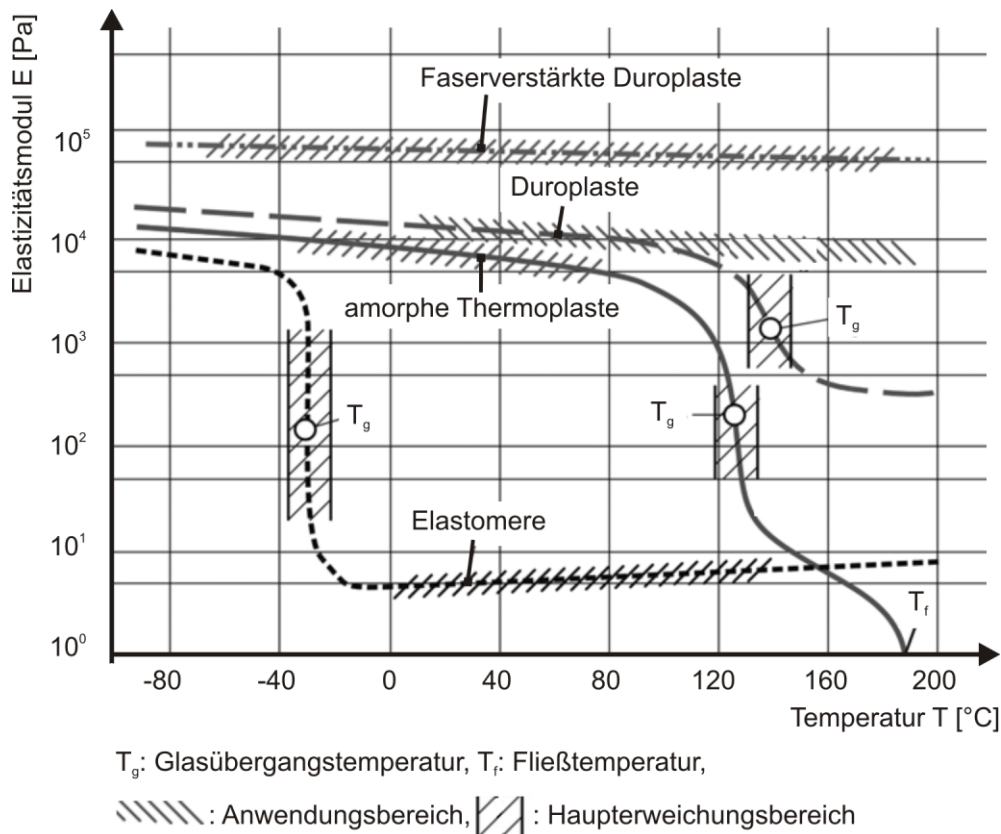


Abb. 10: Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls verschiedener Polymere [Dom08]

2.4.2 Einteilung der Polymerwerkstoffe

Gemäß DIN 7724 erfolgt die Einteilung von Polymerwerkstoffen nach ihrem temperaturabhängigen mechanischen Verhalten in vier Gruppen (Duroplaste, Elastomere, thermoplastische Elastomere und Thermoplaste) [Kie08].

2.4.2.1 Duroplaste

Duroplaste (auch Duromere) charakterisieren sich dadurch, dass ihre Makromoleküle sehr stark miteinander vernetzt sind, was zu einer hohen Härte und Sprödigkeit führt. Die Glasübergangstemperatur (T_g) liegt meistens über der Zerstörungstemperatur. Deswegen sind sie nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformbar [Mar09].

Duromere finden Verwendung bei der Herstellung von Gehäusen von elektronischen Geräten, Schutzhelmen, Karosserieteilen, etc.

2.4.2.2 Elastomere

Bei den Elastomeren sind die Makromoleküle miteinander leicht vernetzt. Daher verfügen sie über ein gummielastisches Verhalten. Sie können nach einer Zug- oder Druckbelastung wieder ihre ursprüngliche Form finden.

Die Glasübergangstemperatur liegt unterhalb der Raumtemperatur [Mar09]. Elastomere sind nicht schmelzbar. Sie dienen zur Herstellung von Reifen, Gummibänder, Dichtungsringen, etc.

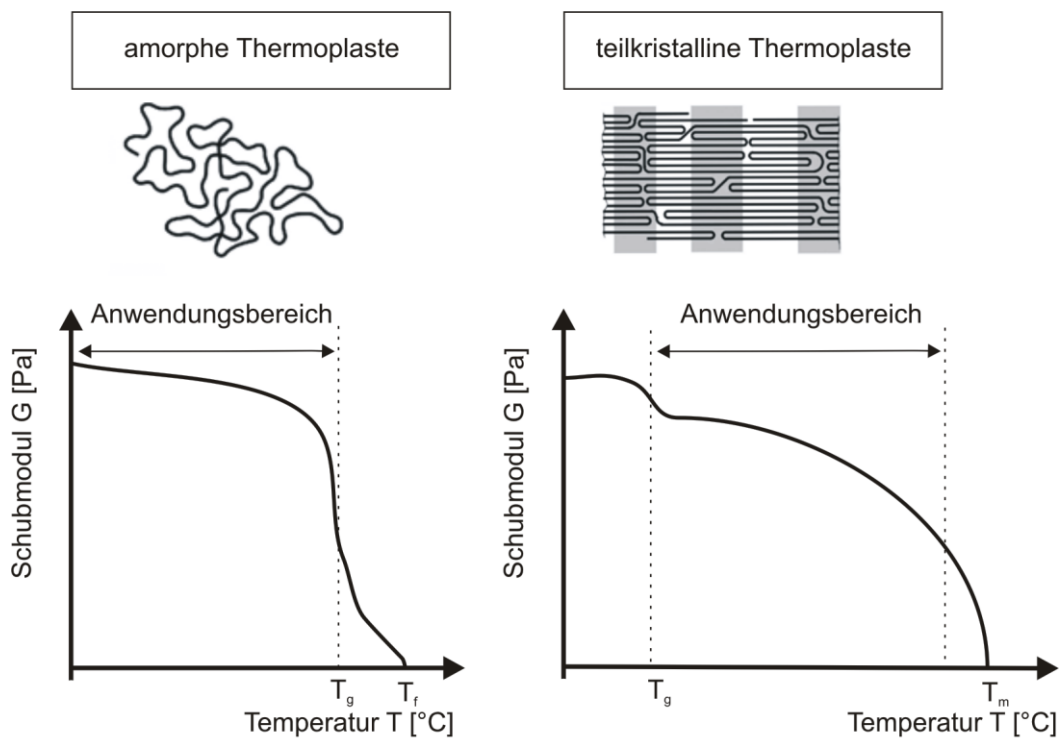
2.4.2.3 Thermoplastische Elastomere

Thermoplastische Elastomere (TPE) sind bei Raumtemperatur elastisch wie klassische Elastomere, sie lassen sich jedoch bei einer Erwärmung plastisch verformen. Sie verfügen also über ein thermoplastisches Verhalten. Sie können wieder eingeschmolzen und wieder verarbeitet werden [Mar09].

2.4.2.4 Thermoplaste

Thermoplaste bestehen aus linearen Makromolekülketten, die schwach miteinander verbunden sind. In einem bestimmten Temperaturbereich verfügen sie über ein thermoplastisches Verhalten, wobei sie leicht verformbar sind. Sie können wieder eingeschmolzen und verarbeitet werden solange die Temperatur der thermischen Zersetzung nicht überschritten ist.

Thermoplaste lassen sich in amorphen und teilkristallinen Thermoplasten einteilen [Dom08]. Bei der ersten Gruppe sind die Makromolekülketten verknäult. Die Gebrauchstemperatur liegt unterhalb der Glasübergangstemperatur. Die zweite Gruppe hat parallel ausgerichtete Ketten. Ihre Gebrauchstemperatur liegt zwischen der Glasübergangs- und der Erweichungstemperatur. In Abb. 11 ist der Unterschied zwischen den Strukturen der beiden Gruppen von Thermoplasten sowie die Einwirkung auf dem mechanischen Verhalten gezeigt. Darüber hinaus es ist hier zu erkennen, dass amorphe Thermoplaste unterhalb der Glasübergangstemperatur dagegen teilkristalline Thermoplaste oberhalb der Glasübergangstemperatur angewandt werden.



T_g : Glasübergangstemperatur, T_f : Fließtemperatur, T_m : Schmelztemperatur

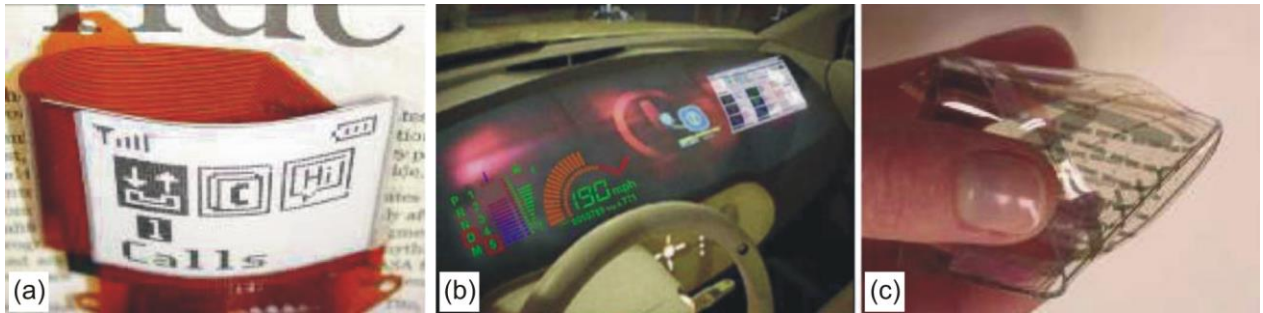
Abb. 11: Vergleich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten [Dom08]

2.4.3 Polymere für die Herstellung von flexiblen Leitern

Zur Herstellung von flexiblen Leitern ist der Einsatz von Kunststoffen mit gewisser Flexibilität und Zähigkeit bei Raumtemperatur sehr wichtig. Flexible Substrate können je nach Verformbarkeit in drei Gruppen klassifiziert werden [Won09]:

- biegsam oder aufrollbar,
- dauerhaft verformbar und
- elastisch dehnbar.

In Abb. 12 sind einige Anwendungsbeispiele von flexiblen Leitern abgebildet.



(a) Ein biegbares Armband-Display, (b) Konzept für eine anpassbare digitale Armaturentafel, (c) Dehnbare integrierte Schaltung auf einem Elastomer

Abb. 12: Beispielsanwendungen von flexiblen Substraten [Won09]

Für die Herstellung von Folienleitern sind elastisch dehnbare Polymere gefragt. Deswegen sind Thermoplaste für diese Anwendungen sehr gut geeignet. Wong und Salleo haben hierzu folgende Beispiele genannt [Won09]:

- Teilkristalline Thermoplaste (wie Polyethylenterephthalat PET und Polyethylennaphthalat PEN)
- Amorphe Thermoplaste (wie Polycarbonate PC, Polyethersulfone PES)
- Thermoplaste mit erhöhter Glasübergangstemperatur (wie Polyimide PI, Polyarylat PAR, Cyclo-Olefin-Copolymere COC)

Foliensubstrate müssen außerdem isolierend sein. Diese Eigenschaft ist bei allen Polymeren vorhanden, weil in ihrem Molekülverband keine frei beweglichen Elektronen vorhanden sind [Bar12].

Eine weitere Eigenschaft, die für einige Anwendungen von Polymeren sehr wertvoll ist, stellt die Durchsichtigkeit dar [Bar12]. So sind beispielsweise amorphe Thermoplaste transparent und können daher als Leiter für Lichtwellen angewendet werden.

3 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel dieser Bachelorarbeit ist, das eutektische Bonden auf flexiblen Polymer-Substraten grundlegend experimentell zu untersuchen. Hierzu sind Legierungen mit niedrigen Schmelztemperaturen unumgänglich. Im Rahmen dieser Studie werden ausschließlich binäre eutektische Legierungen untersucht.

Für die flexiblen Substrate werden Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonate (PC) als Grundmaterial gewählt. Diese haben eine Glasübergangstemperatur von 106 °C bzw. 148 °C (siehe Tabelle 3). Da beim Bonden auf flexiblen Polymer-Substraten die Bondtemperatur weit unter der Glasübergangstemperatur liegen soll um bleibende Veränderungen im Polymer zu vermeiden, bieten sich aus Tabelle 2 im Wesentlichen die eutektischen binären In-Sn- und In-Bi-Legierungen. Die erste hat ihr Eutektikum bei 117 °C und eignet sich somit ausschließlich für das Bonden auf PC-Substraten. Die zweite hat bei 73 °C den ersten eutektischen Punkt und ist also für das Bonden auf PC- sowie PMMA-Substraten gut geeignet.

Um jedoch die Prozessparameter experimentell zu optimieren, erfolgt - aufgrund der einfachen Handhabung - zunächst das Bonden mit den bereits genannten eutektischen Binärlegierungen auf starren Substraten. Hierbei wird der jeweilige Einfluss der wesentlichen Prozessparameter (Bondzeit, Bondtemperatur und Kontaktdruck) auf die Qualität der Bondverbindung untersucht.

Für die Bewertung der Bondverbindung werden sowohl mechanische als auch elektrische Kriterien herangezogen. Zum einen sollen Scherversuche zur Bestimmung der mechanischen Stabilität der Bondverbindung erfolgen. Zum anderen wird der elektrische Widerstand zur Beurteilung der elektrischen Eigenschaften der Verbindung gemessen.

Anschließend erfolgen mit den zuvor ermittelten Prozessparametern Bondversuche auf flexiblen Substraten. Da die mechanischen Eigenschaften und insbesondere die Elastizität und Festigkeit der flexiblen und starren Substrate stark voneinander abweichen und somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet ist, wird der Kontaktdruck erst beim Bonden auf flexiblen Trägern variiert und dessen Einfluss auf die Bondverbindung experimentell untersucht.

4 Aufbau der Versuche

Im Rahmen dieser Arbeit steht das Bonden mit der binären eutektischen In-Sn- und In-Bi-Legierung, aufgrund ihrer niedrigen Schmelztemperaturen, im Vordergrund. Hierzu sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen vorgesehen. Abb. 13 stellt den Aufbau der dafür hergestellten Proben dar.

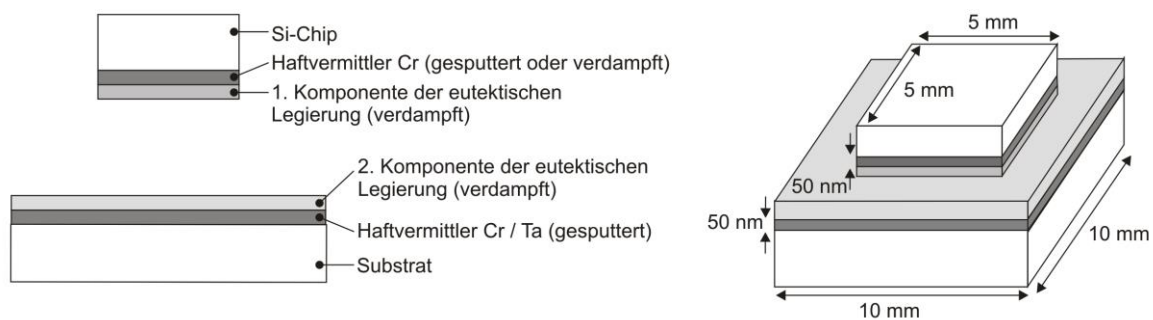


Abb. 13: Aufbau der Bondpaarung

Wie es hier deutlich zu erkennen ist, sind die Chips 5 mm x 5 mm groß und bestehen aus Silizium (Si). Generell eignet sich Si als Basismaterial für die Herstellung von Chips, da es ein Halbleitermaterial, hochtemperaturstabil, resistent gegen Umwelteinflüsse, kostengünstig und ein Isolator nach thermischer Oxidation ist [Völ100].

Die Chips wurden mit einer dünnen Schicht (50 nm) aus reinem Chrom (Cr) als Haftvermittler versehen und dann mit der ersten Komponente der eutektischen Legierung durch Verdampfen beschichtet. Die Dicke dieser Schicht hängt von der eutektischen Zusammensetzung.

Die Substrate sind 10 mm x 10 mm groß. Bei den starren Substraten wurden in dieser Studie sowohl Cr als auch Tantal (Ta) als Haftvermittler untersucht. Das besser geeignete Haftbeschichtungsmaterial wurde dann für die experimentellen Arbeiten mit flexiblen Substraten verwendet. Die Substrate wurden mit der zweiten Komponente der eutektischen Legierung ebenfalls durch Verdampfen beschichtet.

4.1 Vorbereitung der Chips und Substrate

Das Grundmaterial Si der Chips und der starren Substrate wird in Scheibenform (Wafer) geliefert. Die verwendeten Wafers haben einen Durchmesser von 100 mm und eine Dicke von 500 μm , sie sind geläppt und von einer Seite poliert. Für die Herstellung der flexiblen Substrate werden dagegen Polymer-Folien mit einer Dicke von 250 μm verwendet und in Wafer-Form geschnitten. Abb. 14 zeigt die Fertigungsschritte zur Vorbereitung der Chips und Substrate aus den Wafern. Nach dem Reinigen und dem anschließenden Ätzen werden die Wafer mit Legierungskomponenten beschichtet. Danach erfolgt die Lackierung der Si-Wafer um eine Oxidation der Beschichtungsmetalle zu unterbinden. Polymer-Substrate werden dagegen nicht lackiert, da sie beim Endreinigen durch das verwendete Lacklösemittel aufgelöst werden können. Sie werden jedoch nach dem Beschichten im Vakuum gehalten um eine Oxidation der Beschichtungsmetalle zu vermeiden.

