

Karsten Meißner

Reduzierung der Belastung eines Chips beim
Ultraschall-Flipchip-Bonden durch Einführung
einer zweidimensionalen Ultraschallanregung

Reduzierung der Belastung eines Chips beim Ultraschall-Flipchip-Bonden durch Einführung einer zweidimensionalen Ultraschallanregung

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Karsten Meißner
aus Niedermarsberg

Tag des Kolloquiums: 17.10.2011
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Hesse & Knipps GmbH im Zeitraum von 2002 bis 2011. Der Grundstein für das Vorhaben der Promotion wurde jedoch durch die Arbeit in der Fachgruppe Mechatronik und Dynamik am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn in den Jahren 1997 bis 2000 gelegt.

Bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Wallaschek. Ohne seine initiale Anregung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am HNI anzufangen, hätte ich nie die Idee und den Mut gehabt, dieses Vorhaben zu starten. Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Sattel danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank gilt meinem ehemaligen Chef Herrn Dr.-Ing. Hans-Jürgen Hesse, der mich mit Nachdruck zum Abschluss dieser Arbeit drängte und mich dabei tatkräftig als Diskussionspartner und Korrekturleser unterstützte.

Allen meinen Kollegen, sowohl im HNI als auch bei der Hesse & Knipps GmbH, bin ich für die vielen fachlichen und auch die abschweifenden Diskussionen dankbar. Stellvertretend für meine Zeit am HNI will ich Herrn Dr.-Ing. Heiner Storck besonders für die vielen Diskussionen danken. Herrn Dipl.-Ing. Frank Walther und Herrn Dr.-Ing. Andreas Jochheim danke ich stellvertretend für meine Kollegen bei der Hesse & Knipps GmbH.

Einen schlecht in Worte zu fassenden Dank schulde ich meinen Eltern. Meinem Vater danke ich für die häufig ungeliebten Arbeiten im Bereich des Maschinenbaus im Schulalter, für die mein Bruder und ich zu dieser Zeit kein Verständnis hatten. Wie wir heute wissen, wurden zu dieser Zeit die Fundamente für unseren heutigen Werdegang gelegt. Meiner Mutter danke ich für die aufopfernde Fürsorge und den eisernen Willen uns diese Ausbildung zu ermöglichen. Meinen Geschwistern Karin und Knut danke ich für das Ertragen eines kleinen Bruders, was sicher nicht immer einfach war.

Abschließend danke ich meiner Frau Milena und meinen beiden Kindern Kimon und Lia. Meiner Frau möchte ich für die unbegrenzte Unterstützung in allen Belangen und für das Übernehmen zusätzlicher Lasten, in den Zeiten in denen ich mich diesem Vorhaben gewidmet habe, danken. Ferner für den Verzicht auf viele nicht gemeinsam verbrachte Stunden. Meinen Kindern danke ich für das Lächeln und die Freude in manch einem dunklen Moment.

Paderborn, im Oktober 2012

Karsten Meißner

Zusammenfassung

Das Ultraschall-Flipchip-Bonden wird zur Kontaktierung von Chips mit kleinen Abmessungen und geringen Anschlusszahlen in der Elektronikfertigung seit vielen Jahren genutzt. Bei diesem Verfahren werden die Anschlusselemente des Chips mit einem hochfrequenten Reibschweißverfahren mit den Anschlussstellen auf einem Träger verbunden. Es ist bis heute nicht gelungen, dieses Fertigungsverfahren auf Chips mit großen Anschlusszahlen und einer großen Chipfläche zu übertragen, da die zur Verbindungsbildung einzuleitende Ultraschallenergie Beschädigungen am Chip hervorruft. In dieser Arbeit wird ein Ansatz erarbeitet, mit dem es möglich ist, die Belastungen auf den Chip beim Ultraschall-Flipchip-Bonden zu verringern. Hierzu wird neben analytischen Betrachtungen des Bondprozesses auch ein Ersatzmodell zur Simulation der Vorgänge beim eindimensionalen Bonden genutzt. Mit Hilfe des Ersatzmodells werden die Vorgänge beim Bonden analysiert. Die grundlegende Idee zur Reduzierung der Belastung ist den Chip beim Reibschweißvorgang auf einer ebenen zweidimensionalen Trajektorie zu bewegen anstatt auf einer linearen eindimensionalen Bahn. Nach einer analytischen Betrachtung der Vorgänge beim zweidimensionalen Ultraschall-Flipchip-Bonden wird für die zweidimensionale Anregung ein Ersatzmodell der Last entwickelt. Das mit Hilfe des Modells abgeleitete Ergebnis, die Reduktion der Belastung durch die Einführung der zweidimensionalen Anregung, wird durch experimentelle Untersuchungen mit einem zweidimensionalen Ultraschallwerkzeug bestätigt.

Abstract

Ultrasonic flip chip bonding has been used for bonding chips with small dimensions and low pin counts for several years. The difference between this technology and other flip chip technologies is, that the connection between the chip and the substrate is realised by exciting the chip with ultrasonic vibration. So far it was not possible to bond chips with larger dimensions and higher number of pin counts, because the chip was damaged during the process. the aim of this thesis is to show how the applied load can be reduced by using a two-dimensional motion of the chip instead of the linear one-dimensional motion. For this purpose an analytical analysis was done and a mathematic model was introduced to simulate the bonding process. Based on the analysis and the model an approach to reduce the applied load was developed. A mathematical model is developed to monitor the load for the chip during the bonding process and it was shown that the load during a two dimensional bond is significantly smaller than that for the common one dimensional bonding process. The results are verified by experimental investigation obtained by bonding chips using a two dimensional transducer.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel dieser Arbeit	2
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Die Direktmontageverfahren	4
2.1	Das Drahtbonden	5
2.1.1	Wedge-Wedge-Bonden	6
2.1.2	Ball-Wedge-Bonden	6
2.2	Tape Automated Bonding	8
2.3	Standard Flipchip-Verfahren	9
2.3.1	Soldering bonding	11
2.3.2	Herstellen einer Verbindung durch Kleben	13
2.3.3	Thermokompressionsbonden	14
2.4	Das US-Flipchip-Bonden	15
2.4.1	Das transversale US-Flipchip-Bonden	16
2.4.2	Das longitudinale US-Flipchip-Bonden	17
2.5	Eigenschaften der verschiedenen Direktmontageverfahren	17
2.5.1	Kostenvergleich	18
2.5.2	Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren	18
2.5.3	Zukünftige Anforderungen an die Montagetechnik	22
2.5.4	Zusammenfassung der Eigenschaften	24
3	Aktuell eingesetzte Ultraschallwerkzeuge	25
3.1	Aufbau eines Ultraschallsystems	25
3.1.1	Die elektrische Ansteuerung	25
3.1.2	Das elektromechanische Subsystem	27
3.1.3	Das mechanische Subsystem	29
3.1.4	Die Last des Systems	31
3.2	Darstellung der aktuell eingesetzten US-Werkzeuge	31
3.2.1	Longitudinal schwingende US-Werkzeuge	33
3.2.2	Transversal schwingende US-Werkzeuge	35
3.2.3	Mehrdimensional schwingende US-Werkzeuge	36
4	Die Verfahren zur Qualitätsprüfung	38
4.1	Experimentelle Bewertung von US-Werkzeugen	38
4.1.1	Aufbau zur Messung einer Eingangsadmittanz	39
4.1.2	Aufbau einer Kernadmittanz-Messung	41

4.1.3	Allgemeine Anforderungen an US-Werkzeuge	43
4.2	Qualitätsprüfung in der Halbleiterfertigung	44
4.2.1	Zerstörende Prüfverfahren	44
4.2.2	Nichtzerstörende Verfahren	49
5	Modellbildung zweidimensionaler US-Flipchip-Prozess	51
5.1	Anforderungen an moderne US-Werkzeuge	51
5.2	Betrachtung des eindimensionalen US-Flipchip-Prozesses	52
5.2.1	Ersatzmodell für den eindimensionalen US-Bondprozess	54
5.2.2	Energiebilanz beim eindimensionalen US-Bonden	59
5.3	Schlussfolgerungen aus dem eindimensionalen Bondprozess	62
5.3.1	Variation der Schweißzeit	62
5.3.2	Vermeidung des Stick-Slip-Effektes	63
5.3.3	Bewegung auf Bahnen höherer Ordnungen	63
5.3.4	Wahl des Ansatzes	64
5.4	Energiebilanz beim zweidimensionalen US-Bondprozess	65
5.4.1	Aufstellen der Energiebilanz	65
5.4.2	Energiebilanz bei Abweichung von der kreisförmigen Bewegung	71
5.5	Ersatzmodell für den zweidimensionalen US-Bondprozess	72
5.5.1	Lastmodell des Bondprozesses	73
5.5.2	Das zweidimensionale Ersatzmodell	75
5.6	Ergebnisse der Betrachtungen mit Hilfe der Ersatzmodelle	77
5.6.1	Vergleich der Simulationsergebnisse	78
5.6.2	Vergleich der Energiebilanzen aus der Simulation	81
5.6.3	Verringerung der Belastung durch Reduzierung der Amplitude	82
6	Das zweidimensionale US-Werkzeug	84
6.1	Aufbau des zweidimensionalen US-Werkzeuges	84
6.2	Mögliche Ansteuerungskonzepte	86
6.2.1	Resonant angeregter zweidimensionaler Ultraschall	87
6.2.2	In einem Arbeitspunkt angeregter zweidimensionaler Ultraschall	88
6.3	Charakterisierung der aufgebauten Bauform	90
6.3.1	Freischwingendes US-Werkzeug	90
6.3.2	Belastetes US-Werkzeug	94
7	Vergleich der ein- bzw. zweidimensionalen Anregung	96
7.1	Die Versuchsumgebung	96
7.1.1	Die Maschine	97

7.1.2	Versuchsmaterial	101
7.2	Die Versuchsplanung	102
7.2.1	Identifikation bzw. Beschreibung des Problems	103
7.2.2	Definition der Ziele	104
7.2.3	Auswahl geeigneter und messbarer Qualitätsmerkmale	104
7.2.4	Festlegung der einzelnen Versuchsbedingungen	108
7.2.5	Durchführung der Versuche	110
7.2.6	Analyse der Versuchsdaten	110
7.2.7	Interpretation der Ergebnisse	111
7.2.8	Validierung der gewonnenen Erkenntnisse	111
7.3	Optimierung der Parameter für die ein- bzw. zweidimensionale Anregung . .	112
7.3.1	Die eindimensionale Anregung	112
7.3.2	Die zweidimensionale Anregung in der Ebene	118
7.4	Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse	120
8	Zusammenfassung	122
A	MATLAB[®]-Simulink Blockschaltbild der Reibkraft	129

Abbildungsverzeichnis

1	Einteilung verschiedener Chipmontageverfahren	4
2	Geometrische Verhältnisse einer Wedge-Wedge-Bondverbindung	5
3	Die Verfahrensabläufe beim Drahtbonden	7
4	REM-Aufnahme einer Ballbondverbindung	9
5	Eine Verbindung hergestellt mit Tape Automated Bonding	10
6	Verschiedene Flipchip-Verfahren	11
7	Verschiedene Klebverfahren	12
8	Vergleich TC-Bonden mit TS-Bonden	15
9	Links longitudinales und rechts transversales US-Flipchip-Bonden	16
10	Planaritätsproblem	17
11	Aufbau eines speziellen US-Systems für das Bonden	26
12	Der direkte und der inverse piezoelektrische Effekt	28
13	Aufbau eines Halbwellen-Ultraschallwandlers	28
14	Drei beispielhafte Transformatoren	30
15	Longitudinal schwingender Transducer mit Bondtool	33
16	Versuchsaufbau zur Messung einer Eingangsadmittanz	38
17	Vierpol	39
18	Versuchsaufbau zur Messung einer Kernadmittanz	41
19	Durchführung eines Ball-Schertests	45
20	Durchführung und Fehlercodes beim Die-Schertest	47
21	Schliff einer Flipchip-Verbindung	48
22	Cratering - Beschädigung des Chips unter dem Bondpad	52
23	Elektromechanisches Ersatzmodell	54
24	Zeitlicher Ablauf der Verbindungsbildung beim US-Drahtbonden	57
25	Stick-Slip-Bewegung beim Thermosonic-Ball-Bonden	58
26	Ersatzmodell eines Jenkin-Elements und die Kraft-Verformungs-Charakteristik	59
27	Elektromechanisches Ersatzmodell ergänzt um ein Jenkin-Element	61
28	Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung bei einer linearen und einer kreisförmigen Bewegung	64
29	Verschiedene Lissajous-Figuren	65
30	Reduktion der Amplitude der Toolspitze	66
31	Kreisförmige und elliptische Bahn	71
32	Modell zur Berechnung der Last pro Anregung	74
33	Blockschaltbild des Gesamtsystem	76
34	Eingangsrößen der Bondsimulation	79

35	Hüllkurven der Auslenkung der Wedgespitze x_{ws} (skaliert mit der Kontaktsteifigkeit c_L) und der Reibkraft F_R	80
36	Über die Dauer eines Bonds geleistete Arbeit	81
37	Reduzierte Spannung bei zweidimensionaler Anregung	83
38	Vergleich der Amplituden bei einem konstanten Energieeintrag am Ende eines Bonds	83
39	Zweidimensionales US-Werkzeug	84
40	Neu entwickeltes zweidimensionales US-Werkzeug	85
41	Funktionsweise des zweidimensionalen US-Werkzeuges	86
42	Bahn der Spitze des Bondtools bei Anregung mit unterschiedlichen Frequenzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten	87
43	Ermittlung eines Arbeitspunktes durch Messung der Admittanzen	89
44	Optimale Ausspannlänge des Bondtools beim zweidimensionalen US-Werkzeug	91
45	3d-Lasermessung bei freischwingendem Wedge	92
46	Spannungen und Ströme bei freischwingendem Wedge	93
47	Geschwindigkeiten und Ströme bei freischwingendem Wedge	94
48	Spannungen und Ströme eines Bondvorgangs	95
49	XY-Darstellung der Ströme mehreren Bondvorgänge	95
50	Der US-Flipchip-Bonder FJ520 der Hesse & Knipps GmbH	96
51	Bondkopf mit US-Werkzeug	99
52	Pyramidenförmiges und ein flaches Bondtool	100
53	Modell des genutzten Chips	101
54	Studbump	102
55	Modell des genutzten Substrates	102
56	Verformungs- und Scherwerte von Versuch V8	114
57	Verformungswerte und Scherwerte bei eindimensionaler Anregung	114
58	Einfluss der Bondkraft bei eindimensionaler Anregung	115
59	Einfluss der Leistung bei eindimensionaler Anregung	116
60	Einfluss der Bondzeit bei eindimensionaler Anregung	117
61	Verformungs- und Scherwerte bei transversaler Anregung	118
62	Verformungs- und Scherwerte bei kreisförmiger Anregung	120
63	MATLAB [®] -Simulink Blockschaltbild der Reibkraftberechnung	129

Tabellenverzeichnis

1	Berechnung der Montage- und Kontaktierungskosten pro Chip	19
2	Vor- und Nachteile der Montageverfahren	21
3	Entwicklung ausgewählter Kenngrößen	22
4	Marktprognose der Halbleiterindustrie	23
5	Longitudinal schwingende US-Werkzeuge	32
6	Transversal schwingende US-Werkzeuge	34
7	Komplex schwingende US-Werkzeuge	36
8	Beispielhafte Eingangsadmittanzverläufe	40
9	Beispielhafte Kernadmittanzverläufe	41
10	Darstellung als Ortskurve	42
11	Phasen der Kraft-Verformungs-Charakteristik	60
12	Identifizierte Modellparameter eines US-Werkzeuges	78
13	Ergebnisse der Arbeitspunktbestimmung bei optimaler Ausspannlänge	91
14	Versagungsformen des Versuchsproduktes beim Die-Schertest	107
15	Bondparameter und die über 26 Versuche erzielten Mittelwerte der Qualitätsmerkmale bei eindimensionaler Anregung	113
16	Optimierte Bondparameter	118
17	Ergebnisse bei eindimensionaler Anregung mit optimierten Bondparametern	119
18	Bondparameter und die über 26 Versuche erzielten Mittelwerte der Qualitätsmerkmale bei kreisförmiger Anregung	119
19	Zusammenfassung der Ergebnisse mit optimierten Bondparametern	121

1 Einleitung

Die Herstellung und Entwicklung von elektronischen Geräten, von der Waschmaschine über das Handy bis hin zum Computer, weist seit Jahren eine der höchsten Wachstumsraten aller Industriezweige auf. Am Anfang dieses enormen Wachstums stand die Erfindung des bipolaren Transistors im Jahre 1949 durch Bardeen, Brattain und Shockley. Durch diesen Baustein wurde die Welt der Elektrotechnik dramatisch verändert. Ende der Fünfzigerjahre kam es zur Entwicklung der integrierten Schaltkreise (Integrated Circuit = IC). Bis heute wurde deren Zuverlässigkeit stetig verbessert und deren Integrationsgrad stetig erhöht.

Mit der ständigen Zunahme der Komplexität elektronischer Systeme wuchs schnell die Anzahl der notwendigen integrierten Schaltungen und somit auch die Notwendigkeit, diese Schaltungen in großer Stückzahl zu fertigen und untereinander oder mit anderen Bauteilen zu verbinden. Es gelang, die einzelnen Schaltkreise und ihre Verdrahtung in einem gemeinsamen Fertigungsprozess auf einem einkristallinen Halbleiterplättchen (Chip oder Die genannt) herzustellen. Basismaterial zur Herstellung dieses Halbleiterplättchens ist hauptsächlich einkristallines Silizium.

Die starke Entwicklung der Mikroelektronik seit der Erfindung des Transistors kann an einigen langfristigen Zielen fest gemacht werden:

- Miniaturisierung der Bauteile und Baugruppen,
- Vergrößerung der Leistungsdichte,
- Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung integrierter Bauelemente,
- Steigerung der Zuverlässigkeit der Montageverfahren,
- geringe Leitungsinduktivitäten und -kapazitäten für Anwendungen mit hohen Frequenzen,
- Reduzierung der Verlustleistung bzw. Wärmeentwicklung,
- Reduzierung von Kosten.

Damit auch in Zukunft die gesteckten Ziele erreicht werden, müssen nicht nur die zur Herstellung der Chips notwendigen Maschinen verbessert, sondern auch die Montageverfahren weiterentwickelt werden. Ein vielversprechendes Verfahren ist das Flipchip-Bonden und dort insbesondere das Ultraschall-Flipchip-Bonden (US-Flipchip-Bonden). Trotz des großen Potentials dieser immer noch recht neuen Technologie wird dieses Verfahren im Markt nur vereinzelt eingesetzt. Die fehlende Akzeptanz der halbleiterfertigenden

Industrie ist darin begründet, dass mit dem bekannten US-Flipchip-Verfahren, dem transversalen US-Flipchip-Bonden, bis heute nur Chips mit geringen Abmessungen und geringen Anschlusszahlen (bis ca. 100) verarbeitet werden können [1]. Dies resultiert aus dem Aufbau der eingesetzten Ultrasschallwerkzeuge (US-Werkzeuge), die nicht in der Lage sind, die für höhere Anschlusszahlen notwendige Ultraschalleistung und Normalkraft zu übertragen, ohne dabei den Chip zu beschädigen.

1.1 Ziel dieser Arbeit

In der Literatur existieren zum Thema Flipchip-Technologien viele Arbeiten (z. B. [2], [3] oder [4]). Jedoch beschäftigen sich diese Arbeiten in erster Linie mit den klassischen Flipchip-Technologien, wie dem von IBM entwickelten C4 Prozess (Controlled Collapse Chip Connection = C4). Nur an wenigen Stellen wurden auch andere Flipchip-Technologien entwickelt bzw. untersucht. Als Basis und Einstieg für diese Arbeit dienen die Untersuchungen, die am Lehrstuhl von *Prof. Lee* am *Department of Mechanical Engineering* an der *University of Colorado*, zu Beginn der 90iger Jahre gemacht wurden ([5],[6],[7]). Diese Arbeiten beinhalteten sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen zum Thema US-Flipchip-Bonden. Es wurden besonders die Probleme bei größeren Chips mit hohen Anschlusszahlen angesprochen, jedoch wurden weder in den genannten Arbeiten noch in den letzten 20 Jahren gezielte Lösungsansätze zur Serienfertigung von größeren Chips mit hohen Anschlusszahlen erarbeitet. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt darin, zu untersuchen, in wie weit es möglich ist, eine US-Flipchip-Verbindung mit einer großen Anzahl von Anschlüssen mit einer möglichst geringen US-Energie zu bonden und dadurch sowohl eine makroskopische als auch eine mikroskopische Beschädigung des Chips zu vermeiden. Die Akzeptanz in der Halbleiterfertigungsindustrie würde sprunghaft ansteigen, wenn erst die Basis geschaffen würde, in naher Zukunft Chips mit größeren Abmessungen (20 x 20 mm²) und größerer Anschlusszahlen (bis 5000) mit dem US-Flipchip-Verfahren verarbeiten zu können.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung wird im zweiten Kapitel der Stand der Technik der bekannten Direktmontageverfahren erläutert. Dabei stehen die Chip-On-Board-Verfahren (COB-Verfahren) wie Drahtbonden, Tape Automated Bonding und die Flipchip-Technologie, besonders das für diese Arbeit wichtige Bondverfahren US-Flipchip-Bonden, im Vordergrund. Zum Abschluss dieses Kapitels werden die einzelnen Direktmontageverfahren einander gegenübergestellt und die Vor- und Nachteile diskutiert. Die heute bei der Direktmontage eingesetzten US-Werkzeuge werden in Kapitel drei

vorgelegt. Bevor die US-Werkzeuge der einzelnen Verfahren genannt werden, wird der allgemeine Aufbau und die Funktionsweise von US-Werkzeugen erläutert. Im anschließenden Kapitel vier wird ein Einblick in die Anforderungen an eine Charakterisierung und die Prüfverfahren eines US-Werkzeuges und die Qualitätsprüfung erzeugter Verbindungen in der Halbleiterfertigung gegeben. Mit Hilfe dieser Verfahren werden im späteren Verlauf der Arbeit die US-Werkzeuge und die Verbindungen analysiert und bewertet. Ausgehend von den in den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnissen werden in Kapitel fünf die Anforderungen der Halbleiterfertigung an neue US-Werkzeuge zusammengefasst und mit dem Potential der heute eingesetzten US-Werkzeuge verglichen. Aufgrund der aus diesem Vergleich gewonnenen Ergebnisse wird die Notwendigkeit, die Belastungen der zu verbindenden Bauteile während des Verbindungsprozesses zu reduzieren, deutlich. Aufbauend auf drei Lösungsansätzen wird ein Ansatz zur Reduzierung der Belastung beim Ultraschall-Flipchip-Bonden sowohl analytisch als auch durch Simulation des Bondvorgangs entwickelt und bestätigt. Zur weiteren Validierung des gewählten Ansatzes wird ein neu entwickeltes US-Werkzeug in Kapitel sechs vorgestellt und charakterisiert. Eine endgültige Bewertung des neu entwickelten US-Werkzeuges und eine experimentelle Validierung der aufgestellten Thesen erfolgt im anschließenden Kapitel sieben. Hier wird unter Bedingungen einer Serienfertigung und unter Anwendung der zuvor angesprochenen Qualitätsverfahren zur Qualifizierung der erzeugten Verbindungen ein direkter Vergleich der heute eingesetzten und des entwickelten US-Werkzeuges durchgeführt. Zum Abschluss der Arbeit werden in Kapitel acht die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick zur Entwicklung der US-Werkzeuge im US-Flipchip-Bonden gegeben.

2 Die Direktmontageverfahren

Die Montageverfahren in der Halbleiterfertigung werden in drei Gruppen unterteilt. Beim sog. First Level Packaging wird der Chip in ein für ihn speziell angefertigtes Gehäuse eingesetzt (gehäuster Chip). Die von außen zugänglichen Anschlüsse des Gehäuses werden vor dessen Verschließen mit den Anschlussflächen des Chips elektrisch leitend verbunden. Wird dieser so aufgebaute Baustein mit Hilfe verschiedener Verfahren auf eine Leiterplatte (z. B. durch Löten) oder mit Hilfe eines Sockels befestigt, wird dies als Second Level Packaging bezeichnet. Und wenn ungehäuste Chips direkt auf einem Schaltungsträger (z. B. Leiterplatte, Keramik, Folie oder Wafer) montiert und die Anschlussflächen des Chips (Bondpads) elektrisch leitend mit dem Schaltungsträger (Substrat) verbunden werden, wird von Third Level Packaging gesprochen. Die Herstellung der elektrischen Verbindungen der Schaltungsträger mit dem Chip wird im Anschluss näher erläutert. Dabei kann es sich bei der Direktmontage nicht nur um das Verbinden von einzelnen Chips direkt mit einer Leiterplatte oder anderen Substraten handeln, sondern auch um das Verbinden von kleinen Leiterplatten (Multi-Chip-Module = MCM) auf großen Leiterplatten (Motherboard) [8].

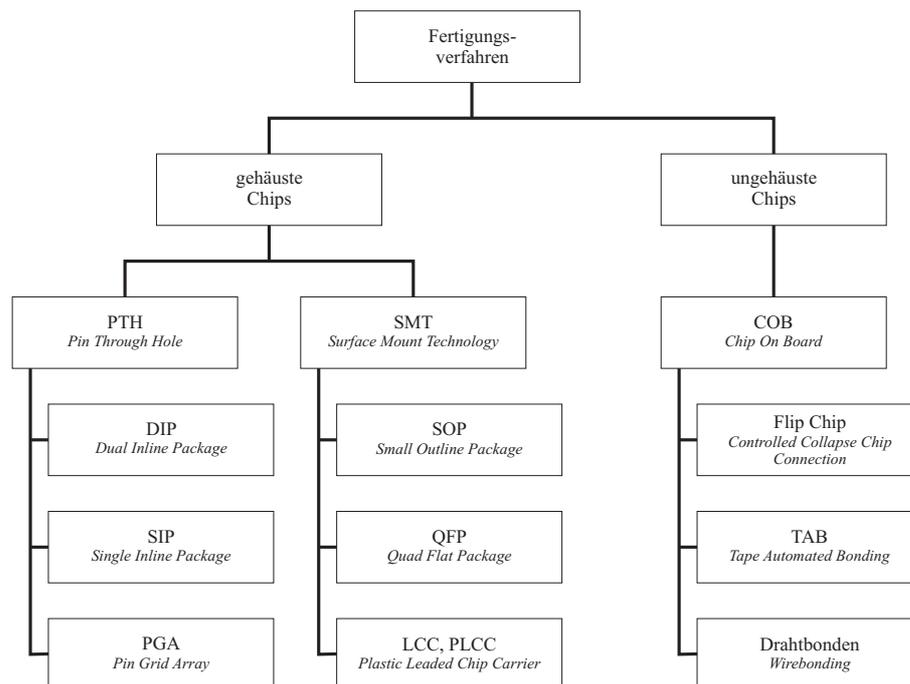
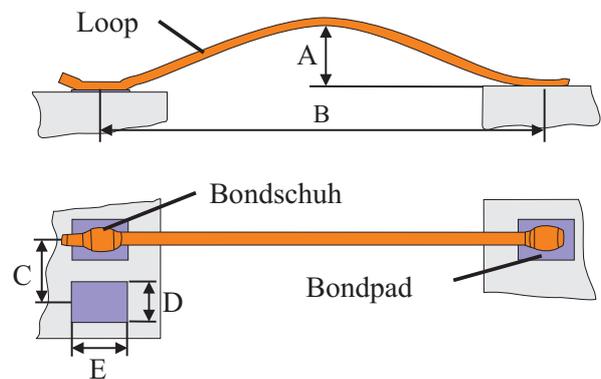
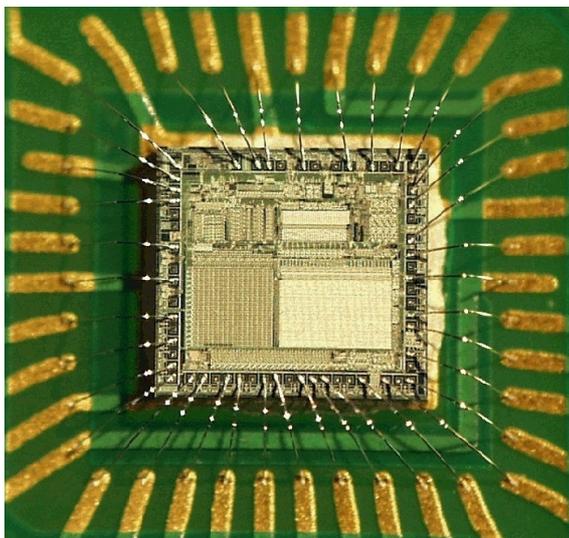


Abbildung 1: Einteilung verschiedener Chipmontageverfahren

Aus der eben erläuterten Aufteilung der Montageverfahren lassen sich zwei wesentliche Bereiche von Fertigungsverfahren ableiten, die Fertigungsverfahren für gehäuste Chips und die Fertigungsverfahren für ungehäuste Chips. Eine Übersicht und eine genauere Unterteilung dieser beiden Verfahren ist in Abbildung 1 dargestellt. Da für diese Arbeit Fertigungsverfahren für ungehäuste Chips und somit die Direktmontageverfahren maßgeblich sind, werden diese im folgenden näher erläutert.

2.1 Das Drahtbonden

In Abbildung 2 ist das zuerst genannte Fertigungsverfahren in der Gruppe der ungehäusten Chips, das Drahtbonden, dargestellt. Dieses Verfahren wird in der Halbleiterfertigung bereits seit längerer Zeit eingesetzt, um Halbleiterbausteine (Chips) mit Trägerelementen (Substraten) elektrisch leitend zu verbinden. Die Kontaktierung erfolgt dabei mit Gold- bzw. Aluminiumdrähten von $17\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$ Durchmesser (vgl. Abbildung 2 links) beim Einsatz von Dünndrahtbondern. Zur Kontaktierung von Drähten mit Durchmessern im Bereich von $100\ \mu\text{m}$ bis $500\ \mu\text{m}$ werden sogenannte Dickdrahtbonden eingesetzt. Grundsätzlich wird zwischen zwei Bondverfahren unterschieden, dem Wedge-Wedge-Bonden und dem Ball-Wedge-Bonden. Die Namensgebung dieser beiden Drahtbondverfahren beruht auf der Formgebung des Drahtes während des Verbindungsprozesses.



Looplänge A von $0,1\ \text{mm}$ bis $0,4\ \text{mm}$
 Looplänge B von $0,5\ \text{mm}$ bis $2,0\ \text{mm}$
 Anschlußraster C = $140\ \mu\text{m}$ (PITCH)
 Bondpad D = $70\ \mu\text{m}$, E = $100\ \mu\text{m}$

Abbildung 2: Links: elektrische Verbindung eines Chips mit einem Schaltungsträger; rechts: Geometrische Verhältnisse einer Wedge-Wedge-Bondverbindung

2.1.1 Wedge-Wedge-Bonden

Beim Wedge-Wedge-Bonden wird der Draht an der ersten und an der zweiten Kontaktstelle (1. Bond und 2. Bond) durch das Bondwerkzeug, das sogenannte Wedge, gleichermaßen verformt. Abbildung 3 I zeigt vereinfacht den Verfahrensablauf beim Dünndraht Wedge-Wedge-Bonden, der kurz näher erläutert wird. Im Bondwerkzeug wird der Draht durch eine Bohrung geführt. Das nach vorne herausragende Drahtende wird beim Aufsetzen auf die erste Kontaktfläche aufgedrückt und vorverformt. Durch Anregen von Ultraschallschwingungen wird der Draht mit dem Bondpad verschweißt und der erste Kontakt der Verbindung entsteht. Im nächsten Schritt wird das Bondwerkzeug auf einer bestimmten Bahn verfahren, um die Drahtbrücke, den sogenannten Loop, zu formen. Dabei hängt die Qualität der gesamten Verbindung stark von der Geometrie dieser Drahtbrücke ab. Nachdem die Zielposition über der zweiten Verbindungsstelle erreicht wurde, senkt sich das Bondwerkzeug bis auf die Oberfläche ab, und der Draht wird erneut vorverformt. Die eigentliche Verbindung entsteht wieder durch das Anregen von Ultraschallschwingungen. Damit das Bondwerkzeug zur nächsten Bondstelle bewegt werden kann, muss zuerst der Draht durchtrennt werden. Dies geschieht mit Hilfe einer Drahtklammer. Diese schließt sich, um den Draht zu greifen, und führt eine Bewegung in Drahtrichtung aus. Dabei wird der Draht am Ende der Bondstelle definiert abgerissen. Im letzten Prozessschritt bewegt die Drahtklammer das Drahtende erneut unter das Bondtool.