Anschließend erfolgen das Vereinzeln und die Endreinigung der Chips und Substrate. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zur Vorbereitung der Chips und Substrate aus den Wafern näher beschrieben.

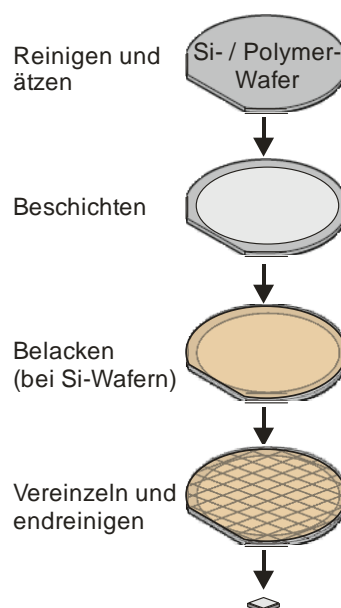


Abb. 14: Vorbereitung der Chips und Substrate

4.1.1 Reinigung und Ätzen

Trotz der Arbeit im Reinraum sind die Wafer für die Herstellung der Chips und der Substrate, um makro- sowie mikroskopische Verschmutzungen zu beseitigen, gründlich zu reinigen. Dies ist für das anschließende Beschichten und Bonden zwingend erforderlich.

4.1.1.1 Si-Wafer

Si-Wafer werden zuerst mit Aceton gespült um organischen Verunreinigungen zu entfernen. Mit dem Isopropanol erfolgt die Endreinigung, bei der die Acetonspuren beseitigt werden. Der Trocknungsprozess wird beschleunigt durch die Anwendung von Stickstoff. Mit dem Plasmaätzen an der Sputteranlage (SENVAC), welche in Abb. 15 dargestellt ist, wird dieser Schritt abgeschlossen.



Abb. 15: Am IMPT zur Verfügung stehende Sputteranlage (SENVAC)

Dieser Prozess erfolgt unter Argon und dauert 3 min bei einer Leistung von 300 W und einer Durchflussrate von 50 sccm. Dabei werden Ionen des hochenergetischen Argonplasmas in Richtung des Wafers beschleunigt. Durch den Prall wird Material aus der Wafer-Oberfläche abgetragen [Dil05]. Die entstehende dreidimensionale Strukturierung der Wafer-Oberfläche führt zu einer deutlich Verbesserung der Adhäsion der aufzubringenden Metallschichten.

Da Bismut im Vergleich zu den restlichen angewandten Metallen ein schlechteres Haftvermögen zu Silizium aufweist, wurden die Wafer vor der Bi-Beschichtung stattdessen an der Ionenstrahlätzanlage (COMMONWEALTH SCIENTIFIC CORPORATION - ION BEAM ETCHING), welche in Abb. 16 gezeigt ist, über einen längeren Zeitraum (10 min) ebenfalls mit Argon bei einer Stromstärke von 100 mA geätzt.

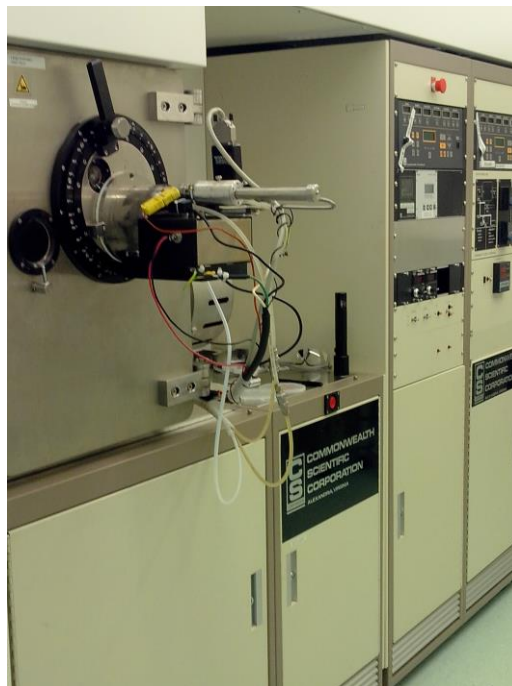


Abb. 16: Angewandte Ionenstrahlätzanlage (COMMONWEALTH SCIENTIFIC CORPORATION - ION BEAM ETCHING)

4.1.1.2 Polymer-Wafer

Da die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Polymere für die Herstellung der flexiblen Substrate in Aceton und Isopropanol löslich sind, wurden die Polymer-Wafer zunächst mit Ethanol und anschließend mit destilliertem Wasser gereinigt. Um die Haftfähigkeit der Oberfläche des Substrates zu erhöhen wird ein Plasmaätzen auf beiden Seiten des Substrates durchgeführt. Bei diesem Prozess werden Verunreinigungen aus der Oberfläche des Polymers entfernt sowie eine schwache Grenzschicht des Polymers abgetragen. Das führt zu keine Änderung der Quer- und Dickeneigenschaften der Polymerfolie sondern nur zur Aufräuen der Oberfläche. Das

Ätzen erfolgt über eine Zeitdauer von 3 min unter Sauerstoff bei einer Leistung von 150 W und einer Durchflussrate von 10 sccm.

4.1.2 Beschichtung

Auf die Si-Wafer und auf die flexiblen Substrate wird zunächst eine dünne Haftvermittlerschicht (50 nm) mittels Versputtern an der Sputteranlage (SENVAC), welche in Abb. 15 dargestellt ist, aufgebracht. Hierbei wurde Argon als Inertgas eingesetzt mit einer Durchflussrate von 50 sccm. Ferner betrag die Leistung 400 W und die Beschichtungszeit 60 s. Bei den starren Si-Substraten wurden zwei Haftvermittler nämlich Chrom (Cr) und Tantal (Ta) untersucht.

Anschließend wird eine Komponente der betrachteten eutektischen Binärlegierungen auf die Si- oder Polymer-Wafer an der Aufdampfanlage (LAB500PLUS - LEYBOLD), welche in Abb. 17 gezeigt ist, aufgedampft.



Abb. 17: Am IMPT vorhandene Aufdampfanlage (LAB500PLUS - LEYBOLD)

Die Dicke der jeweiligen Beschichtung wurde, wie bereits erwähnt, aus der eutektischen Legierungszusammensetzung gemäß bestimmt.

$$D_B = \frac{\rho_A \cdot D_A \cdot m_B}{\rho_B \cdot m_A} \quad \text{Gl. 2}$$

Hierbei stellen D_A und D_B die Dicken der A- und B-Schicht dar, m_A und m_B die Gewichtprozent im eutektischen Punkt, ρ_A und ρ_B die Materialdichten der Legierungselemente A und B.

Es ist hier zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Beschichtungsdicke die Duktilität der Verbindungsstelle steigt und ihre Wärmeleitfähigkeit abnimmt [Völ00]. Da in dieser Arbeit die eutektischen binären In-Sn- und In-Bi-Legierungen zu untersuchen sind, wurden jeweils In-, Bi- und Sn-Beschichtungen durchgeführt. Die für das Aufdampfen gewählten Prozessparameter sind tabelliert. (Tabelle 4).

Tabelle 4: Parameter für das Aufdampfen der In- und Sn-Beschichtung

<i>Parameter</i>	<i>In</i>	<i>Sn</i>
Schichtdicke nach XTC [μm]	2	2
Abscheiderate [Å/s]	5	1,2
Strahlleistung [kW]	0,2	1,4

Im Gegensatz zu den In- und Sn-Beschichtungen ist die Bi-Beschichtung noch nicht umfassend erforscht. Aufgrund der polykristallinen Struktur von Bi nach dem Verdampfen ist eine homogene Dünnschicht nur mit besonderen Maßnahmen erreichbar [Ahn12, Yan99]. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept zum Aufbringen der Bi-Beschichtung erforscht, das in Kapitel 5.3.1 ausführlich beschrieben wird.

4.1.3 Belacken der beschichteten Si-Wafer

Um eine Oxidation der Beschichtung (insbesondere bei In) sowie Kratzer beim Trennschleifen zum vereinzeln der Chips oder der starren Substrate zu vermeiden, werden die Si-Wafer mit dem Positivlack (MICROCHEMICALS - AZ 9260) lackiert. Die Lackschicht ist dann vor dem Bonden bei der Endreinigung zu entfernen. Da dabei die gewählte Polymere PMMA und PC auch aufgelöst werden, erfolgte der Schritt des Lackierens bei den Polymer-Substraten nicht. Um in diesem Fall eine Oxidation der Metallbeschichtung zu unterbinden werden die Proben im Vakuum gelagert.

4.1.4 Vereinzeln und Endreinigen

Die Si-Wafer werden in einzelnen Chips oder Substraten geschnitten. Dies erfolgt bei den Polymer-Wafern mit einer Schere und bei den Si-Wafern mittels Trennschleifen. Hierzu ist die am IMPT vorhandene Trennschleifmaschine (DISCO - DAC551) zum Einsatz gekommen (Abb. 18).



Abb. 18: Am IMPT zur Verfügung stehende Trennschleifmaschine (DISCO - DAC551)

Davor werden die Si-Wafer mit der nicht behandelten Rückseite auf eine Folie geklebt damit die Chips oder die Substrate nach dem Trennen fixiert bleiben. Die Dicke der verwendeten Trennscheibe beträgt 30 μm . Ihre Kante ist mit Diamanten (Korndurchmesser zwischen 4 und 6 μm) beschichtet. Der Schnitt erfolgt durch den gesamten Wafer hindurch bis in die Oberfläche der Klebefolie. Die Trennscheibe wird ständig mit Wasser abgekühlt und somit werden die Wafer beim Trennschleifen im Gegensatz zum Laserschneiden thermisch nicht belastet.

Nach dem Vereinzeln erfolgt, wie beim Reinigen bereits beschrieben, die Endreinigung der Chips und Substrate.

4.2 Eutektisches Bonden

4.2.1 Bonden im Ofen unter mechanischem Druck

Zum Beginn der Bachelorarbeit war kein Flip-Chip-Bonder am IMPT vorhanden, daher wurden die ersten Versuche zum Bonden mit der In-Sn-Legierung auf starren

Substraten im elektrischen Ofen (LHG PRÄZITHERM - 2860 SR) durchgeführt (Abb. 19).



Abb. 19: Am IMPT vorhandener Ofen (LHG PRÄZITHERM - 2860 SR)

Die Erwärmung sowie die Abkühlung erfolgen unter Stickstoff als Schutzgas um die Oxidation der Metallbeschichtungen zu vermeiden. Wegen ungenauer Temperaturregelung war es nicht möglich einen definierten Temperaturverlauf nachzufahren. Dies führt zu Ungenauigkeiten bei den tatsächlichen Bondzeiten. Darüber hinaus konnten die Erwärmungsstrategien nicht variiert werden. Die Abkühlung der Proben erfolgt langsam im ausgeschalteten Ofen.

Für die Erzeugung eines mechanischen Drucks während des Bondens wurde das in Abb. 20 gezeigte Werkzeug angewandt. Mit diesem Werkzeug konnte der Schließdruck nicht eingestellt werden, so dass die Versuche im Hinblick auf den mechanischen Druck nicht reproduzierbar sind. Ein weiterer Nachteil lag in der inhomogenen Verteilung des Druckes über die gesamte Verbindungsfläche.

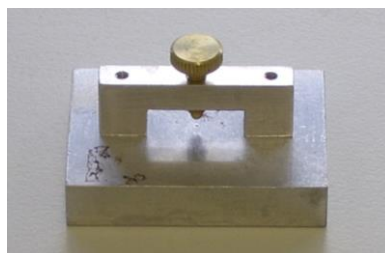


Abb. 20: Werkzeuge zur Erzeugung des mechanischen Drucks beim Bonden

4.2.2 Bonden mittels Flip-Chip-Bonder

Das Bonden mit dem Flip-Chip-Bonder ist dagegen wesentlich präziser, da das Gerät eine genaue Platzierung des Chips auf dem Substrat ermöglicht. In Abb. 22 ist der

am IMPT vorhandener Flip-Chip-Bonder (FINETECH - FINEPLACER[®] LAMBDA) gezeigt.



Abb. 21: Am IMPT vorhandener Flip-Chip-Bonder (FINETECH - FINEPLACER[®] LAMBDA)

4.2.2.1 Thermokompressionsbonden

Beim Thermokompressionsbonden können die Temperatur- sowie Druckverläufe vorprogrammiert werden. Damit werden nicht nur die Prozessparameter exakt und reproduzierbar eingestellt, sondern auch unterschiedliche Erwärmungs- und Abkühlstrategien untersucht. Mit diesem Gerät ist es möglich Chip und Substrat getrennt zu erhitzen. In Abb. 22 ist das verwendete Thermokompressionsmodul dargestellt.

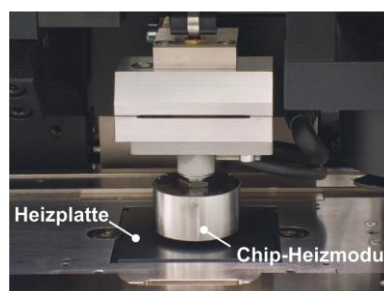


Abb. 22: Thermokompressionsbondmodul

4.2.2.2 Ultraschallbonden

Schall ist eine longitudinale Materiewelle. Für das menschliche Ohr ist der Schall in einem Frequenzbereich von 20 Hz bis ca. 20 kHz hörbar [NN02]. Wenn die Frequenz

des Schalls unterhalb von 20 Hz liegt bezeichnet man ihn als Infraschall. Bei Frequenzen über 20 kHz bezeichnet man ihn als Ultraschall (Abb. 23).

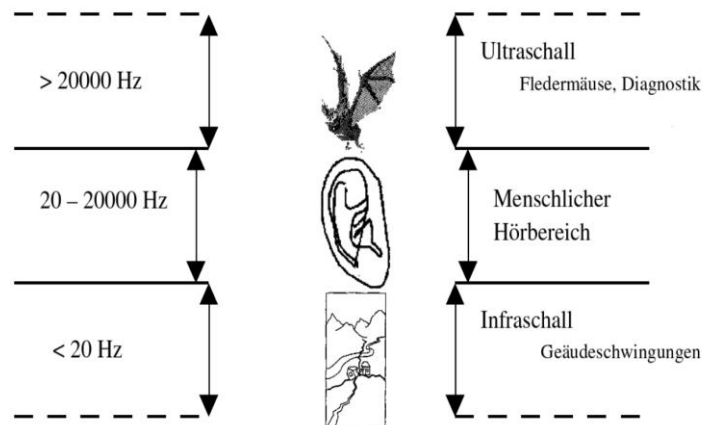


Abb. 23: Schallfrequenzbereiche

Das Ultraschallbonds ist ein Reibungsschweißverfahren [Völ00]. Mithilfe einer Sonotrode werden die Fügepartner gegeneinander gedrückt. Dann erfolgt die Zufuhr der Ultraschallenergie und die Fügepartner werden mit einer Frequenz im Ultraschallbereich parallel zueinander bewegt. Damit werden die Oxidschicht aufreißen und die Rauheit abgebaut. Die Reibungswärme und der Druck ermöglichen die Verbindung der Kontaktflächen [Völ00].

Aufgrund der entwickelten Reibungswärme nimmt die Temperatur an der Oberfläche der Fügepartner zu und kann typischerweise Werte bis zu 80 °C erreichen [Völ00]. Generell ist somit die thermische Belastung des Chips und Substrates beim Ultraschallbonds im Vergleich zum Thermokompressionsbonds deutlich niedriger. In Abb. 24 ist das benutzte Ultraschallbondmodul dargestellt.

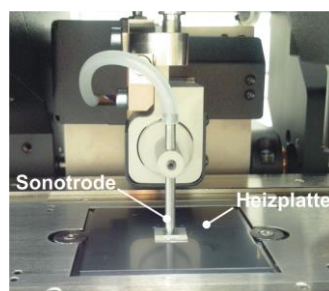


Abb. 24: Ultraschallbondmodul

4.3 Prüfung der Qualität der Bondverbindungen

4.3.1 Mechanische Festigkeit mittels Schertest

Die mechanische Stabilität der Bondverbindung ist von besonderer Bedeutung [Völ00]. Die Prüfung dieser Eigenschaften kann durch zahlreiche Testmethoden erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Schertests nach den MIL-STD-883G-Normen durchgeführt. Dieser Versuch ist in Abb. 25 schematisch dargestellt.

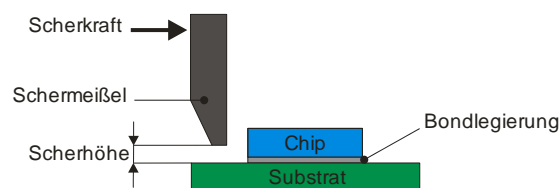


Abb. 25: Schematische Darstellung des Schertests

Die Scherhöhe entspricht der Hälfte der Chipdicke. Die hierfür eingesetzte Anlage (ROYCE - SYSTEM 552) mit dem montierten 50kg-Scherkopf ist in Abb. 26 gezeigt.

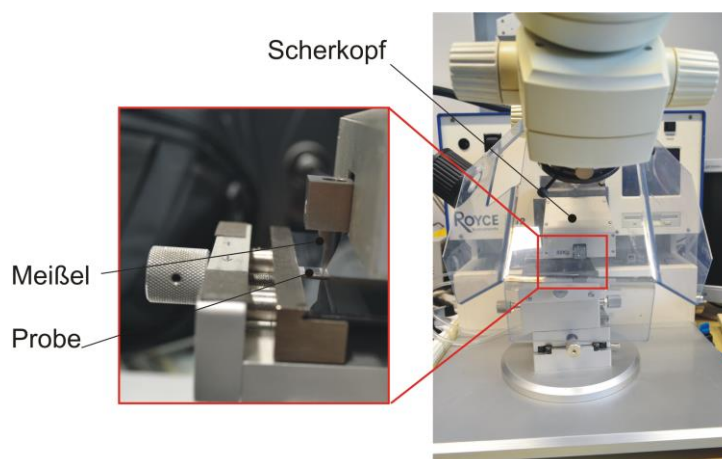


Abb. 26: Angewandte Schertestanlage (ROYCE - SYSTEM 552)

Bei dem Schertest wird die maximale Scherkraft F_m bis zum Versagen der Bondverbindung gemessen. Um die experimentellen Ergebnisse mit Messdaten aus bereits existierenden Literaturstudien vergleichen zu können, kann die

Scherfestigkeit τ gemäß Gl. 2 berechnet werden. Dabei stellt A die Bondkontaktfläche zwischen den Fügepartnern dar.

$$\tau \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{F_m [N]}{A [mm^2]} \quad \text{Gl. 3}$$

4.3.1 Optische Prüfung

Für ein besseres Verständnis der Ergebnisse des Schertests wurden die gescherten Bondproben optisch am Messmikroskop (NIKON - MM-400), das in Abb. 27 gezeigt ist, untersucht.



Abb. 27: Messmikroskop (NIKON - MM-400)

4.3.2 EDX-Analyse

Energiedispersive Röntgenspektroskopie (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, **EDX**) ist eine Materialanalysemessmethode. Hierbei wird die zu untersuchende Probe mit einem sehr fein gebündelten Elektronenstrahl energiereicher Elektronen angeregt. Dadurch wird Röntgenstrahlung einer für das jeweilige Element spezifischen Energie ausgesendet, die charakteristische Röntgenstrahlung [NN03]. Die Auswertung des Röntgenspektrums (Energie-Häufigkeits-Verteilung) erlaubt es, die Elementzusammensetzung der untersuchten Probe zu identifizieren und über die Intensität zu quantifizieren. Dazu wird die Energie der Röntgenstrahlung analysiert und die jeweilige Intensität der Spektrallinien gemessen. Da die Energie der

Röntgenstrahlung von der Ordnungszahl der Atome abhängt (Moseleysches Gesetz), kann anhand der Röntgenspektren auf die chemische Zusammensetzung der Probe geschlossen werden [NN04].

Zur Durchführung dieser EDX-Untersuchungen steht am IMPT ein Rasterelektronenmikroskop (JEOL - JSM-6400F) zur Verfügung (Abb. 28), das über einen EDX-Detektor (EDAX - PV-9900) mit einem Analysesystem (POINT ELECTRONIC - IDFIX) verfügt.



Abb. 28: Rasterelektronenmikroskop (JEOL - JSM-6400F)

4.3.3 Messung des elektrischen Widerstandes

Für die Messung des elektrischen Widerstandes wurden die Proben - wie in Abb. 29 gezeigt - geschnitten um ein Fließen des elektrischen Stroms durch die Bondlegierung zu gewährleisten. Ein Aufbau bestehend aus mit einem Isolator verbundenen zwei Sonden wird zur Messung benutzt. Der Isolator sorgt dafür, dass der gleiche Abstand zwischen den Klemmern bei Messung behalten wird.

Aufgrund von Imperfektionen und Kratzern in der Bondprobe sowie aufgrund des Widerstandes des verwendeten Messaufbaus ergibt diese Methode nicht den exakten elektrischen Widerstand der Probe. Sie ermöglicht jedoch eine relative Untersuchung des Einflusses der Bondparameter auf die elektrischen Eigenschaften der Verbindung. Eine Vier-Punkte-Messung ist wesentlich genauer, konnte aber - wegen der geringen Probengröße - nicht durchgeführt werden.

Niedrige Werte des elektrischen Widerstandes deuten auf eine gute Stromleitfähigkeit und sind bei dieser Anwendung erwünscht.

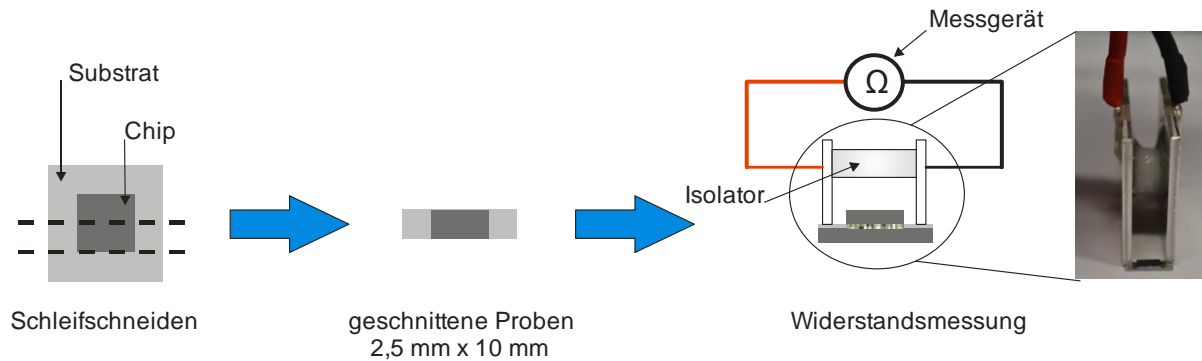


Abb. 29: Messung des elektrischen Widerstandes

4.3.4 Thermoschocktest

Im Rahmen dieser Arbeit soll zusätzlich die mechanische Stabilität der Bondverbindungen (durch die Bestimmung der Scherfestigkeit) nach thermischen Wechselbelastungen geprüft werden. Dafür wird ein Thermoschocktest nach der MIL-STD-883-A-Norm durchgeführt. Die am IMPT zur Verfügung stehende Thermoschockkammer ist in Abb. 30 gezeigt.



Abb. 30: Angewandte Thermoschockkammer (VÖTSCH – TEMPERATUR- UND KLIMAPRÜFANLAGE DER SERIE VT³)

Insbesondere ist für diese Untersuchungen der Zeitraum direkt nach der Herstellung der Bondverbindung von besonderer Bedeutung. Daher wurden in diesem Test ausschließlich 10 Zyklen in einem Temperaturbereich zwischen -60 °C und 88 °C betrachtet (Abb. 31). Jeder Zyklus dauert 40 min, die Erwärmung sowie die Abkühlung erfolgen jeweils in 10 s.

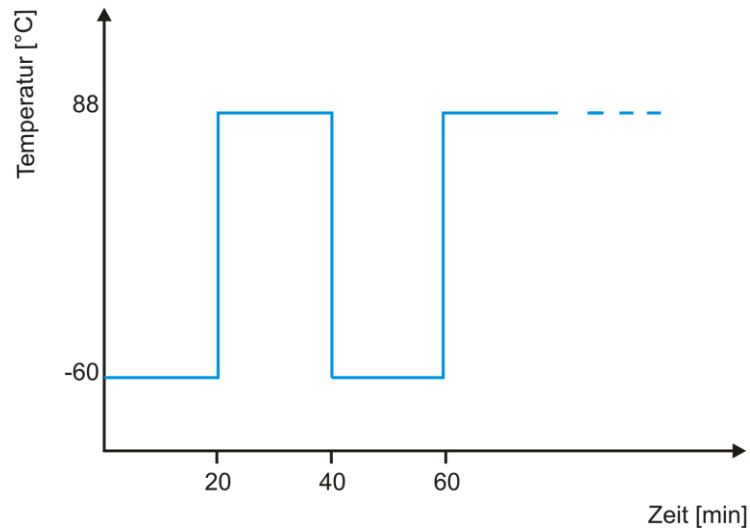


Abb. 31: Temperaturverlauf im Thermoschocktest

5 Eutektisches Bonden auf starren Substraten

Wie bereits erwähnt, bieten sich für das eutektische Bonden auf PC-Substraten die eutektischen In-Sn- und In-Bi-Legierungen und für das Bonden auf PMMA-Trägern ausschließlich die In-Bi-Legierung. Um den Einfluss der unterschiedlichen Prozessparameter (insbesondere die Bondzeit und -temperatur) die Qualität der Bondverbindung zu untersuchen, wurden - aufgrund der einfachen Handhabung - zunächst starre Substrate aus Silizium verwendet.

5.1 Einfluss der Rauheit

In beiden eutektischen Legierungen, die in diesem Kapitel betrachtet werden, ist Indium (In) als Basiskomponente beinhaltet. Zunächst wurde der Einfluss der Beschichtungsrauheit des Indiums auf die Verbindungsgüte theoretisch mittels plastomechanischer Ansätze untersucht.

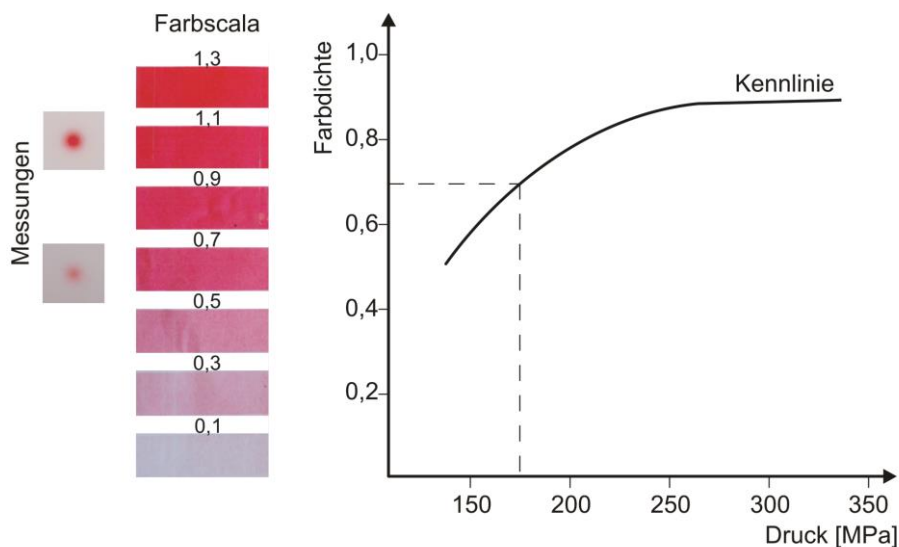


Abb. 32: Mit einer drucksensitiven Folie ermittelter mechanischer Druck im Schließwerkzeug

Wie bereits in Tabelle 1 gezeigt, beträgt die Zugfestigkeit R_m des Indiums ca. 1,88 MPa. Da in der Literatur keine Werte der Streckgrenze R_e des reinen Indiums vorliegen, wird angenommen, dass sie ca. 1,5 MPa (80 % der Zugfestigkeit R_m) beträgt.

Es handelt sich hierbei um einen sehr niedrigen Schließdruck, bei dem eine plastische Verformung des Indiums vorliegt. Experimentelle Auswertungen mittels drucksensitive Folie (siehe Abb. 32) haben wesentlich höhere Schließdrücke (teilweise über 175 MPa) gezeigt.

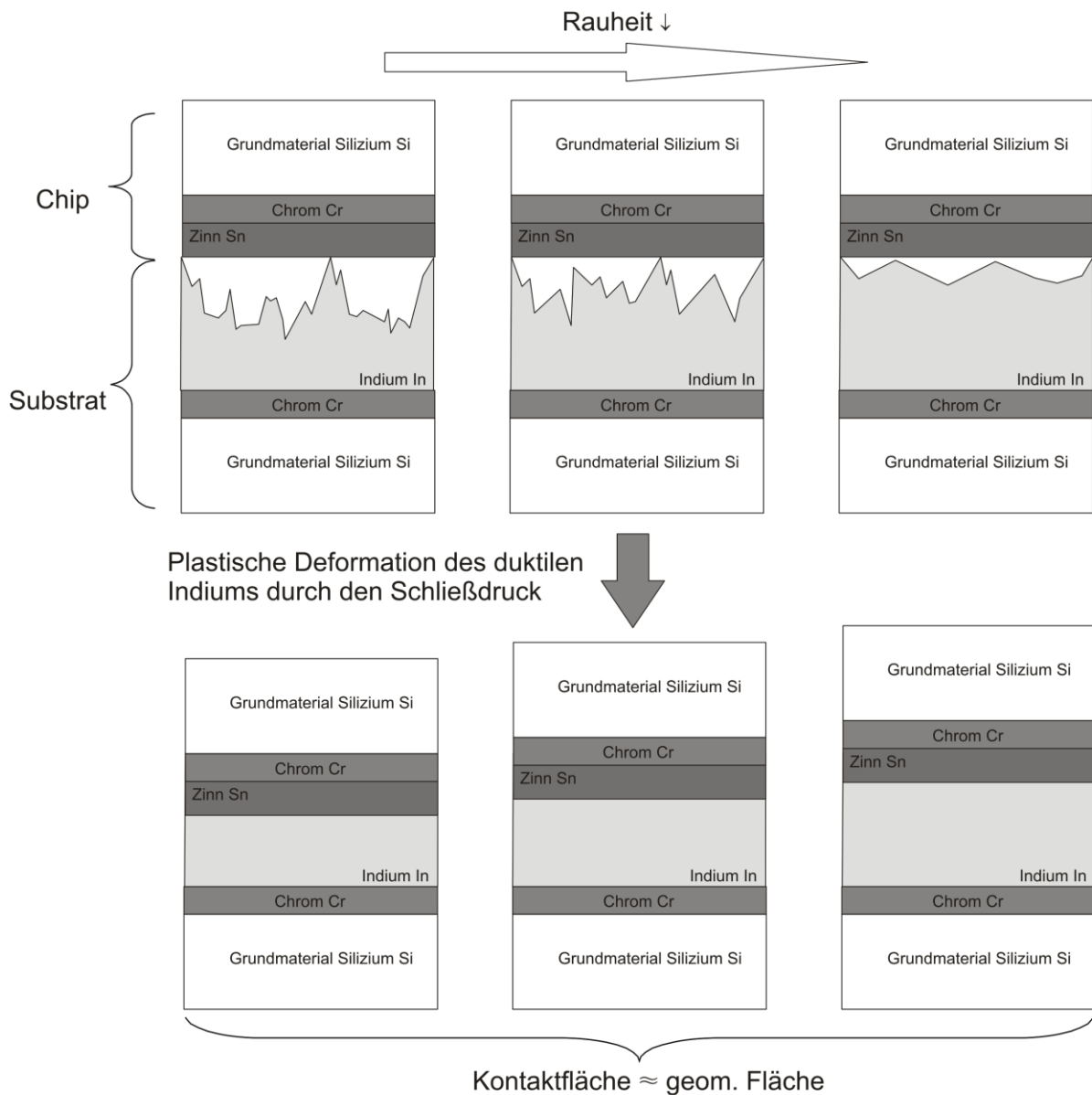


Abb. 33: Einfluss der Rauheit der In-Beschichtung auf die Bondkontaktfläche

Aufgrund der plastischen Verformung des Indiums entspricht die Kontaktfläche der geometrischen Fläche des Chips. Dies zeigt, dass die Rauheit der In-Beschichtung keinen Einfluss auf die Bondkontaktfläche hat (Abb. 33).

Die Rauheit der Beschichtung mit der zweiten Komponente Zinn (Sn) für die eutektische In-Sn-Legierung oder Bismut (Bi) für die eutektische In-Bi-Legierung ist dagegen entscheidend für die Bondkontaktfläche. Es ist hier deutlich zu erkennen, dass die Kontaktfläche mit steigender Rauheit der Bi- oder Sn-Komponente stark zunimmt (Abb. 34).