Ein Vorteil gegenüber dem später dargestellten Ball-Wedge-Bonden besteht darin, dass nicht nur Golddrähte sondern auch Aluminiumdrähte verarbeitet werden können. Die Kontaktierung von Aluminiumdrähten wird im allgemeinen bei Raumtemperatur vorgenommen, eine externe Erwärmung des Substrates ist nicht erforderlich. Ferner werden mit Aluminium Wedge-Wedge-Bondern monometallische Verbindungen auf dem Chip, dessen Anschlussflächen in der Regel auch aus Aluminium hergestellt sind, erzeugt, wodurch die Langzeitstabilität der Bondverbindungen erhöht wird [4]. Weitere Vorteile ergeben sich durch die kleine Loophöhe einer Wedge-Wedge-Bondverbindung sowie durch den kleinen Bondschuh, so dass auch modernste Chips mit sehr kleinen Bondpads (Fine-Pitch-Applikationen) gebondet werden können. Zur Erklärung der hier verwendeten Begrifflichkeiten sei auf das rechte Bild der Abbildung 2 verwiesen. Trotz der genannten Vorteile gegenüber dem Ball-Wedge-Bonden wird dieses Verfahren nur etwa in 5 % aller Drahtbondapplikationen eingesetzt.

2.1.2 Ball-Wedge-Bonden

Das Ball-Wedge-Bonden ist das am weitesten verbreitete Drahtbondverfahren. Es wird in über 90 % der Drahtbondapplikationen eingesetzt. Dies liegt hauptsächlich an

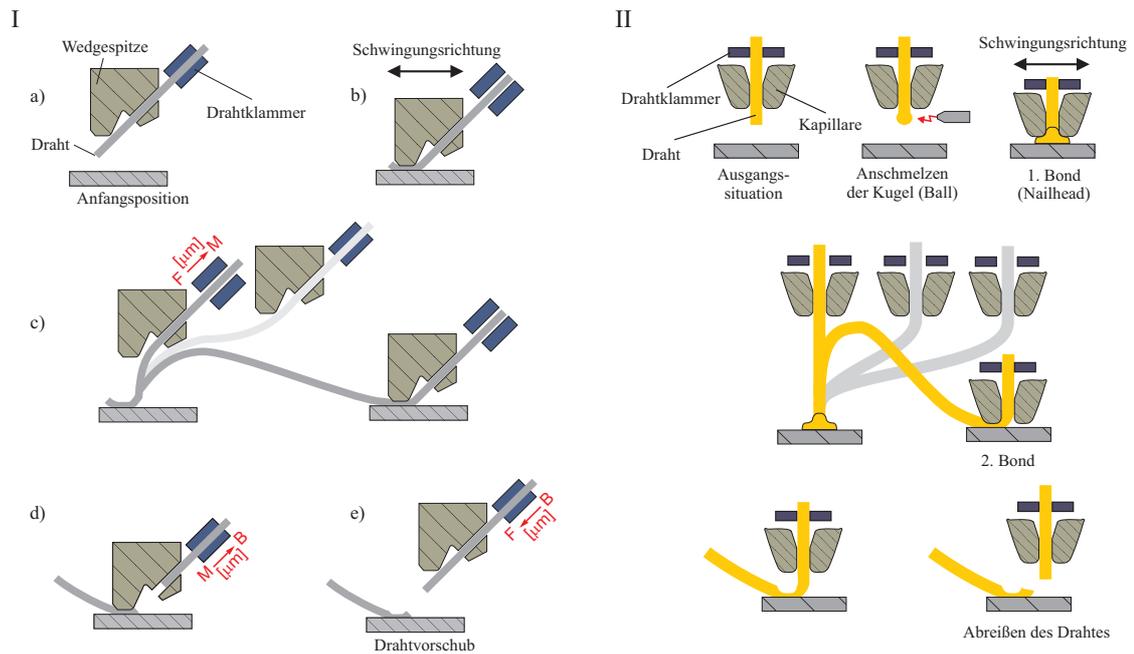


Abbildung 3: Die Verfahrensabläufe beim Drahtbonds: I Wedge-Wedge-Bonden; II Ball-Wedge-Bonden

der guten Automatisierbarkeit und den deutlich kürzeren Zykluszeiten gegenüber dem Wedge-Wedge-Bonden. Die kürzeren Zykluszeiten sind zum Teil darin begründet, dass nach dem Source Bond ohne Drehung des Werkzeuges in jede Richtung verfahren werden kann, da das Bondwerkzeug bezogen auf seine Hauptachse rotationssymmetrisch aufgebaut ist. Es wird zwischen zwei Ball-Wedge-Bondverfahren, dem thermosonic Bonden (TS-Bonden) und dem Thermokompressionsbonden (Thermocompression Bonding = TC-Bonden), unterschieden. Der im nächsten Abschnitt beschriebene Verfahrensablauf bezieht sich auf das TS-Bonden. Dieses Verfahren hat sich in den letzten Jahren gegenüber dem TC-Bonden durchgesetzt. Der Unterschied dieser beiden Verfahren liegt in der zum Verformen und Verschweißen bereitgestellten Energieform. Beim TC-Bonden wird die zum Verschweißen von Draht und Bondpad benötigte Energie durch Druck (Bondkraft) und Temperatur bereitgestellt. Typische Werte sind hier 60 cN und ca. 350 °C bei einem Drahtdurchmesser von 25 μm . Dagegen wird beim TS-Bonden die notwendige Energie in Form der Bondkraft und der Ultraschalleistung zur Verfügung gestellt. Hier liegen die Werte bei 40 cN und einer Ultraschalleistung von unter 1 Watt, in Abhängigkeit von der Bondtemperatur und dem Drahtdurchmesser.

Der prinzipielle Verfahrensablauf des Ball-Wedge-Bondens ist in Abbildung 3 II und eine REM-Aufnahme einer solchen Ballbondverbindung in den linken Bildern in Abbildung

4 dargestellt. Im Gegensatz zum Wedge-Wedge-Bonden wird bei diesem Verfahren der Bonddraht senkrecht durch das Bondwerkzeug (Kapillare) geführt. In der Ausgangsstellung ragt der Bonddraht zu einem gewissen Teil aus der Kapillare heraus und wird mit Hilfe eines Lichtbogens aufgeschmolzen. Dieser Lichtbogen wird typischerweise durch die Entladung eines Kondensators zwischen Draht und einer zusätzlichen Wolframelektrode erzeugt. Bei diesem Anschmelzen wird über den Lichtbogen eine definierte Energie zugeführt, so dass sich aufgrund der Oberflächenspannung die Schmelze zu einer Kugel mit dem 1,5-2-fachen des Drahtdurchmessers ausbildet. Anschließend wird die Kapillare auf das zu bondende Bondpad abgesenkt, die Kugel beim Aufsetzen zu einem nagelartigen Gebilde (Nailhead) geformt und mit dem Bondpad verschweißt. Üblicherweise wird der erste Bond auf dem Chip durchgeführt, um einer Beschädigung des Chips durch das Bondwerkzeug vorzubeugen. Beim TC-Bonden wird in den meisten Fällen eine beheizte Kapillare oder eine beheizte Substrataufnahme eingesetzt. Im Gegensatz dazu wird, wie oben schon angesprochen, beim TS-Bonden die für den Schweißprozess notwendige Energie durch Anregung der Kapillare mit Ultraschallschwingungen eingeleitet. Nach dem ersten Verschweißen wird ähnlich wie beim Wedge-Wedge-Bonden der Draht zu einer Drahtbrücke ausgeformt und über der zweiten Bondstelle positioniert. Vor dieser Bewegung bedarf es keiner Rotation um den Toolmittelpunkt, da aufgrund der Symmetrie der Kapillare und somit auch der Bondverbindung der Loop in jede Richtung ausgeführt werden kann. Nach Absenken der Kapillare wird durch Anregen von Ultraschallschwingungen bei einer Temperatur von ca. 100 °C der Bonddraht mit der zweiten Kontaktstelle verschweißt. Durch das Anheben des Bondwerkzeuges und Schließen einer Drahtklammer wird der Draht derart hinter der Bondstelle abgerissen, dass genügend Draht aus der Kapillare ragt, um erneut eine Kugel anzuschmelzen.

Wird dieses Verfahren nach dem ersten Verschweißen abgebrochen und der Draht durch die Drahtklammer abgerissen, wird ein sogenannter Studbump (Abbildung 4 rechts) erzeugt. Die so gefertigten Gold-Studbumps dienen einigen Verfahren der im späteren Verlauf dieses Kapitels diskutierten Flipchip-Verfahren als Verbindungselement zwischen Chip und Substrat.

2.2 Tape Automated Bonding

Im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren werden beim Tape Automated Bonding (TAB) nur wenige Arbeitsschritte benötigt, um den Chip mit dem Substrat zu verbinden. Jedoch wird der Chip nicht direkt mit den Anschlüssen des Substrates, sondern mit Metallbahnen auf einer Kunststoffolie verbunden (siehe Abbildung 5). Der gesamte Prozess besteht im Wesentlichen aus zwei Arbeitsschritten, dem Inner-Lead-Bonding

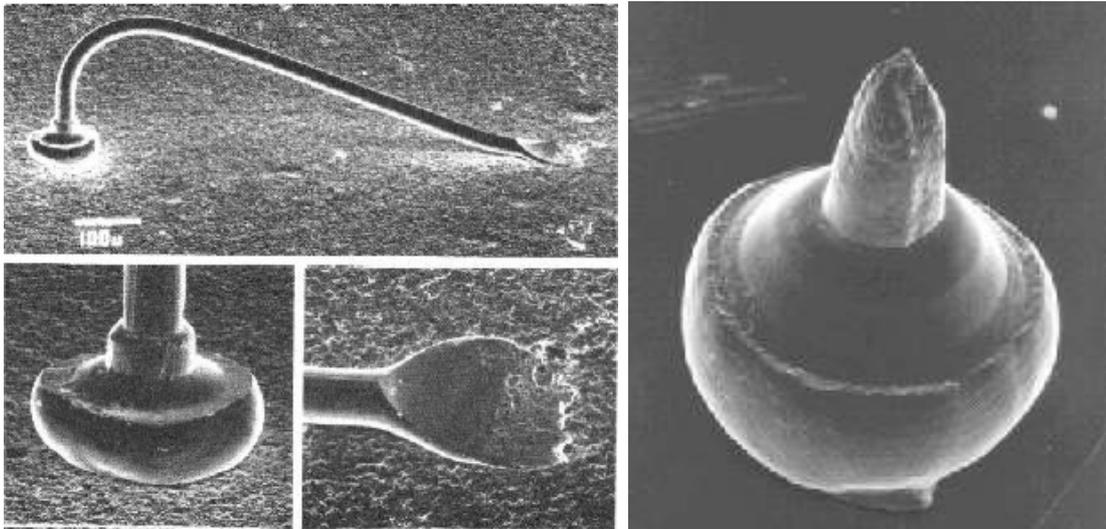


Abbildung 4: links: Eine REM-Aufnahme einer Ballbondverbindung [9]; rechts: Ein Gold-Studbump [10]

(ILB) und dem Outer-Lead-Bonding (OLB). Bei dem zuerst durchgeführten ILB wird der Chip mit den innen liegenden Anschlüssen der Folie verbunden. Dies geschieht im Thermokompressionsverfahren. Bei diesem Verfahren wird in einer bestimmten Zeit mit angepasstem Anpressdruck und angepasster Temperatur die Verbindung zwischen Chip und Metallbahnen erzeugt. Danach wird der Chip in vielen Fällen noch mit einer Kunststoffmasse überzogen, die aber nur Schutzfunktionen, zum Beispiel gegen Sonnenlicht oder Korrosion übernimmt. Im zweiten Arbeitsschritt, dem OLB, wird das Tape in einem kombinierten Stanz-Thermokompressionsverfahren ausgeschnitten und mit dem Substrat verbunden. Eine so erzeugte Verbindung ist in Abbildung 5 dargestellt. Anwendung findet dieses Verfahren besonders in Bereichen, bei denen eine flache Bauform erforderlich ist, wie z. B. Laptops, Notebook-Computern, Flachpanel-Displays, Organizer und Chip-Karten [4].

2.3 Standard Flipchip-Verfahren

Schon der Name dieses Verfahrens deutet auf das wichtigste Merkmal dieser Technologie hin. Der Chip wird während des Montageprozesses gedreht (flipped) und mit seinen Anschlüssen nach unten (face down), zum Substrat hin, mit der Leiterplatte verbunden. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren werden weder Kontaktierungsdrähte noch Leiterbahnen auf Folien benötigt. Damit eine Verbindung zwischen Substrat und Chip hergestellt werden kann, müssen bei diesem Verfahren auf den Kontaktflächen des Chips oder den Kontaktflächen des Substrates Verbindungselemente, die sogenannten Bumps, aufgebracht werden. Je nach Flipchip-Verfahren und dadurch bedingtem Material gibt es verschiedene

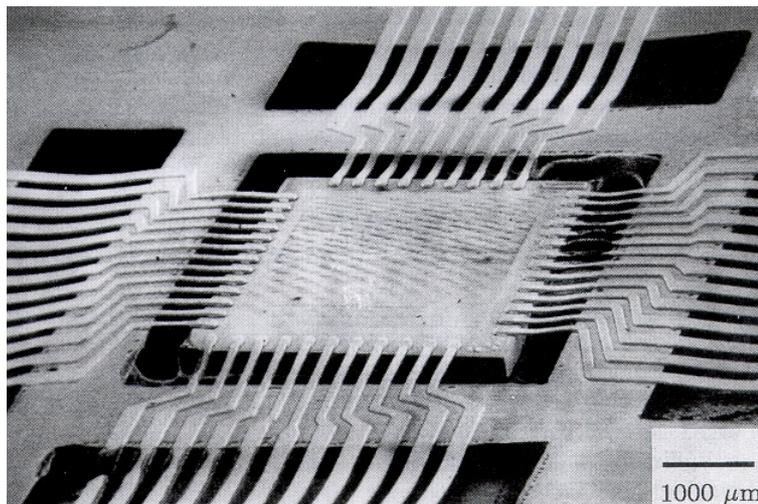


Abbildung 5: Eine Verbindung hergestellt mit Tape Automated Bonding

Möglichkeiten, diese Verbindungselemente zu erzeugen. Eine Möglichkeit, die Erzeugung von Studbumps, wurde in Abschnitt 2.1.2 erläutert. Andere Möglichkeiten sind das Plating [3], das Lotdrahtbonden [2] und das Aufdampfen (Evaporation Method) [3].

Beim Flipchip-Verfahren werden alle Verbindungen des Chips mit dem Substrat in einem Arbeitsgang erzeugt, was die Fertigungszeiten drastisch reduziert. Zusätzlich wird im gleichen Arbeitsgang sowohl der elektrische als auch der mechanische Kontakt hergestellt, damit entfällt ein Aufkleben des Chips auf das Substrat, wie es beim Draht- oder TAB-Bonden notwendig ist. Ein weiterer Vorteil des Flipchip-Verfahrens im Vergleich zu den anderen Fertigungsverfahren ist die Reduzierung des Bauraumes und der Länge der Verbindungen. Mit Hilfe des Flipchip-Verfahrens ist es möglich, die höchste Chipdichte zu erreichen, denn die Anschlüsse des Chips sind nicht außen um ihn herum angeordnet, sondern liegen innerhalb der Chipabmessungen (Chip Scale = 1). Die Entfernung des Pads auf dem Chip zum Pad auf dem Substrat beträgt nach dem Montageprozess gerade einmal $40 \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu ist die Länge der Verbindung beim Drahtbonden bis zu mehrere Millimeter (0,5-2 mm). Diese enorme Verkürzung der Verbindung ist gerade für die moderne Kommunikationsindustrie und den Einsatz von Filterchips in Mobiltelefonen wichtig. Durch die Reduzierung der Verbindungslänge sinkt die Induktivität dieser Verbindung und ermöglicht so den Einsatz in Hochfrequenz-Applikationen.

Die einzelnen Flipchip-Verfahren werden in zwei Kategorien (vgl. Abbildung 6) eingeteilt, zum einen ist dies die Herstellung der Verbindung durch Löten (Soldering) und zum anderen die der lotfreien Verbindungsherstellung (Solderless). Trotz der Nutzung dieser Verfahren

seit vielen Jahren, stehen die lotfreien Flipchip-Verfahren weiterhin im Mittelpunkt vieler Forschungsprojekte, um die Effektivität und somit die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Sie können in die Klebverfahren und die Bondverfahren unterteilt werden. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Verfahren erläutert und auf entsprechende Literatur verwiesen.

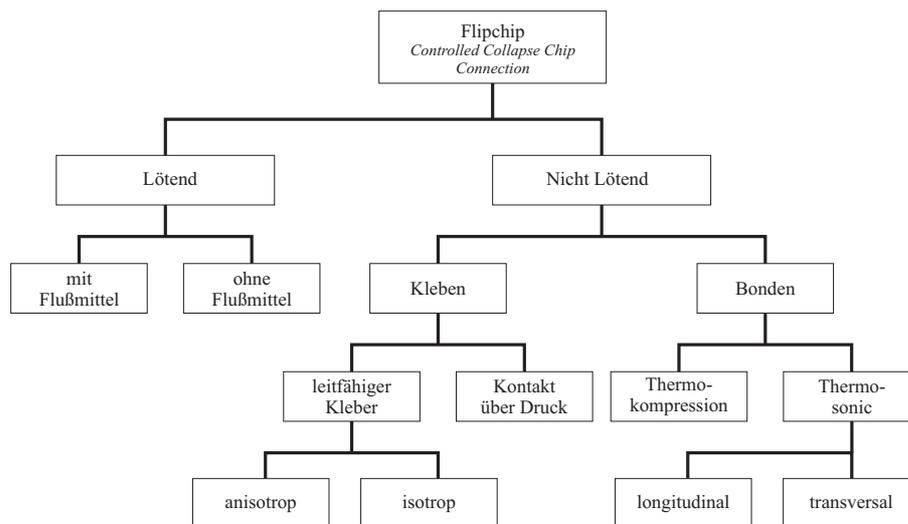


Abbildung 6: Verschiedene Flipchip-Verfahren

2.3.1 Soldering bonding

Das erste industriell genutzte Flipchip-Verfahren war das Auflöten des Chips auf das Substrat. Der wohl bekannteste Lötprozess ist der von IBM entwickelte C4-Prozess (Controlled Collapse Chip Connection). Dieser Prozess und seine Variationen decken ca. 80 - 90 % des gesamten Flipchip-Marktes ab [11].

Sehr viel Forschungsarbeit wurde im Zusammenhang mit diesem Verfahren geleistet, und es sollen an dieser Stelle stellvertretend einige Veröffentlichungen und Ergebnisse von Untersuchungen auf dem Gebiet aufgeführt werden. Einen sehr guten Überblick über das lötende Flipchip-Verfahren liefern Tummala und Rymaszewski [12] oder Marcotte [13]. Weitere Untersuchungen zum Beispiel im Bereich des Self-Alignment von Chips durch das Auflöten wurden von Pedder [14], Armiento [15] und Lin [16] durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigten, dass mit Hilfe dieses Verbindungsverfahrens eine genaue passive Ausrichtung des aufgebrauchten Chips erreicht werden kann. Dies ist besonders in der Optoelektronik hilfreich und von großer Bedeutung. Natürlich wurde das in der Anwendung

sich immer weiter verbreitende Verfahren in vielen Experimenten variiert. Ähnlich wie bei allen anderen Flipchip-Verfahren, müssen auch beim Soldering Bonding vor dem eigentlichen Bondprozess die für diesen Prozess notwendigen Bumps auf den Chip oder das Substrat aufgebracht werden. Dies kann bei der Waferherstellung im sogenannten Front-End geschehen oder zu einem späteren Zeitpunkt im sogenannten Back-End.

Ein Nachteil dieses heute in der Halbleiterfertigung so verbreiteten Flipchip-Verfahrens ist, dass in den mit hoher Temperatur verlöteten Verbindungen durch den Abkühlungsprozess hohe Spannungen entstehen. Diese Spannungen resultieren aus den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Chips, der Bumps und des Substrates (Thermal mismatch). Zu diesem Problem gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Untersuchungen. An dieser Stelle sei zum Beispiel auf die Arbeit von Suryanarayana [17] verwiesen, der mit Hilfe eines zusätzlich zwischen Chip und Substrat eingebrachten Klebstoffs (Underfill) versuchte, die Verbindungen zu entlasten. Dieser zusätzlich eingebrachte Klebstoff dient bei fast allen Flipchip-Verfahren zur Verstärkung der mechanischen Festigkeit der Bauteile. Jedoch verliert das Flipchip-Verfahren gegenüber den anderen Verbindungsverfahren den Vorteil der geringeren Anzahl von Prozessschritten, da nach dem Bonden in einem weiteren Prozessschritt der Underfill in den Zwischenraum von Substrat und Chip eingebracht werden muss.

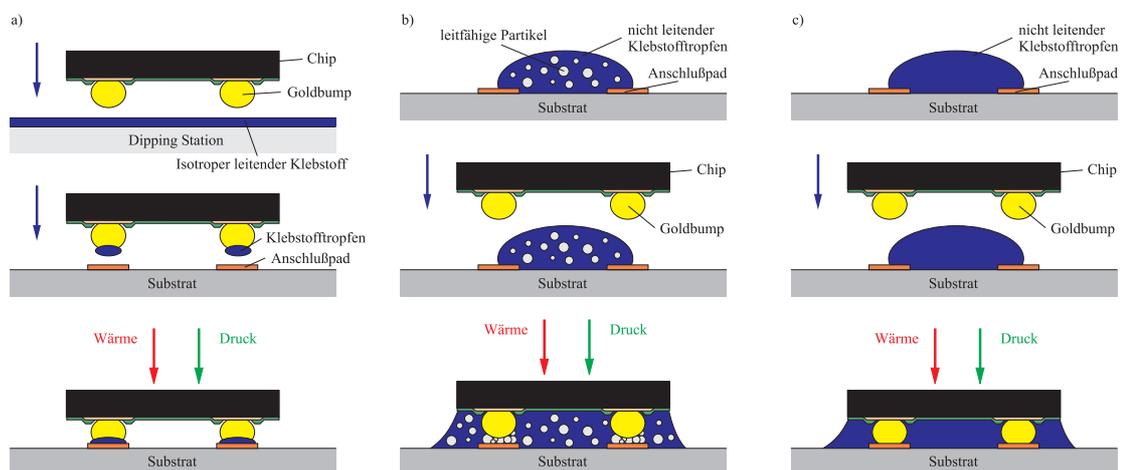


Abbildung 7: Verschiedene Klebverfahren; a) Verbindung mit einem isotropen leitenden Klebstoff; b) Verbindung mit einem anisotropen leitenden Klebstoff; c) Verbindung mit einem nicht leitenden Klebstoff

2.3.2 Herstellen einer Verbindung durch Kleben

Eine interessante Alternative zum Lötten ist auch die Verwendung von Klebstoffen [18], [19], [20], [21]. In Abbildung 7 sind die drei bekannten Klebtechnologien dargestellt. Die abgebildeten Klebtechnologien grenzen sich untereinander nur durch die Verwendung unterschiedlicher Klebstoffarten ab und zwar werden isotrop leitende, anisotrop leitende und nicht leitende Klebstoffe benutzt. Diesen Verfahren ist gemein, dass auch hier vor dem eigentlichen Verbindungsprozess Bumps auf den Chip oder das Substrat aufgebracht werden müssen. Für die Klebtechnologien werden jedoch im Vergleich zu dem Soldering Bonding andere Werkstoffe, meist Metalle wie Gold, Kupfer oder Aluminium, als Bumpmaterial verwendet.

Ein isotrop leitender Klebstoff ist ein Klebstoff, bei dem die gesamte Klebstoffmasse den elektrischen Strom leitet. Der Klebstoff wird durch Eintauchen der Bumps in einen Klebstofffilm genau dosiert. Diese genaue Dosierung ist notwendig, da es bei Verwendung von zu viel Klebstoff zu unerwünschten Kurzschlüssen zwischen den einzelnen Bumps kommen kann. Nach dem Eintauchen der Bumps wird der Chip über dem Substrat positioniert und die Bumps mit der Klebstoffmasse auf die Anschluss pads gedrückt. Der Aushärtungsprozess des Klebstoffes kann durch unterschiedliche Randbedingungen ausgelöst werden. Dabei sind Temperatur oder UV-Licht die meist gewählten Initiatoren.

Ein Vorteil des isotrop leitenden Klebstoffes liegt darin, dass die Chipunterseite nicht mit dem Klebstoff in Berührung kommt. Dies ist besonders bei Filteranwendungen von Bedeutung, denn auf der Chipunterseite sind freiliegende Strukturen, die für ihre Funktion mechanische Schwingungen ausüben müssen. Entsprechend hat dieses Klebverfahren den Nachteil, dass bei Anwendungen von anderen Chips meist ein zusätzlicher Füllklebstoff zwischen Chip und Substrat eingebracht werden muss. Dieser Underfill dient zur mechanischen Entlastung der eigentlichen leitenden Klebverbindung bei äußeren Belastungen (mechanisch oder thermisch). Ein weiteres Problem bei diesem Verfahren tritt bei Fine-Pitch-Anwendungen auf, denn dort kann es, wie schon angesprochen, aufgrund schlechter Dosierung des Klebstoffes zu Kurzschlüssen zwischen den einzelnen Bumps kommen.

In Abbildung 7 b) wird ein Klebverfahren gezeigt, bei dem anisotroper leitfähiger Klebstoff verwendet wird. Ein solcher Klebstoff besteht z. B. aus einer Epoxy-Matrix, die mit goldbeschichteten Polymer-Kugeln angereichert ist. Bei der Fertigung einer Verbindung wird erst ein Klebstofftropfen auf das Board dosiert und anschließend der Chip mit den Bumps in diesen Tropfen plaziert. Dabei werden die Polymer-Kugeln durch aufgetragenen Druck derartig verformt, dass ein mechanischer Kontakt zwischen Bauteilanschluss und Substrat

hergestellt wird. Über diesen Kontakt wird die elektrische Leitfähigkeit sichergestellt. Auch bei diesem Verfahren wird der Aushärtungsprozess des Klebstoffes durch unterschiedliche Randbedingungen aktiviert.

Die Verwendung von anisotropen leitenden Klebstoffen hat gegenüber den isotropen leitenden Klebstoffen den Vorteil, dass sich die eigentliche Klebstoffmasse unter dem gesamten Chip ausbreitet. Damit ist ein anschließender Fertigungsprozess, bei dem ein Underfill eingebracht werden muss, nicht mehr notwendig. Aber auch dieses Verfahren hat den Nachteil, dass es bei Fine-Pitch-Anwendungen zu Kurzschlüssen zwischen den einzelnen Bumps kommen kann.

Das letzte hier beschriebene Verfahren nutzt nicht leitenden Klebstoff. Auch hier wird ein Klebstofftropfen auf das Board dosiert und der Chip in den Tropfen gedrückt. Dabei wird der Druck auf den Chip so lange erhöht, bis zwischen den Bumps des Chips und den Kontaktflächen des Substrates ein elektrisch leitender Kontakt entstanden ist. Die dabei verwendeten Klebstoffe besitzen zusätzlich die Eigenschaft, dass sich beim Aushärten das Volumen der Klebstoffmasse verringert und der Chip weiter an das Substrat gezogen wird. Dadurch wird der Kontakt zwischen Bump und Anschlusspad weiter verstärkt. Bei diesem Verfahren kommen fast ausschließlich Studbumps zum Einsatz, da diese Bumps aufgrund ihrer Form besonders gut geeignet sind, die Klebstoffschicht zu durchdringen (vgl. Abbildung 4 rechts).

Da auch hier ein Klebstofftropfen aufgebracht wurde, dessen Volumen ausreicht, um den gesamten Raum zwischen Chip und Substrat auszufüllen, ist ein nachfolgendes Einbringen eines Underfills nicht notwendig. Jedoch muss als nachteilig angeführt werden, dass bei den beiden zuletzt vorgestellten Verfahren eine höhere Kraft auf den Chip ausgeübt werden muss, als beim isotrop leitenden Klebstoff, da die Klebstoffmasse unter dem Chip verteilt werden muss. Dies kann bei sehr empfindlichen oder dünnen Chips zu Beschädigungen führen.

2.3.3 Thermokompressionsbonden

Von den lotfreien Flipchip-Verfahren ist das TC-Bonden das am weitesten verbreitete. Dieses Verfahren wurde direkt vom Draht- bzw. TAB-Bonden abgeleitet. Besonders das fundierte Wissen über das Drahtbonden [22] ermöglichte es, dieses Verfahren schnell auf die Flipchip-Technologie anzuwenden. Abgesehen von sehr wenigen theoretischen Arbeiten [23] wurden die meisten Erkenntnisse durch Experimente gewonnen.

Beim TC-Bonden wird die Verbindung zwischen Chip und Substrat mit Hilfe einer Normalkraft und thermischer Energie erzeugt (vgl. Abbildung 8 links). Bei dieser

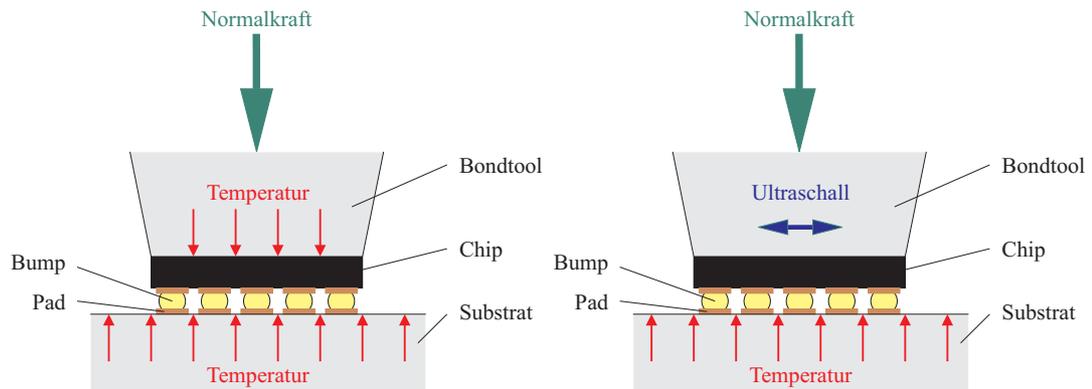


Abbildung 8: Vergleich TC-Bonden mit TS-Bonden (links: TC-Bonden; rechts: TS-Bonden)

Flipchip-Montagetechnik finden fast ausschließlich Au/Au-Metallkombinationen ihre Anwendung. Somit ist es notwendig, dass sowohl der Chip als auch das Substrat eine Au-Metallisierung besitzen. Die Dicke, Härte und Reinheit dieser Metallisierung muss definierten Anforderungen genügen, damit es zu einer guten Verbindung zwischen Chip und Substrat kommen kann. Wie schon angesprochen, wird die Verbindung unter Einwirkung einer Normalkraft und Temperatur erzeugt. Typische Werte hierfür liegen bei 1 N pro Bump und bei 300 - 350 °C [6]. Mit diesen Parametern wird ein gutes Bondergebnis bei einer Prozesszeit von ca. 60 Sekunden erreicht. Dadurch ergeben sich einige Nachteile. Viele dieser kleinen und empfindlichen Bauteile dürfen nicht derart hohen Temperaturen ausgesetzt werden oder werden durch die hohe Normalkraft zerstört. Somit ist das TC-Bonden in seiner Anwendung auf robuste und temperaturunempfindliche Chips beschränkt.

2.4 Das US-Flipchip-Bonden

Eine Verringerung der Temperatur, der Normalkraft und der Prozesszeit beim TC-Bonden war nur möglich, indem eine weitere Energieform in den Prozess eingeführt wurde. Diese Energie wird analog zum Drahtbonden über Ultraschallschwingungen zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 8 rechts). Mit Hilfe dieser zusätzlichen Energie ist es möglich, die notwendige Temperatur und die Normalkraft für die Bildung der Verbindung zwischen Chip und Substrat drastisch zu senken. Beim US-Flipchip-Bonden, auch thermosonic Flipchip-Bonden (TS-Flipchip-Bonden) genannt, sind Temperaturen von ca. 150 °C und Normalkräfte von 0,2 - 0,3 N pro Bump erforderlich. Das bedeutet eine Halbierung der Temperatur und eine Reduzierung der Normalkraft auf ein Drittel gegenüber dem TC-Bonden. Es werden zwei US-Flipchip-Verfahren unterschieden, das transversale US-Flipchip-Bonden und das longitudinale US-Flipchip-Bonden.

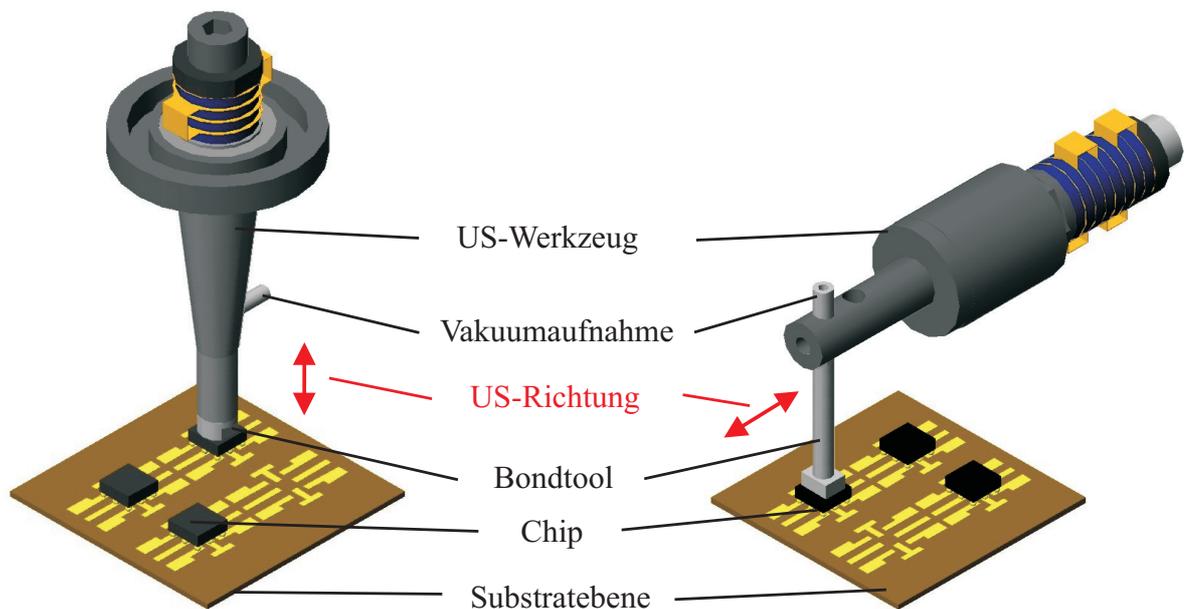


Abbildung 9: Links longitudinales und rechts transversales US-Flipchip-Bonden

2.4.1 Das transversale US-Flipchip-Bonden

Heute wird in fast allen US-Flipchip-Anwendungen das transversale TS-Bonden eingesetzt. Beim transversalen US-Flipchip-Bonden (siehe Abbildung 9) wird ähnlich wie beim Drahtbonden mit Hilfe eines US-Werkzeuges ein Bondtool in transversale Schwingungen parallel zur Kontaktebene versetzt. Die Verbindungselemente (Gold-Studbumps) des sich unter dem Bondtool befindenden Chips werden durch diese Schwingungsbewegung mit dem Substrat verschweißt. Die Gold-Studbumps wurden in einem vorgeschalteten Prozessschritt entweder durch Plating oder durch Studbumping auf den Pads des Chips aufgebracht. Mit diesem transversalen US-Flipchip-Verfahren konnten bisher Chips mit bis zu 100 Verbindungen reproduzierbar verarbeitet werden [5]. Hierbei liegt die Begrenzung der Verbindungszahl einzig und allein in der übertragbaren Kraft. Die für das sichere Verschweißen von Chip und Substrat benötigte Normalkraft muss über den Transducer und das Bondwerkzeug aufgebracht werden. Dies ist bei den aktuell eingesetzten Transducerformen nur bis zu einer bestimmten Kraft möglich.

Beim Bonden von Chips mit einer Bumpanzahl >100 treten so hohe Bondkräfte (senkrecht zur Chipfläche) auf, dass es beim transversalen Bonden zur Verbiegung des US-Werkzeuges kommt. Durch diese Verbiegung kann nicht mehr gewährleistet werden, dass der Chip planar auf das Substrat aufgesetzt wird. Kommt es aber zu einem Verkippen des Chips gegenüber dem Substrat, werden beim Schweißen nicht alle Bumps mit der gleichen Bondkraft belastet.

Dies führt zu einer nicht hinreichenden Verbindung zwischen Chip und Substrat. Im ungünstigsten Fall kann dieses Verkippen dazu führen, dass einige Bumps keinen elektrisch leitenden Kontakt mit den Pads des Substrates ausbilden.

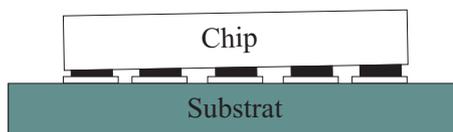


Abbildung 10: Planaritätsproblem

2.4.2 Das longitudinale US-Flipchip-Bonden

Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Problem des nicht planaren Aufsetzens des Chips kann durch den Einsatz des longitudinalen US-Flipchip-Bonden umgangen werden. Bei diesem Verfahren werden die US-Schwingungen senkrecht zur Substratebene eingeleitet. Die Normalkraft wirkt hier im Gegensatz zu den o.g. Verfahren nicht in radialer sondern in axialer Richtung auf das Horn des US-Werkzeuges. Das zu Biegeschwingungen angeregte Wedge kann ebenfalls entfallen, die US-Schwingung wird durch den Transducer direkt auf die Kontaktstelle übertragen. Durch die Krafteinleitung in Längsrichtung wird nicht nur der Kraftfluss verkürzt, sondern ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das US-Werkzeug nicht mehr auf Biegung, sondern auf Druck belastet wird. Das gesamte US-Werkzeug befindet sich quasi direkt über dem Chip (vgl. Abbildung 9). Mit diesem Verfahren ist es möglich, Chips mit einer hohen Anzahl von Bumps (>100) zu bonden und die dafür erforderliche Bondkraft aufzubringen, ohne dass zusätzliche Planaritätsprobleme durch Biegung entstehen. Jedoch besitzt dieses Verfahren nicht nur Vorteile. Die Ultraschallschwingungen in Kraftrichtung führen häufig zu Beschädigungen des Chips. Aus diesem Grund findet dieses Verfahren fast keine Anwendung in heutigen Serienproduktionen.

2.5 Eigenschaften der verschiedenen Direktmontageverfahren

Zur Verdeutlichung der Unterschiede und eventueller Gemeinsamkeiten der verschiedenen Direktmontageverfahren wird auf den folgenden Seiten ein Vergleich der angeführten Direktmontageverfahren (Ball-Wedge-Drahtbonden, Wedge-Wedge-Drahtbonden, Tape Automated Bonden und Flipchip-Bonden) durchgeführt. Für diese Bewertung werden zum einen die Kosten und der Aufwand der einzelnen Verfahren gegenübergestellt und zum anderen die Vor- und Nachteile der Verfahren zusammenfassend genannt.

2.5.1 Kostenvergleich

Die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse einer Kostenanalyse basieren auf den Berechnungen von *Reichl* [24] und werden im folgenden zusammengefasst. Die Montagekosten der einzelnen Verfahren setzen sich aus den Investitions-, Material-, laufenden Betriebs-, Personal-, Prüf-, Nacharbeits- und Ausfallkosten zusammen. Die Investitionskosten werden für den hier betrachteten Fall für alle Montageverfahren gleich auf ca. 800.000 Euro beziffert. Die Materialkosten bestehen sowohl aus den Einkaufspreisen für Chips bzw. Wafer, für die Substrate und das Tape als auch aus den Kosten für das Bumping der Wafer. Unter den laufenden Betriebskosten werden Kosten für die Räumlichkeiten wie Energiekosten und Reinraumkosten und Wartungskosten verstanden. Die Personalkosten teilen sich in Kosten für die Bediener im Fertigungsbetrieb und für die Einrichter auf. Dabei sind besonders beim Flipchip-Verfahren die Kosten für die Anlaufphase einer Fertigung und die Umrüstarbeiten nicht zu unterschätzen. Als sehr produktspezifisch können die Prüf- und Nacharbeitskosten gesehen werden. Sie hängen im Wesentlichen von der Stückzahl der nachzuarbeitenden Bauteile und der Möglichkeit, überhaupt Bauteile nachzubessern, ab. Beim Betrachten der in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse fällt auf, dass die Kosten für das US-Flipchip-Bonden mit Abstand am geringsten sind. Ferner fällt auf, dass die Kosten für das Drahtbonden geringer sind als die Kosten für das Standard-Flipchip-Bonden. Insgesamt muss bei diesem Vergleich beachtet werden, dass die gewählte Anschlusszahl von 200 pro Chip einen großen Einfluss auf die Berechnung der Kosten hat. Wie an Hand der Tabelle zu ersehen ist, würden die Kosten beim Flipchip-Bonden bei höheren Anschlusszahlen geringer steigen als beim Drahtbonden. Dies hängt zum großen Teil von den fast gleich bleibenden Prozesszeiten beim Flipchip-Bonden gegenüber den linear mit der Anschlusszahl steigenden Taktzeiten beim Drahtbonden ab [24].

2.5.2 Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren

In den vorangegangenen Abschnitten zu den verschiedenen Montageverfahren wurde der jeweilige Prozess sowie der Ablauf der Verfahren erläutert und nur kurz auf die Vor- und Nachteile eingegangen. An dieser Stelle werden nun die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren gegenübergestellt.

Drahtbonden

Durch seine vielseitige Verwendbarkeit und seine hohe Flexibilität bei kleinen als auch bei großen Stückzahlen ist das Drahtbonden heute noch das Kontaktierverfahren der ersten Wahl. Die erforderlichen Maschinen, Werkzeuge und Kenntnisse über die Technologie selbst stehen fast in jeder Halbleiterfertigung zur Verfügung. Die Drahtkontaktierung im Low-Power Bereich für Drähte bis 100 μm und im High-Power Bereich für Drähte bis

	Drahtbonden	Standard FCB	US-FCB	TAB
Taktzeit				
Chip pro Sekunde	0,03	3	0,5	0,1
Anzahl Schichten	3	1	1	3
Stückzahl pro Jahr	2 Mio.	16 Mio	8 Mio	1,6 Mio
Personalbedarf	4,25	1	1	4
Personalkosten pro Chip in Euro	0,16	0,005	0,005	0,19
Abschreibungskosten pro Chip in Euro	0,14	0,015	0,015	0,18
Verbrauchsarten pro Chip in Euro	Kleber: 0,005 Draht: 0,10 Glob Tob: 0,005	Bumping: 1,9 Underfill: 0,005	Bumping: 0,113 Underfill: 0,005	Bumping: 0,75 Film: 0,5 Lot: 0,005 Glop Tob: 0,005
Verbrauchskosten pro Chip in Euro	0,11	1,905	0,118	0,81
Gesamtkosten pro Chip in Euro	0,41	1,925	0,138	1,18
Gesamtkosten pro I/O in Cent	0,205	0,9625	0,069	0,59

Tabelle 1: Berechnung der Montage- und Kontaktierungskosten pro Chip (200 Anschlüsse pro Chip; 100 funktionsfähige Chips pro 6"-Wafer) [24]

500 μm gilt als maschinen- und prozesstechnisch ausgereift. Durch den direkten Blick auf das Verbindungselement, den Draht, ist eine gute optische Kontrolle und eine eventuell notwendige Reparatur möglich. Einzelne Drahtbrücken können manuell entfernt bzw. fehlende Verbindungen ersetzt werden.

Nachteilig an diesem Verfahren ist der sequentielle Ablauf des Prozesses. Es kann immer nur eine Verbindung nach der anderen gesetzt werden, was bei einer zunehmenden Anzahl von Verbindungen pro Chip zu steigenden Fertigungszeiten führt. Zusätzlich stößt das Drahtbonden im Zuge der Miniaturisierung an seine Grenzen, da der Platzbedarf sehr groß ist (vgl. Abbildung 2 links in Abschnitt 2.1).

Das Golddrahtbonden findet seine Anwendung meist in der Hybrid- bzw. COB-Fertigung, der HF-Technik und bei Anwendungen mit hohen korrosiven oder thermischen Anforderungen. Dagegen wird das Aluminiumdrahtbonden nur zum Teil in der Hybridfertigung eingesetzt, dafür aber bevorzugt bei Fine-Pitch-Anwendungen.

Tape Automated Bonden

Das TAB-Bonden findet in der heutigen Halbleiterfertigung fast keine Anwendung mehr. Es wird vereinzelt in HF-Applikationen eingesetzt oder in Bereichen, in denen der Montagehöhe eine große Bedeutung zukommt (z. B. Flachbildschirme). Auszeichnen kann sich dieses Montageverfahren neben der geringen Montagehöhe durch die guten Hochfrequenzeigenschaften, hohe mechanische Festigkeit und durch die Testbarkeit der Verbindungen. Ähnlich wie beim Drahtbonden sind die Verbindungen nach dem Kontaktierungsprozess optisch kontrollierbar und eine manuelle Reparatur einzelner Verbindungen ist generell möglich. Gegen den Einsatz des TAB-Bondens sprechen die hohen Kosten und der im Vergleich zum folgenden Verfahren große Flächenbedarf.

Flip-Chip-Bonden

Mit der Flipchip-Technik kann heute die höchste Kontaktierungs- und Packungsdichte erreicht werden. Alle Verbindungen werden in einem Arbeitsgang erzeugt und führen bei steigender Anzahl der Verbindungen nur marginal zu einer Erhöhung der Fertigungszeit sowie der Fertigungskosten. Durch die guten HF-Eigenschaften aufgrund extrem kurzer Verbindungen findet die Flipchip-Technik zum Beispiel große Anwendung im Bereich der Fertigung von Halbleitern für Mobiltelefone. Jedoch bedarf es beim Einsatz dieses Verfahrens in einer Fertigung gründlicher Vorbereitung in Bezug auf Design/Layout, Chip-Bumping bzw. Substratstrukturierung. Besonders das Standardverfahren, der C4-Prozess, ist nicht flexibel einsetzbar. Dagegen bietet das US-Flipchip-Bonden sehr hohe Flexibilität und eine einfache Realisierung bei Fine-Pitch-Anwendungen. Ein weiterer Vorteil des US-Flipchip-Bondens ist das Erzeugen von monometallischen Verbindungen, durch die eine hohe Langzeit-Zuverlässigkeit erreicht werden kann. Trotzdem kommt in der heutigen Halbleiterfertigung fast ausschließlich der C4-Prozess zum Einsatz. Dies liegt jedoch nicht nur an den heute noch eingeschränkten Möglichkeiten (geringe Anzahl der Kontakte und geringe Abmessungen der zu verbindenden Chips) des US-Flipchip-Bonden, sondern viel mehr an dem geringen Bekanntheitsgrad dieser Technologie. Ähnlich wie beim Drahtbonden ist der C4-Prozess bekannt und es stehen meist schon aufgebaute und genutzte Fertigungsanlagen zur Verfügung.

Neben der schon angesprochenen geringen Flexibilität des C4-Prozesses haben alle Flipchip-Techniken den Nachteil, dass eine optische Kontrolle und eine Reparatur einzelner Verbindungen nicht möglich ist. Ferner ist zum Erreichen der erforderlichen mechanischen Festigkeit der Bauteile zumeist das Einbringen eines zusätzlichen Underfill notwendig.

Techniken	Vorteile	Nachteile
Drahtbonden	<ul style="list-style-type: none"> - flexibel - opt. Inspektion möglich - bei niedr. Anschlusszahlen preiswert - Reparatur einzelner Verbindungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - serielles Verfahren - rel. großer Flächenbedarf - Glob Top problematisch - Nachteile im HF-Verhalten - Wärmeabfuhr durch die Verdrahtungsebene - schlecht in die SMD-Technik integrierbar
TAB	<ul style="list-style-type: none"> - Simultankontaktierungsverfahren - opt. Inspektion möglich - Reparatur gut möglich - Burn-In und HF-Testen möglich - gute HF-Eigenschaften - hohe Zuverlässigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - relativ teuer - relativ großer Flächenbedarf - Spezialgeräte nötig - schlecht in die SMD-Technik integrierbar
Flipchip-Bonden	<ul style="list-style-type: none"> - Low Cost Varianten verfügbar - Simultankontaktierungsverfahren - gute HF-Eigenschaften - versch. Methoden der Wärmeabfuhr möglich - geringer Platzbedarf - gut in SMD-Technik integrierbar - hohe Zuverlässigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten hängen wesentlich vom Bumpingprozess ab - Underfillprozess ist nachteilig - keine optische Inspektion möglich - schwierig bei kleinen Kontaktpitches - Reparatur nicht möglich
US-Flipchip-Bonden	<ul style="list-style-type: none"> - monometallische Verbindung - hohe Flexibilität - bleifreie Verbindung - Fine-Pitch-Anwendungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Verbreitung im Markt - hohe Investitionskosten - nur bei geringer Anzahl von Verbindungen einsetzbar

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Montageverfahren [24]

In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Montageverfahren zusammenfassend gegenübergestellt. Diese Zusammenfassung basiert auf den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Eigenschaften der einzelnen Verfahren sowie den Angaben in [24]).

2.5.3 Zukünftige Anforderungen an die Montagetechnik

Zum Abschluss des Vergleiches der verschiedenen Montageverfahren werden hier einige Anforderungen an die Verfahren der Zukunft aufgezählt. Einen guten Überblick über diese Anforderungen gibt *W. Scheel* in [4]. Die Montage von elektronischen Baugruppen wurde in den letzten Jahren und wird auch in Zukunft hauptsächlich durch die dort erläuterten Faktoren bestimmt. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten dieser Faktoren angesprochen.

Packaging-Parameter	2012	2016
Chipgröße [mm ²]	350	308
Ball-Bonden-I/O-Pitch [μ m]	30	25
Draht-Bonden-I/O-Pitch [μ m]	28	20
TAB Lead Pitch [μ m]	30	30
Flipchip-I/O-Pitch [μ m]	50	30
Substrat-Padgröße [μ m]	75	50
I/O-Anschlüsse/Gehäuse	1200 bis 2500	1500 bis 4000
Package-Dicke [mm ²]	0,2 bis 0,6	0,05 bis 0,45

Tabelle 3: Entwicklung ausgewählter Kenngrößen [11]

Der Wunsch des Verbrauchers, immer höhere Funktionalität bei immer geringerem Bauraum zur Verfügung gestellt zu bekommen, führt zu einem drastischen Anstieg der Verbindungen pro Chip und einem stetig steigenden Integrationsgrad bzw. stetiger Miniaturisierung. Dabei wird entsprechend der Miniaturisierung und der höheren Verbindungsdichte der je Verbindung zur Verfügung stehende Platz geringer (vgl. Tabelle 3). Dies resultiert schließlich in den für die Montageverfahren anspruchsvollen Fine-Pitch-Anwendungen.

Neben der steigenden Anzahl von Verbindungen pro Chip, dem immer kleineren Bauraum und dem größeren Markt (vgl. Tabelle 4) werden die Anforderungen an die Montageverfahren auch durch die Komplexität der Baugruppen verstärkt. Die Nachfrage nach Multi-Chip-Modulen und mehrdimensional angeordneten Baugruppen zur Integration weiterer Funktionen führt zu neuen Herausforderungen an die Montageverfahren. Diesen Herausforderungen müssen sich die Entwickler neuer oder angepasster Montageverfahren auch unter dem Gesichtspunkt der Umweltfreundlichkeit stellen. Die RoHS-Richtlinie

(Restriction of certain Hazardous Substances) trat am 01. Juli 2006 in Kraft und stellt noch heute Hersteller vor große Probleme, ihre aktuellen Bauteile der Richtlinie entsprechend zu fertigen [25].

Zusätzlich zu den durch den Gesetzgeber festgelegten Einschränkungen muss die Qualität der Verbindung immer höheren Ansprüchen genügen. Gerade im Automotive-Bereich wachsen die Ansprüche bis hin zur Nullfehlerfertigung. Die Qualitätsansprüche und die vorgeschriebenen Belastungstests der Bauteile beanspruchen die einzelnen Verbindungen derartig stark, dass nur perfekt erstellte Verbindungen die Anforderungen erfüllen.

Wertentwicklung nach Ländern	Wert [Mrd. US\$]				Zuwachs [%]			
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2013
Amerika	55,197	56,961	60,591	62,854	2,8	3,2	6,4	3,7
Europa	37,391	36,070	38,432	40,292	-1,7	-3,5	6,5	4,8
Japan	42,903	43,614	46,339	48,171	-7,9	1,7	6,2	4,0
Asien	164,030	164,214	177,062	185,187	2,5	0,7	7,8	4,6
Gesamt	299,521	300,859	322,424	336,505	0,4	0,4	7,2	4,4
nach Produkten								
Diskrete	21,387	20,539	22,358	23,775	8,0	-4,0	8,9	6,3
Optik-Elektronik	23,092	26,224	28,832	31,020	6,4	13,6	9,9	7,6
Sensors	7,970	8,171	8,732	9,313	15,5	2,5	6,9	6,6
IC	247,073	245,924	262,502	272,397	-1,1	-0,5	6,7	3,8
• Analog	42,338	42,602	46,134	49,007	0,1	0,6	8,3	6,2
• Mikro	65,204	64,096	67,774	70,821	7,5	-1,7	5,7	4,5
• Logik	78,782	80,366	86,880	90,099	1,8	2,0	8,1	3,7
• Speicher	60,749	58,861	61,714	62,470	-12,7	-3,1	4,8	1,2
Gesamt	299,521	300,859	322,424	336,505	0,4	0,4	7,2	4,4

Tabelle 4: Marktprognose der Halbleiterindustrie [26]

Dem entgegen wirkt der Druck, zu immer geringeren Kosten fertigen zu müssen. Dies steht zum Teil im Widerspruch zu den steigenden Anschlusszahlen und den daraus resultierenden längeren Fertigungszeiten. In den meisten Fällen wird versucht, dem Kostendruck durch günstigere Standorte, höhere Automatisierung, günstigere Werkstoffe und kürzere Fertigungszeiten gerecht zu werden.

Zusammenfassend werden hier die Anforderungen an die Montageverfahren aufgezählt.

- höhere Verdrahtungsdichte ($\leq 100 \mu\text{m}$ Pitch),
- Multi-Chip-Module (MCM) als Funktionsmodule auf Leiterplatten,
- flussmittelfreies Verbinden,
- keine Ausgasung von Kontaktmaterialien,
- hohe Qualität der Verbindung und somit eine hohe Ausbeute,
- geringe Prozesszeit und damit eine hohe Wirtschaftlichkeit,
- geringe Belastung der Substrate.

Damit auch in Zukunft die Anforderungen der Chipdesigner erfüllt werden können, müssen nicht nur die dafür notwendigen Maschinen verbessert, sondern auch die Montageverfahren weiterentwickelt werden.

2.5.4 Zusammenfassung der Eigenschaften

Das US-Flipchip-Verfahren zeichnet sich als besonders geeignet aus, um den Anforderungen nach hoher Verbindungsdichte, geringem Bauraum, Reduzierung der Kosten bei hoher Qualität und steigenden Stückzahlen gerecht zu werden. Die Verringerung des Bauraumes, die steigende Anzahl an Verbindungen und die damit verbundenen Fine-Pitch-Anwendungen verdeutlichen im Vergleich zu den klassischen Drahtbondtechniken die Vorteile des US-Flipchip-Verfahrens. Beim US-Flipchip-Prozess hängt der realisierbare Abstand zwischen zwei Verbindungen einzig und alleine von der Genauigkeit der Fertigungsmaschine und dem Grad der Verformung der Verbindungselemente zwischen Chip und Substrat ab. Aus dieser Problematik leitet sich der Ansatz dieser Arbeit ab, das Potential des Montageverfahrens US-Flipchip-Bonden durch die Weiterentwicklung der genutzten US-Werkzeuge zu steigern.

3 Heute eingesetzte Ultraschallwerkzeuge

Bevor die Weiterentwicklung der US-Werkzeuge für das US-Flipchip-Bonden dargestellt werden kann, wird im ersten Teil dieses Kapitels der Aufbau und die Funktionsweise eines US-Werkzeuges oder allgemeiner formuliert eines Ultraschallschwingers erläutert. Daran anschließend wird der Status Quo der sich heute im Einsatz befindlichen US-Werkzeuge aufgenommen. Dabei zeigt sich, dass für viele US-Werkzeuge die Konzepte und Bauformen der eingesetzten US-Werkzeuge für das US-Flipchip-Bonden aus dem Bereich des US-Drahtbondens abgeleitet wurden. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die heute in der Halbleiterfertigung eingesetzten US-Werkzeuge sowohl im Bereich Draht- als auch im Bereich Flipchip-Bonden vorgestellt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit (siehe Abschnitt 5.1) werden die vorgestellten Werkzeuge den wachsenden Anforderungen an die Montageverfahren und somit auch an die Montagewerkzeuge gegenübergestellt und die sich daraus ergebenden Konsequenzen abgeleitet bzw. bewertet.

3.1 Aufbau eines Ultraschallsystems

Ein Ultraschallsystem (US-System) kann nach *Harthoorn* [27] in drei Untersysteme aufgeteilt werden. Dabei handelt es sich um die Ultraschallquelle, die aus einem Ultraschallgenerator mit integrierter Phasenregelung, einem Ausgangsverstärker und ggf. einer Auswertelektronik zur Weiterverarbeitung von Sensorsignalen zur Prozessüberwachung besteht, sowie das elektromechanische und das mechanische Subsystem. Wird diesem Aufbau eine entsprechende Last hinzugefügt, so kann das System gemäß Abbildung 11 dargestellt werden. Die einzelnen Bereiche können ihrerseits wieder in weitere Teilbereiche aufgeteilt werden. Diese Aufteilungen und ergänzende Erläuterungen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

3.1.1 Die elektrische Ansteuerung

Die elektrische Ansteuerung dient nicht nur zur Versorgung des US-Systems mit elektrischer Energie, sondern übernimmt auch die Aufgabe, diese Energie mit einer definierten Frequenz zur Verfügung zu stellen. Bei dieser Frequenz handelt es sich in den meisten Fällen um eine Resonanzfrequenz des elektro-mechanischen Systems. Sie hängt im Wesentlichen von der Auslegung und der Dimensionierung des US-Systems ab. Weitere Randbedingungen, die die Betriebsfrequenz eines US-Werkzeuges im Betrieb beeinflussen, sind die Temperatur des Systems und die Last, die auf das System wirkt. Während des Prozesses ändert sich die Last über die Prozesszeit. Die sich ändernde Last bewirkt in aller Regel eine Phasendrehung zwischen der elektrischen Anregespannung und dem resultierenden Strom

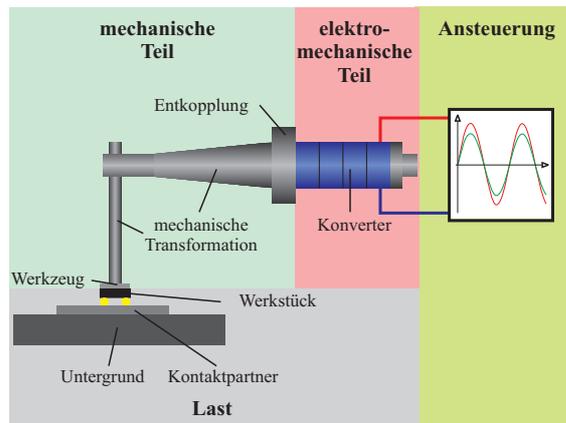


Abbildung 11: Aufbau eines speziellen US-Systems für das Bonden

bei vorgegebener Frequenz bzw. eine Verschiebung der Resonanzfrequenz. Stimmt die Ansteuerungsfrequenz nicht mit der Betriebsfrequenz des gesamten Systems überein, erfolgt die Bearbeitung bzw. der Prozess nicht mit optimalem Wirkungsgrad. Dies bedeutet, dass sich im spannungsgesteuerten Betrieb die Schwingungsamplitude an der Werkzeugspitze (Bondtool) reduziert, wodurch nicht genügend Schwingungsenergie in das Werkstück eingeleitet wird. Im geregelten Betrieb wird die Ansteuerungsfrequenz nachgeführt.

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes sei auf die Darstellung eines Verlaufes einer Eingangsadmittanz eines US-Werkzeuges in Tabelle 8 auf der Seite 40 verwiesen.

Bei der Messung der Eingangsadmittanz wird der Quotient aus dem Strom und der Anregespannung gebildet, während die Frequenz der Anregung einen definierten Bereich durchläuft. Anhand dieser Darstellung einer Eingangsadmittanz ist zu erkennen, dass eine geringe Frequenzabweichung zu einer erheblichen Verringerung der Admittanz bzw. zu einem Anstieg der Impedanz führt, da es sich um ein System mit hoher Güte handelt. Wird die eingepreßte Spannung konstant gehalten, dann ist der Strom umgekehrt proportional zur Impedanz, die abgebbare Leistung des Systems wird also reduziert. Es gibt viele Prozesse, bei denen der eben beschriebene Wirkungsgrad nicht primär im Vordergrund steht, jedoch ist bei der Verbindungstechnik in der Halbleiterfertigung die Qualität und die Konstanz des Prozesses von entscheidender Bedeutung.

Ein optimaler Wirkungsgrad tritt auf, wenn das System in Resonanz angeregt wird, deshalb ist es notwendig die Frequenz während der Bearbeitung so anzupassen, dass das US-System stets in Resonanz betrieben wird. Für diese Anpassung der Frequenz sind unter anderen zwei Ansteuerungsprinzipien bekannt, zum einen das Prinzip Self-Oscillating und zum anderen das Konzept des Phase-Locked Loop (PLL).

Beim Self-Oscillating gibt das US-System selbst die Frequenz vor, mit der es arbeiten soll. Wird das System angeregt, so schwingt es in einem stabilen Zustand (Resonanz) und über ein verstärkt zurückgeführtes Signal werden die Dämpfungsverluste kompensiert. Dies ist ein sehr einfaches Prinzip eine Ansteuerung aufzubauen. [28] Jedoch kann diese Art der Ansteuerung nur für Systeme eingesetzt werden, bei denen es zu quasistatischen Änderungen der Last kommt. Hochdynamischen Laständerungen kann diese Ansteuerung nicht folgen und es ist somit nicht für die in dieser Arbeit definierten Anforderungen geeignet.

PLL oder auch Nachlaufsynchronisation ist eine Phasenregelung, die besser geeignet ist, die Anforderungen an eine Ansteuerung eines US-Systems in der Halbleitertechnik zu erfüllen. Mit Hilfe der Phasenregelung werden zwei Signale zur Übereinstimmung gebracht, so dass die Phasenverschiebung zwischen diesen Signalen minimiert wird. Bei einer Ansteuerung für ein US-System sind dies die Spannung, erzeugt über einen externen Frequenzgenerator, und der ins System eingespeiste Strom. Ist die Phasendifferenz zwischen diesen beiden Signalen gleich null Grad, dann arbeitet das System in Resonanz und somit mit optimalem Wirkungsgrad [29], [30].

3.1.2 Das elektromechanische Subsystem

Das elektromechanische Subsystem besteht in erster Linie aus einem Energiewandler. Mit diesem Wandler kann entweder die von einem Ultraschallgenerator entnommene elektrische Energie in mechanische Schwingungen z. B. zur Durchführung von Reibarbeit verwendet werden (Motorprinzip), andererseits kann umgekehrt eine mechanische Anregung in elektrische Energie gewandelt werden (Generatorprinzip). *Ensminger* umschreibt diese Vorrichtung in [31] auf folgende Art:

"By definition, a transducer is a device that is actuated by power from one system to supply power in any other form to a second system; i.e., a transducer converts energy from one form to a second"

Besonders gut geeignet für die elektromechanische Wandlung in Ultraschallenergie ist der piezoelektrische Effekt.

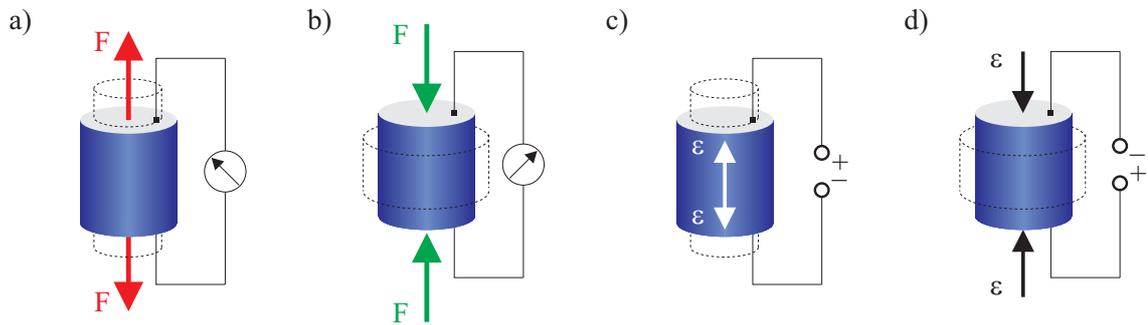


Abbildung 12: Der direkte und der inverse piezoelektrische Effekt [32]

Der piezoelektrische Effekt oder auch Piezoeffekt wurde von den Brüdern Curie 1880 entdeckt. Wird piezoelektrisches Material, im technischen Einsatz wird meist eine gesinterte Piezokeramik eingesetzt, durch eine äußere Kraft mechanisch belastet, kommt es zu einer Verzerrung im Material. Diese Verzerrung bewirkt eine Ladungsverschiebung im Inneren des Materials und erzeugt ein elektrisches Feld (vgl. 12 a) und b)). Dieser Effekt wird auch direkter piezoelektrischer Effekt genannt. Bei der Umkehrung dieses Effektes, dem inversen piezoelektrischen Effekt, bewirkt ein angelegtes elektrisches Feld eine Deformation des piezoelektrischen Materials (vgl. 12 c) und d)). Weitere Informationen über diese Effekte mit detaillierten Beschreibungen der genauen Zusammenhänge und dem Aufbau der piezoelektrischen Materialien können z. B. [32] und [33] entnommen werden.