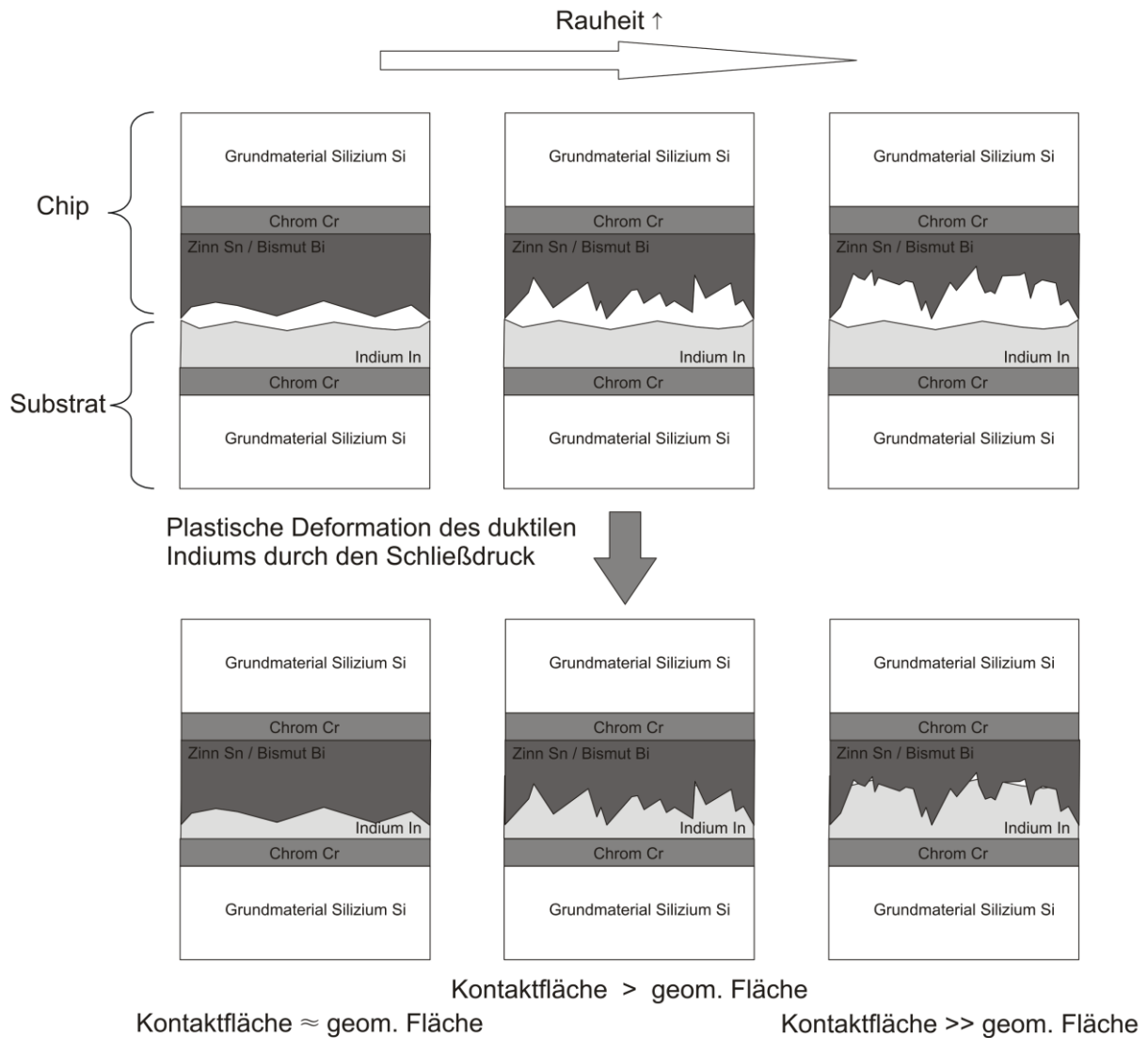


Abb. 34: Einfluss der Rauheit der zweiten Beschichtungskomponente Bi oder Sn auf die Bondkontaktfläche

Daher können die Sn- und Bi-Beschichtungen einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Bondverbindung haben.

5.2 Eutektisches Bonden mit In-Sn-Legierung

In diesem Kapitel wird die eutektische In-Sn-Legierung untersucht, wobei die Sn-Beschichtung auf dem Chip und die In-Beschichtung auf dem starren Si-Substrat erfolgen. Wie in Kapitel 4 „Versuchsaufbau“ bereits beschrieben, wurde für den Chip Cr als Haftvermittler verwendet, für das Substrat wurden jedoch zwei Haftvermittler Cr und Ta angewandt und untersucht (Abb. 35).

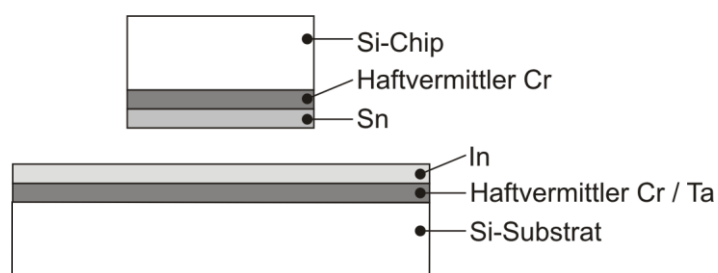


Abb. 35: Aufbau der Bondpaarung für die eutektische In-Sn-Legierung

5.2.1 Schertest

In einem weiteren Schritt wurde zur Bewertung der Qualität der mechanischen Verbindung die Scherfestigkeit mittels Schertest experimentell bestimmt. Hierbei wurde ebenfalls jeweils der Einfluss der Bondtemperatur sowie der Bondzeit auf die Scherfestigkeit untersucht. In Abb. 36 und Abb. 38 sind die Ergebnisse für beide untersuchte Haftvermittler Cr und Ta dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Scherfestigkeit mit steigender Bondzeit zunächst (bis 5 min) geringfügig zunimmt. Dies liegt daran, dass bei längeren Versuchszeiten mehr Diffusionsvorgänge stattfinden und somit eine vollständige eutektische Reaktion erfolgt. Mit weiter zunehmender Zeit findet eine Thermomigration statt, dann verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften der neuen Verbindung und die Scherfestigkeit nimmt geringfügig ab. Da bei 5 min die höchste Scherfestigkeit erreicht wurde, ist die Bondzeit für die weiteren Untersuchungen auf 5 min festgelegt. Bei der Probe mit der höchsten Scherfestigkeit (130 °C, 5 min) wurde mit den EDX-Untersuchungen annähernd (In: 54,4 % und Sn: 45,6 %) die eutektische Gewichtszusammensetzung der Legierungselemente festgestellt.

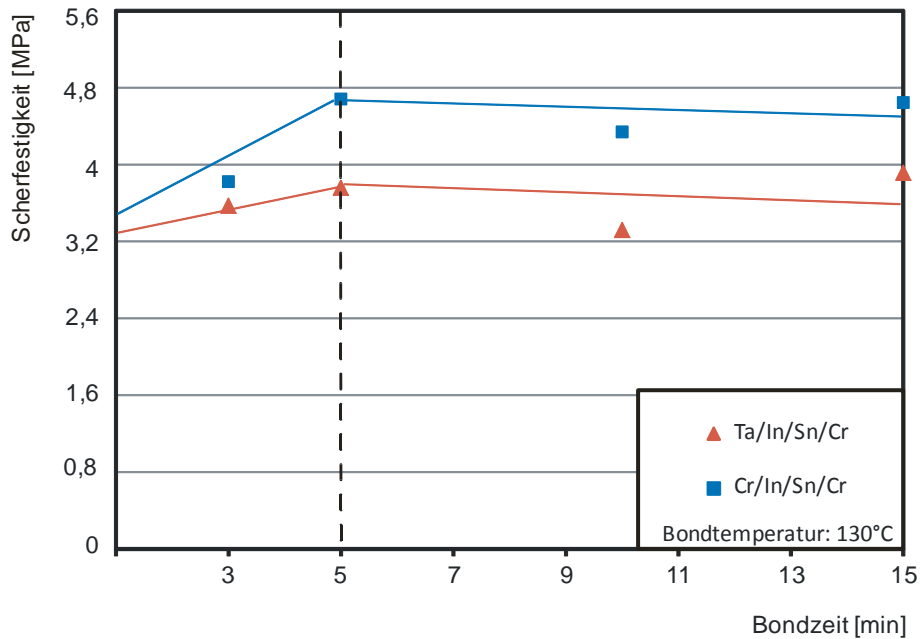


Abb. 36: Einfluss der Bondzeit auf die Scherfestigkeit

Ferner nimmt die Scherfestigkeit mit zunehmender Bondtemperatur leicht ab. Dies liegt, wie bereits dargestellt, an der Thermomigration. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Indium unter den Chip fließt. Das Verhältnis der In- zu Sn-Anteilen verändert sich. Es handelt sich hierbei nicht mehr um reine eutektische Legierung sondern um eine Mischung der eutektischen In-Sn-Legierung mit In. Somit verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften der neuen Verbindung und die Scherfestigkeit nimmt ab.

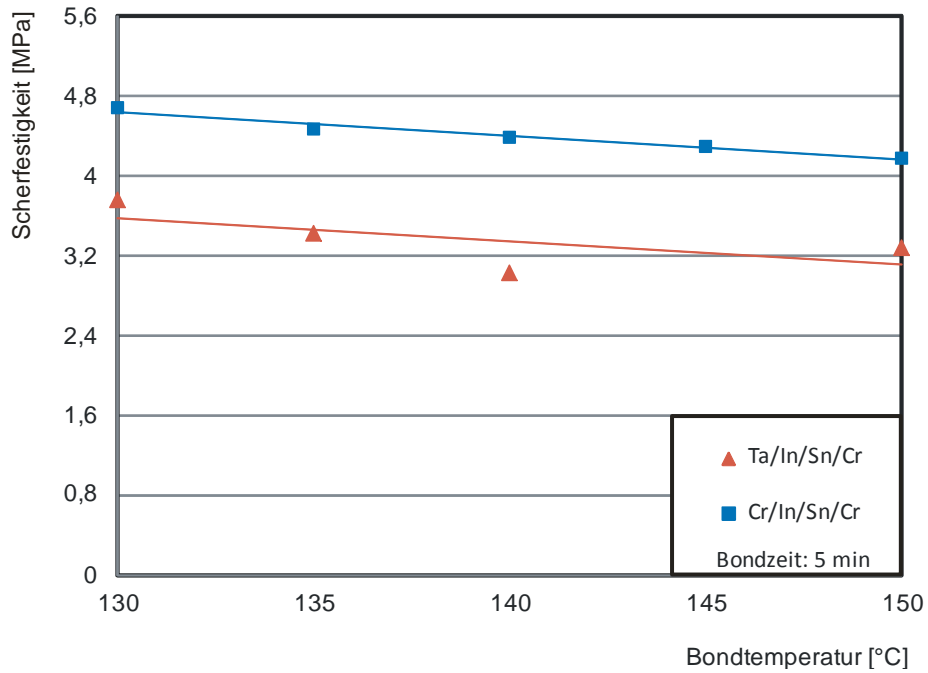


Abb. 37: Einfluss der Bondtemperatur auf die Scherfestigkeit

Darüber hinaus zeigen beide Diagramme Abb. 36 und Abb. 37 bessere Scherfestigkeiten beim Haftvermittler Cr als Ta. Dies liegt - wie bereits gezeigt - an der guten Benetzung von In auf Cr.

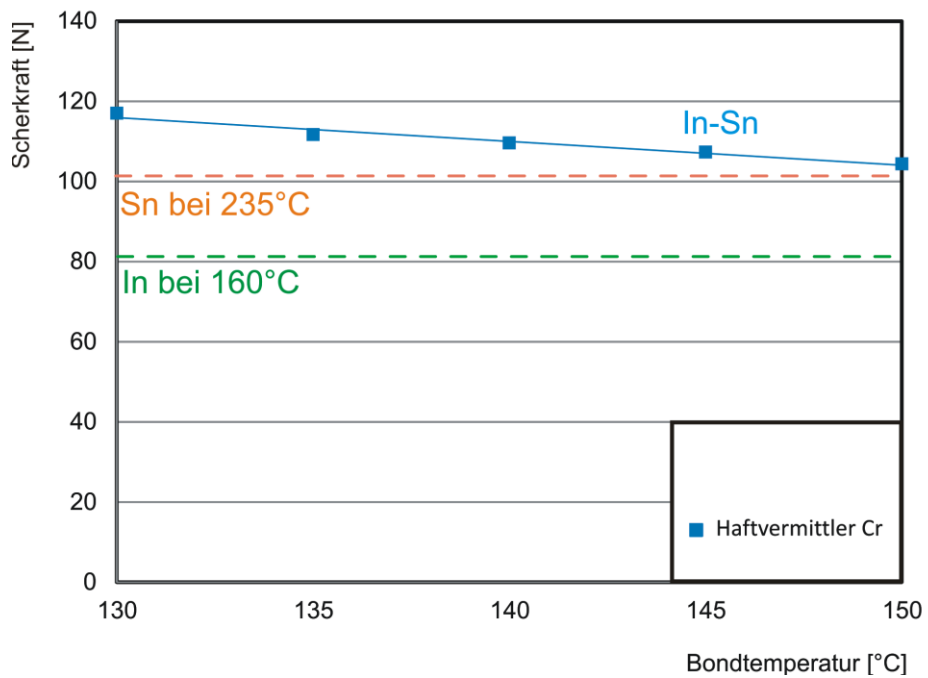


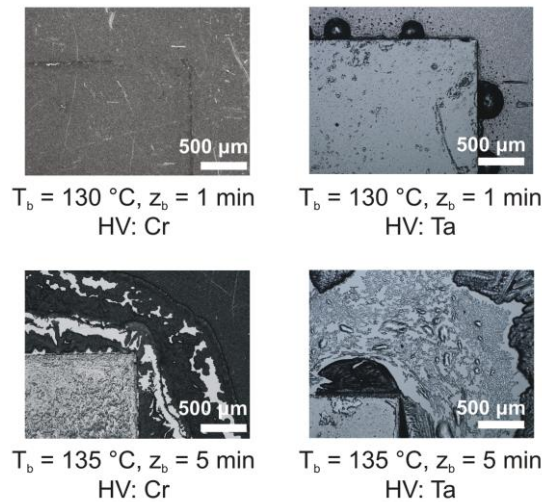
Abb. 38: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch eutektisches Bonden

Ferner wurden weitere Bondversuche mit dem besseren Haftvermittler Cr durchgeführt. Hierbei wurden Substrat und Chip mit der gleichen Komponente Sn bzw. In beschichtet. Durch das Erhitzen auf die Schmelztemperatur (235 °C bei Sn bzw. 160 °C bei In) der jeweiligen Komponente und das anschließende Abkühlen erfolgt das einphasige Bonden. Die ermittelten Scherfestigkeiten zeigen das Potential des eutektischen Bondens, nämlich gute mechanische Qualität der Verbindung bei wesentlich niedrigen Bondtemperaturen (Abb. 38).

5.2.2 Optische Untersuchung

Für ein grundlegendes Verständnis der Ergebnisse des Schertests wurden die gebrochenen Bondverbindungen optisch untersucht. Dabei wurde eine zum Teil ausgeprägte Thermomigration festgestellt. Die Thermomigration ist ein energisches Phänomen und geschieht wenn ein Temperaturgradient in einer Legierung vorliegt. Es bedeutet, dass die Atome sich von der kalten zur warmen Region bewegen und wird mit dem Soret-Effekt bezeichnet [Tu07]. In den durchgeführten Versuchen ist der Substrat, im Gegensatz zum Chip, in direktem Kontakt mit der Heizplatte des Ofens. Damit erwärmt sich die Beschichtungskomponente des Substrates schneller als die des Chips. Je größer die Temperaturdifferenz ist, desto stärker die Materialdiffusion ist. Das Phänomen der Thermomigration ist bei eutektischen Legierungen – aufgrund des feinkörnigen Gefüges - schneller als bei einphasiger Legierungen [Tu07].

In Abb. 39 ist die Thermomigration der betrachteten In-Sn-Legierung bei beiden Haftvermittler (HV) Cr und Ta dargestellt. In beiden Fällen ist zu erkennen, dass In sich neben und unter dem Chip einsammelt.



T_b : Bondtemperatur, z_b : Bondzeit, HV: Haftvermittler

Abb. 39: Einfluss der Haftbeschichtung auf die Indium-Migration

Ferner es ist zu erkennen, dass die Thermomigration abhängig vom angewandten Haftvermittler ist. So ist bei gleichen Randbedingungen (Bondzeit und -temperatur) die Thermomigration des Indiums auf Ta im Vergleich wesentlich stärker. Dies liegt daran, dass die Benetzung des In auf Cr wesentlich besser ist als auf Ta.

Im Allgemeinen kann die Benetzung mittels des Benetzungswinkels zwischen dem flüssigen und der festen Oberfläche bewertet werden. Je kleiner der Benetzungswinkel desto fester ist die intermetallische Verbindung [Mat03].

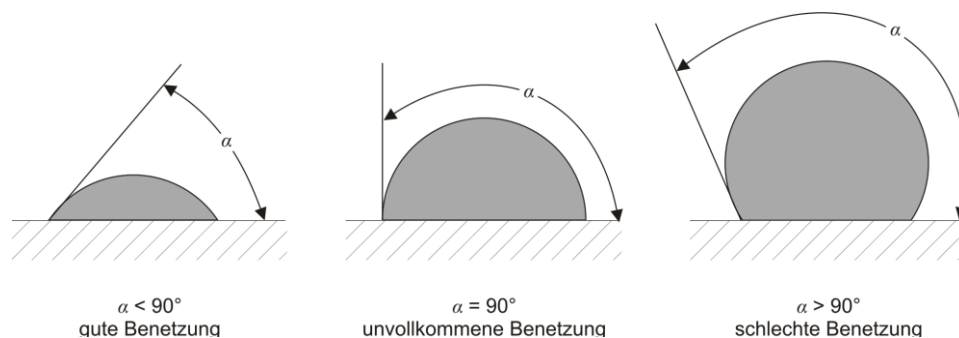


Abb. 40: Benetzung der Oberfläche [Mat03]

Dies wurde in einem einfachen Versuch geprüft. Hierbei wurden zwei mit In auf Cr (im ersten Fall) und Ta (beim zweiten) beschichteten starre Substrate über die Schmelztemperatur von In erwärmt. Die Probe mit Cr als Haftvermittler hat sich optisch kaum verändert und ist auf die gute Benetzung des In auf Cr zurückzuführen.