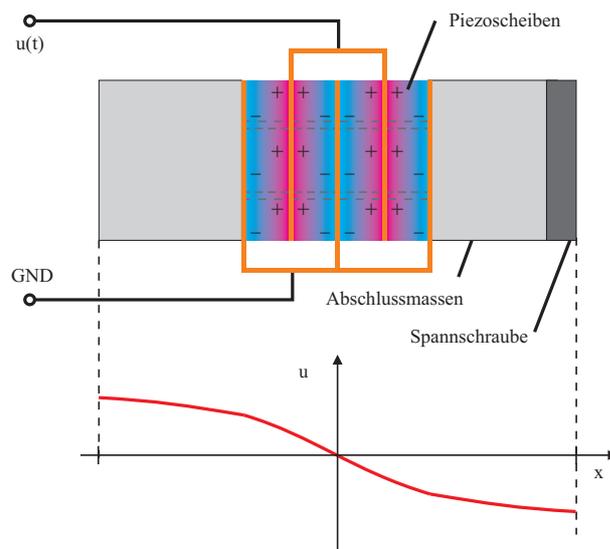


Abbildung 13: Aufbau eines Halbwellen-Ultraschallwandlers

In Abbildung 13 ist der prinzipielle Aufbau eines Halbwellen-Ultraschallwandlers dargestellt. Der Wandler besteht aus vier polarisierten Piezokeramiken, fünf Elektroden und zwei Abschlussmassen. Die Abschlussmassen sind über eine Spannschraube miteinander verbunden. Mit Hilfe dieser Spannschraube werden die Piezokeramiken vorgespannt. Eine äußere Spannungsversorgung baut über die Elektroden ein elektrisches Feld in den Piezoscheiben auf und führt zu einer Dehnung der Keramik. Da die Keramiken mit ihrer Polarisierung gegeneinander angeordnet sind, bewirkt eine angelegte Wechselspannung in allen Scheiben entweder eine positive oder eine negative Auslenkung.

Die Verbindung zwischen den beiden Abschlussmassen dient nicht nur der elektrischen Kopplung der beiden Massen, sondern auch zum Schutz der Keramiken vor mechanischen Zugspannungen und zur Erhöhung des Wirkungsgrads [31]. Mit Hilfe eines Bolzens zwischen den beiden Massen wird eine Vorspannung auf die Keramiken aufgebracht. Diese Vorspannung verringert die auf die Keramiken wirkenden Zugkräfte während des Betriebes. Ist die von einem nicht vorgespannten Ultraschall-Wandler abverlangte Leistung zu groß, kann es auf Grund zu großer im Wandler auftretender Zugbeanspruchungen zum Ausfall einzelner Keramikscheiben kommen. Im unteren Bereich von Abbildung 13 ist der Verlauf der Auslenkung im Wandler und die somit am Rand des Wandlers auftretende Amplitude für ein ideales System gezeigt. Alle Kontaktübergänge sind als ideal angenommen und die akustischen Eigenschaften der Keramiken sowie der Endstücke werden als gleich vorausgesetzt. Das Maß der erreichbaren Amplitude am Ende des Wandlers hängt im Wesentlichen von den Dimensionen, der Frequenz und den Eigenschaften der Piezokeramiken ab. Jedoch reicht die durch den Konverter erzeugte Amplitude häufig nicht für den gewünschten Prozess aus und daher wird bei den meisten US-Werkzeugen die erzeugte Schwingung mechanisch transformiert.

3.1.3 Das mechanische Subsystem

Die Hauptaufgabe dieses Subsystems des US-Systems ist die Übertragung der durch den Konverter erzeugten Schwingungen zum Arbeitspunkt bzw. der Last des Systems. Zusätzlich befindet sich in diesem Bereich bei den meisten US-Systemen die Befestigung an die Anschlusskonstruktion. Diese Befestigung dient nicht nur zur räumlichen Fixierung sondern auch zur Entkoppelung des US-Systems, damit keine Ultraschallenergie vom US-System über die Anbindung in die Anschlusskonstruktion übertragen wird. Eine weitere Aufgabe des mechanischen Bereiches ist die Transformation der Schwingung. Durch Querschnittsveränderungen des Materials wird die Amplitude der Schwingung den Anforderungen angepasst.

Die Übertragung der vom Konverter erzeugten Schwingungen zum Arbeitspunkt bedarf einer genauen Abstimmung des mechanischen Subsystems auf die Frequenz des Konverters. Nur wenn die Eigenfrequenz des Übertragungsgliedes mit der des Konverters übereinstimmt, kann das gesamte System mit einem guten Wirkungsgrad betrieben werden. Ist dies nicht der Fall, bedarf es einer wesentlich höheren elektrischen Anregung des Systems, um die gleiche Amplitude im Arbeitspunkt zu erreichen.

Jedoch nicht nur das Abweichen der Eigenfrequenz des mechanischen Übertragungsgliedes kann zu einer starken Verringerung des Wirkungsgrades und somit der Amplitude führen, auch eine schlechte Ausführung der Kontaktübergänge und ein unterschiedlicher Wellenwiderstand zwischen dem Material des Konverters und dem Material des mechanischen Übertragungsgliedes führt zu einer Verringerung der Amplitude. Dieser Verringerung der Amplitude kann in der Mechanik, ähnlich wie bei elektrischen Schwingkreisen mit Hilfe von Transformatoren entgegengewirkt werden. In Abbildung 14 sind beispielhaft drei mechanische Transformatoren, die nach ihrem Erfinder als Mason-Hörner bezeichnet werden, dargestellt. Bei diesen Transformatoren wird eine kleine Amplitude an einer großen Fläche in eine große Amplitude an einer kleinen Fläche umgewandelt. Dieser Vorgang funktioniert natürlich entsprechend auch umgekehrt, nur findet dieser in der Industrie wenig Anwendung.

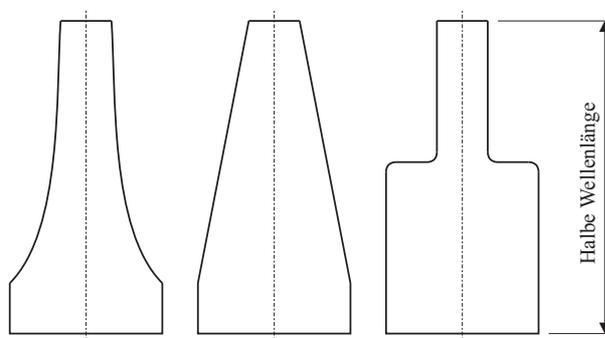


Abbildung 14: Drei beispielhafte Transformatoren [34]

Entsprechend der elektrischen Transformation, die mitunter zur Impedanzanpassung verwendet wird, wird auch mit der mechanischen Transformation eine Anpassung von Last und Quelle durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass ein stark transformierendes Übertragungsglied bei freier Schwingung eine hohe Amplitude erreichen kann, diese bei einer Dämpfung des Systems durch eine Last jedoch wieder stark reduziert wird. Etwas anders dargestellt führt eine hohe Transformation der Amplitude am Übertragungsglied zu einer hohen Empfindlichkeit des gesamten US-Systems auf eine äußere Last. Diese hohe Empfindlichkeit des US-Systems widerspricht jedoch dem Wunsch nach einem stabilen

Prozess. Bei einer hohen Empfindlichkeit des Systems verringert sich schon bei geringen Änderungen der Last die Amplitude stark und der Prozess erreicht nicht mehr die gewünschte Qualität [34].

3.1.4 Die Last des Systems

In diesem Abschnitt wird der Einfluss einer Last auf das Schwingungsverhalten eines US-Systems beschrieben. Dabei wird unter dem Begriff Last alles verstanden, was im Arbeitspunkt dem US-System entgegenwirken kann. Natürlich ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Lasten mit unterschiedlichen Ausprägungen der Einflüsse entsprechend der Vielzahl von Anwendungsgebieten von US-Werkzeugen denkbar. An dieser Stelle werden aber nur die zwei signifikanten Einflussgrößen allgemein angesprochen.

Diese Einflüsse sind zum einen die Abnahme der Resonanzüberhöhung in der elektrischen und mechanischen Admittanz und zum anderen eine Verschiebung der Resonanzfrequenz. Eine Definition und die Möglichkeit der Messung der elektrischen und mechanischen Admittanz wird in Abschnitt 4.1 dargestellt.

Reagiert ein US-System beim Anlegen einer Last mit einer starken Verringerung der Resonanzüberhöhung, so verringert sich die Schwingungsamplitude des Systems bei gleicher Anregespannung. Dieser Einfluss wurde im vorherigen Abschnitt schon unter dem Begriff Empfindlichkeit des Systems diskutiert und die negativen Folgen für den Prozess wurden erläutert.

Eine Verschiebung der Resonanzfrequenz des Systems hat nur dann die gleichen Auswirkungen wie eine Verringerung der Resonanzüberhöhung, wenn die Frequenz der Ansteuerung nicht geregelt wird. Da die meisten Ansteuerungen über eine solche Frequenzregelung verfügen (vgl. Abschnitt 3.1.1), folgt aus diesem Einfluss der Last keine Beeinträchtigung des angestrebten Prozesses [35]. Dies gilt allerdings nur, wenn sich die Eigenschwingungsform des Werkzeuges durch die Last nicht ändert. Kommt es zu einer Änderung der Eigenschwingungsform, kann die Ansteuerung unter Umständen eine Beeinträchtigung des Prozesses nicht verhindern.

3.2 Darstellung der aktuell eingesetzten US-Werkzeuge

Die in der Halbleiterfertigung eingesetzten US-Werkzeuge arbeiten fast alle nach dem gleichen Prinzip und werden in erster Linie beim Drahtbonden eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen horizontal angeordneten Longitudinalschwinger mit einem an der Spitze eingespannten senkrechten Bondtool, das durch die longitudinale Anregung

in Biegeschwingung versetzt wird. Diese in der Drahtbondtechnik weit verbreiteten US-Werkzeuge (siehe Tabelle 6 auf Seite 34) wurden zunächst auch erfolgreich für das US-Flipchip-Bonden eingesetzt. Da beim US-Flipchip-Bonden mit steigender Anzahl der Verbindungen auch die notwendige Bondkraft ansteigt, wurde die Biegebelastung der Werkzeuge immer größer und führte zu den in Abschnitt 2.4 erwähnten Problemen. Aus diesem Grunde wurden von verschiedenen Maschinenherstellern andere mögliche Bauformen von US-Werkzeugen entwickelt und zum Teil schon für die Fertigung von Massenprodukten eingesetzt.

In Abschnitt 2.4 wurde eine Einteilung der Fertigungsverfahren nach der Richtung der Ultraschallschwingung eingeführt. Entsprechend werden auch hier die Gruppen der US-Werkzeuge nach dieser Art der Gliederung in transversale, longitudinale und zusätzlich in mehrdimensionale Anregung unterschieden. Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Bauformen der unterschiedlichen Anregungsrichtungen vorgestellt.

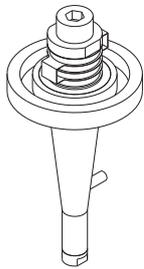
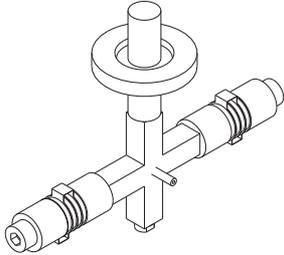
Typ	US-Werkzeug	Frequenz	Draht-bonden	US-FCB
1	Hornschwinger  Quelle [36]	60 kHz	nein	ja
2	Kreuzschwinger  Quelle [36]	60 kHz	nein	ja

Tabelle 5: Longitudinal schwingende US-Werkzeuge

3.2.1 Longitudinal schwingende US-Werkzeuge

Eine mögliche Anregung zum Einleiten des Ultraschalls in die Kontaktzone zwischen Bump und Substrat ist die longitudinale Schwingung. Wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, wirken die Ultraschallschwingung und die Bondkraft in die gleiche Richtung und die Last wird direkt und nicht über ein in Biegeschwingung angeregtes Wedge an der Transducerspitze eingeleitet.

In Tabelle 5 werden zwei beim US-Flipchip-Bonden eingesetzte Bauformen vorgestellt. Zum einen handelt es sich um einen 60 kHz Hornschwinger und zum anderen um einen 60 kHz Kreuzschwinger. Abbildung 15 zeigt eine schematische Darstellung des longitudinal schwingenden Hornschwingers.

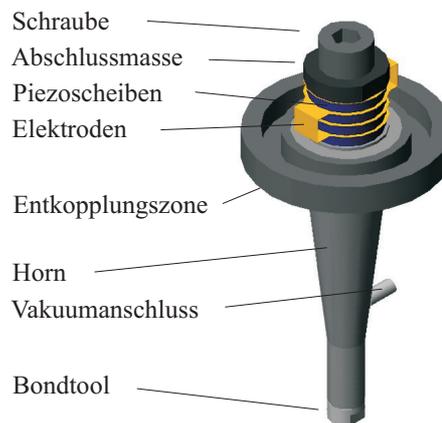


Abbildung 15: Longitudinal schwingender Transducer mit Bondtool

Der Kreuzschwinger arbeitet gegenüber dem Hornschwinger nach einem anderen Prinzip. Die sich gegenüber liegenden Konverter werden phasengleich angesteuert und erzeugen dadurch eine Querdehnung des vertikalen Transducer-Kerns zwischen den Konvertern. Dieser Querdehnung folgend wird im Transducer-Kern eine Schwingung in Längsrichtung angeregt. Durch diese Transformation der quer zur eigentlichen Bondrichtung liegenden Konverter reagiert dieses System sehr unempfindlich auf eine zusätzlich angelegte Last. Trotz dieser Unempfindlichkeit gegenüber der angelegten Last wurde diese Bauform nie über den Prototypenstatus hinaus in einer Serienfertigung eingesetzt. Dies liegt aber weniger an der Performance dieser Bauform, sondern viel mehr an den Nachteilen einer longitudinalen Anregung im Allgemeinen.

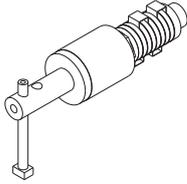
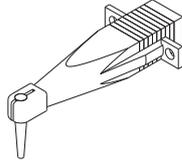
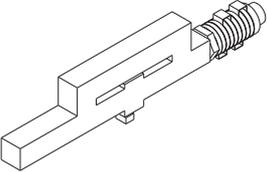
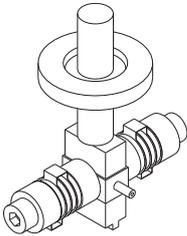
Typ	US-Werkzeug	Frequenz	Draht- bonden	US- FCB
1	Hornschwinger  Quelle [36]	60 kHz	ja	ja
2	Hornschwinger  Quelle [37]	90 kHz	ja	nein
3	Hornschwinger  Quelle [38]	60 kHz	nein	ja
4	Querschwinger  Quelle [36]	60 kHz	nein	ja

Tabelle 6: Transversal schwingende US-Werkzeuge

3.2.2 Transversal schwingende US-Werkzeuge

Die andere Möglichkeit, die Ultraschallenergie in die Kontaktzone zwischen Bump und Substrat einzuleiten, ist die Anregung einer eindimensionalen transversalen Schwingung. Dieses Verfahren wurde bereits in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Dabei wirken die Ultraschallschwingung und die Bondkraft nicht in gleicher Richtung, sondern senkrecht zueinander. Die Kraft wird ähnlich wie beim longitudinalen US-Flipchip-Bonden senkrecht zur Kontaktebene eingeleitet, während der Ultraschall in der Kontaktebene eingepreßt wird.

Die unterschiedlichen Bauformen dieser US-Werkzeuge sind in Tabelle 6 dargestellt. Bei den ersten zwei US-Werkzeugen handelt es sich um waagrecht eingebaute Hornschwinger, die die US-Schwingung über ein Bondtool weiterleiten. Diese beiden Hornschwinger unterscheiden sich durch ihre Abmessungen und ihre Resonanzfrequenz. Bauform 3 ist ein Hornschwinger ohne ein zusätzlich schwingendes Bondtool und Bauform 4 zeigt einen Querschwinger mit zwei Konvertern. Ähnliche Varianten dieser Bauform kommen bei einigen Herstellern von US-Flipchip-Bondern zum Einsatz. Der unter Position 1 gezeigte Hornschwinger wird neben dem Einsatz beim Dickdrahtbonden auch in einer US-Flipchip-Fertigung im Bereich der Herstellung von Handykomponenten eingesetzt.

Der Aufbau des in Abbildung 6 unter Punkt 1 gezeigten Hornschwingers ist ähnlich dem Aufbau des longitudinalen US-Werkzeuges. Der wesentliche Unterschied ist, dass der Chip von einem senkrecht zur Achse des US-Werkzeuges eingespannten Bondtool aufgenommen wird. Durch die Längsschwingung des Hornes wird das Bondtool in Biegeschwingungen versetzt und die Spitze des Bondtools übt eine transversale Bewegung aus. Diese Bewegung besteht nicht nur aus einer transversalen sondern auch aus einer longitudinalen Komponente. Jedoch ist die longitudinale Komponente um mehr als eine Größenordnung geringer und kann somit für den Bondprozess vernachlässigt werden. Der unter Punkt 3 gezeigte Hornschwinger unterscheidet sich zu den zuvor gezeigten Typen darin, dass im Schwinger kein Bondtool eingebaut ist, dass seinerseits in einer Eigenform angeregt wird. Die Schwingungsamplitude resultiert einzig aus der Längsschwingung des Horns.

Eine andere Möglichkeit, eine transversale Schwingung zu erzeugen, ist in Tabelle 6 als Typ 4 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Variante des bei den longitudinal schwingenden Transducern diskutierten Kreuzschwingers, die im weiteren Verlauf als Querschwinger bezeichnet wird. Beim Querschwinger werden die sich gegenüber liegenden Konverter nicht phasengleich, sondern mit einer Phase von 180° angesteuert. Durch diese Art der Ansteuerung entsteht im Gegensatz zu dem longitudinal schwingenden Kreuzschwinger in dem senkrecht angeordnetem Schaft keine Querdehnung. Beim Anlegen

einer Anregespannung wird der Schaft durch die beiden Konverter in Biegeschwingungen versetzt. Diese Biegeschwingungen resultieren am Ende des Schaftes in einer transversalen Schwingung.

Entsprechend dem bereits in diesem Abschnitt vorgestellten transversalen Hornschwinger wird beim Querschwinger keine reine transversale Schwingung erzeugt. Da jedoch auch bei diesem US-Werkzeug die longitudinale Komponente um mehr als eine Größenordnung kleiner ist, wird diese für den Bondprozess vernachlässigt.

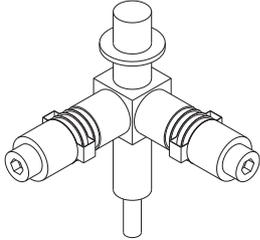
Typ	US-Werkzeug	Frequenz	Draht- bonden	US- FCB
1	Kreisschwinger 	350-980 kHz	ja	nein
	Quelle [39]			

Tabelle 7: Komplex schwingende US-Werkzeuge

3.2.3 Mehrdimensional schwingende US-Werkzeuge

Eine konsequente Weiterentwicklung der Kreuzschwinger und der Querschwinger führte zu den komplex schwingenden US-Werkzeugen. In Tabelle 7 ist beispielhaft ein solches US-Werkzeug dargestellt. Der Aufbau entspricht zwei in einem 90° Winkel angeordneten Querschwingern. Durch eine entsprechende elektrische Ansteuerung können mit Hilfe eines solchen US-Werkzeuges Kreisbahnen, elliptische Bahnen oder andere Lissajous-Figuren erzeugt werden.

Tsujino hat in diversen Arbeiten solche Systeme untersucht und mit diesen Systemen Versuche mit vielversprechenden Ergebnissen, dass heißt mit einer Verringerung der Bondzeit, im Bereich der Drahtbond-Technologie durchgeführt. Trotzdem haben diese US-Werkzeuge keine Verwendung in den Maschinen zum Drahtbonden und somit in der Serienfertigung gefunden und dienen weiterhin nur als Forschungsobjekte. Der Vorteil durch die Verringerung der Bondzeit wird nur durch den Einsatz von größeren und

schwereren Bondwerkzeugen erreicht. Diese Bondwerkzeuge vergrößern ihrerseits die Prozesszeit durch Verringerung der Dynamik der Fertigungsmaschine und führen in Summe zu keiner Änderung der gesamten Prozesszeit. Versuche mit solchen mehrdimensionalen US-Werkzeugen im Bereich des US-Flipchip-Bondens wurden bis heute noch nicht durchgeführt [39], [40].

4 Die Verfahren zur Qualitätsprüfung

In diesem Kapitel werden sowohl Einblicke in die Prüfverfahren und die Anforderungen zur Charakterisierung eines US-Werkzeuges gegeben, als auch die Qualitätsprüfverfahren erzeugter Verbindungen in der Halbleiterfertigung vorgestellt. Die hier angesprochenen Prüfverfahren für ein US-Werkzeug und eine Bondverbindung sind die Grundlage zur späteren Auswahl bzw. Bewertung der neuentwickelten US-Werkzeuge.

4.1 Experimentelle Bewertung von US-Werkzeugen

Nachdem ein US-Werkzeug ausgelegt und aufgebaut wurde, wird experimentell ermittelt, ob sich dieses Werkzeug auch den Vorgaben entsprechend verhält, bevor es für den Einsatz in einer Serienfertigung freigegeben wird. Eine Möglichkeit, experimentell die Qualität des US-Werkzeuges zu ermitteln, wäre der direkte Versuch am eigentlichen Bondprozess. Diese Vorgehensweise hat jedoch erhebliche Nachteile, da bei diesem Versuch nicht nur die Qualität des Werkzeuges sondern auch die Qualität des Bondprozesses beurteilt würde, in die auch Dinge wie Geometrie und Schichtaufbau von Substrat und Chip eingehen. Somit ergibt sich die Notwendigkeit eine Versuchsumgebung zu schaffen, bei der reproduzierbare Bedingungen herrschen. Nur so kann gewährleistet werden, dass die erarbeiteten Ergebnisse direkt dem Werkzeug und nicht den Versuchsbedingungen zuzuordnen sind. Aus diesem Grund werden hier die eingesetzten Versuchsumgebungen zur Messung der Qualität der US-Werkzeuge erläutert, unter denen die für diese Arbeit relevanten Daten zur ersten Charakterisierung der Werkzeuge aufgenommen wurden. Dabei wird an dieser Stelle nur auf den Messaufbau an sich und allgemeine Bewertungskriterien eingegangen. Wie die durch diese Art der Messung aufgenommenen Daten analysiert und bewertet werden, wird in Abschnitt 6.3 an den konkret entwickelten Konvertern bzw. US-Werkzeugen erläutert.

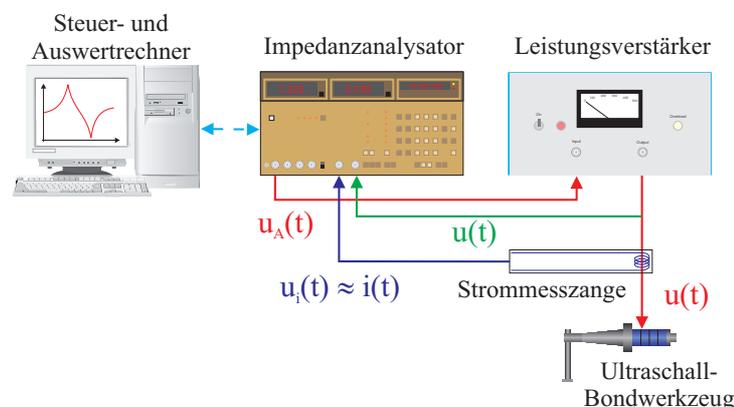


Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Messung einer Eingangsadmittanz

4.1.1 Aufbau zur Messung einer Eingangsadmittanz

In dem folgenden Abschnitt wird die Messung der elektrischen Admittanz (auch als Eingangsadmittanz bezeichnet) vorgestellt. Bei der Messung der Eingangsadmittanz \underline{Y}_{elek} wird der Quotient aus dem Strom $\underline{i}(t)$ und der Anregespannung $\underline{u}(t)$ gebildet.

$$\underline{Y}_{elek} = \frac{\underline{i}(t)}{\underline{u}(t)} \quad (1)$$

Abbildung 16 zeigt den Messaufbau zur Messung einer Eingangsadmittanz. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Messung der Eingangsadmittanz ohne Last erfolgt, deshalb wird die gemessene Admittanz auch als "Kurzschluss-Eingangsadmittanz" bezeichnet. Diese Bezeichnung folgt aus der Vierpol-Darstellung eines Konverters, in der die Last $\underline{F}(t) = 0$ gesetzt wird. Die rechte Seite des Vierpols wird "kurzgeschlossen".



Abbildung 17: Vierpol

Allgemein formuliert wird ein Frequenzgenerator (hier ein Impedanzanalyser), ein Leistungsverstärker (hier ein Leistungsverstärker ENI 1040L), eine Strommesseinrichtung (hier eine Strommesszange) und ein Auswertegerät (hier ein handelsüblicher PC mit entsprechenden Schnittstellen) benötigt. Mit Hilfe des Frequenzgenerators wird beginnend mit einer vorgegebenen Frequenz für eine definierte Messzeit ein sinusförmiges Anregesignal erzeugt. Dieses Signal wird über den Leistungsverstärker auf eine angemessene Anregespannung angehoben und über die Strommesseinrichtung wird der Strom gemessen. Das Auswertegerät erfasst den Wert der Anregespannung, des Stromes und der Phase zwischen Strom und Anregespannung und wertet diese aus. Nach dieser Messung erzeugt der Frequenzgenerator ein neues, um einen bestimmten Frequenzbetrag geändertes Anregesignal und eine weitere Messung wird durchgeführt. Dies wiederholt sich bis eine vorgegebene Zielfrequenz erreicht wird.

In Tabelle 8 sind neben einem berechneten Verlauf auch drei beispielhafte gemessene Eingangsadmittanzverläufe von unterschiedlichen US-Werkzeugen im Frequenzbereich von

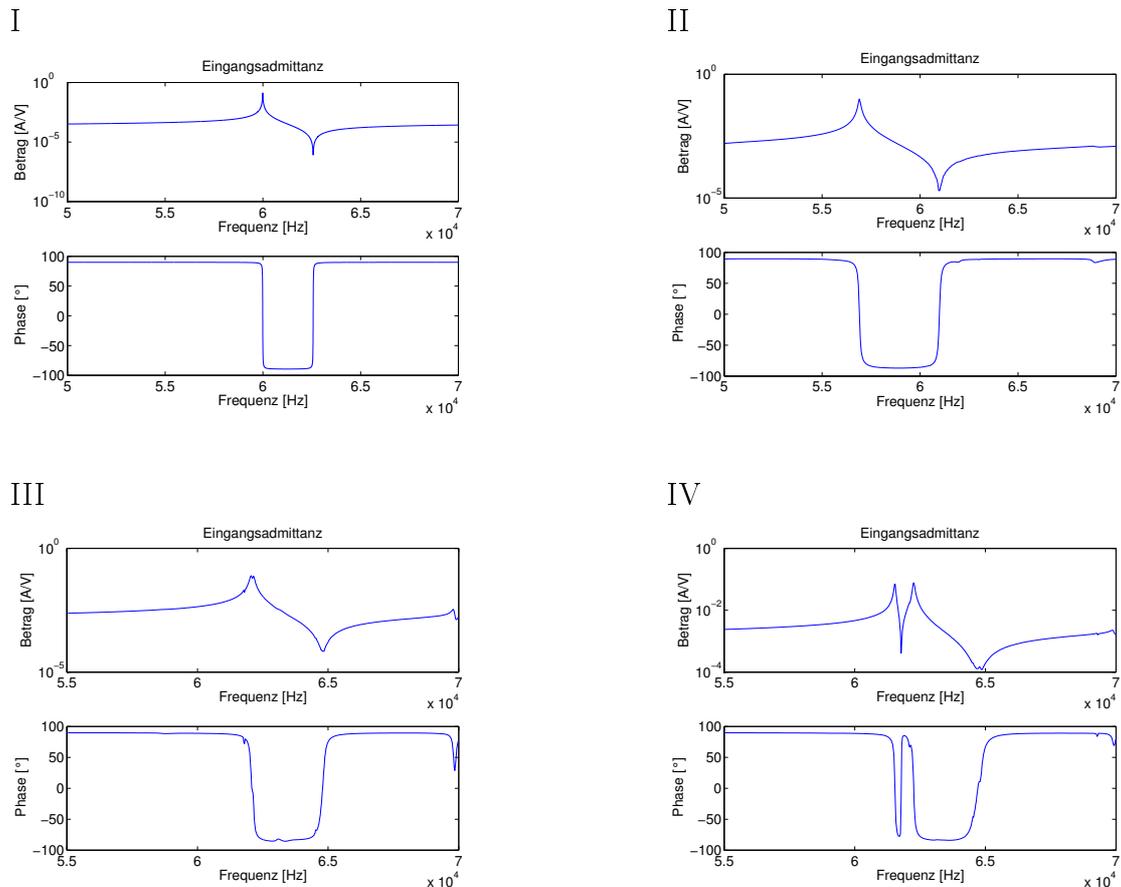


Tabelle 8: Beispielhafte Eingangsadmittanzverläufe

50 bis 70 kHz dargestellt. Bild I der Tabelle 8 zeigt einen sehr steilen Anstieg der Admittanz bis hin zu einem Maximum bei einer Resonanzfrequenz von 60 kHz. Danach erfolgt ein ebenfalls steiler Abfall der Admittanz bis hin zur Antiresonanz bei 62,5 kHz. Die hohe Güte dieses theoretischen US-Werkzeuges wird besonders durch den steilen Abfall der Phase von 90° auf -90° deutlich. Bild II und III zeigen einen ähnlichen Verlauf, jedoch weisen diese realen Messungen eine geringere Güte des Werkzeuges auf. Zusätzlich sind in Bild III kleinere Nebenresonanzen zu erkennen. Bild IV zeigt einen Admittanzverlauf mit zwei dicht beieinander liegenden Nebenresonanzen. Ein solches US-Werkzeug würde keine Anwendung in der Industrie finden, da eine Ansteuerung keine der beiden Resonanzen eindeutig ansteuern könnte und somit die Ultraschallschwingung des Werkzeuges und damit auch der Prozess nicht kontrollierbar wäre.

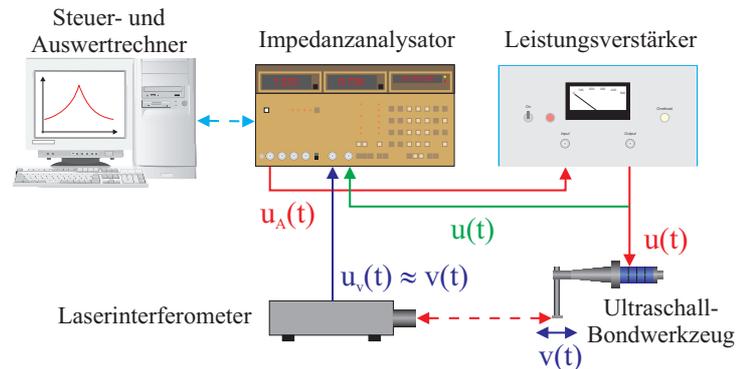


Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Messung einer Kernadmittanz

4.1.2 Aufbau einer Kernadmittanz-Messung

Bei der Messung der Kernadmittanz \underline{Y}_{mech} wird der Quotient aus der Geschwindigkeit $\underline{v}(t)$ und der Anregespannung $\underline{u}(t)$ gebildet. Dabei ist für die Bewertung die Geschwindigkeit an der Stelle des Werkzeuges interessant, die später im Prozess unmittelbar mit der Last in Berührung kommt.

$$\underline{Y}_{mech} = \frac{\underline{v}(t)}{\underline{u}(t)} \quad (2)$$

Entsprechend dem Abschnitt über die Messung der Eingangsadmittanz ist der prinzipielle Versuchsaufbau in Abbildung 18 dargestellt. Da bei der Messung das Werkzeug nicht belastet wird, erhalten wir die "Kurzschluss-Kernadmittanz".

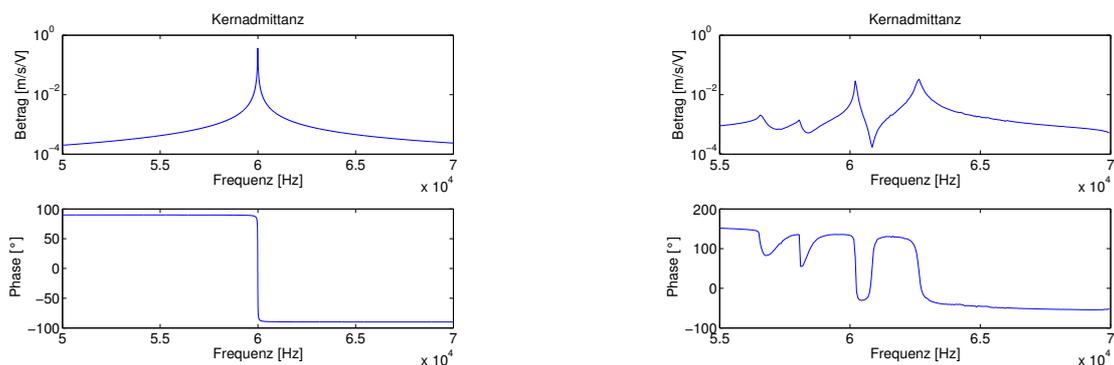


Tabelle 9: Beispielhafte Kernadmittanzverläufe

Der gezeigte beispielhafte Aufbau kann auch hier durch den Einsatz von anderem Messequipment von dieser Darstellung abweichen. Allgemein formuliert werden folgende Geräte benötigt: ein Frequenzgenerator (hier ein Impedanzanalyser), ein Leistungsverstärker

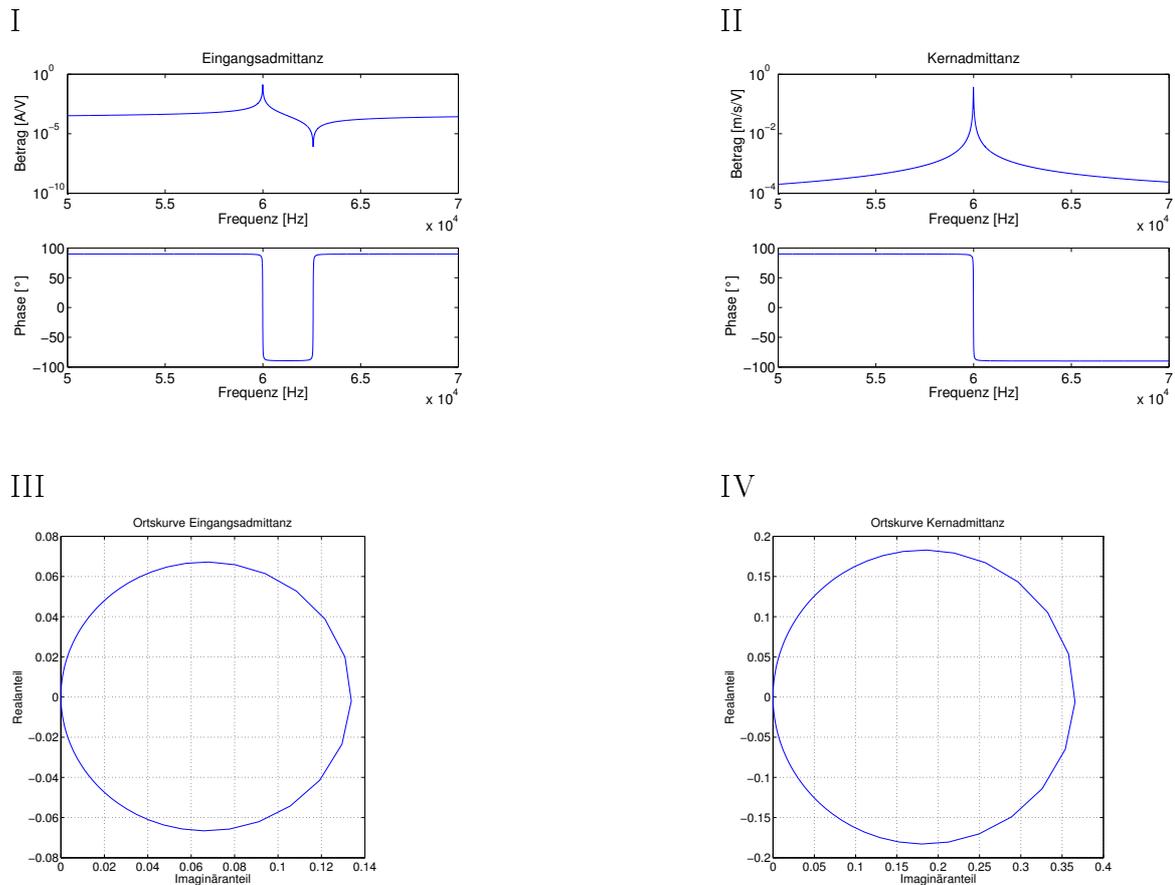


Tabelle 10: Darstellung als Ortskurve

(hier ein Leistungsverstärker ENI 1040L), ein Gerät zur Messung der Geschwindigkeit (hier ein Laserinterferometer) und ein Auswertegerät (hier ein handelsüblicher PC mit entsprechenden Schnittstellen). Ähnlich der Messung der Eingangsadmittanz wird über den Frequenzgenerator ein Anregesignal erzeugt, welches mit Hilfe des Leistungsverstärkers verstärkt wird. Jedoch wird nicht der Wert des Stromes passend zur Frequenz und Anregespannung erfasst, sondern die bei dieser Spannung an einem ausgewählten Punkt in einer ausgewählten Richtung anliegende Geschwindigkeit.

Genau wie im vorhergehenden Abschnitt über die Eingangsadmittanzverläufe werden hier beispielhaft Verläufe von Kernadmittanzen vorgestellt. Bild I der Tabelle 9 zeigt entsprechend einen berechneten Verlauf einer Kernadmittanz und Bild II einen an einem US-Werkzeug aufgenommenen Verlauf. Im Gegensatz zur Eingangsadmittanz ist bei der Kernadmittanz die Antiresonanz nicht vorhanden. Bild II zeigt eine Messung an einem US-Werkzeug mit mehreren Nebenresonanzen im angezeigten Frequenzbereich. Auch dieses US-Werkzeug würde auf Grund der eng nebeneinander liegenden Resonanzen in einer Industrieanwendung nicht zum Einsatz kommen.

Eine andere Form der Darstellung beider Admittanzverläufe wird in Tabelle 10 gezeigt. Dabei handelt es sich um die Form der Ortskurve (siehe Bild III und IV). Mit Hilfe dieser Darstellung ist es möglich, die Ersatzparameter eines US-Werkzeuges zu ermitteln. Wesentliche Daten sind dabei der Radius und die Lage des Mittelpunktes des Kreises. Genaue Angaben über die Ermittlung von Ersatzparametern von US-Werkzeugen können der Arbeit von *Littmann* [35] entnommen werden.

4.1.3 Allgemeine Anforderungen an US-Werkzeuge

Eine Charakterisierung durch eine Messung an einem US-Werkzeug ist nur möglich, wenn zuvor einige grundlegenden Anforderungen bzw. Qualitätsmerkmale für diese Werkzeuge festgelegt wurden. Zu diesen Qualitätsmerkmalen gehören eine ausgeprägte einzelne Resonanzfrequenz, eine bestimmte mechanische Güte, die elektrische Impedanz und die Empfindlichkeit gegenüber äußeren Lasten. Abgesehen von dem Merkmal einer über einen größeren Frequenzbereich einzelnen Resonanz gibt es für die anderen hier genannten Merkmale erst einmal keine eindeutige Qualitätsaussage. Dies liegt an den unterschiedlichen Kriterien, wie ein US-Werkzeug bewertet werden kann.

Einige Hersteller von US-Werkzeugen verfolgen den Grundsatz, dass ein US-Werkzeug eine geringe Güte bzw. eine hohe Impedanz haben muss, damit dieses US-Werkzeug unempfindlich gegenüber einer äußeren Last reagiert. Mit der so definierten Vorgabe der Qualitätsmerkmale kann auch mit Hilfe einer einfachen Ansteuerung ein stabiler Prozess gewährleistet werden. Dies ist möglich, da eine durch eine Änderung der äußeren Last herbeigeführte Frequenzverschiebung nur zu einer geringen Änderung in der Impedanz und somit zu einer geringen Beeinflussung des Prozesses führt. Eine Ansteuerung hat somit "Zeit" auf diese Änderung zu reagieren und muss nicht jede kleine Änderungen ausgleichen, da der Prozess über einen größeren Frequenzbereich stabil läuft. Diese Art der Ansteuerung hat jedoch einen Nachteil. Durch die mit einer geringen Güte einhergehende hohe Impedanz sind die Anregespannungen sehr hoch. Hohe Spannungen erfordern eine gute Isolierung der Leitungen und eine Abschirmung des US-Werkzeuges.

Insoweit ist unter dem Aspekt der erweiterten Sicherheitsanforderungen bei Verwendung hoher Spannungen (>60 V) die Nutzung von US-Werkzeugen mit einer hohen Güte und einer geringen Impedanz in Resonanz sinnvoller. Diese Werkzeuge reagieren empfindlich auf äußere Lasten und geben dadurch eine auswertbare Rückmeldung über den Bearbeitungs- bzw. Verarbeitungsprozess. Zur Ansteuerung und gegebenenfalls zur Auswertung der Signale bedarf es jedoch bei diesen US-Werkzeugen komplexer Ansteuerschaltungen. Die Ansteuerungen müssen schnell auf lastbedingte Änderungen der Frequenz reagieren, denn

eine kleine Änderung der Frequenz resultiert in einer großen Änderung der Impedanz und damit kann die Stabilität eines Prozesses nur sichergestellt werden, wenn eine Anpassung der Betriebsfrequenz an sich ändernde Lastbedingungen erfolgt. Der Vorteil dieser Auslegung des Werkzeuges liegt in der Möglichkeit die Anregespannungen der Ansteuerung so gering zu halten, dass keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen notwendig sind. Im Laufe dieser Arbeit wird bei der späteren Beurteilung der US-Werkzeuge die hohe Güte bzw. die Eignung zum Betrieb bei geringen Spannungen ($<60\text{ V}$) als ein Auswahlkriterium genutzt.

4.2 Qualitätsprüfung in der Halbleiterfertigung

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Prüfverfahren für eine Verbindung in der Halbleiterfertigung beschrieben. Die mit diesen Prüfverfahren ermittelten Ergebnisse werden später zur Beurteilung der Bondverbindungen herangezogen. Diese Beurteilung ist ihrerseits ein Maß für die Qualität der eingesetzten Ultraschallwerkzeuge. Dabei wird zunächst auf die zerstörenden Prüfverfahren und dann auf die nicht zerstörenden Prüfverfahren eingegangen ([4], [41], [42], [43], [44]).

Letztlich beurteilen alle Prüfverfahren zwei wesentliche Qualitätsmerkmale. Ein geringer elektrischer Übergangswiderstand mit rein ohmschem Charakter und eine hohe mechanische Festigkeit sind maßgeblich für eine gute Verbindung. Der Mindestwert dieser Festigkeit kann pauschal nicht definiert werden. Er hängt von dem späteren Einsatzgebiet des Bauteiles und der Qualität der Verbindungspartner ab.

4.2.1 Zerstörende Prüfverfahren

Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind die mechanisch zerstörenden Prüfverfahren. Da hier nicht alle mechanisch zerstörenden Prüfverfahren für die Prüfung von Verbindungen der Montageverfahren für Halbleiterelemente relevant sind, sollen nur die für diese Arbeit wichtigen Verfahren genannt werden. Es kann dabei zwischen einer Scherprüfung und einem Schliff unterschieden werden. Beim Schertest wird die Verbindung mit Hilfe eines Scherkeils parallel zur Verbindungsebene abgeschert und die Kraft im Moment des Abscherens gemessen. Es wird zwischen dem Abscheren einer einzelnen Verbindung z. B. einer Ballbondverbindung und dem Abscheren eines kompletten Dies unterschieden. Bei einem Schliff werden nicht interessierende Materialschichten einer Verbindung nach einer entsprechenden Präparation durch Schleifen entfernt. Nach Erreichen der zu untersuchenden Stelle oder Schicht kann eine Analyse dieser Stelle beispielsweise mit einem Lichtmikroskop erfolgen.

Der Ball-Schertest

Beim Ball-Schertest wird ein Ballbond mit einem Scherkeil abgeschert. Dabei wird die am Keil anliegende Scherkraft kontinuierlich erhöht, bis es zum Bruch der Verbindung kommt. In Abbildung 19 wird der Prüfaufbau erläutert. Bei der Durchführung muss besonders auf den Abstand Δh zwischen Bondebene und Abscherebene geachtet werden. Er sollte minimal so groß gewählt werden, dass der Scherkeil nicht über das Substrat bzw. das Bondpad reibt und maximal $1/3$ des Drahtdurchmessers betragen. Wird nicht auf die Scherhöhe geachtet, kann der Ballbond zu hoch abgeschert werden oder der Scherkeil berührt das Substrat und verfälscht bzw. führt zum Abbruch der Messung.

Bei der Bewertung der Fehlerbilder in Abhängigkeit des erreichten Scherwertes wird zwischen drei möglichen Versagensfällen der Verbindung unterschieden. Der Ballbond wird sauber auf dem Substrat abgeschert. Es sind nach dem Scheren nur kleinere Goldreste auf dem Pad des Substrates zu erkennen. Im direkten Gegensatz dazu steht ein in sich gescherter Ball. Dabei wird durch das Anlegen der Scherkraft der Ball auf der eingestellten Scherhöhe getrennt. Der letzte Versagensfall ist das sogenannte Cratering, bei dem Stücke aus dem Pad oder dem Substrat selbst herausgerissen werden. Ähnliche Versagensformen und eine grafische Beschreibung dieser können der Abbildung 20 zum Die-Schertest entnommen werden.

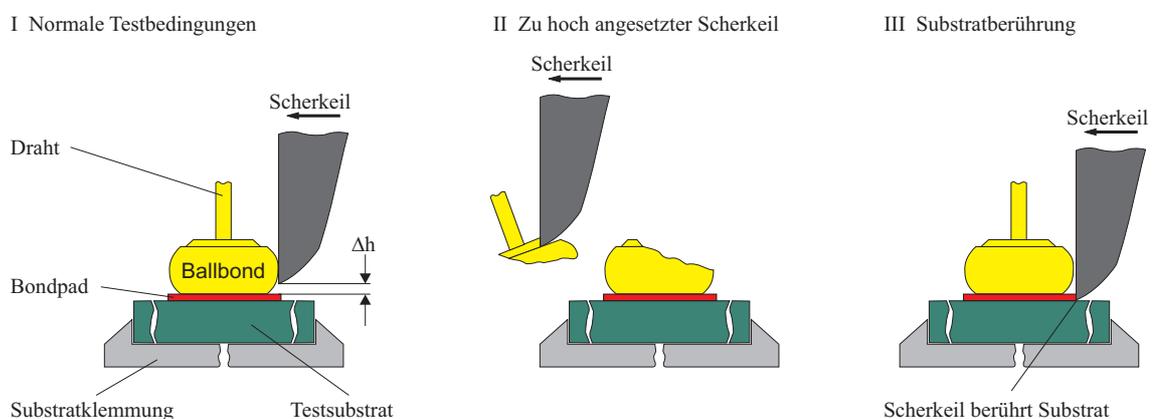


Abbildung 19: Durchführung eines Ball-Schertests [42]

Der Die-Schertest

Beim Die-Schertest wird ein Die (Chip) mit einem Scherkeil abgeschert. Dabei wird auch hier die am Keil anliegende Scherkraft kontinuierlich erhöht, bis es zum Bruch der Verbindung kommt. Da im Folgenden ausschließlich Untersuchungen an Dies durchgeführt werden, die durch Einwirken von Ultraschall mit dem Substrat verbunden wurden, wird die Durchführung des Die-Schertestes an einer solchen Verbindung erläutert.

Selbstverständlich ist die Art und die Durchführung dieses Prüfverfahrens auch auf alle anderen Flipchip-Verfahren anwendbar, jedoch unterscheiden sich die Bruchbilder und die Qualitätsmerkmale der verschiedenen Flipchip-Verfahren.

Die für das Die-Schertesten einer US-Flipchip-Verbindung unterschiedlichen Bruchbilder bzw. Fehlercodes sind in Abbildung 20 dargestellt. Die hier dargestellten Bruchbilder bzw. Fehlercodes entsprechen den schon beim Ball-Schertest angesprochenen Fällen. Bild I der Abbildung 20 zeigt den Prüfaufbau. Bei der Durchführung dieser Prüfung muss genau wie beim Ball-Schertest besonders auf den Abstand Δh zwischen Bondebene und Abscherebene geachtet werden. Auch an dieser Stelle gilt, dass der Scherkeil nicht über das Substrat bzw. das Bondpad reibt und der Abstand zwischen Scherkeil und Substrat $1/3$ des Bumpdurchmessers nicht überschreitet. Zur Begrifflichkeit sei gesagt, dass beim Ball-Bonden vom Ball oder Nail-Head gesprochen wird und beim Flipchip-Bonden von einem Bump. Bild II zeigt sauber auf dem Substrat abgescherte Bumps. Dagegen sind in Bild III sauber auf dem Chip abgescherte Bumps dargestellt. Entsprechend dem Ball-Schertest können die Bumps beim Die-Schertest in sich abgeschert werden (Bild IV). Auch bei dieser Prüfung kann es zu Cratering kommen. Dabei können zum einen Stücke aus dem Pad des Substrates oder dem Substrat selbst oder zum anderen aus dem Pad des Chips oder dem Chip selbst herausgerissen werden, wie es in Bild V zu erkennen ist. Ergibt sich nach dem Scheren das Fehlerbild des Cratering, muss entschieden werden, ob das Cratering durch das Studbumping, durch das US-Flipchip-Bonden oder durch den Schertest entstanden ist. Dies kann nur durch eine vorher durchgeführte nichtzerstörende Prüfung wie die Ultraschall-Mikroskopie erfolgen. Bild VI zeigt im Gegensatz zum Ball-Schertest eine weitere Möglichkeit der fehlerhaften Versuchsdurchführung. Wird der Scherkeil nicht mittig am Chip bzw. nicht mittig vom Bumpbild angesetzt, kommt es beim Scheren zu einer Verdrehung des Chips. Diese Verdrehung führt genau wie eine falsch gewählte Scherhöhe zu einer fehlerhaften Messung.

Beim Scheren einer US-Flipchip-Verbindungen sind die Qualitätsmerkmale gegenüber dem Ball-Schertest eindeutiger definiert. Alle Verbindungen, die entsprechend des Bildes II, III und IV der Abbildung 20 abgeschert werden, sind als gut zu bezeichnen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Bondpad und die Metallisierung des Chips nicht durch das Bonden beschädigt wurden.

Der Schliff

Bei einem Schliff handelt es sich um ein zerstörendes Prüfverfahren, dass immer in Verbindung mit einem optischen Prüfverfahren angewandt wird. In den meisten Fällen reicht eine mikroskopische Begutachtung des Schliffs aus.

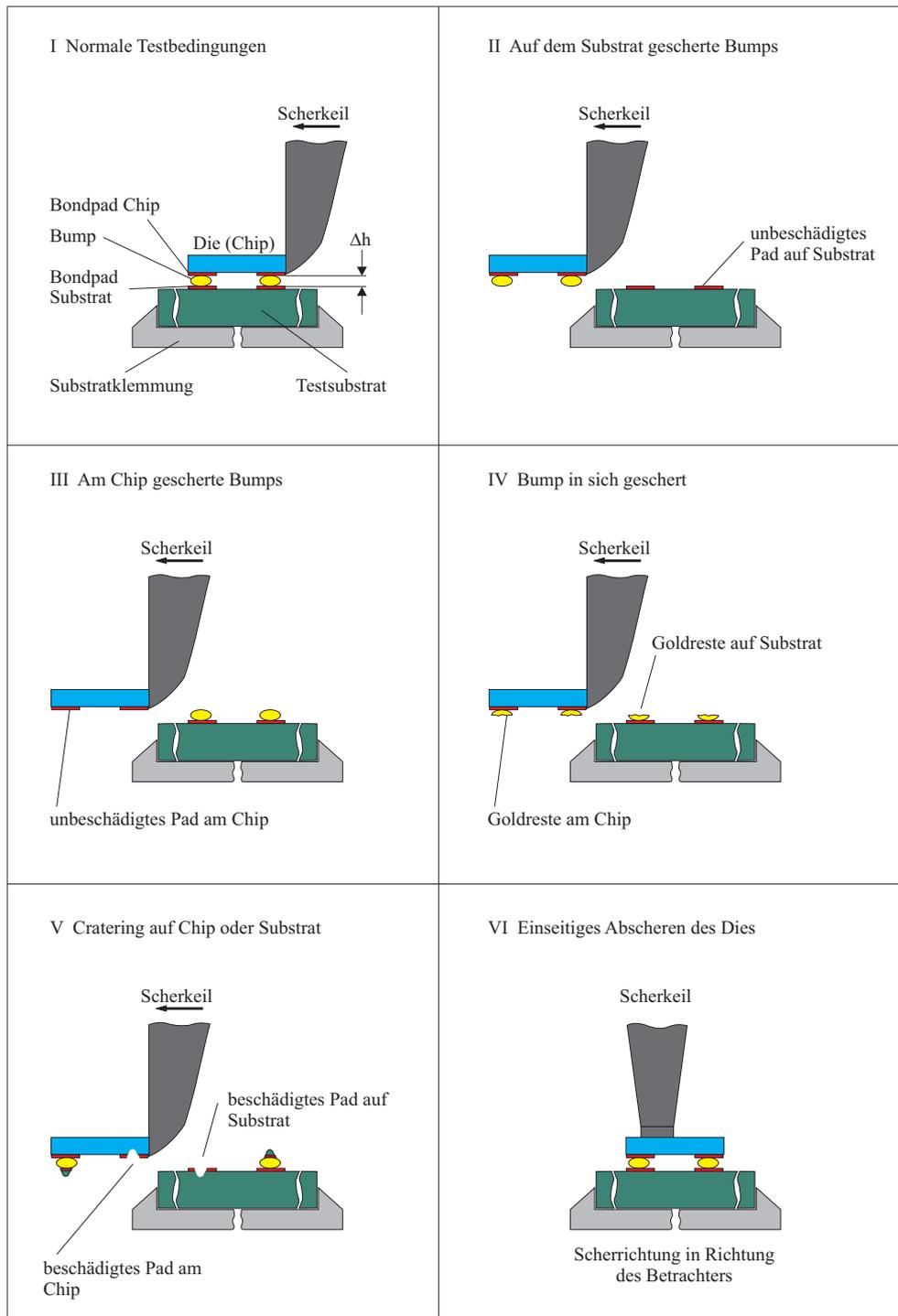


Abbildung 20: Durchführung und Fehlercodes beim Die-Schertest



Abbildung 21: Schliff einer Flipchip-Verbindung

Die Präparation und das Schleifen bzw. Polieren sind eine unerlässliche Voraussetzung für die spätere mikroskopische Untersuchung einer Verbindung. Die Präparation eines Schliffs beginnt immer mit der Einbettung der Probe. Diese Einbettung ist für die bessere Handhabung und die Festigkeit der Probe notwendig [45], [46].

Nach dem Einbetten wird die Probe geschliffen. Dabei erfolgt das grobe Vorschleifen nass oder trocken, das anschließende Feinschleifen jedoch immer nass, damit eine Erwärmung der Probe vermieden wird. Als Kühlmittel wird im allgemeinen Wasser eingesetzt. Es wird einfaches Schmirgelpapier aus Pappe oder Leinwandbögen eingesetzt, auf dem sich das eigentliche Schleifmittel befindet. Beginnend mit einem groben Schmirgelpapier wird nach und nach die Körnung immer feiner gewählt. Bei jeder neuen Körnung ist darauf zu achten, dass solange geschliffen wird, bis die Spuren, hervorgerufen durch das vorherige Schleifmaterial, vollständig verschwinden. Zur Kontrolle ist es sinnvoll, die Probe nach jedem Schleifgang unter dem Lichtmikroskop zu betrachten.

Beim letzten Arbeitsschritt der Präparierung wird die geschliffene Probe poliert. Dafür werden Poliermittel auf rotierende Scheiben aufgebracht und die Probe ähnlich wie beim Schleifen auf die Scheibe gedrückt. Als Poliermittel sind Diamantpasten am weitesten verbreitet. Aber auch andere Poliermittel wie Tonerde (Al_2O_3), Poliergrün (Cr_2O_3) und Polierrot (Fe_2O_3) kommen zum Einsatz. Nach dem Polieren kann die Probe mit unterschiedlichen visuellen Verfahren analysiert werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 21 einen Schliff einer Klebverbindung mit einem leitenden Klebstoff und einem nachträglich eingebrachten Underfill.

4.2.2 Nichtzerstörende Verfahren

Bei der Montage von Halbleiterelementen kann es erforderlich sein, auch während der laufenden Fertigung die Verbindung zu beurteilen. Dies ist durch die eben dargestellten zerstörenden Prüfverfahren prinzipiell möglich, jedoch wird die Verbindung und somit das gesamte Bauteil zerstört. Es gibt aber eine Reihe von Anwendungen, bei denen entweder sehr kostenintensive Bauteile verarbeitet werden oder bei denen eine 100 %-ige Qualitätssicherung erforderlich ist. Als Beispiele seien hier die Militär- und Luftfahrttechnik oder die Raumfahrt genannt. In diesen Bereichen werden die in diesem Abschnitt näher erläuterten nichtzerstörenden Prüfverfahren eingesetzt.

Bei der Prüfung von Flipchip-Verbindungen in der Halbleiterfertigung werden vorzugsweise die visuelle Untersuchung mit Hilfe eines Lichtmikroskopes, eine Untersuchung mit einem Ultraschall-Mikroskop (US-Mikroskop) oder ein elektrischer Funktionstest des Bauteils durchgeführt. Mechanisch nichtzerstörende Prüfverfahren scheiden zur Beurteilung von Flipchip-Verbindungen aus. Bei einem nichtzerstörenden Ball- oder Die-Schertest würde der Keil den Ball oder den Die schon derart stark beschädigen, dass das Bauteil aus der weiteren Fertigung entfernt werden müsste.

Lichtmikroskop

Mit einer visuellen Untersuchung einer Flipchip-Verbindung mit einem Lichtmikroskop kann lediglich die Position des Dies auf dem Substrat und Beschädigungen des Dies beurteilt werden. Eine Messung der Höhe zwischen Substrat und der Die-Oberkante ist ferner mit einem entsprechend ausgestatteten Mikroskop möglich.

Ultraschall-Mikroskopie

Das Ultraschall-Mikroskop (US-Mikroskop) dient ähnlich wie das Lichtmikroskop zur Vergrößerung von Strukturen, die ohne diese Vergrößerung nicht erkennbar wären. Dabei macht die Ultraschall-Mikroskopie Diskontinuitäten bis herab zu einer Größe von 1 μm sichtbar. Ferner wird dieses Verfahren bei der Analyse der physikalischen Eigenschaften von Materialien genutzt, bei der Suche nach Fehlstellen im Kontaktbereich oder zur allgemeinen Beurteilung der Verbindung.

Die physikalischen Grundlagen und die Funktionsweise eines US-Mikroskopes lassen sich wie folgt beschreiben. Physikalisch gesehen werden bei der Ultraschall-Mikroskopie hochfrequente mechanische Schwingungen (5 MHz - 2 GHz) in das Prüfobjekt eingebracht. Durch eine Reflexion, Absorption oder eine Streuung dieser Schallwellen können Materialübergänge erkannt werden. Es können zwei unterschiedliche Verfahren abgegrenzt werden. Dabei handelt es sich zum einen um das Reflexionsverfahren, bei dem der Sender

und der Empfänger auf der gleichen Seite angebracht sind, und zum anderen um das Transmissionsverfahren, bei dem Sender und Empfänger gegenüber angeordnet sind. Am häufigsten kommt dabei das Reflexionsverfahren bzw. die sogenannte Echoanalyse zum Einsatz. Mit Hilfe der Gleichung 3 kann der Reflexionsfaktor von Materialübergängen in einer Grenzfläche beschrieben werden [4].

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

In Gleichung 3 ist R der Reflexionsfaktor, Z_1 und Z_2 die akustischen Impedanzen der sich an der Grenzfläche berührenden Materialien. Die Reflexion ist umso stärker, je größer der Unterschied zwischen den beiden Impedanzen ist. Da die akustische Impedanz von Luft nahezu 0 ist, würde nach Gleichung 3 jede Messung, bei der Luft zwischen dem Sender und dem Empfänger ist, $R = 1$ ergeben. Dies würde einer Totalreflexion gleich kommen. Aus diesem Grund ist bei diesen Messungen ein Koppelmedium erforderlich. Im allgemeinen wird als Koppelmedium Wasser oder Alkohol benutzt. Die Auflösung dieses Prüfverfahrens hängt im Wesentlichen von der Frequenz der Messung ab. Je höher die Frequenz gewählt wird, desto genauer wird eine Messung. Die Eindringtiefe der Welle in das Prüfobjekt wird mit zunehmender Frequenz reduziert. Die einzelnen Verfahren sind in [47], [48] detailliert beschrieben und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weitergehend behandelt.

Elektrischer Funktionstest

Ein sehr wirkungsvolles und aussagekräftiges Prüfverfahren ist der elektronische Funktionstest ([49], [50], [51]). Mit diesem Prüfverfahren kann nicht nur die Funktion eines einzelnen Bauteils getestet werden, sondern auch die Funktion einer ganzen Baugruppe. Dies ist besonders für die COB-Verfahren von Bedeutung, denn so kann ein Board in der Fertigungslinie mit Hilfe eines sogenannten Nadeltesters geprüft werden. Jedoch ist zu beachten, dass bei diesem Test unter Umständen nicht alle Bauelemente getestet werden, die sich auf einem Board befinden. Bauelemente, die nur zu bestimmten Zeitpunkten eine Auswirkung auf die gesamte Funktion haben, wie z. B. Freilaufdioden oder Stützkondensatoren, werden durch einen einfachen Funktionstest nicht überprüft. Dieses Prüfverfahren muss auf jedes zu prüfende Bauteil oder jede Baugruppe speziell angepasst werden.

5 Die Modellbildung eines 2D-US-Flipchip-Prozesses

5.1 Anforderungen an moderne US-Werkzeuge

In Abschnitt 4.1.3 wurden die allgemeinen Anforderungen an ein US-Werkzeug aufgelistet, dabei handelte es sich um Anforderungen im Sinne der Anfertigung eines perfekten US-Werkzeuges. Diese decken jedoch noch nicht die Anforderungen aus Sicht der Anwender ab. Bei den Anforderungen der Anwender solcher US-Werkzeuge geht es vor allem um die Beeinflussung des Prozesses durch das verwendete US-Werkzeug. Die im weiteren Verlauf dieses Abschnittes aufgeführten Anforderungen sind damit nicht nur alleine vom US-Werkzeug abhängig, sondern spiegeln die Anforderungen an den gesamten Fertigungsprozess wieder. Der allgemeine Trend in der Halbleiterindustrie zur Miniaturisierung ist seit vielen Jahren ungebrochen und liefert dadurch gleich zwei in sich fast gegensätzliche Anforderungen. Moderne US-Werkzeuge müssen in der Lage sein, einerseits kleine Chips mit wenigen Verbindungen und andererseits Chips mit immer höheren Anschlusszahlen (>5000) zu verbinden. US-Werkzeuge für immer kleiner werdende Chips zu entwickeln, ist durch die Vielfalt der schon beim Drahtbonden vorhandenen US-Werkzeuge keine große Herausforderung. Jedoch stellt die Entwicklung von US-Werkzeugen für die Verarbeitung von Chips mit einer hohen Anzahl von Anschlussstellen alle Maschinenhersteller vor eine große Aufgabe.

Als Qualitätsmerkmale einer Verbindung zwischen einem Chip und einem Substrat und somit als direkte Anforderungen sollen hier die wesentlichen Merkmale genannt werden. Das erste offensichtliche Merkmal ist, dass weder Chip noch Substrat beschädigt werden dürfen. Dies ist natürlich eine Grundvoraussetzung, kann eine Entwicklung jedoch vor Probleme stellen, da viele Beschädigungen nicht direkt nach dem Verbindungsprozess auffallen. Viele Defekte, die zum Ausfall eines Bauteils führen, können erst im Laufe von Langzeitversuchen festgestellt werden. Aus diesem Grund sind elektrische Tests sowohl direkt nach dem Verbindungsprozess als auch nach den durchgeführten Belastungen erforderlich. Bei vielen Produkten ist die Kontrolle der Deformation ein weiteres Qualitätsmerkmal, der Prozess und somit das US-Werkzeug muss für einen definierten und vor allem konstanten Abstand zwischen Chip und Substrat Sorge tragen. Je nach Anwendungsgebiet ist die Anforderung bezogen auf die mechanische Festigkeit der Verbindung unterschiedlich, in den meisten Fällen ist aber eine maximale Festigkeit zwischen Chip und Substrat gefordert. Jedoch kann eine hohe Festigkeit meist nur durch eine hohe US-Leistung erreicht werden. Gerade bei einer hohen Anzahl von Verbindungen ist die durch das US-Werkzeug einzuprägende US-Leistung sehr groß und kann schnell zu Beschädigungen am oder im Bauteil führen [52].

5.2 Betrachtung des eindimensionalen US-Flipchip-Prozesses

Der Wunsch, Chips mit immer höheren Anschlusszahlen zu verbinden, wird in der Halbleiterindustrie immer häufiger geäußert, jedoch ist bis heute kein Hersteller eines US-Flipchip-Bonders in der Lage, solche Verbindungen sicher und zuverlässig herzustellen. Es gab in den letzten Jahren verschiedene Ansätze unterschiedlicher Hersteller, dieses Problem zu lösen. Einerseits wurde 2007 in [1] verkündet, dass das US-Bonden von 20 x 20 mm^2 großen Chips mit 1000 Bumps möglich sei, andererseits gibt es bis jetzt keine bekannte Anwendung dieser Technologie. Deshalb ist die Nachhaltigkeit der in [1] gemachten Aussage fraglich. In [53] wird ausgesagt, dass ein anderer Maschinenhersteller Chips mit 100 Verbindungen erfolgreich und zuverlässig verbinden kann.