In der zweiten Probe haben sich bei 200 °C auf der Oberfläche des Haftvermittlers Ta geschmolzenen In-Tropfen gebildet (Abb. 41). Dies deutet auf eine schlechte Benetzung des In auf Ta hin.

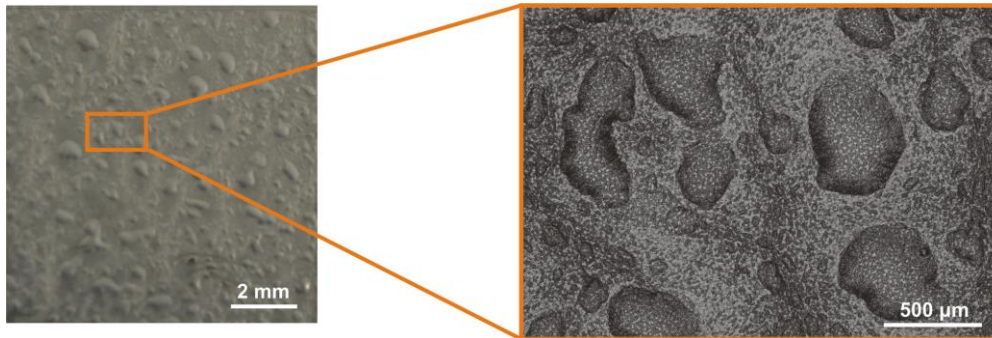


Abb. 41: Schlechte Benetzung des flüssigen Indiums auf Tantal

Als nächstes wurde jeweils der Einfluss der Bondzeit sowie der Bondtemperatur auf die Thermomigration experimentell untersucht. Diese Darstellung wird auf Cr als Haftvermittler - aufgrund der besseren Benetzung des In auf Cr - eingeschränkt.

In Abb. 42 ist die Thermomigration bei einer Bondzeit von 5 min und für unterschiedliche Bondtemperaturen (130 °C, 135 °C und 150 °C) dargestellt. Wie es hier zu erkennen ist, fließt bei höheren Temperaturen mehr Indium unter den Chip und deutet auf eine Zunahme der Thermomigration mit steigender Temperatur.

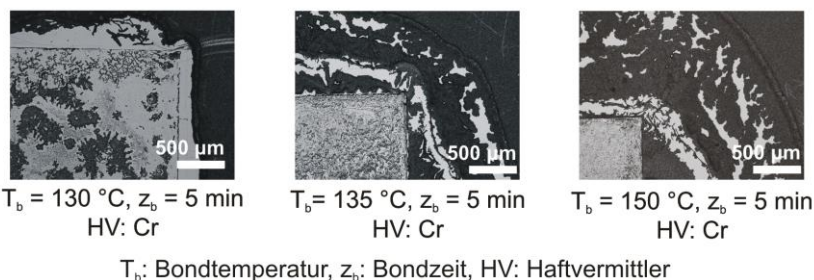


Abb. 42: Einfluss der Bondtemperatur auf die Thermomigration von Indium

In Abb. 43 sind die bei 130°C und bei unterschiedlichen Bondzeiten (1 min, 5 min und 15 min) gebundenen Proben gezeigt. Es wird hier deutlich, dass das Phänomen der Thermomigration bei längeren Bondzeiten ausgeprägter ist.

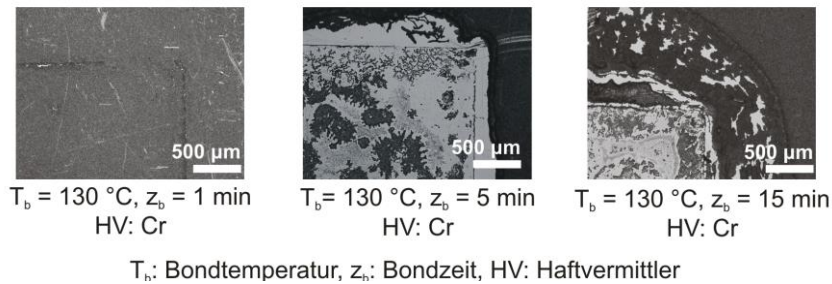


Abb. 43: Einfluss der Bondzeit auf die Thermomigration von Indium

Ein Versuch wurde mit den gleichen Parametern (130 °C, 5 min und einem minimalen Druck) auf dem Flip-Chip-Bonder wiederholt. Es ist zu merken dass die Thermomigration eindeutig weniger ist (Abb. 44). Dies hat zum Grund die schnellere Anwärm- und Abkühlzeiten sowie die gleichmäßige Erhitzung der beiden Fügekomponenten.

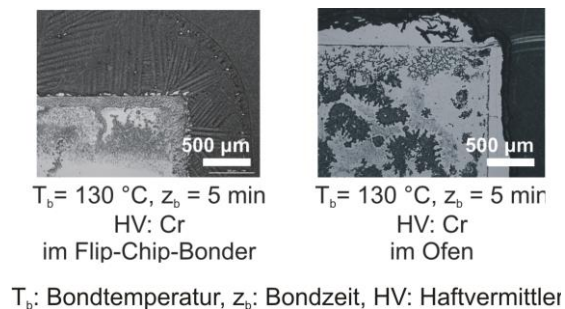


Abb. 44: Vergleich zwischen Bonden im Ofen und mit Flip-Chip-Bonder

5.2.3 Messung des elektrischen Widerstandes

Zudem wurde der elektrische Widerstand der Bondproben gemessen und dabei der Einfluss der Bondtemperatur und der Bondzeit untersucht. In Abb. 45 und Abb. 46 sind die Messergebnisse ebenfalls für beide untersuchte Haftvermittler Cr und Ta abgebildet. Es ist hier zu erkennen, dass mit steigender sowohl Bondzeit als auch Bondtemperatur der elektrische Widerstand der Probe zunimmt. Jedoch hängt diese Zunahme stark vom verwendeten Haftvermittler ab. So ist sie bei Ta - aufgrund der ausgeprägten Thermomigration - wesentlich stärker, bei Cr ist sie dagegen sehr geringfügig.

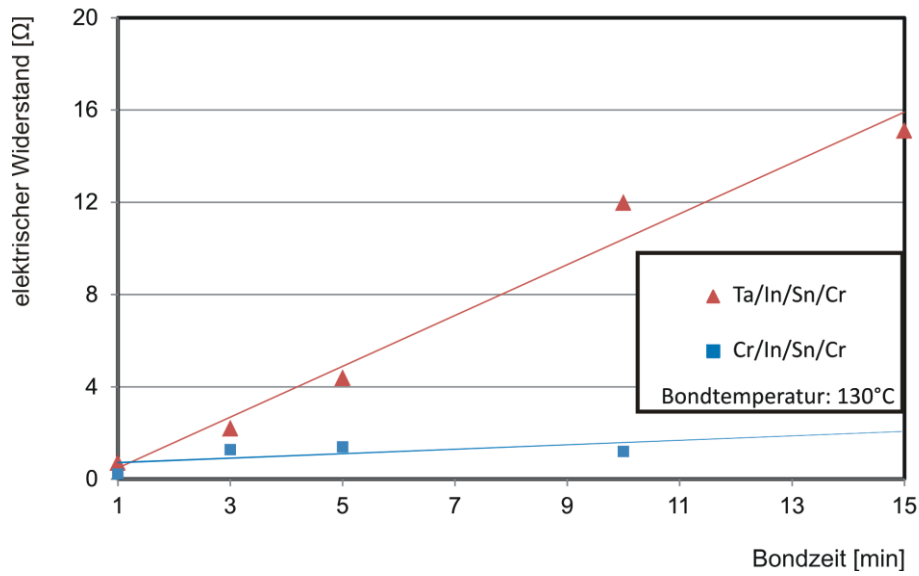


Abb. 45: Einfluss der Bondzeit auf den elektrischen Widerstand

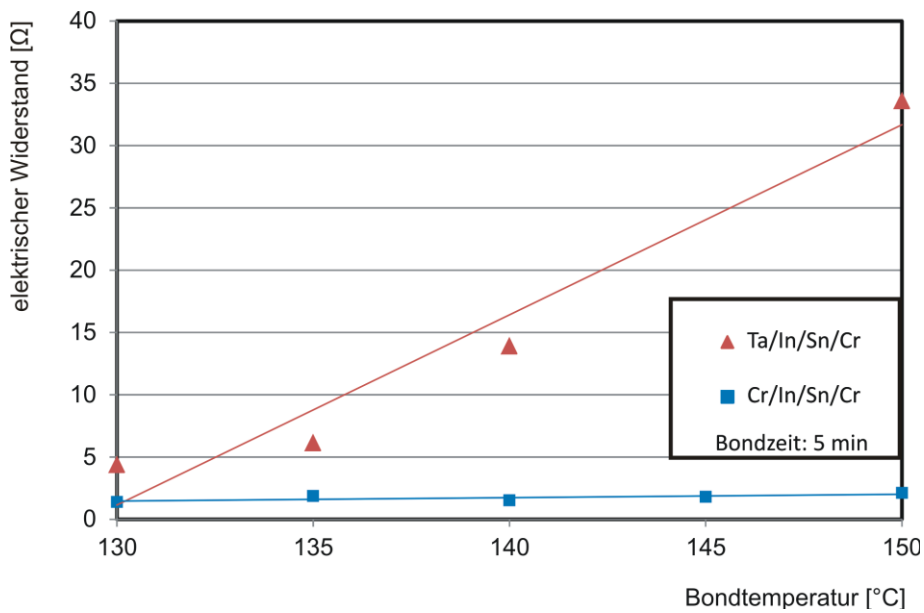


Abb. 46: Einfluss der Bondtemperatur auf den elektrischen Widerstand

5.2.4 Einfluss des Thermoschocktests

Nach dem Thermoschocktest wurde jede Probe in zwei Hälften geschnitten. An der ersten Hälfte wurde die Scherfestigkeit ermittelt an der zweiten Hälfte der elektrische Widerstand gemessen. Annähernd alle Proben haben das Trennschleifen bestanden.

Dies lässt auf eine gute mechanische Qualität der In-Sn-Bondverbindung zurückschließen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 47 (für die Scherfestigkeit) und Abb. 48 (für den elektrischen Widerstand) dargestellt und den Werten vor dem Thermoschocktest gegenübergestellt. Kein signifikanter Einfluss des Thermoschocktests auf die Scherfestigkeit oder den elektrischen Widerstand der Bondproben ist hier feststellbar. Dies kann u.a. an der geringen Zyklanzahl (10 Zyklen) beim Thermoschocktest oder auch am eingestellten Temperaturbereich (-60 °C bis 88 °C). Ausschließlich die bei 130 °C und 135 °C gebondeten Proben weisen hinsichtlich der Scherfestigkeiten vor und nach dem Thermoschocktest bemerkbare Abweichungen auf. Dies kann auf eine um die Schnittlinie nicht symmetrische eutektische Reaktion zurückgeführt werden.

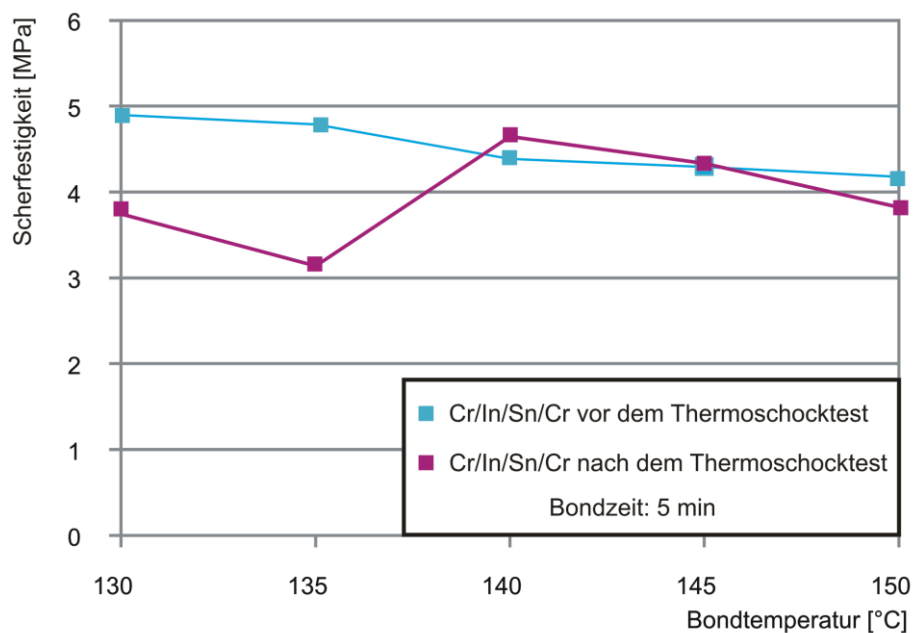


Abb. 47: Einfluss des Thermoschocktests auf die Scherfestigkeit

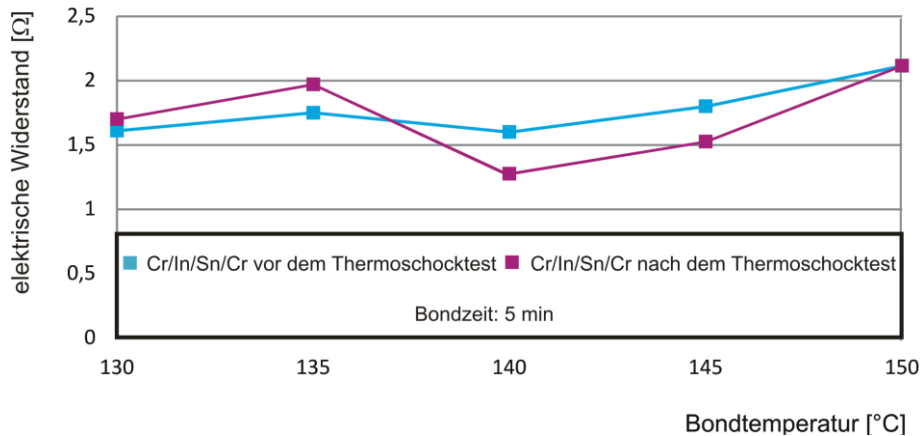


Abb. 48: Einfluss des Thermoschocktests auf dem elektrischen Widerstand

Aufgrund der beschriebenen Ergebnisse wurden in den folgenden Untersuchungen zum Bonden auf flexiblen PC-Substraten Cr als Haftvermittler genommen. Die Bondzeit wurde auf 5 min bei einer Bondtemperatur von 130 °C festgelegt.

5.3 Eutektisches Bonden mit In-Bi-Legierung

5.3.1 Bi-Beschichtung

Entscheidend für eine optimale mechanische Bondverbindung ist eine gute Haftbarkeit der Beschichtung auf dem Substrat. Da die Bi-Beschichtungen nicht gängig und vertieft erforscht sind, wurde zuerst erprobt, bei welchen Beschichtungsprozessparametern Bi auf starren Substraten gut haftet.

Nach allen theoretischen Modellen des Wachstums von dünnen Schichten auf Substraten ist die Struktur der Beschichtung von der Abscheiderate und der Substrattemperatur abhängig [Pat06]. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich diese Parameter variiert. Dabei wurde, wie im vorigen Kapitel bereits erläutert, Cr als Haftvermittler gewählt. Die Beschichtung erfolgte durch das Verdampfen im Vakuum, da das Versputten nicht zielführend war [Cho01]. Da die Temperatur des Substrates für die Bi-Textur von entscheidender Bedeutung ist [Pat06], wurde das Verdampfen von Bi bei unterschiedlichen Wafer-Temperaturen (Raumtemperatur, 100, 150, 200 und 350 °C) durchgeführt.

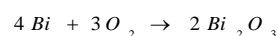
Um die Haftbarkeit von Bi auf dem Substrat zu bewerten, wurden Kratzfestigkeits- und Scotch-Tape-Tests durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass das Verdampfen bei einer Substrattemperatur von 150 °C die besten Ergebnisse liefert.

Basierend auf den Arbeiten in [Yan99], wurde nach dem Aufdampfen das Tempern der Bi-Beschichtung für 6 Stunden bei 268 °C durchgeführt. Das Tempern erfolgt im Vakuumofen um eine Oxidation zu vermeiden. Somit konnte die Haftbarkeit der Bi-Beschichtung auf dem Substrat sowie die Reaktion mit In beim Bonden eindeutig verbessert werden.

Ferner wurde die Abscheiderate beim Verdampfen ebenfalls variiert um die Rauheit der Beschichtung zu variieren. Hierbei erzeugt eine schnelle Verdampfung eine raue Oberfläche. Je langsamer das verdampfen erfolgt, desto glatter wird die Beschichtung. Wie bereits erwähnt, ist eine raue Bi-Oberflächen vorteilhaft.

Die beste Bi-Beschichtung wurde mit folgenden Prozessparametern erreicht: Schichtdicke nach XTC: 1 µm, Abscheiderate: 5 Å/s, Strahlleistung 0,11 kW.

Trotz dass das Beschichten und das Tempern im Vakuum durchgeführt sind, hat sich auf der Oberfläche der Bi-Beschichtung durch den Kontakt mit dem Sauerstoff eine leichte Oxidschicht gebildet (Gl. 3).