Neben der Schwierigkeit, den Chip parallel auf das Substrat aufzusetzen (vgl. Abschnitt 2.4.1), ist die Wahl geeigneter Bondparameter, wie Bondkraft und US-Energie, die größte Herausforderung. Sind die Werte für die Bondparameter zu gering gewählt, kann nicht gewährleistet werden, dass alle Anschlüsse nachhaltig elektrisch und mechanisch verbunden sind. Werden die Werte für die Bondparameter zu hoch gewählt, kommt es zu Beschädigungen des Produktes. Das am häufigsten auftretende Fehlerbild ist das sogenannte Cratering. Beim Cratering wird während des Bondprozesses die Chipstruktur derartig beschädigt, dass Teile des Chips herausbrechen. Die Bezeichnung Cratering geht auf das Bruchbild der Chipstruktur zurück [54].

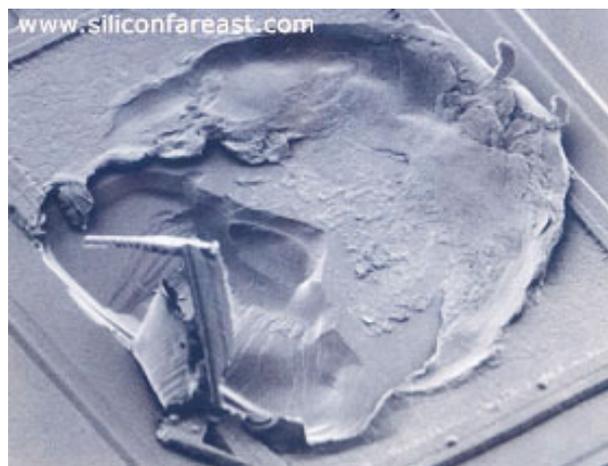


Abbildung 22: Cratering - Beschädigung des Chips unter dem Bondpad [54]

Wird die US-Energie zu hoch gewählt, wird in der Literatur auch vom „überbonden“ einer Verbindung gesprochen. Durch die zu hohe US-Energie wirken während des Bondvorganges zu starke Spannungen im Chip. Diese zu hohen Spannungen können entweder durch zu große

Schwingungsamplituden oder durch eine zu lang gewählte Bondzeit entstehen. Neben dieser makroskopischen Beschädigung des Chips, kann eine zu hohe US-Energie zu Delamination der Strukturen innerhalb des Chips führen. Die immer kleineren und dünner werdenden Strukturen im Chip können durch die mechanischen Belastungen durch die US-Energie zerstört werden.

Genau hier setzt die Motivation dieser Arbeit an. Es soll untersucht werden, in wie weit es möglich ist, eine US-Flipchip-Verbindung mit einer großen Anzahl von Anschlüssen mit einer möglichst geringen US-Energie (dabei steht die Verringerung der Amplitude bei gleicher Bondzeit im Vordergrund) zu bonden und dadurch sowohl eine makroskopische als auch eine mikroskopische Beschädigung des Chips zu vermeiden.

Damit ein entsprechender Ansatz zur Verringerung der Belastungen des Chips gefunden werden kann, muss zunächst das heutige Fertigungsverfahren näher untersucht werden. In der Literatur wird als Hauptgrund für das Cratering, eine zu hohe US-Energie genannt [54]. Die je Zeiteinheit abgegebene Energie wird durch die beiden Größen Frequenz und Amplitude der mechanischen Auslenkung bestimmt. Da die Werkzeuge in Resonanz betrieben werden, die Frequenz nahezu festliegt, ist die Amplitude die verbleibende Größe, über die die US-Leistung beeinflusst werden kann. Abgesehen von Resonanzeffekten im Chip/Substrat ist die Amplitude auch ein Maß für die mechanische Beanspruchung, der die Paarung Chip/Substrat ausgesetzt wird, also die Größe, die letztendlich die o. g. Schädigungen hervorruft.

Die US-Energie, die zur Verbindungsbildung benötigt wird, wird während der Schweißdauer zugeführt. Die Bondzeit ist also ein weiterer Parameter, der für die Zuverlässigkeit der Verbindung bzw. die mögliche Schädigung von Chip/Substrat zu berücksichtigen ist.

Im Folgenden wird zunächst ein Ersatzmodell zur Berechnung der wirkenden Energie beim eindimensionalen, transversalen US-Wedge-Wedge-Bonden vorgestellt. Daran anschließend wird eine analytische Betrachtung durchgeführt, wie die Amplitude der mechanischen Auslenkung bei konstanter Leistung verringert werden kann. Anhand des aus [55] bekannten Ersatzmodells für das eindimensionale US-Bonden wird die analytische Energiebetrachtung für diesen Fall durchgeführt. Bei dem analytischen Ansatz für das vorgestellte Modell werden die gleichen Randbedingungen und Annahmen berücksichtigt. Da für diese Arbeit nicht nur der Bondprozess alleine sondern auch das Verhalten bzw. der Einfluss des US-Werkzeuges eine Rolle spielt, wird in dem folgenden Modell auch das Verhalten des US-Werkzeuges beschrieben.

5.2.1 Ersatzmodell für den eindimensionalen US-Bondprozess

Das von *Brökelmann* [55] entwickelte diskrete Ersatzmodell wurde zur Untersuchung des Verhaltens eines US-Werkzeuges und des Bondprozesses im Zeitbereich auch bei nichtlinearen Randbedingungen für das transversale Wedge-Wedge-Drahtbonds entwickelt. Das Gesamtsystem besteht aus dem US-Werkzeug inklusive Bondtool, dessen Dynamik als diskreter Zweimassenschwinger modelliert wurde, dem an der Werkzeugspitze wirkenden Bondprozess, der als nichtlineare Last modelliert wurde und der Leistungselektronik mit PLL-Phasenregelung. Das gesamte Modell wurde im numerischen Simulationsprogramm MATLAB[®]-Simulink implementiert.

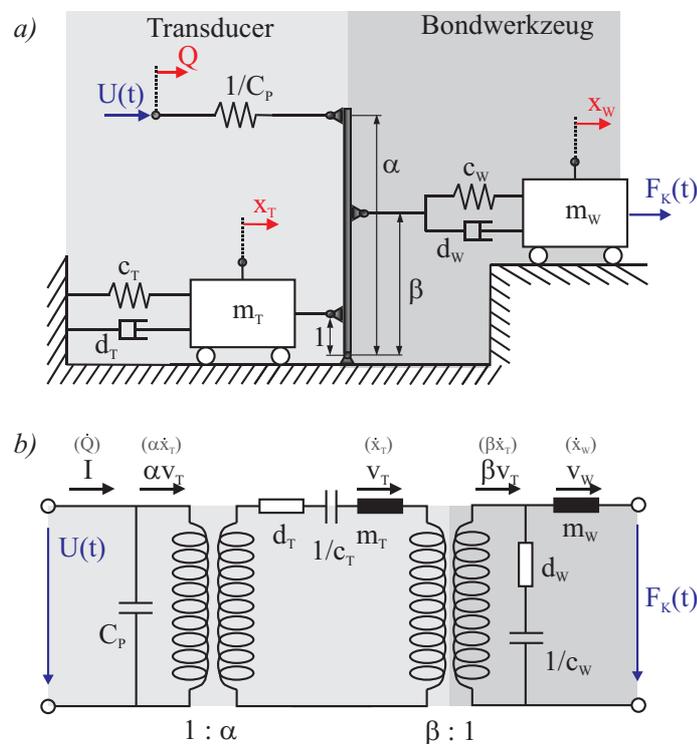


Abbildung 23: Elektromechanisches Ersatzmodell im Bereich der Resonanzfrequenz (a) mechanische Darstellung, (b) elektrische Darstellung [55]

Das genutzte Ersatzmodell des Zweimassenschwingers zur Modellierung des US-Werkzeuges inklusive Bondtool ist in Abbildung 23 dargestellt. Die beiden Modelle, elektrisch und mechanisch, werden durch identische Differentialgleichungen beschrieben und geben die physikalischen Zusammenhänge analog wieder. Die zur Herleitung des Modells benötigten Grundlagen können [55] entnommen werden.

Das US-Werkzeug wird im linken farblich abgesetzten Bereich als Einfreiheitsgradmodell abgebildet. Die Masse m_T , die Steifigkeit c_T und die Dämpfung d_T stellen dabei die Ersatzparameter des US-Werkzeuges dar. In der elektrischen Darstellung wird mittels eines idealen Übertragers mit dem Übertragungsfaktor α die Kapazität der Piezokeramiken C_P mit dem mechanischen System gekoppelt. Die Anregung des Systems erfolgt über die Speisespannung $U(t)$, die an den Piezokeramiken anliegt. Im mechanischen Modell entsprechen die Kapazität der Piezokeramiken einer Feder der Steifigkeit $1/C_P$, die über eine Kraft (Speisespannung $U(t)$) angeregt mit einem Hebelverhältnis von $\alpha : 1$ auf das mechanische System wirkt. Die eindimensionale Auslenkung x_T der so angeregten Masse m_T spiegelt die Bewegung des US-Werkzeuges wieder. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei den hier genannten Parametern um modale Parameter handelt, die so dargestellt nur in der Nähe der zugehörigen Resonanzfrequenz gelten.

Der rechte, etwas dunkler abgesetzte Teil der Abbildung 23 stellt das dynamische Verhalten des Bondtools (Wedges) dar. Dabei wird eine zweite Masse m_W über ein Feder-Dämpferelement (Steifigkeit c_W und Dämpfung d_W) mit einem Hebelverhältnis $1 : \beta$ angekoppelt. Die Auslenkung des Bondtools wird in der mechanischen Darstellung mit x_W gekennzeichnet. Als Analogon für den Strom im elektrischen Ersatzschaltbild steht in der mechanischen Darstellung die Geschwindigkeit mit v_W . Die an der Masse wirkende Kraft $F_K(t)$ entspricht einer durch den Bondprozess anliegenden Last an der Wirkstelle zwischen Bondtool und Chip. Mit Hilfe dieses Modells, in der mechanischen oder in der elektrischen Darstellung, lässt sich das Schwingungsverhalten in einer guten Näherung wiedergeben. In [55] zeigt *Brökelmann*, dass die unterschiedlichen Lastfälle durch dieses Modell in guter Näherung wiedergegeben werden.

In dem oben beschriebenen Modell ist die Modellierung des Bondprozesses noch nicht mit einbezogen. Für das Wedge-Wegde-Drahtbonden ist in [55] ein erweitertes Ersatzmodell angegeben, das den Verbindungsprozess beim eindimensionalen Drahtbonden abbilden soll.

Beim Ultraschall-Drahtbonden handelt es sich um einen Reib-Schweiß-Prozess. Die Relativbewegung zwischen Draht und Substrat innerhalb der ersten Millisekunden des Prozesses sowie die anschließende Verbindungsbildung sind in vielen Arbeiten beschrieben worden. In jüngeren Arbeiten konnte die Verbindungsbildung, insbesondere die Ausbildung der intermetallischen Phase, aufgrund moderner Messmittel genauer beschrieben werden als bisher.

Im Allgemeinen werden in der Literatur (siehe [4] und [56]) vier Phasen unterschieden (siehe Abbildung 24):

- Vordeformation,
- Aktivierungs- bzw. Reinigungsphase,
- Deformationsphase,
- Interdiffusionsphase.

Während der Vordeformation wirkt im Gegensatz zu den drei folgenden Phasen nur eine aufgebrachte Touchdown- bzw. Bondkraft und keine US-Energie. Die durch diese Kräfte erzeugte Deformation liegt typischerweise bei 10 - 20 % des Drahtdurchmessers je nach Stärke und Material des Drahtes. Durch die Vordeformation wird die Voraussetzung für den Flächenkontakt zwischen Draht und Bondpad geschaffen. Erst nach Abschluss der Vordeformation und ab dem Beginn der zweiten Phase startet die Bondzeit, die als Parameter in den Fertigungsautomaten wiederzufinden ist.

Die zweite Phase des Bondprozesses ist die Aktivierungs- bzw. Reinigungsphase. Diese Phase dauert einige Millisekunden, die genaue Dauer kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht eindeutig bestimmt werden [57]. Während dieser Phase bewirkt eine Relativbewegung zwischen Draht und Bondpad die Aktivierung der Kontaktoberflächen [56]. Die natürliche Oxidschicht eines oder beider Verbindungspartner (je nach Materialkombination) wird aufgebrochen und es entstehen rein metallische Oberflächen. Zusätzlich werden Rauigkeitsspitzen beider Fügepartner durch die Relativbewegung eingeebnet und es bilden sich erste Mikroverschweißungen. Auf die Aktivierungs- bzw. Reinigungsphase folgt die Deformationsphase. Hier dominiert die makroskopisch plastische Verformung, die der Verformungskurve ihren charakteristischen Verlauf gibt. Durch die plastische Verformung des Drahtes wird gleichzeitig die Kontaktfläche zwischen Draht und Bondpad vergrößert und so die Voraussetzung für die letzte Phase geschaffen.

In der vierten und letzten Phase des Bondprozesses kommt es abschließend zur qualitätsgerechten und stoffschlüssigen Verbindung. Für die Festigkeit der Verbindung sorgen diffusionskontrollierte Prozesse. Neben atomaren Transportvorgängen zwischen Bonddraht und Bondpad werden auch mechanische Spannungen durch Leerstellen- und Versetzungsbewegungen reduziert [56]. Ein ausführlicher Überblick über die bei der Verbindungsbildung ablaufenden Prozesse inklusive neuester Messergebnisse wird in [58] gegeben.

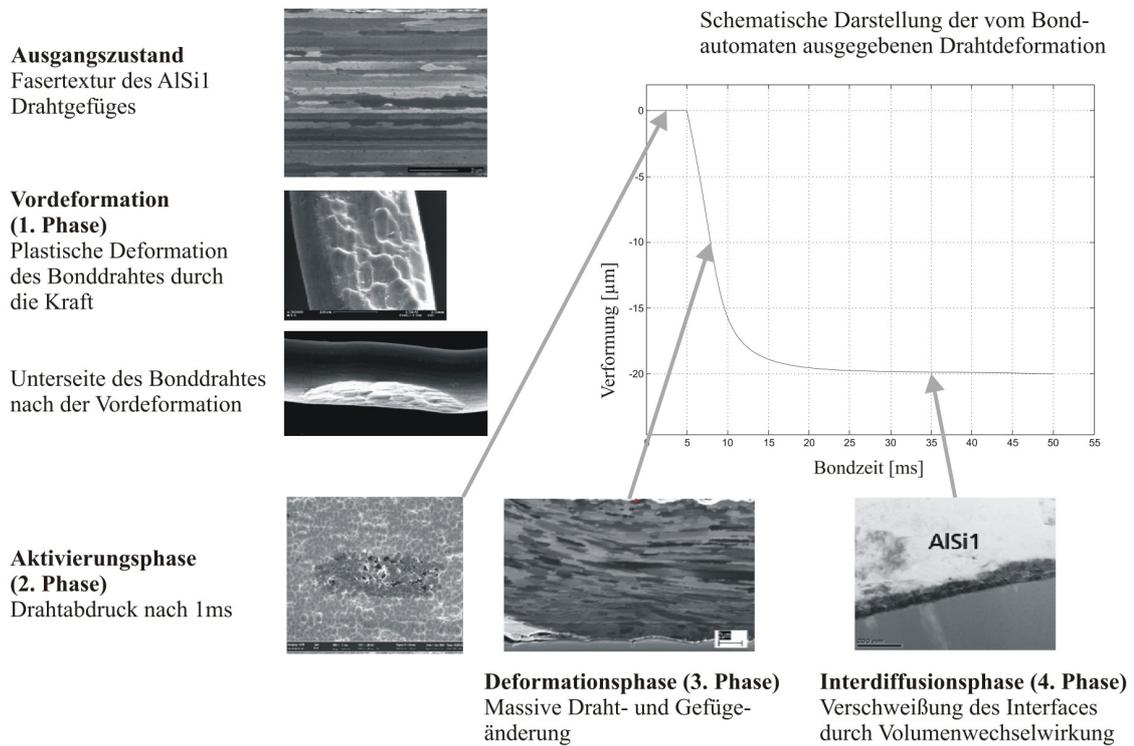


Abbildung 24: Zeitlicher Ablauf der Verbindungsbildung beim US-Drahtbonds [58]

Den eben beschriebenen unterschiedlichen Reibvorgängen ist gemeinsam, dass es sich um Stick-Slip-Vorgänge handelt und nicht um einen reinen Coulomb'schen Reibprozess¹. Dies wurde durch M. Mayer [59] für das Ball-Wedge-Bonds messtechnisch nachgewiesen und ist in Abbildung 25 dargestellt.

Unter der Voraussetzung eines elastischen Untergrundes bewegt sich der Ball und der Untergrund zu Beginn gemeinsam in Richtung der Auslenkung des Bondwerkzeuges (2). Sobald die Haftkraft zwischen Ball und Substrat, resultierend aus dem Produkt von Reibwert μ_H und der Normalkraft F_N , überschritten wird, beginnt der Ball zu gleiten (3). In dieser Phase, in der die beiden Verbindungspartner gleiten, ist die Kontaktkraft konstant. Erreicht das Bondwerkzeug seine maximale Auslenkung haften beide Partner wieder und bewegen sich gemeinsam in Richtung Ausgangspunkt. Wird die Haftkraft bei der Rückbewegung des Bondwerkzeuges überschritten, beginnt der Ball erneut zu gleiten. Am Punkt der maximalen Auslenkung beginnt eine weitere Haftphase, und der gesamte Zyklus wiederholt sich. Hierbei

¹Wird ein Fußpunkt eines klassischen Coulombschen Reibelements harmonisch angeregt, gibt es während der Bewegung keine Haftphasen. Das Reibelement gleitet ständig. Lediglich kehrt sich beim Wechsel der Richtung der Geschwindigkeit auch die Richtung der Reibkraft um.

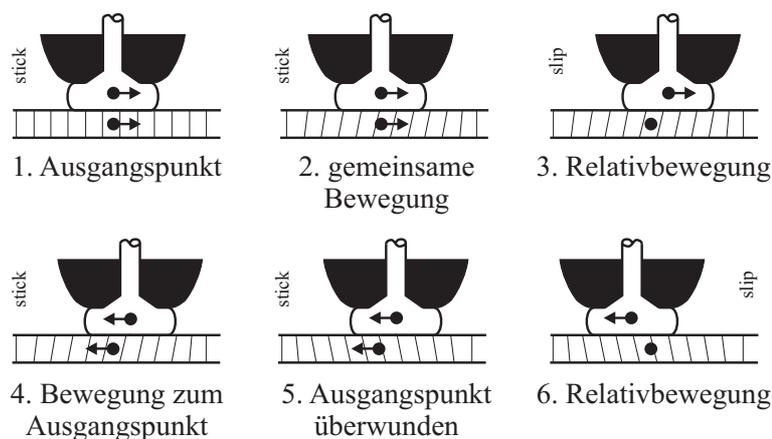


Abbildung 25: Stick-Slip-Bewegung beim Thermosonic-Ball-Bonden [59]

handelt es sich um ein vereinfachtes Modell der Vorgänge beim Ball-Wedge-Bonden, da die Steifigkeit des Balls und somit die elastische Verformung des Balls nicht berücksichtigt wird. Elastische oder vielleicht auch plastische Verformungen bei den Übergängen von Gleitphasen in Haftphasen bzw. bei den Änderungen der Auslenkungsrichtung werden vernachlässigt. Diese Vereinfachung hat jedoch einen geringen Einfluss, da die Abmessungen des Balls im Verhältnis zwischen Höhe und Durchmesser sehr gering sind. Für das in [55] beschriebene Modell des Bondprozesses beim Wedge-Wedge-Bonden ist der Einfluss der elastischen oder plastischen Verformung in Drahtrichtung noch geringer, da die Längsrichtung des Drahtes eine vielfach höhere Steifigkeit im Vergleich zum Drahtdurchmesser bietet. Prinzipiell zeigen die Verbindungspartner jedoch identisches Verhalten.

Zur Darstellung der eben beschriebenen Stick-Slip-Vorgänge eignet sich das sogenannte Jenkin-Element (Abbildung 26). Es besteht aus einem Coulomb-Element mit der maximalen Haftkraft H und einer masselosen linearen Feder mit einer Steifigkeit c [55].

Zu Beginn einer Belastung wird die Feder des Jenkin-Elements gedehnt, bis die maximale Haftkraft H überschritten wird und die Haftphase in eine Gleitphase übergeht. Die Gleitphase endet, wenn die Verformungsgeschwindigkeit \dot{u} ihr Vorzeichen ändert. Während dieser zweiten Haftphase wird erst die gedehnte Feder entspannt, um sie dann in die entgegengesetzte Richtung erneut zu spannen. Die nächste Gleitphase beginnt, wenn $|F| = H$ wird. Es bildet sich bei einer harmonischen Verformung eine geschlossene Hysteresekurve aus. Ändert sich während einer Haftphase die Richtung der Verformungsgeschwindigkeit vor Erreichen der Haftgrenze, dann wandert der Punkt des aktuellen Zustandes des Jenkin-Elements in dem Kraft-Verformungsdiagramm auf der aktuellen Steifigkeitslinie zurück. Dagegen ändert sich der Ausgangspunkt der Kraft-Verformungs-Charakteristik

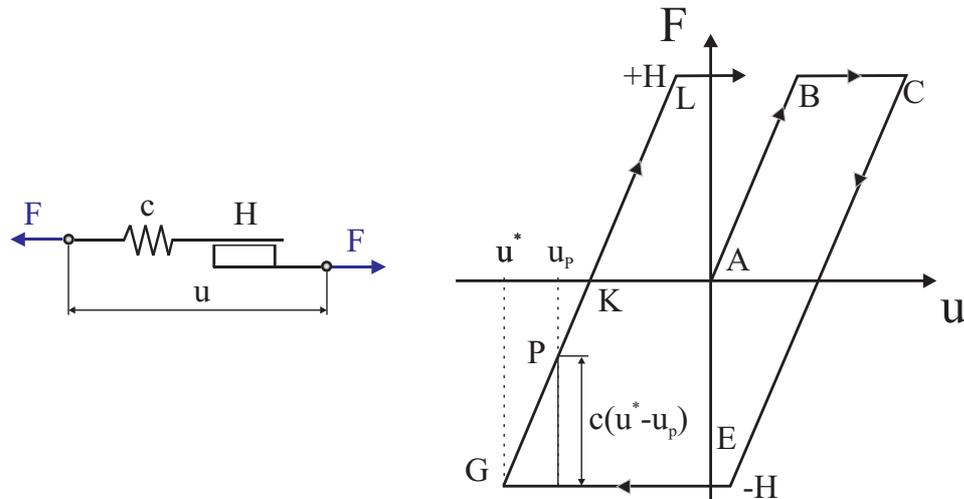


Abbildung 26: Ersatzmodell eines Jenkin-Elements und die Darstellung der Kraft-Verformungs-Charakteristik [55]

bei einem Richtungswechsel der Verformungsgeschwindigkeit während einer Gleitphase. Daher ist bei der Modellierung für die momentan genutzte Charakteristik der vorherige Gleit-Haftübergang zu berücksichtigen. Somit kann das Jenkin-Element nicht als eindeutige Funktion $F(u)$ abgebildet werden, sondern ist neben der Verformung u und der Verformungsgeschwindigkeit \dot{u} auch von dem vorherigen Zustand des belasteten Elementes $F(u, \text{sgn}(\dot{u}), u(\tau)|_{\tau < t}, \text{sgn}(\dot{u}(\tau))|_{\tau < t})$ abhängig [55]. Trotz des einfachen Aufbaus des Jenkin-Modells ist sein Verhalten komplex. Neben den zwei Zuständen in denen die dissipierte Energie gleich Null ist, wenn die Haftkraft H gleich Null bzw. die Haftkraft H größer F ist, gibt es eine maximal dissipierte Energie, wenn der Wert der Haftkraft zwischen diesen beiden Extremen liegt (siehe Tabelle 11). Eine genauere Beschreibung der Vorgänge inklusive einer Kraft-Verformungs-Charakteristik sind in [55] ausführlich dargestellt. Das durch das Jenkin-Element erweiterte elektromechanische Ersatzmodell ist in Abbildung 27 dargestellt. Dieses Modell dient als Ausgangspunkt für die Ableitung der geleisteten Arbeit beim eindimensionalen Ultraschallschweißen sowie zum Vergleich der abgebbaren Arbeit beim zweidimensionalen Ultraschallschweißen.

5.2.2 Energiebilanz beim eindimensionalen US-Bonden

Mit Hilfe des hergeleiteten Modells lässt sich die während eines Bondvorgangs eingeleitete Energie berechnen. Es ist offensichtlich, dass nur während der Gleitphasen Energie dissipiert werden kann. Somit kann für die Zeit, in der Energie in die Verbindungsebene eingeleitet wird, der folgende analytische Ansatz gewählt werden. Die eingeleitete Energie bzw. die

I. Haften , wenn $ F < H$	<p>Dies ist in den Bereichen AB, CE und GL von Abbildung 26 der Fall. Hier gilt:</p> $F = c(u - u^*) - H \operatorname{sgn}(\dot{u}^*) \quad (4)$ <p>Es bezeichnen u^* und \dot{u}^* die Verformungen und deren Zeitableitung zum Zeitpunkt t^* unmittelbar nach dem letzten Übergang von der Gleitphase zur Haftphase. Für den Punkt P in Abbildung 26 gilt z. B. $u = u_P$, $u^* = u_G$, $\operatorname{sgn}(\dot{u}^*) = 1$, $F_P = c_L(u_P - u_G) - H$</p>
II. Gleiten , wenn $ F = H$ und $\dot{u}F > 0$	<p>Dies ist in den Bereichen BC und EG (siehe Abbildung 26) der Fall. Hier gilt:</p> $F = H \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (5)$
III. Gleit-Haft-Übergang , wenn $ F = H$ und $\dot{u}F \leq 0$	<p>Dies ist in den Umkehrpunkten C und G der Fall. Hier gilt Gleichung 4. Unmittelbar nach dem Übergang von der Gleit- zur Haftphase des Coulomb-Elements zum Zeitpunkt t^* gilt noch $F = H$. Damit ist die Bedingung I. (noch) nicht erfüllt. Die Steifigkeit darf hier jedoch nicht Null sein, sondern es muss Gleichung 4 gelten. Daher wird dieser Sonderfall für die sonst singulären Punkte C und G betrachtet.</p>
IV. Haft-Gleit-Übergang , siehe II.	<p>Dies ist in den Punkten B, E und L der Fall. Hier gilt Gleichung 5. Diese Punkte sind unkritisch und können auch mit II. zu einem Fall zusammengefasst werden.</p>

Tabelle 11: Phasen der Kraft-Verformungs-Charakteristik [55]

5.3 Schlussfolgerungen aus dem eindimensionalen Bondprozess

Aus dem eindimensionalen Modell und der daraus folgenden Energiebetrachtung kann bei gegebener zur Verbindungsbildung benötigter Arbeit, wie bereits oben erwähnt, lediglich die Amplitude \hat{u} und die Schweißzeit t_s variiert werden. Verlässt man allerdings die Vorstellung, dass die Relativbewegung der Verbindungspartner auf einer Geraden stattfindet und lässt statt dessen auch Bahnen höherer Ordnungen (z. B. Lissajous-Figuren²) zu, so könnte der durchlaufene Weg je Periode bei konstanter Auslenkung – und damit konstanter mechanischen Beanspruchung – vergrößert werden. Des Weiteren könnte die Unterdrückung des Stick-Slip-Effektes eine zusätzliche Reduzierung der mechanischen Belastung bei gleichzeitig vergrößerter Schweißleistung bewirken.

Es sind also folgende Szenarien zu diskutieren:

- Variation der Schweißzeit
- Vermeidung des Stick-Slip-Effektes
- Bewegung auf Bahnen höherer Ordnungen (z. B. Kreis)

5.3.1 Variation der Schweißzeit

Wird die Bondzeit eines Bondprozesses verkürzt, wird die geleistete Arbeit entsprechend geringer. Jedoch darf die eingeprägte Energie ein bestimmtes Maß nicht unterschreiten, da sonst der Bond nicht in der geforderten Qualität ausgebildet werden kann. Dieser Kompromiss zwischen der Verkürzung der Bondzeit und ausreichender Energie ist nicht nur im Bezug auf die Reduzierung der Belastung der Verbindungspartner interessant, sondern auch in Bezug auf die Reduzierung der Taktzeiten. Ist es möglich, die Zeit für den Bondprozess zu verringern, ermöglicht dies gleichzeitig eine Steigerung der Produktivität der Maschinen.

Ein in der Literatur schon häufig gewählter Ansatz, die Bondzeit zu verkürzen und somit die Taktzeiten zu verringern, ist die Erhöhung der Ultraschallfrequenz [39]. Auch bei der Betrachtung der Belastungen eines Chips durch den US-Flipchip-Prozess könnte die Erhöhung der Bondfrequenz zu einer Verringerung der Belastung führen. Neben der häufig kleineren Amplitude und den damit verbundenen geringeren Spannungen in den Bauteilen, würde sich auch die Deformationsphase verkürzen. Eine solche Verkürzung der Deformationsphase würde zusätzlich die Belastung des Chips verringern. Jedoch haben

²Lissajous-Figuren sind Kurvengraphen, die durch Überlagerung harmonischer Schwingungen entstehen. Sie sind benannt nach dem französischen Physiker Jules Antoine Lissajous (1822 - 1880).

Untersuchungen gezeigt, dass eine Erhöhung der Bondfrequenz nicht wie angestrebt zu einer Verkürzung der Deformationsphase führt, sondern die Belastung des Chips nur im Verhältnis der Steigerung der Frequenz zur Verringerung der Amplitude reduziert werden kann [39].

Allerdings nimmt bei konstanter Bondzeit und unterschiedlichen Resonanzfrequenzen die Anzahl der Lastzyklen bei Verwendung höherer Frequenzen zu, was ggf. den Vorteil geringerer Amplituden kompensiert.

Die Vergrößerung der Bondzeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Amplitude ist durch die Forderung $c_L \hat{u} \geq F_H$ begrenzt, da eine Relativbewegung der Verbindungspartner eine notwendige Voraussetzung zur Verbindungsbildung ist. Dabei entspricht F_H der Haftkraft.

Die Bestimmung der US-Amplitude und der Bondzeit sind die üblichen Aufgaben bei der Festlegung eines Bondprogramms. Diese Parameter tragen allerdings kein prinzipielles Verbesserungspotential in sich.

5.3.2 Vermeidung des Stick-Slip-Effektes

Ausgehend von der Betrachtung der vom Chip zurückgelegten Wegstrecke u pro Schwingungsperiode, der entsprechenden Geschwindigkeit \dot{u} und der wirkenden Beschleunigungen \ddot{u} ist die Belastung für den Chip in den Umkehrpunkten der Geschwindigkeit und den dazu gehörigen Übergängen zwischen den Haft- und Gleitphasen (Stick-Slip-Effektes) am größten. In diesen Phasen wird der Chip maximal beschleunigt (vgl. Abbildung 28). Wird ein Wechsel der Richtung der Geschwindigkeit des Chips verhindert, so kann die Belastung durch die Verringerung der Beschleunigung in diesen Punkten reduziert werden. Der einfachste Ansatz dies zu gewährleisten ist die Bewegung auf einer Kreisbahn. Würde sich der Chip auf einer Kreisbahn bewegen, wäre die Belastung des Chips immer konstant, da sowohl die Bahngeschwindigkeit als auch die auf den Chip wirkende Beschleunigung immer gleich groß wären. Der Stick-Slip-Effekt in den Umkehrpunkten und insoweit auch die damit verbundenen oben beschriebenen Nachteile könnten auf diese Art vermieden werden.

5.3.3 Bewegung auf Bahnen höherer Ordnungen

Da die Wegstrecke linear in die Berechnung der geleisteten Arbeit und somit der eingeleiteten Energie eingeht (vgl. Gleichung 6), führt eine Vergrößerung der pro Schwingungsperiode zurückgelegten Wegstrecke zu einem direkten Anstieg der geleisteten Arbeit. Weil eine lineare Verbindung die kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten beschreibt, führt jegliche Änderung der Bahn zu einer Vergrößerung der zwischen den beiden Punkten

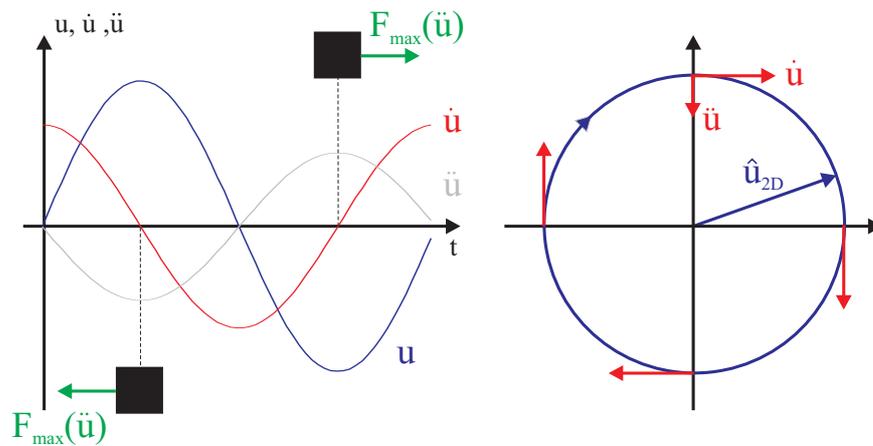


Abbildung 28: Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung bei einer linearen und einer kreisförmigen Bewegung

zurückgelegten Wegstrecke. Bahnen höherer Ordnung lassen sich dadurch erzeugen, dass das US-Werkzeug in zwei Richtungen (x, y) angeregt wird und die angeregten Schwingungen eine Phasenverschiebung ungleich Null oder unterschiedliche Frequenzen haben. Die so erzeugten Bahnen heißen Lissajous-Figuren. Einige Beispiele sind in Abbildung 29 dargestellt. Soll eine Kreisbahn erreicht werden, so müssen die angeregten Schwingungen die gleiche Amplitude und dieselbe Frequenz haben und die Phasenverschiebung muss 90° betragen.

5.3.4 Wahl des Ansatzes

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Möglichkeiten, die auf eine Bondverbindung wirkenden Belastungen zu reduzieren, wird an dieser Stelle ein Ansatz gewählt, der im Rahmen dieser Arbeit theoretisch dargestellt und anschließend experimentell validiert werden soll.

Zur Reduktion der mechanischen Belastung wird eine kreisförmige Bewegung für das US-Flipchip-Bonden gewählt. Diese Bewegung erfüllt die Bedingungen, dass zum einen die Bahngeschwindigkeit niemals null wird (kein Stick-Slip-Effekt) und zum anderen die pro Schwingungsperiode zurückgelegte Wegstrecke vergrößert wird. Durch diesen Ansatz soll die Qualität der beim US-Flipchip-Prozess erzeugten Bondverbindung verbessert und das Bonden von Chips mit einer hohen Anschlusszahl möglich werden.

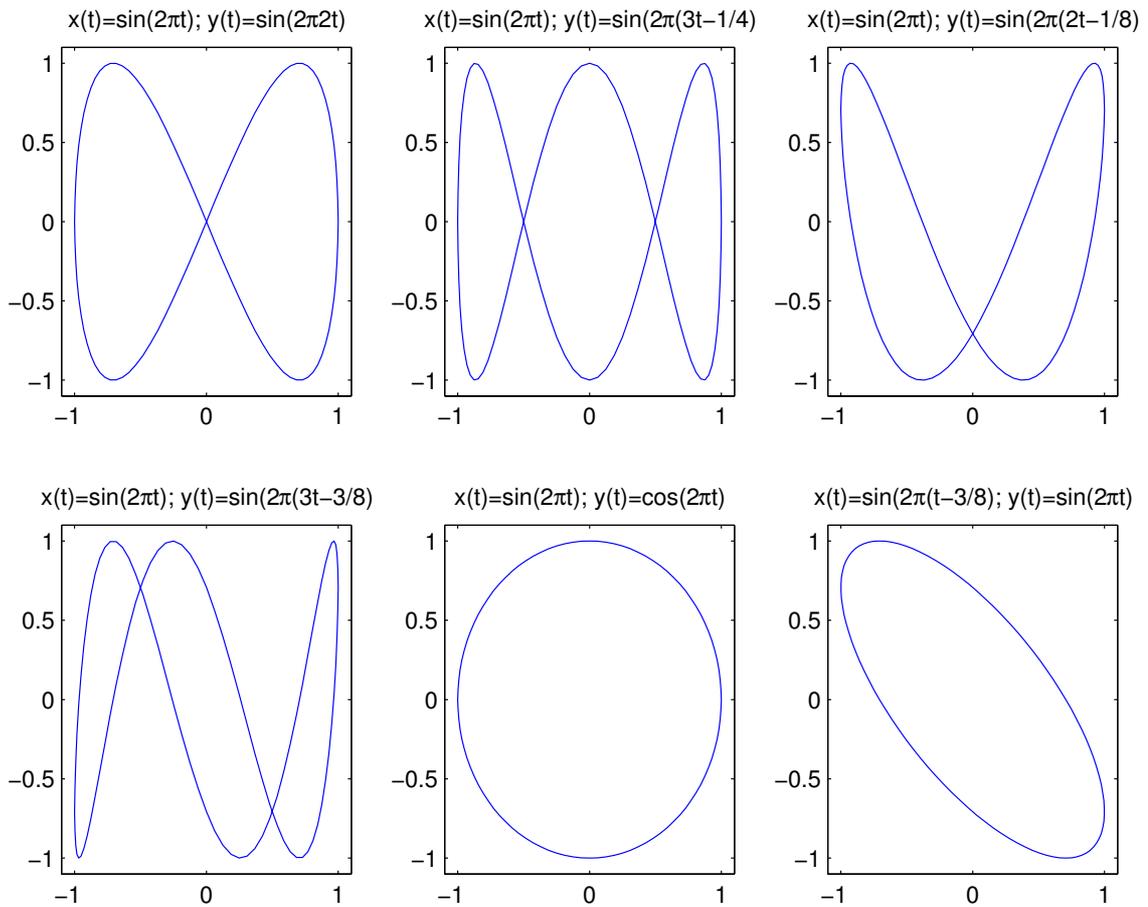


Abbildung 29: Verschiedene Lissajous-Figuren

5.4 Energiebilanz beim zweidimensionalen US-Bondprozess

Der wesentliche Unterschied in der Verwendung von eindimensionalem und zweidimensionalem Ultraschall liegt in den dabei auftretenden Lastzyklen. Beim eindimensionalem Ultraschall werden die Kontaktflächen periodisch beschleunigt und in den Umkehrpunkten jeweils auf die Geschwindigkeit Null abgebremst. Dagegen kann beim zweidimensionalen Ultraschall eine annähernd konstante Bahngeschwindigkeit der Anschlussflächen erreicht werden.

5.4.1 Aufstellen der Energiebilanz

Die Schweißarbeit berechnet sich für den zweidimensionalen Fall mit Hilfe der gleichen Grundgleichung:

$$W = \int_0^s F_R ds \quad (9)$$

Dabei wird die Energie für den zweidimensionalen Fall mit W_{P2D} bezeichnet, die Kraft entspricht analog zum eindimensionalen Fall der Reibkraft F_R beim Gleiten und s entspricht dem pro Periode zurückgelegten Weg. Dieser ist für den Kreis $s = 2\pi \cdot R$. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich der beim Bonden einstellende Radius des Kreises mit der Amplitude $R = \hat{u}_{2D}$ auch entsprechend dem Ansatz beim eindimensionalen Fall reduziert. Jedoch kann beim Bonden auf einer Kreisbahn die Reduzierung der Amplitude nicht wie beim eindimensionalen Bonden mit einem Wert von $\hat{u}_{c2D} = \frac{F_R}{c}$ bestimmt werden, da die Richtung der Auslenkung \hat{u}_{c2D} nicht in Bewegungsrichtung des US-Werkzeuges zeigt. Eine Beschreibung der Wirkung und ein Ansatz zur Berechnung der Kräfte in Bewegungsrichtung der einzelnen US-Werkzeuge wird in dem Abschnitt 5.5.1 über das später in der Simulation genutzte Lastmodell gegeben. An dieser Stelle wird der diskutierte Ansatz nur zur Erläuterung der Reduktion der Amplitude genutzt.

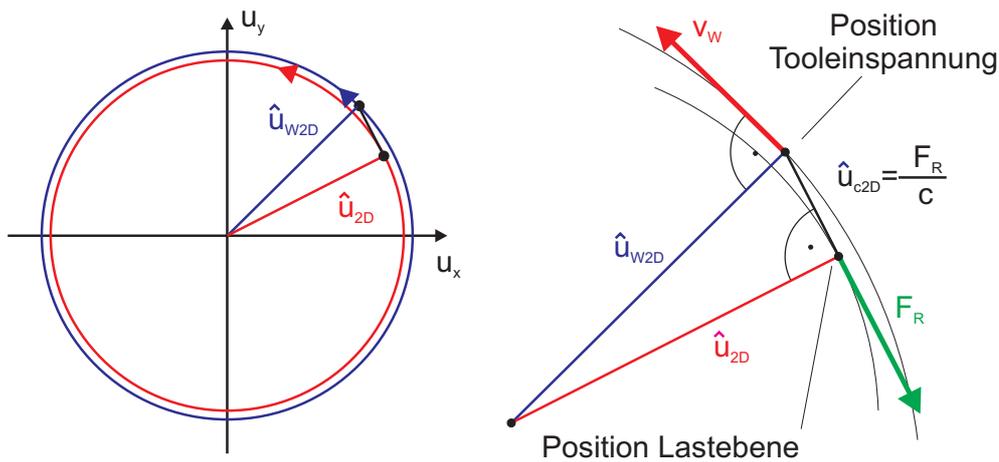


Abbildung 30: Reduktion der Amplitude der Toolspitze

Die Reduktion der Amplitude des US-Werkzeuges lässt sich geometrisch, wie in Abbildung 30 gezeigt, darstellen. Dabei entspricht F_R der Reibkraft und v_W der Geschwindigkeit des Bondtools. Aus dieser Betrachtung kann die Amplitude für die Kreisbahn zur Berechnung der geleisteten Arbeit hergeleitet werden:

$$\hat{u}_{2D} = \sqrt{\hat{u}_{W2D}^2 - \left(\frac{F_R}{c}\right)^2} \quad (10)$$

Entsprechend des eindimensionalen Ansatzes ist \hat{u}_{W2D} die Amplitude des unbelasteten Bondtools. Werden die gerade diskutierten Ansätze in die Gleichung 9 eingesetzt, ergibt sich die pro Schwingungsperiode beim Bonden mit einem zweidimensionalen US-Werkzeug dissipierte Energie.

$$W_{P2D} = F_R \cdot 2\pi \sqrt{\hat{u}_{W2D}^2 - \left(\frac{F_R}{c}\right)^2} \quad (11)$$

Mit Hilfe der Gleichungen 8 und 11 lassen sich zwei unterschiedliche Vergleiche durchführen. Zum einen können die eingeleiteten Energien für beide Anregungen gleich gesetzt werden und damit ein Verhältnis für die Amplituden berechnet werden. Analog können die beiden Amplituden für die eindimensionale und die zweidimensionale Anregung gleich gesetzt und ein Quotient aus den Energien der beiden Anregungen gebildet werden.

Berechnung des Amplitudenverhältnisses bei gleicher eingeleiteter Energie

Die erste Möglichkeit ist, die beiden Energien gleich zu setzen und die Amplitude für den zweidimensionalen Fall in Abhängigkeit der Amplitude beim eindimensionalen Fall zu berechnen.

$$W_{P2D} = W_{P1D} \quad (12)$$

Werden in Gleichung 12 die Ausdrücke für den eindimensionalen Fall (Gleichung 8) und den zweidimensionalen Fall (Gleichung 11) eingesetzt ergibt sich:

$$F_R \cdot 2\pi \sqrt{\hat{u}_{W2D}^2 - \left(\frac{F_R}{c}\right)^2} = 4 \cdot F_R \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c}\right) \quad (13)$$

$$\sqrt{\hat{u}_{W2D}^2 - \left(\frac{F_R}{c}\right)^2} = \frac{2}{\pi} \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c}\right) \quad (14)$$

Wird diese Gleichung quadriert und entsprechend umgeformt, lässt sich für die zweidimensionale Anregung die Amplitude des unbelasteten Werkzeuges in Abhängigkeit der Amplitude des unbelasteten Werkzeuges bei der eindimensionalen Anregung darstellen als:

$$\hat{u}_{W2D} = \sqrt{\frac{4}{\pi^2} \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c}\right)^2 + \left(\frac{F_R}{c}\right)^2} \quad (15)$$

Berechnung des Energieverhältnisses bei gleicher Amplitude

Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Quotient aus beiden Energien zu bilden und die beiden Amplituden \hat{u}_{W1D} und \hat{u}_{W2D} gleich zu setzen.

$$\frac{W_{P1D}}{W_{P2D}} = \frac{4 \cdot F_R \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)}{F_R \cdot 2\pi \sqrt{\hat{u}_{W2D}^2 - \left(\frac{F_R}{c} \right)^2}} \quad (16)$$

mit $\hat{u}_{W2D} = \hat{u}_{W1D}$

$$\frac{W_{P1D}}{W_{P2D}} = \frac{4 \cdot F_R \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)}{F_R \cdot 2\pi \sqrt{\hat{u}_{W1D}^2 - \left(\frac{F_R}{c} \right)^2}} \quad (17)$$

$$\frac{W_{P1D}}{W_{P2D}} = \frac{2 \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)}{\pi \sqrt{\hat{u}_{W1D}^2 - \left(\frac{F_R}{c} \right)^2}} \quad (18)$$

Wird das so dargestellte Verhältnis quadriert und der Nenner umgeformt, ergibt sich:

$$\frac{W_{P1D}^2}{W_{P2D}^2} = \frac{4 \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)^2}{\pi^2 \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right) \left(\hat{u}_{W1D} + \frac{F_R}{c} \right)} \quad (19)$$

$$\frac{W_{P1D}^2}{W_{P2D}^2} = \frac{4 \left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)}{\pi^2 \left(\hat{u}_{W1D} + \frac{F_R}{c} \right)} \quad (20)$$

$$\frac{W_{P1D}}{W_{P2D}} = \frac{2 \sqrt{\left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)}}{\pi \sqrt{\left(\hat{u}_{W1D} + \frac{F_R}{c} \right)}} \quad (21)$$

Aus Gleichung 21 lässt sich die Energie für die zweidimensionale Anregung in Abhängigkeit der Amplitude und der Energie bei eindimensionaler Anregung berechnen zu:

$$W_{P2D} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\left(\hat{u}_{W1D} + \frac{F_R}{c} \right)}{\left(\hat{u}_{W1D} - \frac{F_R}{c} \right)}} W_{P1D} \quad (22)$$

Damit eine qualitative Aussage über die in Gleichung 15 berechnete Amplitude oder die in Gleichung 22 berechnete Arbeit gemacht werden kann, muss der Wert $\frac{F_R}{c}$ näher betrachtet werden. Wird die in Abschnitt 7.1.2 genannte Spezifikation des für die Versuche genutzten Systems berücksichtigt, können für die Reibkraft und die Laststeifigkeit entsprechende Werte abgeleitet und eingesetzt werden. Die Reibkraft resultiert aus der später bei den experimentellen Untersuchungen genutzten Bondkraft $F_N = 2 \text{ N}$ und der Reibkoeffizient wurde mit $\mu_{RGold-Gold} = 1$ festgelegt.

$$F_R = F_N \mu_R = 2 \text{ N} \quad (23)$$

Die Laststeifigkeit c lässt sich als Reihenschaltung der Einzelsteifigkeiten der Last c_L und des Bondtools c_W bestimmen. Die Steifigkeit für die Last ergibt sich aus der Steifigkeit der Bumps. Dazu wird die Schubsteifigkeit eines Bumps mit einem mittleren Durchmesser von $D = 100 \mu\text{m}$ und einer mittleren Höhe von $H = 25 \mu\text{m}$ während des Bondens berechnet.

$$c_{Bump} = \frac{F}{s} \quad (24)$$

Dabei ist F die anliegende Schubkraft und s die durch die anliegende Kraft verursachte Verformung. Die Verformung kann durch den Ausdruck $s = \frac{FH}{A_{Bump}G}$ ersetzt werden und somit die Schubsteifigkeit mit einem Schubmodul von Gold $G_{Gold} = 28500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ berechnet werden.

$$c_{Bump} = \frac{AG}{H} = 8954 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad (25)$$

Das spätere Testprodukt besitzt 8 Bumps, somit beträgt die berechnete Steifigkeit aller Bumps:

$$c_L = 71632 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad (26)$$

Da es sich beim Bondtool um einen Zylinder mit einer Bohrung für das Vakuum handelt, kann die Steifigkeit durch Berechnung der Biegung eines Rohres berechnet werden. Zur Berechnung wird das E-Modul von Wolframcarbide $E_{WC} = 600000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ angenommen und das Flächenträgheitsmoment eines Rohres ($D_A = 3,170 \text{ mm}$ und $D_I = 0,8 \text{ mm}$) berechnet. Dann ergibt sich für die Steifigkeit des Bondtools bei einer Einspannlänge von $L = 9 \text{ mm}$ (gemäß Abbildung 44):

$$c_W = 48,74 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad (27)$$

Die gesamte Steifigkeit während des Gleitvorgangs lässt sich als Reihenschaltung berechnen.

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_L} + \frac{1}{c_W}} \quad (28)$$

Werden die Ergebnisse für die einzelnen errechneten Steifigkeiten aus den Gleichungen 26 und 27 eingesetzt, ergibt sich für die gesamte Steifigkeit:

$$c = 48,63 \frac{N}{\mu m} \quad (29)$$

Mit dieser Steifigkeit und dem oben aufgeführten Wert für die Reibkraft (Gleichung 23) errechnet sich der folgende Wert für den Quotient:

$$\frac{F_R}{c} = \frac{2 N}{48,63 \frac{N}{\mu m}} = 0,041 \mu m \quad (30)$$

Mit dem so gewonnenen Wert für den Quotienten aus Reibkraft und Laststeifigkeit und einer freien Schwingungsamplitude von ca. $\hat{u}_{W1D} = 1,5 \mu m$ bei eindimensionaler Anregung, können die Zahlenwerte in den Gleichungen 15 bzw. 22 eingesetzt werden. Die Amplitude für das unbelastete US-Werkzeug bei der die gleiche Energie umgesetzt wird wie im eindimensionalen Fall kann wie folgt berechnet werden:

$$\hat{u}_{W2D} = \sqrt{\frac{4}{\pi^2} (1,5 \mu m - 0,041 \mu m)^2 + (0,041 \mu m)^2} = 0,95 \mu m \quad (31)$$

Daraus ergibt sich ein Verhältnis von:

$$\frac{\hat{u}_{W2D}}{\hat{u}_{W1D}} = \frac{0,95}{1,5} \quad (32)$$

$$\hat{u}_{W2D} = 0,633 \cdot \hat{u}_{W1D} \quad (33)$$

Aus Gleichung 33 ergibt sich für die oben angenommenen Eingangsgrößen ein Faktor von $k_{A \text{ analytisch}} = 0,633$ zwischen den beiden Amplituden \hat{u}_{W2D} und \hat{u}_{W1D} . Dies bedeutet, dass beim zweidimensionalen Bonden 63,3 % der eindimensionalen Schwingungsamplitude ausreicht, um die gleiche Energie in das System einzuleiten.

Analog lässt sich für das Verhältnis der Energien unter den Vorgaben der Amplitude $\hat{u}_{W1D} = 1,5 \mu m$ und des Quotienten $\frac{F_R}{c} = 0,041 \mu m$ schreiben:

$$W_{P2D} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(1,5 \mu m + 0,041 \mu m)}{(1,5 \mu m - 0,041 \mu m)}} W_{P1D} \quad (34)$$

$$W_{P2D} = 1,57 \cdot W_{P1D} \quad (35)$$

Dies bedeutet, dass beim Bonden einer Verbindung mit einem 2D-US-Werkzeug bei gleicher Schwingungsamplitude $\hat{u}_{W1D} = \hat{u}_{W2D} = 1,5 \mu m$ und den vorausgesetzten Randbedingungen resultierend aus dem Produkt im Vergleich zum eindimensionalen Bonden die 1,57-fache Energie in die Verbindungszone eingeleitet wird (Faktor $k_{E \text{ analytisch}} = 1,57$).

5.4.2 Energiebilanz bei Abweichung von der kreisförmigen Bewegung

Bei den vorangegangenen Überlegungen wurde bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass die Spitze des Bondtools eine kreisförmige Bewegung ausübt. Trotz der im Ersatzmodell getroffenen Annahme, dass sich das Bondtool auf einer Kreisbahn bewegt und dem nachgewiesenen Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Ströme und der Geschwindigkeiten des Bondtools, soll an dieser Stelle abgeschätzt werden, welche Konsequenzen eine mögliche Abweichung von einer kreisförmigen Bewegung hin zu einer elliptischen Bewegung hat. Eine solche Abweichung der Bahn könnte sich zum Beispiel aufgrund von ungleichen Übertragungsverhalten der beiden Transducer oder einer nicht perfekten Ansteuerung ergeben. Daher ist zu diskutieren, inwieweit die Änderungen des Bahnverlaufes den Wert der berechneten Energie beeinflussen.

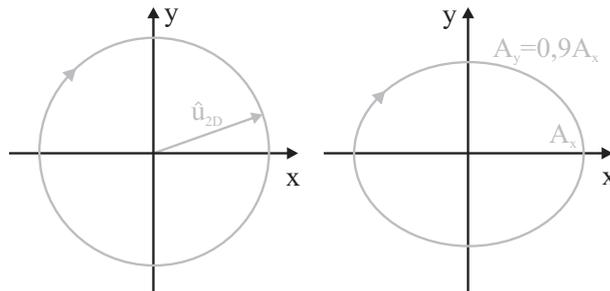


Abbildung 31: Kreisförmige und elliptische Bahn

Wird von einer Abweichung der kreisförmigen Bewegung hin zu einer elliptischen Bewegung ausgegangen, beispielsweise durch eine um 10 % geringere Amplitude eines der beiden Systeme, verändert sich die Wegstrecke und somit auch die dissipierte Energie. Die Berechnung der Wegstrecke s_{Ellipse} pro Schwingungsperiode, also die Bogenlänge einer Ellipse kann mit Hilfe eines unvollständigen elliptischen Integrals 2. Gattung berechnet werden [60].

$$s_{\text{Ellipse}} = 4 \cdot A_x \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \alpha)} d\alpha = 4 \cdot A_x E(k, \frac{\pi}{2}) \quad (36)$$

Dabei entspricht A_x der Amplitude in x-Richtung und somit der Hälfte der größeren Halbachse sowie $e = \sqrt{\frac{A_x^2 - A_y^2}{A_x^2}}$ der numerischen Exzentrizität der Ellipse. Entsprechend ist

A_y die Amplitude bzw. die Hälfte der reduzierten Halbachse der Ellipse. Zusätzlich gilt $k = e = \sin\phi$. In dem hier angesprochenen Fall einer Differenz von 10 % zwischen den Halbachsen ergibt sich für die numerische Exzentrizität:

$$e_{10\%} = \sqrt{\frac{A_x^2 - (0,9 \cdot A_x)^2}{A_x^2}} = 0,436 \quad (37)$$

Mit Hilfe des Wertes $e_{10\%}$ lässt sich aus [60] für das vollständige elliptische Integral 2. Gattung ein Wert für $E(k, \frac{\pi}{2}) = 1,492$ ermitteln. Mit diesem Wert $E(k, \frac{\pi}{2})$ ergibt sich eine Wegstrecke pro Periode von:

$$s_{Ellipse} = 4 \cdot A_x \cdot 1,492 = 5,968 \cdot A_x \quad (38)$$

Der Unterschied $K_{\Delta s}$ der beiden zurückgelegten Wegstrecken pro Periode bei einer rein kreisförmigen Bewegung und einer Bewegung auf einer elliptischen Bahn, bei der die beiden Halbachsen um 10 % voneinander abweichen, lässt sich somit wie folgt berechnen:

$$K_{\Delta s} = \frac{5,968 \cdot A_x}{2\pi \cdot A_x} = 0,95 \quad (39)$$

Dies bedeutet, dass sich die beiden Wegstrecken, Kreisbahn bzw. Ellipse, um ca. 5 % unterscheiden. Da der Weg linear in die Berechnung der Energiebilanz eingeht, wird eine Abweichung der beiden Amplituden von 10 % am zweidimensionalen US-Werkzeug eine Abweichung von 5 % in der Energiebilanz zur Folge haben.

Die später im Verlauf dieser Arbeit diskutierten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden zeigen, dass es zu keiner Zeit zu einer Abweichung der Amplitude von 10 % kommt. Somit ist ein durch eine Abweichung von der Kreisbahn entstehender Fehler bei der Energiebilanz immer kleiner als 5 %.

5.5 Ersatzmodell für den zweidimensionalen US-Bondprozess

In diesem Abschnitt wird ein diskretes Ersatzmodell mit zwei Freiheitsgraden vorgestellt, mit dessen Hilfe der Bondprozess beim zweidimensionalen US-Flipchip-Bonden abgebildet und dadurch die Berechnung der Energiebilanz beim zweidimensionalen Bonden bestätigt werden soll. Das hier vorgestellte Modell kann zur Zeitsimulation auch bei nichtlinearen Randbedingungen, wie Coulomb'scher Reibung, durch die der Reib-Schweiß-Prozess abgebildet wird, genutzt werden. Als Grundlage für dieses Modell dient das in Abschnitt 5.2.1 vorgestellte Ersatzmodell für das eindimensionale Bonden.

Damit das eindimensionale Modell genutzt werden kann, muss neben der Erweiterung auf eine zweite Bewegungsrichtung und der damit verbundenen Ansteuerung auch das Lastmodell des Bondprozesses angepasst werden. Das Verhalten des zweidimensionalen US-Werkzeuges wird für beide Bewegungsrichtungen gleich und unabhängig voneinander angenommen. Es wird bei diesem Modell vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die zweidimensionale Anregung durch zwei einzelne, sich nicht beeinflussende US-Werkzeuge erzeugen lässt. Die Erweiterung auf eine zweite Bewegungsrichtung kann deshalb einfach durch Duplizieren des Blockschaltbildes für das eindimensionale US-Werkzeug erfolgen.

5.5.1 Lastmodell des Bondprozesses

Als Grundlage des hier vorgestellten Lastmodells dient der in Abschnitt 5.4.1 diskutierte Ansatz der Reduktion der Amplitude bei zweidimensionaler Anregung. Abbildung 32 zeigt drei unterschiedliche Positionen eines zweidimensionalen US-Werkzeuges. Es ist ersichtlich, dass die Reibkraft F_R in der Kontaktebene zu keiner Zeit in Richtung der tangential an der Anregung (Transducerspitze) anliegenden Geschwindigkeit wirkt. Die Abweichung der Richtung der Reibkraft um den Winkel α resultiert aus der Steifigkeit des Bondtools c_W und der Last c_L . Es können nur Kräfte in Richtung der Reibkraft übertragen werden. Dies führt zu einer Verringerung der Amplitude und zu einem Winkel zwischen Reibkraft und Geschwindigkeit. Zur Berechnung der wirkenden Kräfte wurde nur der eingeschwungene Zustand betrachtet. Neben der Steifigkeit ist der Winkel α auch von der Amplitude \hat{u}_{W2D} abhängig. Der Winkel α erreicht seinen maximalen Wert, sobald die durch die Auslenkung erreichte Kraft gleich der Haftkraft ist. Der Zusammenhang zwischen dem Winkel α , der Reibkraft ($F_H = F_R$), und der Steifigkeit c ist in Gleichung 40 dargestellt.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{F_R}{\hat{u}_{W2D} \cdot c}\right) \quad (40)$$

Die Auslenkung und die Geschwindigkeit der Bondtoolspitze kann im unbelasteten Fall wie folgt dargestellt werden:

$$x_{wx} = \hat{u}_{W2D} \cdot \cos(\omega t) \quad (41)$$

$$x_{wy} = \hat{u}_{W2D} \cdot \sin(\omega t) \quad (42)$$

$$v_{wx} = \omega \cdot \hat{u}_{W2D} \cdot (-\sin(\omega t)) \quad (43)$$

$$v_{wy} = \omega \cdot \hat{u}_{W2D} \cdot \cos(\omega t) \quad (44)$$

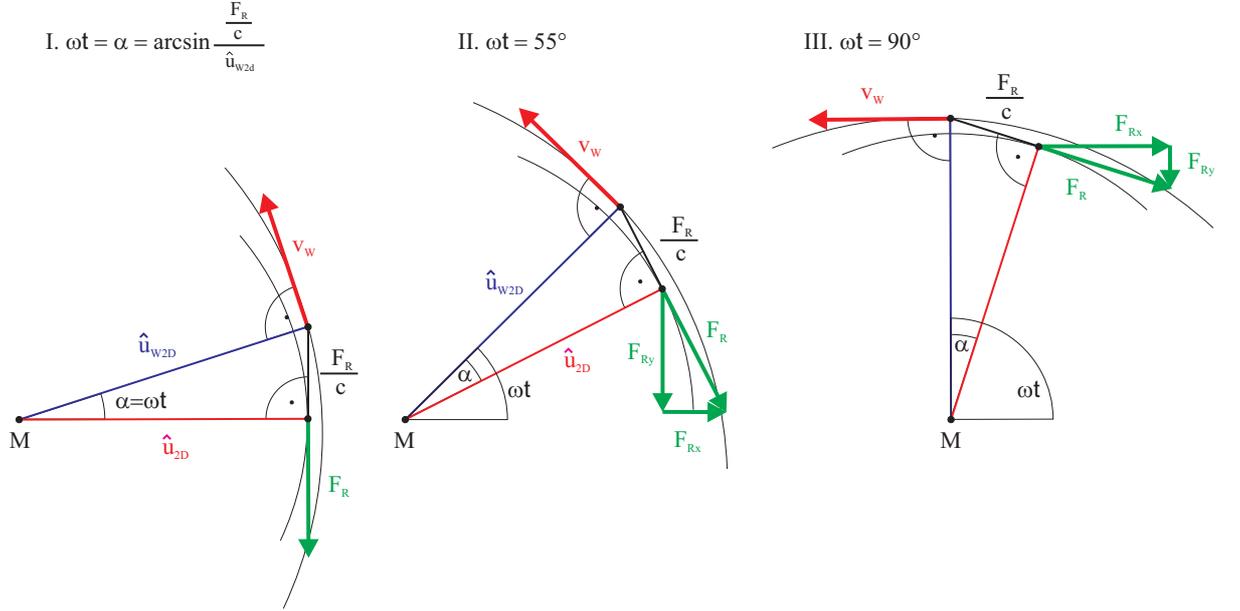


Abbildung 32: Modell zur Berechnung der Last pro Anregung für den stationären Bewegungszustand mit reinem Gleiten

Die tatsächliche Bewegung des Kontaktpunktes am Fuß des Bumps unter Last ist demgegenüber durch:

$$x_{wx} = \hat{u}_{2D} \cdot \cos\left(\omega t - \arcsin\left(\frac{F_R}{c}\right)\right) \quad (45)$$

$$x_{wy} = \hat{u}_{2D} \cdot \sin\left(\omega t - \arcsin\left(\frac{F_R}{c}\right)\right) \quad (46)$$

$$v_{wx} = \omega \cdot \hat{u}_{2D} \cdot \left(-\sin\left(\omega t - \arcsin\left(\frac{F_R}{c}\right)\right)\right) \quad (47)$$

$$v_{wy} = \omega \cdot \hat{u}_{2D} \cdot \cos\left(\omega t - \arcsin\left(\frac{F_R}{c}\right)\right) \quad (48)$$

gegeben, wobei \hat{u}_{2D} gemäß Gleichung 10 von Seite 66 berechnet wird.

Die so berechneten Anteile der Reibkraft können in dem Ersatzmodell den einzelnen US-Werkzeugen in x- und y-Richtung zurückgeführt werden. Dabei wird in dem Lastmodell auch der Übergang von Haft- zur Gleitreibung abgebildet, jedoch wird nicht der transiente Übergang zwischen den beiden Phasen abgebildet. D. h. für die Haftphase zu Beginn

der Simulation gelten die gleichen Bedingungen wie bei der eindimensionalen Anregung ($F_R = \hat{u}_{w1DC_L} = \hat{u}_{w2DC_L} \leq F_N\mu$). Ab dem ersten Gleiten in der Simulation des zweidimensionalen Falls wird der oben beschriebene Ansatz für F_{Rx} und F_{Ry} genutzt. Bis das System für die zweidimensionale Anregung nach diesem ersten Übergang von der Haft- in die Gleitphase einen eingeschwungenen Zustand erreicht, kann es zu weiteren Übergängen zwischen Haft- und Gleitphasen kommen. Befindet sich das System erst in einem eingeschwungenen Zustand, kommt es zu keiner weiteren Haftphase, bis die Anregung abgeschaltet wird.

5.5.2 Das zweidimensionale Ersatzmodell

Die Realisierung des Ersatzmodells des zweidimensionalen US-Werkzeuges inklusive der modellierten Last ist in Abbildung 33 als Blockschaltbild dargestellt. Das Blockschaltbild lässt sich in fünf Abschnitte unterteilen.