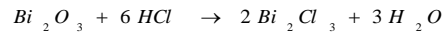
Gl. 4

Diese Oxidschicht ist sehr spröde und kann die Diffusionsvorgänge zwischen den Fügekomponenten beim Bonden vermindern oder sogar gänzlich verhindern und ist daher zu entfernen. Dies erfolgt durch das Reinigen der Chips mit einer Salzsäurelösung (HCl). Erst dann hat beim Bonden das Bismut mit dem Indium reagiert.

Entscheidend beim Entfernen der Oxidschicht sind die Konzentration der HCl-Lösung und die Wirkungszeit. Bei sehr hohen Konzentrationen oder Wirkungszeiten kann die Bi-Schicht vollständig abgetragen werden. Bei zu niedrigen Konzentrationen oder Wirkungszeiten wird die Oxidschicht nicht komplett entfernt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Variationen erprobt und anschließend Bondversuche

durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass um die Oxidschicht zu entfernen eine 7%ige HCl-Lösung und eine Wirkungszeit von 40 s ausreichend sind (Gl. 4).

Gl. 5



Durch das Abtragen der Oxidschicht wird die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse maßgeblich beeinträchtigt.

5.3.2 Schertest

Zunächst wurde der Einfluss der Temperatur auf die mechanische Qualität der Bondverbindung untersucht. Hierzu wurden Bondversuche bei unterschiedlichen Temperaturen (75 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C und 95 °C) durchgeführt und anschließend die Scherfestigkeiten ermittelt. Der Bonddruck wurde konstant bei 1,6 MPa gehalten.

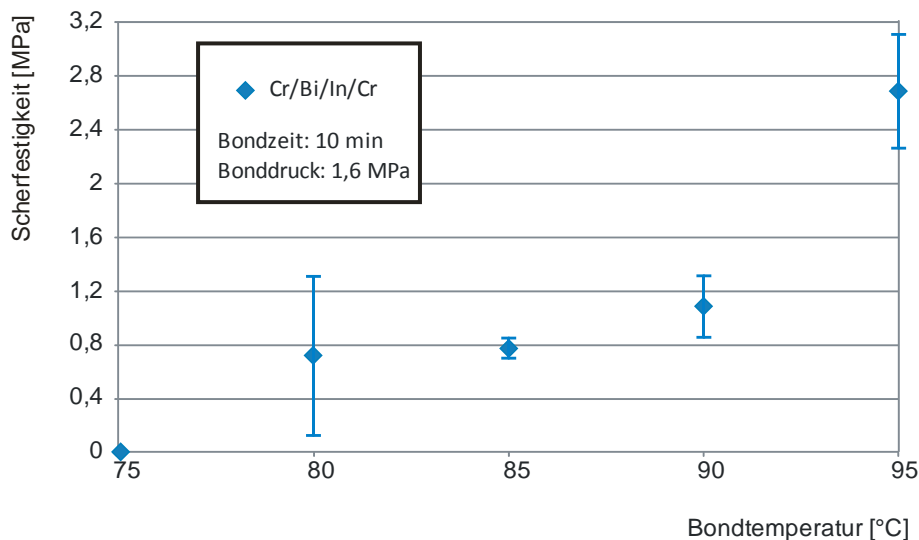


Abb. 49: Einfluss der Bondtemperatur auf die Scherfestigkeit

Wie es in Abb. 49 zu erkennen ist, erfolgt mit der eutektischen In-Bi-Legierung bei 75 °C kein Bonden. Daher ist die Scherfestigkeit nahezu null. Die Scherfestigkeiten der bei 80 °C, 85 °C und 90 °C durchgeführten Bondverbindungen sind nah aneinander. Bei diesen Verbindungen findet ausschließlich das erste Eutektikum dieser binären Legierung (73 °C) statt. Da beim Bonden bei 95 °C zum ersten

Eutektikum das zweite (90 °C) stattfinden, ist die Scherfestigkeit eindeutig höher. Jedoch ist diese Bondtemperatur (95 °C) sehr nah von der Glasübergangstemperatur des betrachteten PMMA und daher für die weiteren Untersuchungen nicht von Bedeutung. Im Allgemeinen sind die Scherfestigkeiten der In-Bi-Bondverbindungen im Vergleich zu denen der In-Sn-Verbindungen niedrig.

Es kann festgehalten werden, dass die Schertestergebnisse der bei 80 °C und 85 °C durchgeführten Bondverbindungen sehr ähnlich sind und dass die Scherfestigkeiten für die Bondverbindung bei 85 °C sehr gut reproduzierbar sind. Zudem sind die Temperaturen 90 °C und 95 °C für das Bonden auf flexiblen PMMA-Substraten zu hoch. Daher wurde für die folgenden Untersuchungen 85 °C als Bondtemperatur festgelegt.

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss der Bondzeit auf die Scherfestigkeit der Bondverbindung experimentell untersucht. Hierzu wurden Proben bei 85 °C und bei unterschiedlichen Bondzeiten (5, 10, 15 und 20 min) gebondet. Danach erfolgt die Bestimmung der Scherfestigkeiten der Bondverbindung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 50 zusammengefasst.

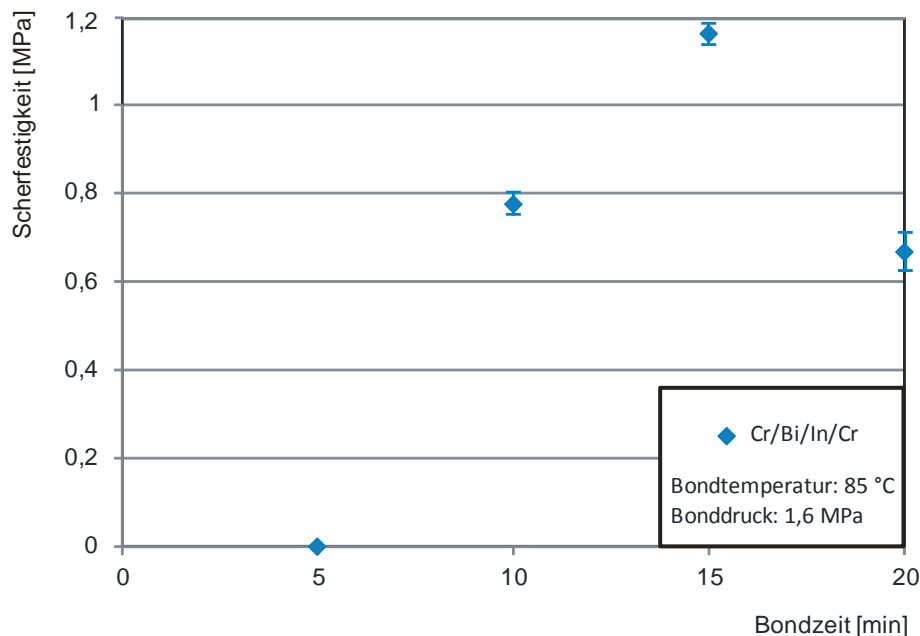


Abb. 50: Einfluss der Bondzeit auf die Scherfestigkeit

Es ist hier zu erkennen, dass bei 5 min kein Bonden erfolgt. Dann nimmt die Scherfestigkeit mit steigender Bondzeit (bis 15 min) signifikant zu. Bei 20 min Bondzeit sinkt die Scherfestigkeit stark.

Bei der Probe mit der höchsten Scherfestigkeit (85 °C, 15 min) wurde mit den EDX-Untersuchungen annähernd (In: 68,3 % und Sn: 31,7 %) die eutektische Gewichtszusammensetzung der Legierungselemente festgestellt.

5.3.3 Optische Untersuchungen

Um die Ergebnisse vom vorigen Unterkapitel 5.3.2 zu erklären wurden die Chips nachdem Scheren optisch untersucht (Abb. 51). Das rechte Bild zeigt, dass nicht die Bondverbindung sondern die Haftvermittlerschicht zwischen Bi-Schicht und Chip versagt.

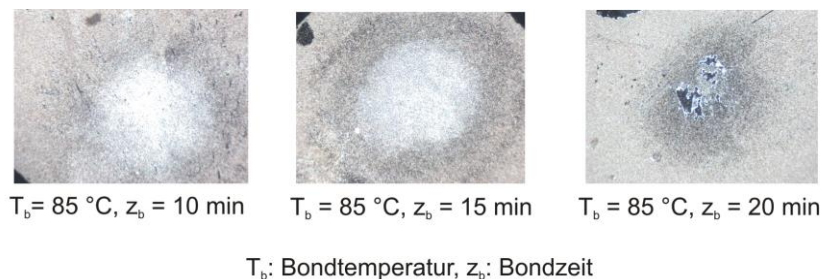


Abb. 51: Einfluss der Erhöhung der Bondzeit auf die eutektische Reaktion

Ferner wurden die Bondverbindungen zwischen In und Bi bei einer Bondzeit von 15 min und bei unterschiedlichen Bondtemperaturen (80 °C, 85 °C, 90 °C und 95 °C) optisch untersucht und in Abb. 52 dargestellt. Wie es hier zu sehen ist, verbreitet sich die eutektische Reaktion unter der Druckstelle mit steigender Temperatur.

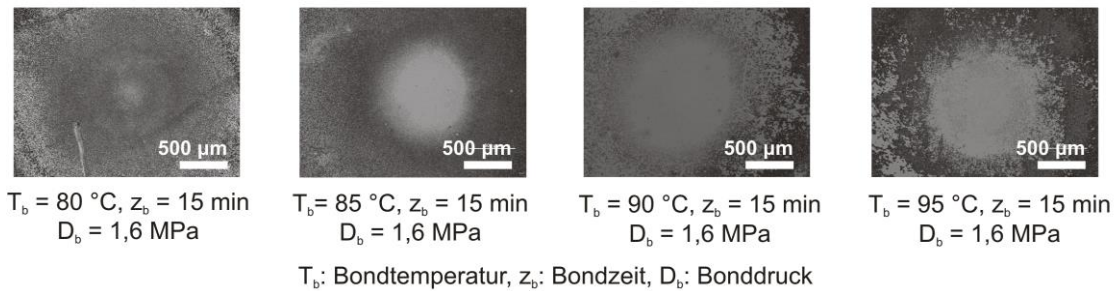


Abb. 52: Einfluss der Bondtemperatur auf die eutektische Reaktion

5.3.4 Messung des elektrischen Widerstandes

Vor der Widerstandsabmessung müssen die Proben wie in Abb. 29 geschnitten werden. Mehr als die Hälfte der Proben hat durch das Trennschleifen versagt. Da keine statistische Absicherung der Daten bei den geführten Messungen des elektrischen Widerstandes vorhanden ist, wurde hier auf die Darstellung der Ergebnisse verzichtet.

5.3.5 Einfluss des Thermoschocktests

Nach dem Thermoschocktest wurde die Scherfestigkeit jeder Probe ermittelt. Der elektrische Widerstand wurde nicht gemessen, da - wie bereits erwähnt - die Proben beim Trennschleifen versagt haben. Die Scherfestigkeiten nach dem Thermoschocktest sind in Abb. 53 zusammengefasst und den Werten vor dem Thermoschocktest gegenübergestellt. Es ist hier ebenfalls kein signifikanter Einfluss des Thermoschocktests auf die Scherfestigkeit zu erkennen.

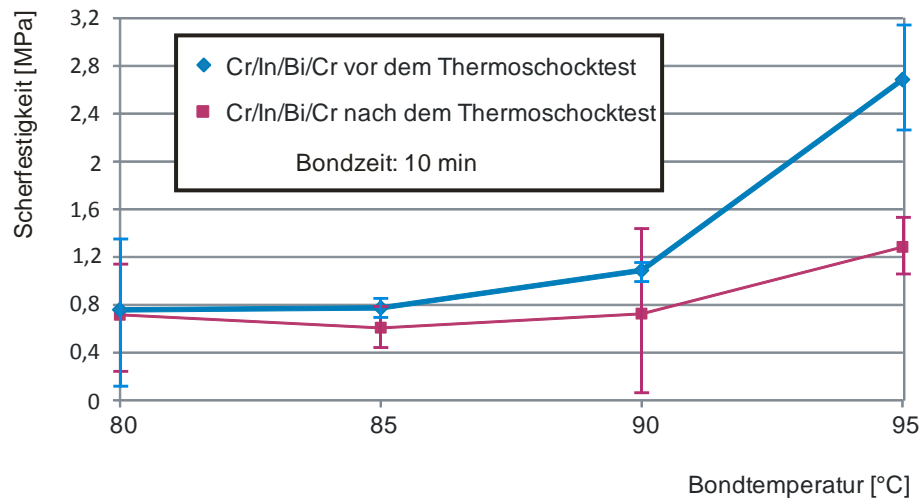


Abb. 53: Einfluss des Thermoschocktests auf die Scherfestigkeit

6 Eutektisches Bonden auf flexiblen Substraten

Für die geplanten Untersuchungen zum Bonden auf flexiblen Polymer-Substraten wurden im Rahmen dieser Arbeit als Polymermaterial zwei amorphe Thermoplaste gewählt:

- Polymethylmethacrylat (PMMA oder Plexiglas)
- Polycarbonate (PC oder Lexan)

Die Eigenschaften dieser beiden Polymere werden näher erläutert in Tabelle 5.

Tabelle 5: Eigenschaften von PMMA und PC nach [Dom08]

<i>Eigenschaften</i>	<i>PMMA</i>	<i>PC</i>
optische	Wasserhelle Transparenz	Glasklare Transparenz
chemische	beständig gegen schwache Säuren und Laugen sowie unpolare Lösemittel, Fette, Öle und Wasser,	begrenzte Chemikalienbeständigkeit
physikalische	Kratzfeste, hochglänzende, polierfähige Oberfläche	Kerbempfindlich und anfällig gegen Spannungsrisssbildung, hoher Oberflächenglanz
mechanische	Hohe Härte, Steifheit und Festigkeit im Bereich von -40 bis $+80$ °C	Hohe Festigkeit, Steifheit, Härte und Zähigkeit im Bereich von -150 bis $+145$ °C
thermische	Hohe Formbeständigkeit in der Wärme	Hohe Formbeständigkeit in der Wärme
elektrische	gute elektrische und dielektrische Eigenschaften	gute elektrische Isoliereigenschaften

Da insbesondere die mechanischen und thermischen Materialkennwerte dieser Polymer-Werkstoffe sich stark von den Eigenschaften des Chip-Grundmaterials (Si) unterscheiden (Tabelle 6), stellen das Bonden und eine mechanisch stabile Verbindung eine enorme Herausforderung dar.

Tabelle 6: Werkstoffkennwerte der betrachteten Polymere im Vergleich zum Chip-Grundmaterial Si

<i>Komponente</i>	<i>Chip</i>	<i>Substrat</i>	
<i>Material</i>	Si	PC	PMMA
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m.K)]	150	0,21	0,18
Schmelztemperatur T_m [°C]	1410	-	-
Glasübergangstemperatur T_g [°C]	-	148	106
Elastizitätsmodul [MPa]	130000	2100	3500
Wärmeausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}/K$]	2,6	60	70
Elektrische Leitfähigkeit σ [$10^6 A/(V \cdot m)$]	12,5	8,8	0,769

Beim Bonden auf flexiblen Polymer-Substraten ist zu gewährleisten, dass der eutektische Schmelzpunkt der Bondlegierung weit unter der Glasübergangstemperatur des betrachteten Polymers liegt. Somit wird ein thermisches Zersetzen im Substrat vermieden.

Für das eutektische Bonden auf PC-Substraten bieten sich die binären eutektischen In-Sn- und In-Bi-Legierungen und für das Bonden auf PMMA-Trägern ausschließlich die In-Bi-Legierung. Hierbei wurden die wesentlichen Prozessparameter wie Bondzeit und -temperatur im vorigem Kapitel „Eutektisches Bonden auf starren Substraten“ festgelegt. In diesem Abschnitt soll das Bonden auf flexiblen Polymer-Substraten durchgeführt werden und dabei geprüft, inwieweit können die beim Bonden auf starren Trägern ermittelten Bondparameter auf diese Anwendung übertragen werden.

Aufgrund der sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten der betrachteten Polymere wurde eine Vorerwärmung zunächst auf die eutektische Temperatur vorgenommen. Nach einem Halten wurde dann erhitzt auf die Bondtemperatur und der Druck aufgebaut. Nach dem Bonden erfolgt ein langsames Abkühlen um die Bildung von Eigenspannungen in der Bondverbindung - aufgrund der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der Substrat- und Chipmaterialien - zu reduzieren. Die Temperatur- und Druckverläufe sind in Abb. 54 schematisch abgebildet.

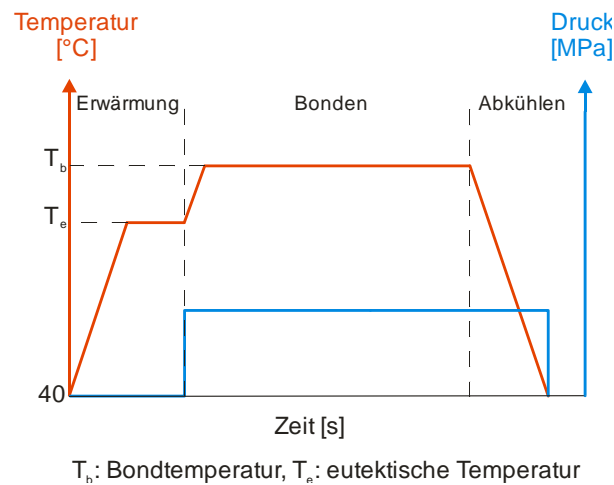


Abb. 54: Temperatur- und Druckverlauf beim Bonden auf flexiblen Substraten mit dem Flip-Chip-Bonder

6.1 Eutektisches Bonden mit In-Sn-Legierung auf PC-Substraten

Aus den bereits beschriebenen experimentellen Untersuchungen zum Bonden auf starren Si-Substraten wurden eine optimale Bondzeit von 5 min und eine Bondtemperatur von 130 °C ermittelt.

6.1.1 Untersuchungen zum Einsatz von Cr als Haftvermittler

Frühere Arbeiten zum Bonden auf starren Si-Substraten haben gezeigt, dass der Einsatz eines Haftvermittlers unumgänglich ist [Cho00]. Da ähnliche Kenntnisse und Aussagen bezüglich des Bondens auf flexiblen PC-Substraten nicht vorliegen, sollte zunächst geprüft werden, ob ein Haftvermittler für PC-Träger notwendig ist.

Die Ergebnisse im Abschnitt 5.2 „Eutektisches Bonden mit In-Sn-Legierung“ haben gezeigt, dass für die In-Beschichtung Cr im Vergleich zu Ta sich als Haftvermittler besser eignet. Daher wird die Verwendung von Cr als Haftvermittler für die flexiblen PC-Substrate untersucht.

In diesem Sinne wurde die In-Beschichtung - mit und ohne Haftvermittler - auf PC-Substrate angebracht. Anschließend wurden Bondversuche durchgeführt.

Als Kriterium für die Bewertung der Bondverbindung wurden ausschließlich die mittels Schertest bestimmten Scherfestigkeiten genommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 55 zusammengefasst.

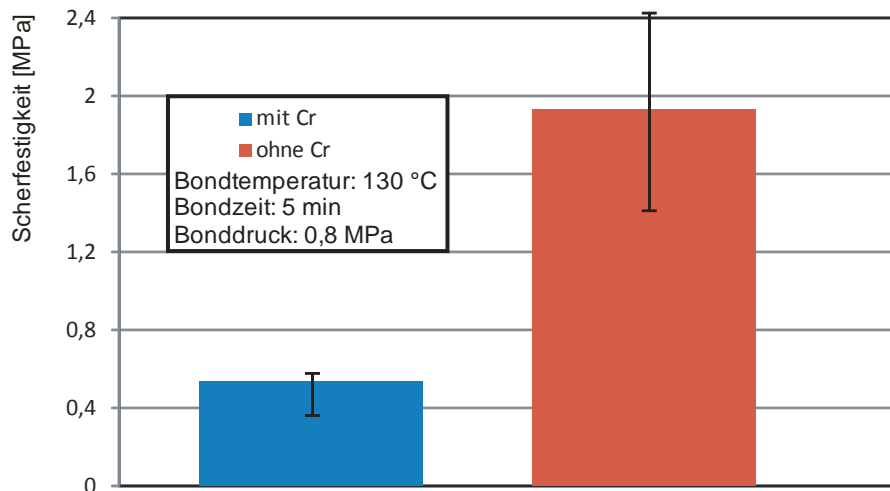


Abb. 55: Einfluss des Haftvermittlers auf die Scherfestigkeit der Bondverbindung

Es ist zu erkennen, dass die Festigkeit der Verbindung durch Zusatz von Haftvermittler beeinträchtigt ist. Dies ist auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und somit auf die resultierenden thermischen Eigenspannungen in der Bondverbindung zurückzuführen. So hat In im Vergleich zu Cr ($\alpha_{Cr} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizient ($\alpha_{In} = 29 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) und ist dem von PC näher ($\alpha_{PC} = 60 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Das führt zu höheren inneren Spannungen im System nach dem Erstarren. Die entstehenden thermische Eigenspannungen führen beim Schertest zum früheren Versagen der Bondverbindung. Daher wurde für die weiteren Untersuchungen kein Haftvermittler für die In-Beschichtung auf den PC-Substraten genommen.

6.1.2 Einfluss des Kontaktdruckes auf die Bondverbindung

Ein wesentlicher Prozessparameter, welcher die Qualität der Bondverbindung maßgeblich beeinflussen kann, ist der Kontaktdruck. Dieser Parameter wurde in den Bondversuchen auf starren Substraten nicht variiert, da im Schließwerkzeug kein definierter reproduzierbarer Druck eingestellt werden kann. Ferner sind die

mechanischen Eigenschaften und insbesondere die Elastizität und Festigkeit der flexiblen und starren Substrate stark unterschiedlich, so dass die Schlussfolgerungen der Ergebnisse nicht übertragbar sind. Der Bonddruck soll die Polymer-Substrate nicht verformen. Es wurden Bondversuche bei unterschiedlichen Bondkräften durchgeführt. Die im Anschluss ermittelten Scherfestigkeiten bis zum Versagen der Bondverbindung in Abhängigkeit des eingestellten Bonddrucks sind in Abb. 56 gezeigt.

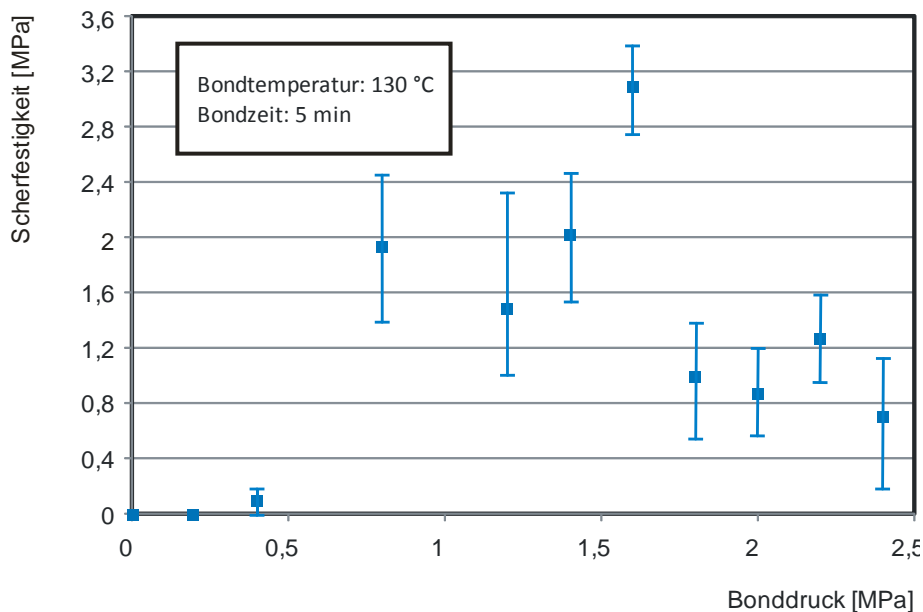


Abb. 56: Einfluss des Bonddruckes auf die Scherfestigkeit

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei niedrigen Drücken (bis 0,2 MPa) kein Bonden erfolgte. Dann nimmt die Scherfestigkeit und somit die mechanische Qualität der Bondverbindung mit steigendem Bonddruck bis zu einem bestimmten Wert (1,6 MPa) zu. Dieser Wert entspricht ca. der Dehngrenze von In. Wenn der Bonddruck noch zunimmt, wird In zur Seite weggedrückt. Dies beweist, dass die Verbindung zwischen Indium und flexiblem Substrat mechanisch und nicht chemisch ist. Das Verhältnis der In- zu den Sn-Anteilen verändert sich und weicht von der eutektischen Zusammensetzung ab. Damit werden die eutektischen Reaktionen auf kleine Bereiche begrenzt, so dass unterhalb des Chips kein Bonden erfolgt (Abb. 57). Dies führt dann zu einer Abnahme der Scherfestigkeit der Bondverbindung.

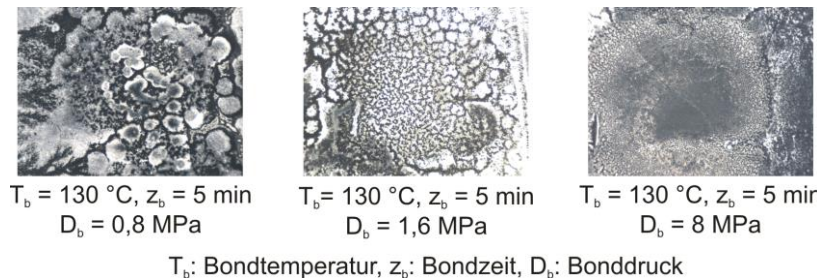


Abb. 57: Einfluss des Bonddruckes auf dem Gefüge

6.2 Eutektisches Bonden mit In-Bi-Legierung auf PC- und PMMA-Substraten

6.2.1 Thermokompressionsbonden

Durch die gezielten experimentellen Untersuchungen zum Bonden auf starren Si-Substraten mit der eutektischen binären In-Bi-Legierung wurden eine optimale Bondzeit von 15 min und eine Bondtemperatur von 85 °C ermittelt.

Es wurden zahlreiche Bondversuche mit diesen Prozessparametern auf flexiblen PC- sowie auf PMMA-Substraten durchgeführt. Hierbei wurde der Bonddruck im Bereich zwischen 0,4 und 2 MPa variiert. Jedoch sind nach der Abkühlung alle Verbindungen gebrochen. Dies kann damit erklärt werden, dass nach dem Erstarren beim Abkühlen erhöhte innere Spannungen in der Bondverbindung entstehen, die zum Versagen der Verbindung führen. Die inneren Spannungen sind von der Abkühlrate beeinflusst [Dol11]. Je größer die Abkühlgeschwindigkeit desto größer sind die auftretenden innere Spannungen. Um diese inneren Spannungen zuverlässig zu reduzieren erfolgten weitere Variationen. Hierbei wurden unterschiedliche Abkühlstrategien verfolgt. Auch sehr niedrige Abkühlraten waren nicht zielführend.

In Abb. 58 sind REM-Bilder beider untersuchten eutektischen Legierungen. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zur In-Bi-Legierung die In-Sn-Legierung wesentlich feinkörniger ist. Dies lässt auf bessere mechanische Eigenschaften und insbesondere hohe Duktilität der Bondlegierung zurückschließen [Bar12]. Dieser Befund bestätigt, dass die In-Bi-Legierung die entstehenden inneren Spannungen beim Bonden auf flexiblen Substraten nicht kompensieren kann und somit beim Abkühlen sofort versagt.

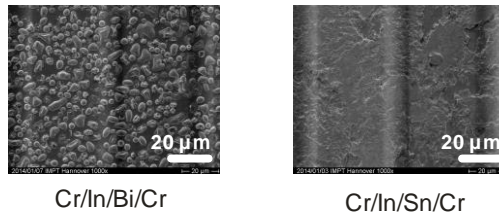


Abb. 58: Vergleich Zwischen der Korngrößen der In-Sn- und In-Bi-Legierung

6.2.2 Ultraschallbonden

Zum Schluss wurden Ultraschallbondversuche durchgeführt. Die hierfür gewählten Prozessparameter sind:

- Leistung: 20 W
- Dauer: 4s
- Anfangstemperatur: 20 °C

Ferner wurde der Druck manuell aufgebaut und die Anzahl der Ultraschallzyklen zwischen 1 bis 3 variiert. Die Ergebnisse des Schertests sind in Abb. 59 dargestellt.

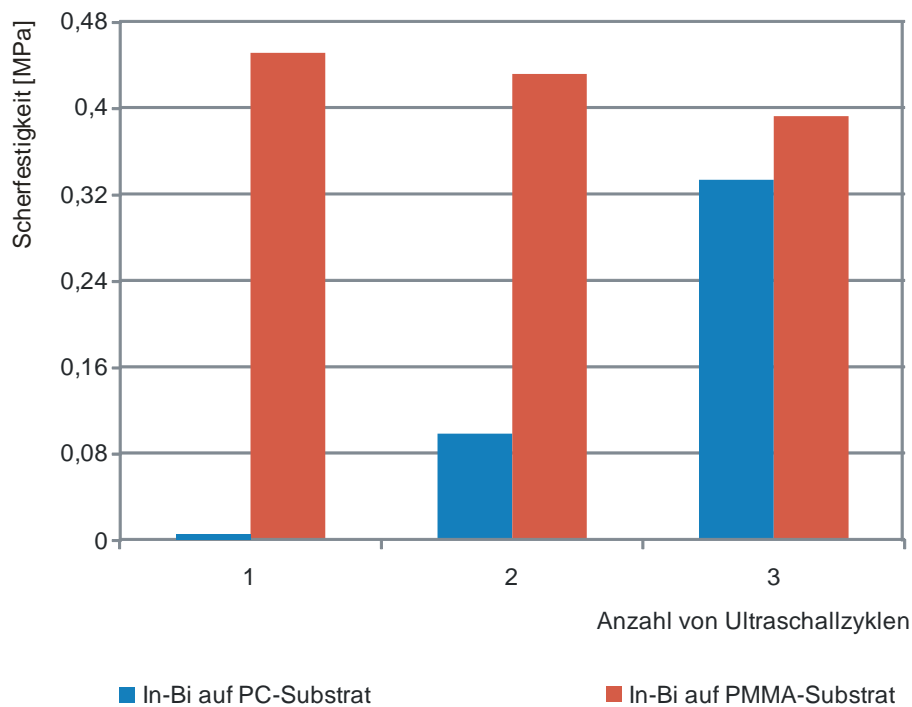


Abb. 59: Einfluss der Zyklenanzahl beim Ultraschallbonden auf flexiblen Substraten auf die Scherfestigkeit der Verbindung

Es ist zu erkennen, dass die mit einem Ultraschallzyklus auf dem PC-Substrat gebondete Probe keine Scherfestigkeit besitzt. Bei der optischen Betrachtung wurde festgestellt, dass nicht die Bondverbindung sondern die In-Beschichtung auf dem PC versagt hat (Abb. 60). Damit wird klar, dass die In-PC-Verbindung eher mechanisch und nicht chemisch ist. Mit zunehmenden Ultraschallzyklen nimmt die Erwärmung der Probe zu und kommt zu einer besseren Verbindung zwischen In und PC. Die Ergebnisse des Ultraschallbondens auf PMMA-Substraten waren in dieser Hinsicht komplett abweichend. So war das Bonden mit einem Ultraschallzyklus erfolgreich. Des Weiteren sinkt die Scherfestigkeit der Probe mit steigenden Ultraschallzyklen. Im Allgemeinen wurde hier beobachtet, dass die Scherfestigkeit der Proben sehr niedrig ist und dass das Versagen der Probe ebenfalls in der In-Substrat-Verbindung erfolgt (Abb. 60).

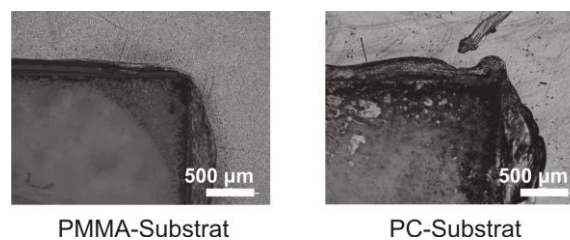


Abb. 60: Einfluss des Ultraschallbondens auf die Verbindung zwischen Indium und flexiblem Substrat

Die Messung des elektrischen Widerstandes war für alle Proben nicht möglich, da sie beim Schneiden versagt haben. Dies beweist, dass beim Schneiden höhere Belastungen als die Scherfestigkeit der Bondverbindungen auftreten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde einen Beitrag zur Weiterentwicklung des eutektischen Bondens auf flexiblen Polymer-Substraten erbracht. Als Polymermaterialien der Träger wurden ein Polycarbonate (PC) und ein Polymethylmethacrylat PMMA mit der Glasübergangstemperatur von 148 °C bzw. 106 °C gewählt.

Eine wesentliche Grundvoraussetzung zum Bonden auf flexiblen Polymer-Substraten besteht darin, dass die Bondtemperatur weit unter der Glasübergangstemperatur liegt um thermische Beschädigungen im Polymer zu vermeiden. Daher bieten sich aus den eutektischen Binärsystemen die In-Sn- und die In-Bi-Legierung an. Beide Legierungen beinhalten die Komponente Indium, das aufgrund ihrer hohen Duktilität das Bonden von Fügepartner mit stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ermöglicht [Dol11].

Das erst genannte System hat die Zusammensetzung In52Sn48 und weist bei 117 °C sein Eutektikum auf. Somit ist es ausschließlich für das Bonden auf PC-Substraten anwendbar. Die binäre Legierung In66Bi34 hat drei eutektische Punkte, wobei der erste bei 73 °C liegt. Daher erfüllt sie die Grundvoraussetzung für das Ultra-Niedrigtemperaturbonden sowohl auf PC- als auch auf PMMA-Substraten.

Um die wesentlichen Prozessparameter zu optimieren, wurde zunächst das Bonden auf starren Si-Substraten - aufgrund der einfachen Handhabung - experimentell untersucht. Die hierbei betrachteten Prozessparameter sind Bondzeit, -temperatur und Druck. Wobei der Bonddruck erst beim Bonden auf Polymer-Substraten variiert wurde, da die mechanischen Eigenschaften und insbesondere die Elastizität und Festigkeit der flexiblen und starren Substrate stark voneinander abweichen und somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet ist.

Als Hauptkriterium für die Optimierung des Bondprozesses ist die Erhöhung der mechanischen Stabilität der Bondverbindung im Scherversuch. Ein weiteres Kriterium zur Bewertung der Bondverbindung, das in dieser Arbeit herangezogen wurde, ist ihr elektrischer Widerstand.

Die Bondversuche mit der In-Sn-Legierung auf starren Substraten haben folgendes gezeigt:

- Bei niedrigen Bondzeiten (unter 5 min) ist keine zuverlässige Bondverbindung zu erzielen.
- Eine Erhöhung der Bondzeit auf 10 und 15 min führte zu einer leichten Abnahme der Scherfestigkeiten der Verbindung aufgrund der Thermomigration.
- Eine Erhöhung der Bondtemperatur hat einen negativen Einfluss auf die mechanische Scherfestigkeit der Bondverbindung.
- Mit zunehmender Bondzeit bzw. -temperatur steigt der elektrische Widerstand der Bondproben.
- Cr ist im Vergleich zu Ta besser geeignet als Haftvermittler.
- Durch den Thermoschocktest werden weder die Scherfestigkeit noch den elektrischen Widerstand der Bondproben beeinträchtigt.

Ferner ist bei der Darstellung der Ergebnisse für diese Legierung anzumerken, dass es absichtlich auf die Standardabweichung verzichtet wurde. Das liegt daran, dass der Kontaktdruck, der eine wesentliche Prozessgröße darstellt und somit die Qualität der Bondverbindung maßgeblich beeinflusst, nicht genau eingestellt werden kann.

Bei den Bonduntersuchungen mit der In-Bi-Legierung auf starren Substraten wurde folgendes festgestellt:

- Die Ergebnisse streuen stark.
- Die Bondverbindungen sind nicht genug stabil, so dass sie in der Regel beim Schneiden der Proben für die Messung des elektrischen Widerstandes versagt haben. Daher war es nicht möglich der jeweilige Einfluss der betrachteten Prozessparameter auf den elektrischen Widerstand umfassend zu untersuchen.
- Das Entstehen einer Oxidschicht auf der Bi-Beschichtung ist kaum zu vermeiden. Diese ist zu entfernen, sonst ist keine Bondverbindung möglich.
- Das Bonden ist erst ab einer Temperatur von 80 °C erfolgreich.

- Mit zunehmender Temperatur steigt die mechanische Stabilität der Bondverbindung.
- Bei einer Bondtemperatur von 95 °C findet neben dem ersten das zweite Eutektikum statt. Dies führt zu einer drastischen Zunahme der Scherfestigkeit der Bondverbindung. Jedoch ist diese Temperatur für das Bonden auf PMMA-Substraten zu hoch.
- Eine Erhöhung der Bondzeit führt zunächst (bis 15 min) zu einer Steigerung und dann zu einer Abnahme der Scherfestigkeiten.

Ferner wurden für das Bonden auf flexiblen Substraten die Prozessparameter gemäß Tabelle 7 übernommen.

Tabelle 7: Identifizierte optimale Prozessparameter

	In-Sn-Legierung	In-Bi-Legierung
Bondzeit in min	5	15
Bondtemperatur in °C	130	85

Die Bondversuche mit der eutektischen In-Sn-Legierung auf flexiblen PC-Substraten waren erfolgreich und haben gezeigt:

- Das Beschichten ohne Haftvermittler führt zu besseren Bondverbindungen hinsichtlich der mechanischen Stabilität.
- Bei einem Kontaktdruck von 1,6 MPa ist die Scherfestigkeit der Bondverbindung am höchsten. Die kann mittels plastomechanischer Ansätze erklärt werden.

Dagegen waren Bondverbindungen mit der eutektischen In-Bi-Legierung auf flexiblen PC- oder PMMA-Substraten nicht möglich. Erst durch das Ultraschallbenden konnten Bondverbindungen - jedoch mit geringer Scherfestigkeiten - hergestellt werden.

Zusammenfassend haben die Bonduntersuchungen zunächst gezeigt, dass die In-Bi-Legierung grundsätzlich für das Bonden auf starren Si-Substraten anwendbar ist. Die

Ergebnisse waren jedoch nicht reproduzierbar. Ein Grund hierfür kann die noch fehlende Erfahrung mit Bismut. Insbesondere ist die Beherrschung der Bi-Beschichtung sowie der optimalen Entfernung der Bismutoxidschicht für die Qualität der Bondverbindung entscheidend.

Die Versuche auf flexiblen PMMA- und PC-Substraten waren dagegen nicht erfolgreich. Dies ist u.a. auf die zu hohe Sprödigkeit dieser Legierung zurückzuführen. Durch den Zusatz von Sn können die mechanischen Eigenschaften dieser Legierung und insbesondere die Duktilität, wie bereits in Kapitel 2.2.4.3 erwähnt, verbessert werden. Die eutektische Ternärlegierung hat die Zusammensetzung $\text{Bi}_{57,2}\text{In}_{24,8}\text{Sn}_{18}$ und weist ihr Eutektikum bei 77 °C [Sen02]. In weiteren Arbeiten ist die Betrachtung dieser Legierung für das Bonden auf flexiblen PMMA-Substraten sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [Ahn12] Ahn, Y., Kim, Y.-H., Kim, S., Jeong, K.-H.: Thickness dependent surface microstructure evolution of bismuth thin film prepared by molecular beam deposition method, *Current Applied Physics* 12, 1518 – 1522, 2012
- [Aks12] Aksöz, S., Marasli, N.: Thermal and electrical conductivities of silver-indium–tin alloys, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 73, Issue 7, 902–910, 2012
- [Bab13] Babel, G.: *Bordnetze und Powermanagement*, Springer Vieweg, 2013
- [Bar12] Bargel, H.-J., Schulze, G.: *Werkstoffkunde*, 11. Auflage, Springer Vieweg, 2012
- [Bat07] Bath, J.: *Lead-Free Soldering*, Springer, 2007
- [Bin08] Bin Jahari, M.S.: Properties of low temperature indium-based ternary lead free solders system, Dissertation, Universität Sains Malaysia, 2008
- [Cha06] Chang, S.C., Lin, S.C., Hsieh, K.C.: The Formation and Growth of Intermetallic Compounds in Sn-Zn and Sn-Zn-Al Solder with Ni/Au Surface Finish Bond Pad, *Journal of electronic materials*, Vol. 35, No. 3, 2006
- [Che00] Cheng, Y.T., Liwei, L., Najafi, K.: Localized silicon fusion and eutectic bonding for MEMS fabrication and packaging, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Volume: 9 , Issue: 1, 3 – 8, 2000
- [Che06] Chen, S.-W., Lin, S.-K., Yang, C.-F.: Interfacial Reactions in the Pb-Free Composite Solders with Indium Layers, *Journal of electronic materials*, Vol. 35, No. 1, 2006
- [Che07] Chen, S.-W., Wang, C.-H., Lin, S.-K., Chiu, C.-N.: Phase diagrams of Pb-free solders and their related materials systems, *Lead-Free Electronic Solders*, 19–37, 2007
- [Che79] Chen, Y.-C., So, W.W., Lee, C.C.: A Fluxless Bonding Technology Using Indium–Silver Multilayer Composites, *IEEE Transactions on components, packaging, and manufacturing technology, Part A*, Vol. 20, No. 1, März 1997
- [Cho01] Choe, S., Chuang, R., Lee C.-C.: Fluxless Sn-Bi-Au Bonding Process Using Multilayer Design, *Electronic Components and Technology Conference*, 2001
- [Crn09] Crnogorac, F., Birringer, R., Dauskardt R., Pease, F.: Aluminum-Germanium Eutectic Bonding for 3D Integration, *IEEE International Conference*, 1-5, 2009

-
- [Deo2003] Montes de Oca, P.: Vergleichende Charakterisierung verschiedener Polymere mit Hilfe von dynamisch mechanischer Analyse (DMA) und dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC), Forschungsarbeit, Grin Verlag, 2003
- [DFR08] DFR Solutions: Processing and Reliability Issues for Eutectic AuSn Solder Joints, IMAPS – International Microelectronics And Packaging Society, Providence, Rhode Island, 909-916, November 2-6, 2008
- [Dil05] Dilthey, U., Brandenburg, A.: Montage hybrider Mikrosysteme, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [Dol11] Dolkemeyer, J.: Aufbau- und Löttechniken für die Montage von Festkörperlasern, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2011
- [Dom08] Domininghaus, H., Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T.: Kunststoffeigenschaften und Anwendungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, 2008
- [Du12] Du, L., Zhao, Z., Xiao, L., Fang, Z., Tian, Q., Sun, X., Wang, X.: Nickel–chromium alloy piezoresistive pressure sensor using eutectic bonding, *Micro & Nano Letters*, Vol. 7, Iss. 12, 1184–1188, 2012
- [Dzi06] Dziuban, J.A.: Bonding in Microsystem Technology, Springer, 2006
- [Eli03] Elias, H.-G.: Makromoleküle: Band 3: Industrielle Polymere und Synthesen, Wiley VCH Verlag GmbH, 2003
- [Fab07] Fabrichnaya, O., Witusiewicz, V., Gröbner, J.: Bismuth – Indium – Tin, *Landolt-Börnstein – Group IV Physical Chemistry: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, Volume 11C3: Non-Ferrous Metal Systems, Part 3, 2007
- [Fan12] Ji Fan, J., Tan, C.S.: Metallurgy – Advances in Materials and Processes, Yogiraj Pardhi, 2012
- [Fle84] Fletcher, M.A., Young, M.S.S., Geyling, F.T., Nakahara, S., Parsey jr.: Bismuth Precipitation in „Monocrystalline“ InBi, *Journal of Metallurgical Transactions A*, 15, 1984
- [Gau06] Gausemeier, J., Feldmann, K.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen, Carl Hanser Verlag Münschen Wien, 2006
- [Hug13] <http://www.hug-technik.com>
- [Hum05] Humpston, G., Jacobson, D.: Indium solders, *Advanced materials & processes*, April 2005
- [Kat02] Kattner, U.: Phase diagrams for lead-free solder alloys, *The journal of the Minerals, Metals & Materials Society (JOM)*, 54(12):45-51, 01/2002
- [Kie08] Kiehl, P., Breutmann, N., Goethe, G.: Klein – Einführung in die DIN-Normen, 14. Auflage, Berlin, 2008
- [Lam02] Lambracht, P.: Materialwissenschaftliche Aspekte bei der Entwicklung

- bleifreier Lotlegierungen, Dissertation, Darmstadt, 2002
- [Lee00] Lee, C., Huang, W.-F., Shie, J.-S.: Wafer bonding by low-temperature soldering, *Sensors and Actuators*, 85, 330 – 334, 2000
- [Lee93] Lee, C.C., Wang, C.Y., Matijasevic, G.: Au-In Bonding Below the Eutectic Temperature, *IEEE Transactions on component hybrids and manufacturing technology*, Vol. 16, No. 3, 311 – 316, May 1993
- [Lu09] Lu, D., Wong, C.P.: *Materials for Advanced Packaging*, Springer, 2009
- [Mar09] Martin, B.: *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung*, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [Mas91] Massalski, T.B.: *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd Edition. Materials Park, OH: ASM International, 1991
- [Mat03] Matthes, K.-J., Riedel, F.: *Fügetechnik*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003
- [McC94] McCornack, M., Jin, S., Chen, H.S.: New lead-free, Sn-Zn-In solder alloy, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 23, No. 7, 687 – 688, 1994
- [Mes02] Mescheder, U.M., Alavi, M., Hiltmann, K., Lietzau, Ch., Nachtigall, Ch., Sandmaier, H.: Local laser bonding for low temperature budget, *Sensors and Actuators A* 97-98, 422-427, 2002
- [Nic01] Niklaus, F., Enoksson, P., Kälvesten, E., Stemme G.: Low-temperature full wafer adhesive bonding, *Journal of micromechanics and mikroengineering* 11, 100-107, 2001
- [NN01] www.schweizerische-metallhandelsag.ch (Stand 21.01.2014)
- [NN02] <http://www.physik.uni-erlangen.de/lehre/daten/NebenfachPraktikum/Ultraschall.pdf> (Stand 14.01.2014)
- [NN03] <http://www.impt.uni-hannover.de/> (Stand 21.01.2014)
- [NN04] <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/energiedispersive%20R%C3%B6ntgenspektroskopie> (Stand 21.01.2014)
- [Ohn00] OHNUMA, I., CUI, Y., LIU, J., INOHANA, Y., ISHIHARA, S., OHTANI, H., KAINUMA, R., ISHIDA, K.: Phase Equilibria of Sn-In Based Micro-Soldering Alloys, *Johurnal of Electronic Materials*, Vol 29, No 10, 2000
- [Pat06] Patzig, C.: *Herstellung und Untersuchung dünner Wismutschichten auf gitterunangepassten Substraten*, Diplomarbeit, Institut für Festkörperphysik Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2006
- [Pie11] Piersig, W.: *Zinn - Metall Der Antike, Gegenwart, Zukunft*, GRIN Verlag, 2011
- [Pre92] Predel B.: Bi-In, *Landolt-Börnstein – Group IV Physical Chemistry Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, Vol. 5b, 1-6, 1992
- [Put01] Puttlitz, K., Totta, P.: *Interconnection handbook*, Springer Science+Business Media, LLC, 2001

-
- [Put05] Puttlitz, K.J., Stalter, K.A.: Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies, Taylor & Francis Library, 2005
- [Roy92] Roy, R., Sen, S. K.: The kinetics of formation of intermetallics in Ag/In thin film couples, Thin Solid Films, Vol. 197, 303–318, 1992
- [Sen02] SENGUPTA, S., SODA, H., McLEAN, A.: Microstructure and properties of a bismuth-indium-tin eutectic alloy, J. Materials Science 37, 1747 – 1758, 2002
- [Sha13a] Shalaby, R.M.: Effect of silver and indium addition on mechanical properties and indentation creep behavior of rapidly solidified Bi–Sn based lead-free solder alloys, Materials Science and Engineering, A 560, 86-95, 2013
- [Sha13b] Shalaby, R.M.: Wettability and electrical properties of Bi-Sn based lead free solders alloys, International Journal of Physics and Research (IJPR), Vol. 3, Issue 3, 1-6, Aug 2013,
- [Sob11] Sobia, B.: Investigation of Wafer Level Au-Si Eutectic Bonding of Shape Memory Alloy (SMA) with Silicon, Dissertation, KTH electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2011
- [Soh07] Sohn, Y.-C, Wang, Q., Ham, S.-J., Jeong, B.-G., Jung, K.-D., Choi, M.-S., Kim, W.-B., Moon, C.-Y.: Wafer-level low temperature bonding with Au-In system, Electronic Components and Technology Conference, ECTC '07, 57th, 633 – 637, 2007
- [Sug07] Suganuma, K., Kim, K.-S.: Sn–Zn low temperature solder, Lead-Free Electronic Solders, 121–127, 2007
- [Tak02] Takao, H., Yamada, A., Hasegawa, H.: Mechanical Properties and Solder Joint Reliability of Low-Melting Sn-Bi-Cu Lead Free Solder Alloy, (Toyota Central R&D Labs., Inc.), Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.5, No.2, 152-158, 2002
- [Tan05a] Tan, A.W.Y., Tay, F.E.H.: Localized laser assisted eutectic bonding of quartz and silicon by Nd:YAG pulsed-laser, Sensors and Actuators A120, 550-561, 2005
- [Tan05b] Tan, A.W.Y., Tay, F.E.H., Zhang, J.: Characterization of localized laser assisted eutectic bonds, Sensors and Actuators, A 125, 573 – 585, 2006
- [Tu07] Tu, K.-N.: Solder joint technology Materials, properties, and reliability, Springer, 2007
- [Vet02] Vetter, J.E.: Nuclear Fusion Programme, Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, 2002
- [Völ00] Völklein, F., Zetterer, T.: Praxiswissen Mikrosystemtechnik – Grundlagen – Technologien – Anwendungen, 2. Auflage, Vieweg Praxiswissen, 2000
- [Wan92] Wang, C.Y., Lee, C.C.: A Eutectic Bonding Technology at a

-
- Temperature Below the Eutectic Point, Electronic Components and Technology Conference, 42nd, 1992
- [Wie12] Weißach, W., Dahms, M.: Aufgabensammlung Werkstoffkunde: Fragen – Antworten, 10. Erweiterte Auflage, Springer Vieweg, 2012
- [Wol97] Wolffenbuttel, R.F.: Low-temperature intermediate Au-Si wafer bonding; eutectic or silicide bond, Sensors and Actuators A 62, 680-686, 1997
- [Won09] Wong, W.S., Salleo, A.: Flexible Electronics: Materials and Applications, Springer, 2009
- [Yan08] Yan, L., Lee, C., Yu, D., Choi, W.K., Yu, A., Yoon, S.U, Lau, J.: A Hermetic Chip to Chip Bonding at Low Temperature with Cu/In/Sn/Cu Joint, IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 1844 – 1848, 2008
- [Yan99] Yang, F.-Y., Liu, K., Chien, C.-L., Searson, P.C.: Large Magnetoresistance and Finite-Size Effects in Electrodeposited Single-Crystal Bi Thin Films, Physikal Review, Vol. 82, No. 16, April 1999