Der obere Teil, das Blockschaltbild der eindimensionalen Anregung, dient zur Erzeugung der Anregespannung für das Modell des ersten US-Werkzeuges, welches einen eigenen Teil darstellt. Als Eingangsdaten für die eindimensionale Anregung dient die Arbeitsfrequenz f_A , der gewünschte Phasenwinkel ϕ_A zwischen dem Strom- und dem Spannungssignal und der Betrag der Amplitude $\hat{U}_1(t)$ für die Anregespannung. Mit Hilfe des PLL-Regelkreises (vgl. Abschnitt 3.1.1) wird die Frequenz der Anregung so geregelt, dass die Phase zwischen dem Strom- und Spannungssignal den Phasenwinkel ϕ_A annimmt. Wird das US-Werkzeug in Resonanz betrieben, dann ist der Phasenwinkel $\phi_A = 0$. Dazu werden die Signale der Anregespannung und des Stromes mit Hilfe eines Komparator-Elementes in die beiden Rechtecksignale $U_{K1}(t)$ und $I_{K1}(t)$ umgewandelt. In dem folgenden Phasendetektor wird ein pulsweitenmoduliertes Rechtecksignal erzeugt, das über ein PI-Regelglied einem VCO (Voltage-Controlled Oscillator) zugeführt wird. Die relative Pulsweite entspricht dem Phasenwinkel zwischen Strom und Anregespannung bezogen auf 2π . Der zur Regelung eingesetzte PI-Regler liefert eine ausreichend schnelle und gedämpfte Sprungantwort. Stellgröße des VCO ist die relative Frequenzänderung bezogen auf die Eingangsgröße, die Arbeitsfrequenz f_A . Mittels eines Verstärkers wird das aus dem VCO kommende auf 1V normierte Signal auf die gewünschte Amplitude von $\hat{U}_1(t)$ verstärkt und dient als Eingang in den Block des ersten US-Werkzeuges (System 1).

Zur Ansteuerung des zweiten US-Werkzeuges, das rechtwinkelig zum ersten US-Werkzeug angeordnet ist und mit einer um 90° verschobenen sowie an die Amplitude des ersten Systems angepassten Anregespannung betrieben wird, dient der zweite Block. In einem Amplitudenkomparator werden die in beide Systeme fließenden Ströme $I_{K1}(t)$ und $I_{K2}(t)$

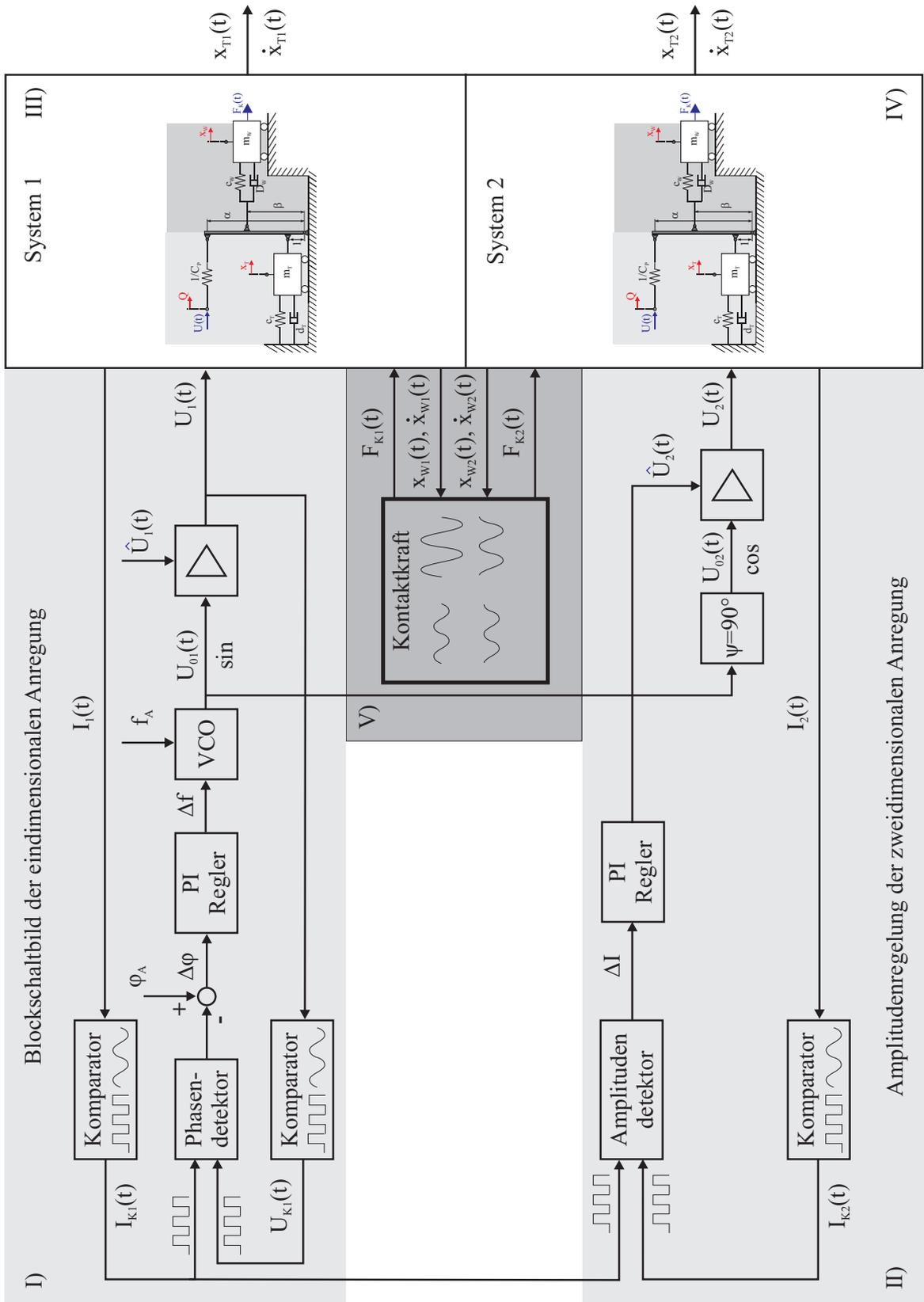


Abbildung 33: Blockschaltbild des Gesamtsystem

verglichen und über einen PI-Regler einem Verstärker als Multiplikator übergeben. Als Eingangssignal des Verstärkers dient das um 90° phasenverschobene Ausgangssignal des VCO des Blockschaltbildes für die eindimensionale Anregung. Das Ausgangssignal des Verstärkers dient als Anregespannung $U_2(t)$ für das zweite Ultraschallsystem (System 2).

Die Blöcke drei und vier sind die jeweils voneinander unabhängig auf das Bondwerkzeug rechtwinkelig angeordneten US-Werkzeuge. Jedem dieser Blöcke dient je eine Anregespannung $U_1(t)$ bzw. $U_2(t)$ als Eingangssignal. Neben der Anregespannung wird jedem System auch eine Kontaktkraft $F_{K1}(t)$ und $F_{K2}(t)$ über das Lastmodell zugeführt. Als Ausgangssignale liefern die Blockschaltbilder der einzelnen US-Werkzeuge die für die Regelung benötigten Stromsignale $I_1(t)$ und $I_2(t)$, die Wege $x_{T1}(t)$ und $x_{T2}(t)$ sowie die Geschwindigkeiten $\dot{x}_{T1}(t)$ und $\dot{x}_{T2}(t)$ des US-Werkzeuges und der Bondtoolspitze $x_{W1}(t)$, $x_{W2}(t)$, $\dot{x}_{W1}(t)$, $\dot{x}_{W2}(t)$. Dabei dienen die Werte für die Toolbewegung als Eingangsgrößen für das Lastmodell.

Der fünfte Block beinhaltet das Blockschaltbild des in Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Lastmodells. Als Eingangsgrößen dienen diesem Block die Wege ($x_{W1}(t)$ und $x_{W2}(t)$) und Geschwindigkeiten ($\dot{x}_{W1}(t)$ und $\dot{x}_{W2}(t)$) der Spitze des Bondtools. Aus diesen Größen werden durch das Modell die entsprechenden anliegenden Kontaktkräfte ($F_{K1}(t)$ und $F_{K2}(t)$) ermittelt und zu den Modellen der US-Werkzeuge zurückgeführt.

5.6 Ergebnisse der Betrachtungen mit Hilfe der Ersatzmodelle

In diesem Abschnitt wird das dynamische Verhalten des ein- und des zweidimensionalen Ersatzmodells erläutert und verglichen. Da beim zweidimensionalen Modell von zwei einzelnen US-Werkzeugen ausgegangen wird, werden für jedes dieser unabhängig voneinander wirkenden US-Werkzeuge die Parameter für das Modell der eindimensionalen Anregung genutzt. Damit ist gewährleistet, dass die aufgezeigten Unterschiede in den Ergebnissen beider Modelle nicht auf unterschiedliche Parameter der beiden US-Werkzeuge zurückzuführen sind.

Als Modellparameter für die Ersatzmodelle wurden die Parameter für das US-Werkzeug gemäß der Vorgehensweise in [35] durch Messungen ermittelt. Dazu werden definierte Punkte der am freischwingenden US-Werkzeug gemessenen Frequenzgänge sowohl der elektrischen Eingangsadmittanz als auch der mechanischen Kernadmittanz ausgewertet.

Berechnete Modellparameter			
Bezeichnung	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
Ersatzmasse Transducer	m_T	15,4534	g
Ersatzsteifigkeit des Transducers	c_T	2343,120	$N/\mu m$
Ersatzdämpfung des Transducers	d_T	7,3079	Ns/m
Elektrische Kapazität	C_p	1,9692	nF
Übersetzungsverhältnis	α	0,4771	As/m
Ersatzmasse Wedge	m_W	0,9072	g
Ersatzsteifigkeit des Wedges	c_W	18,1534	$N/\mu m$
Ersatzdämpfung des Transducers	d_W	0,9718	Ns/m
Übersetzungsverhältnis	β	0,3921	-

Tabelle 12: Identifizierte Modellparameter eines US-Werkzeuges

5.6.1 Vergleich der Simulationsergebnisse

Mit den entwickelten Ersatzmodellen werden der Bondvorgang für die eindimensionale und für die zweidimensionale Anregung des Bondwerkzeuges durch Vorgabe der Eingangsgrößen Spannung $U(t)$, der Bondkräfte $F_N(t)$, der Bondzeit T und des Reibkoeffizienten $\mu(t)$ simuliert und verglichen. Die Simulationsergebnisse bzw. der Vergleich der beiden Anregungen wird mit den Arbeitshypothesen und der analytischen Betrachtung der Lastmodelle aus Abschnitt 5.3 diskutiert und bewertet.

Als Eingangsgrößen zur Simulation eines Bondvorganges beim US-Flipchip-Bonden wurden bei beiden Anregungsformen die in Abbildung 34 dargestellten Verläufe der vorgegebenen Amplitude der Anregespannung $U(t)$ und ein linearer Anstieg des Betrages der Reibkraft $F_R(t) = \mu(t) F_N$ vorgegeben. Die Amplitude der Anregespannung wird über einen Zeitraum von 5 ms von 0 V auf 10 V erhöht und dann für 25 ms konstant auf 10 V gehalten. Nach einer Bondzeit von insgesamt 30 ms wird die Anregespannung abgeschaltet. Die Reibkraft ergibt sich aus dem Produkt der Bondkraft und des Reibwertes. Die Bondkraft wird konstant auf $F_N = 2 N$ gehalten und der Reibwert $\mu(t)$ über die Phase der Anregung von 0,7 auf 1,4 linear erhöht. Durch das lineare Ansteigen des Reibwertes wird die Veränderung der Last über die Bondzeit abgebildet [55]. Dabei liegt der mittlere Reibwert genau in dem Bereich des Reibwertes einer Gold-Gold Verbindung.

Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der Simulation einer Bondverbindung. Dabei ist in dem oberen Graphen das Ergebnis der eindimensionalen Anregung abgebildet. Der Graph in der Mitte und der untere Graph zeigen jeweils die Ergebnisse der zweidimensionalen

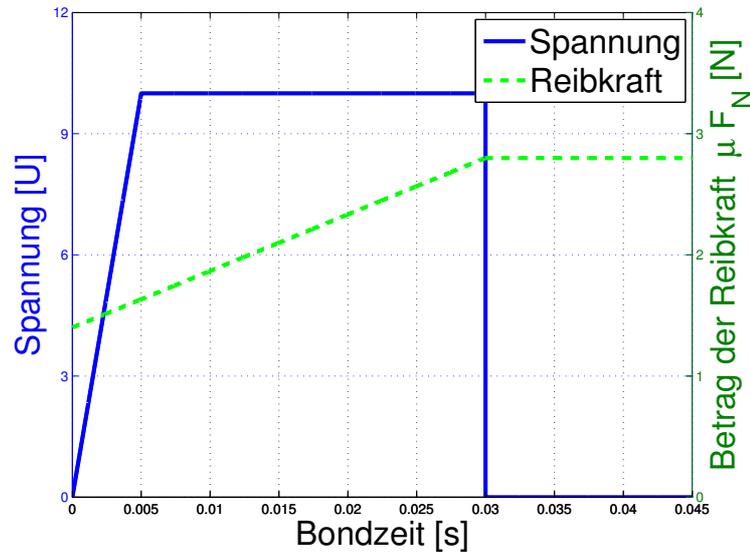


Abbildung 34: Eingangsgroessen der Bondsimulation

Anregung. Diese sind identisch zueinander, da bei der Simulation zwei gleiche Modelle für die Einzelsysteme genutzt wurden. Bei der Darstellung aller Graphen in Abbildung 35 wird die mit der Laststeifigkeit multiplizierte Auslenkung der Wedgespitze und die Reibkraft abgebildet, damit in der Darstellung die Werte für die Reibung und die Amplitude der Wedge-Auslenkung auf gleiche Werte skaliert werden und so beispielsweise der Übergang der Haftung zur Gleitreibung gut abgelesen werden kann.

Die Amplitude der Haftkraft steigt solange proportional zur Auslenkung an, bis die Haftreibung überwunden ist. Zu diesem Zeitpunkt wird der Betrag der erzeugten Kraft aus Laststeifigkeit und Auslenkung größer als die Haftkraft und das System beginnt zu gleiten. Da $\mu(t)$ monoton wächst, verläuft die Reibkraft nach dem Einsetzen des Gleitens nicht waagrecht, sondern nimmt stetig zu.

In der Haftphase verhalten sich beide Modelle identisch. Der transiente Übergang von der Haftung zum eingeschwungenen Zustand bei der zweidimensionalen Anregung ist in dem Ersatzmodell nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.5.1), hierdurch sind die wechselnden Haft-Gleit-Übergänge innerhalb eines kleinen Zeitintervalls nach dem ersten Haft-Gleit-Übergang zu erklären.

Nach dem Abschalten der Anregung ist das Verhalten entsprechend umgekehrt verglichen mit dem Anstieg der Amplitude der Auslenkung. Sobald der Betrag der Haftreibung größer ist als die sich aus der Laststeifigkeit und der Auslenkung ergebenden Kraft, sinkt die Reibkraft entsprechend der Abnahme der Auslenkung.

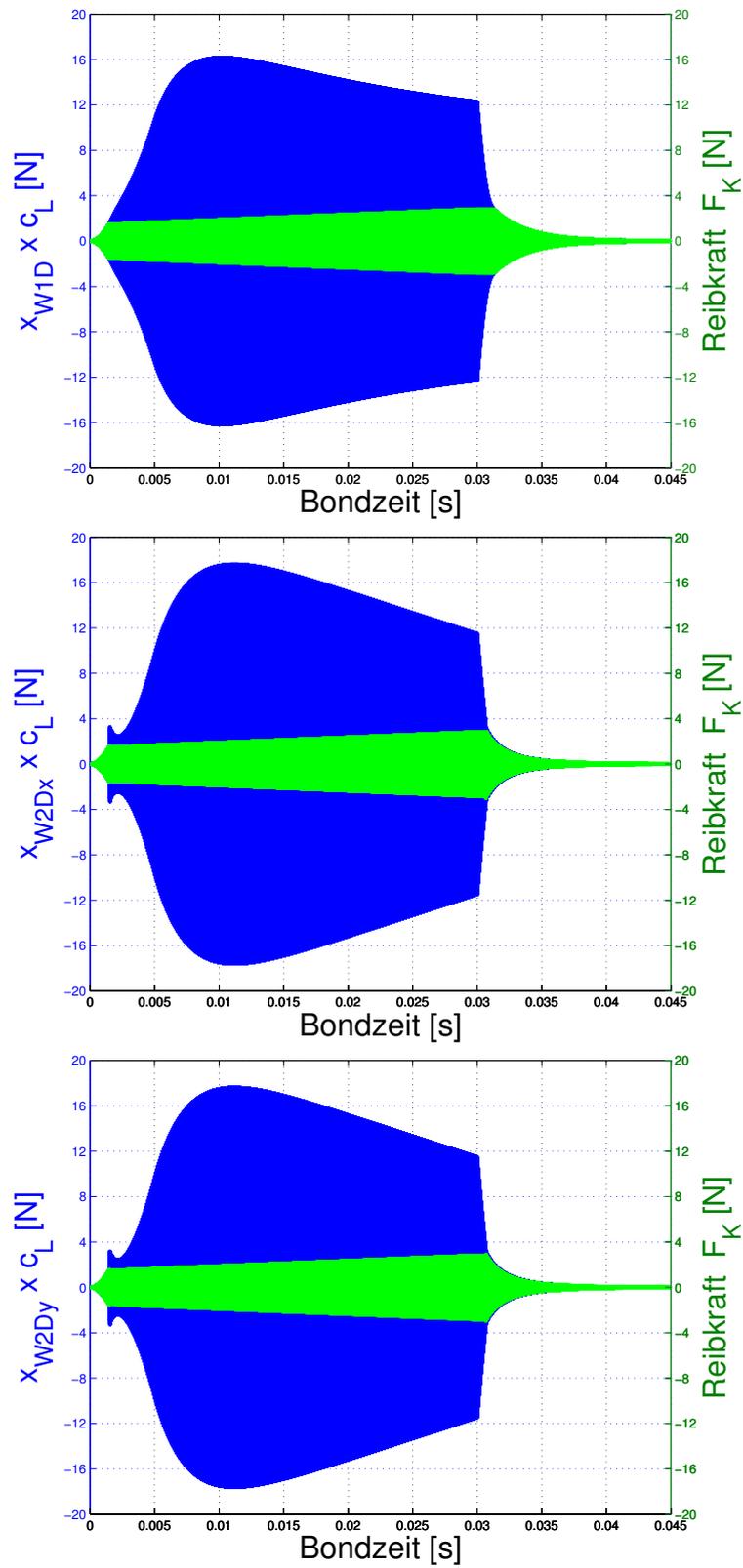


Abbildung 35: Hüllkurven der Auslenkung der Wedgespitze x_{ws} (skaliert mit der Kontaktsteifigkeit c_L) und der Reibkraft F_R

Bei dieser Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass es bei der eindimensionalen Anregung in jeder Schwingungsperiode zu zwei Übergängen von Haftung zur Gleitung kommt (Stick-Slip-Effekt). Bei der zweidimensionalen Anregung dagegen, gibt es im eingeschwungenen Zustand nach dem ersten Wechsel in die Gleitphase erst wieder eine Haftphase nach dem die Anregung abgeschaltet wurde und die Schwingung des Systems abklingt bzw. die Amplitude $U(t)$ kleiner wird als der Quotient aus Reibkraft F_R und der Federkonstante c .

5.6.2 Vergleich der Energiebilanzen aus der Simulation

Abbildung 36 zeigt die über die Bondzeit geleistete Arbeit und somit die der Verbindung zugeführte Energie. Werden die Werte für die Energien der ein- und zweidimensionalen Anregung zum Ende der Simulation verglichen, so ergibt sich ein Faktor von $k_{E\text{ Simulation}}$ zwischen den geleisteten Arbeiten der beiden unterschiedlichen Anregungen.

$$k_{E\text{ Simulation}} = \frac{W_{2D}}{W_{1D}} = 1,68 \quad (49)$$

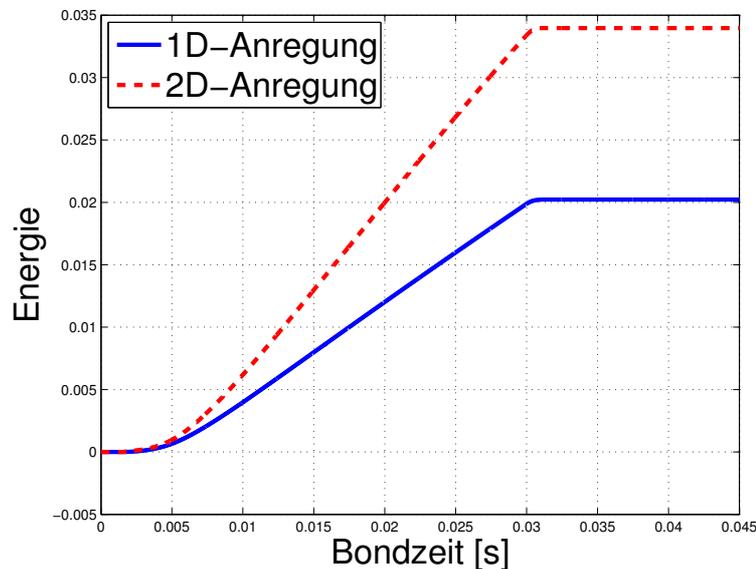


Abbildung 36: Über die Dauer eines Bonds geleistete Arbeit

Der mit Hilfe der Simulation erreichte Wert von $k_{E\text{ Simulation}} = 1,68$ liegt oberhalb des analytischen in Abschnitt 5.4.1 berechneten Wertes von $k_{E\text{ analytisch}} = 1,57$. Da bei der analytischen Berechnung lediglich das Lastmodell und nicht das Gesamtmodell betrachtet wurde, konnte eine exakte Übereinstimmung des Simulationsergebnisses mit der Berechnung

nicht erwartet werden. Auch wurde bei der analytischen Betrachtung des Lastmodells ein konstanter Reibwert unterstellt, so dass der Wert $\frac{F_R}{c}$ ebenfalls eine Konstante war. Dies ist in der Simulation nicht der Fall, so dass das analytische Modell allenfalls einen speziellen Zeitpunkt, bei dem nämlich die Reibkraft in der Simulation dem angenommenen Wert der Berechnung entspricht, korrekt abbilden kann. Gleichwohl ermöglichen die Modellbildung und die Simulation Einblicke in das Verhalten beider Anregungsformen. Die Simulation kann deshalb neben der analytischen Betrachtung auch zur Validierung der in Abschnitt 5.3 aufgestellte These des höheren Energieeintrags bei zweidimensionaler Anregung genutzt werden.

5.6.3 Verringerung der Belastung durch Reduzierung der Amplitude

Wie mit Hilfe der Simulation gezeigt, lässt sich bei zweidimensionaler Anregung eine um den Faktor $k_{E\ Simulation} = 1,68$ höhere Energie in die Verbindungszone einleiten. Würde die Eingangsgröße Spannung für die zweidimensionale Anregung entsprechend reduziert, dass am Ende eines Bonds die gleiche Energie bei beiden Anregungsformen eingeleitet wird, so kann das Verhältnis der Amplituden bei gleicher dissipierter Energie in der Verbindungszone aus Abschnitt 5.4.1 bestätigt werden. Als erster Anhaltspunkt für die Reduktion der Anregung dient der mit Hilfe der Gleichung 31 berechnete Wert von $k_{A\ analytisch} = 0,633$, da die dort angenommene Amplitude $\hat{u}_{W1D} = 1,5\ \mu m$ ungefähr der bei der Simulation im vorherigen Abschnitt erreichten Amplitude entspricht. Eine Simulation mit einer um diesen Wert verringerten Anregespannung für das zweidimensionale System führt jedoch zu einer geringeren Energieeinleitung. Erst bei einem $k_{A\ Simulation} = 0,81$ liegen die Werte für die geleistete Arbeit am Ende einer Bondverbindung auf dem gleichen Niveau. Sowohl der Verlauf der Eingangsgrößen Spannung als auch der Verlauf des Energieeintrags ist in Abbildung 37 dargestellt.

Das Verhältnis der Amplituden bei ein- bzw. zweidimensionaler Anregung kann bei der Simulation eines Bondvorgangs nicht eindeutig bestimmt werden, da die Amplituden der Wedgespitzen aufgrund der gewählten Eingangsgrößen nicht konstant sind. Abbildung 38 zeigt den zeitlichen Verlauf des Quotienten aus den beiden Amplituden \hat{u}_{W1D} und \hat{u}_{W2D} . Dabei ist zu erkennen, dass sich, nach dem die Anregespannung konstant gehalten wird, ein Wert zwischen $k_{A\ Simulation} = 0,46$ bis $k_{A\ Simulation} = 0,72$ ergibt. Dies entspricht annähernd dem in Gleichung 33 ermittelten Wert von $k_{A\ analytisch} = 0,633$.

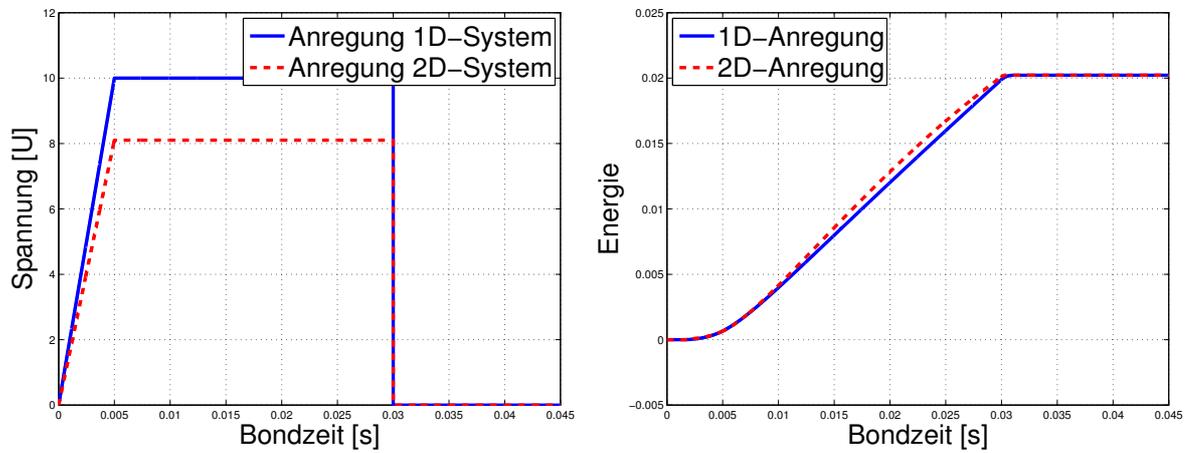


Abbildung 37: Reduzierte Spannung bei zweidimensionaler Anregung, bei gleichem Energieeintrag

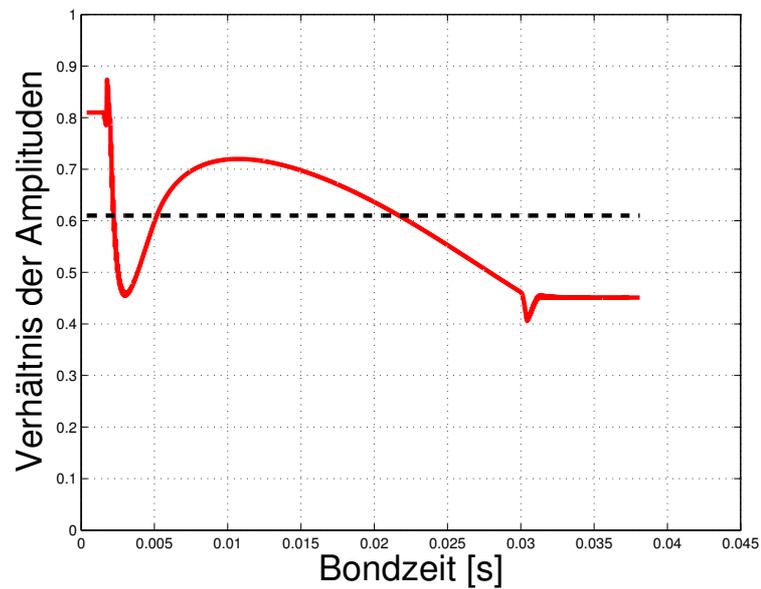


Abbildung 38: Vergleich der Amplituden bei einem konstanten Energieeintrag am Ende eines Bonds

6 Das zweidimensionale US-Werkzeug

In dem vorangegangenen Kapitel wurde ein Ersatzmodell für einen zweidimensionalen US-Bondprozess entwickelt und mit einem Modell für die eindimensionale Anregung verglichen. Dabei wurde die in Abschnitt 5.4 aufgestellte Hypothese zur Energiebilanz beim zweidimensionalen US-Flipchip-Bondens mit Hilfe eines Ersatzmodells und einer Simulation bestätigt. Zur Validierung der Ergebnisse aus der analytischen bzw. modellhaften Betrachtungen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein in zwei Richtungen wirkendes US-Werkzeug vorgestellt.

Der Aufbau eines geeigneten US-Werkzeuges wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert. Zusätzlich wird auf das Ansteuerungskonzept eines solchen US-Werkzeuges eingegangen, da für die nachfolgenden Versuche eine entsprechende Ansteuerung Voraussetzung für den Vergleich des eindimensionalen und des zweidimensionalen US-Flipchip-Bondens ist.

6.1 Aufbau des zweidimensionalen US-Werkzeuges

In Abschnitt 3.2 wurden verschiedene US-Werkzeuge vorgestellt, die sich heute sowohl beim Drahtbonden als auch beim US-Flipchip-Bonden im Einsatz befinden. Neben eindimensionalen US-Werkzeugen wurde auch ein zweidimensionales US-Werkzeug für das US-Dünndrahtbonden vorgestellt. In Tabelle 7 ist das von Tsujino [39], [40] entwickelte und beim US-Dünndrahtbonden genutzte US-Werkzeug dargestellt. Die von *Tsujino* genutzte Bauform lässt sich auch für das US-Flipchip-Bonden in Bezug auf Leistung und anliegende Kräfte optimieren. Ein solches US-Werkzeug für das zweidimensionale US-Flipchip-Bonden wird in Abbildung 39 gezeigt.

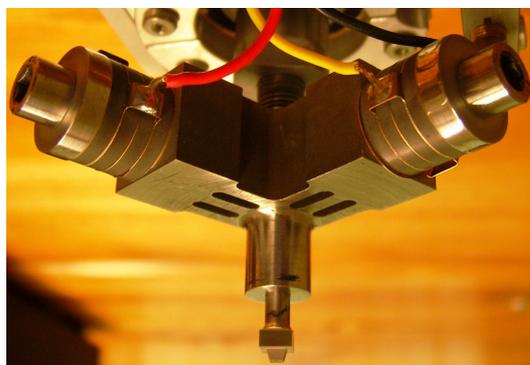


Abbildung 39: Zweidimensionales US-Werkzeug

In der vorliegenden Arbeit wird ein zweidimensionales US-Werkzeug vorgestellt und für die späteren Bondversuche verwendet, das bei der Firma Hesse & Knipps GmbH auf der Basis von Standardwerkzeugen entwickelt wurde. Aufbauend auf dem in [55] vorgestellten Modell für das eindimensionale US-Werkzeug wurde in dem vorherigen Abschnitt ein erweitertes, für das zweidimensionale US-Flipchip-Bonden mit diesem US-Werkzeug geeignetes Modell erzeugt.

Zum besseren Verständnis der experimentellen Untersuchungen und des erzeugten Modells werden der Aufbau und die Eigenschaften des zweidimensionalen US-Werkzeuges im folgenden kurz beschrieben.

Ein naheliegender Ansatz ein zweidimensionales US-Werkzeug zu entwickeln und dabei die Bauform eines Horntransducers nicht zu verändern, besteht darin, zwei rechtwinklig angeordnete Horntransducer auf dasselbe Bondtool wirken zu lassen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine starre Kopplung zwischen den beiden US-Werkzeugen zu einer starken Beeinflussung des Schwingungsverhaltens jedes einzelnen US-Werkzeuges führt. Eine zu weiche Kopplung darf auch nicht gewählt werden, denn die Kopplung muss geeignet sein, die jeweiligen Schwingungen und auch die für den Bondprozess notwendige Leistung in das Bondtool zu übertragen. Auch die Art der mechanischen Anbindung an die Umgebungskonstruktion des entwickelten US-Werkzeuges musste bei dem Entwurf berücksichtigt werden. Abbildung 40 zeigt einen durch die angesprochenen Überlegungen entstandenen Entwurf.

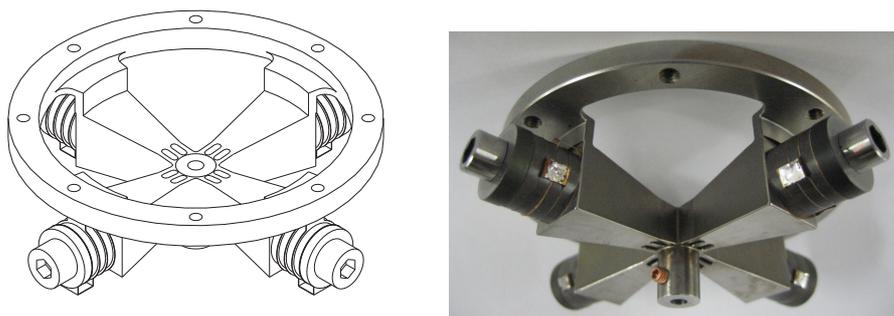


Abbildung 40: Neu entwickeltes zweidimensionales US-Werkzeug

Diesem Entwurf ist zu entnehmen, dass nicht nur zwei Horntransducer in einer Anordnung von 90° auf ein Bondtool wirken, sondern es wirken vier einzelne US-Werkzeuge kombiniert auf ein Bondtool. Die Polarisationsrichtung der in gegenüberliegenden US-Werkzeugen eingebauten Piezo-Scheiben ist in Bezug zum Bondtool um 180° gedreht. Auf diese Weise können die gegenüberliegenden US-Werkzeuge mit derselben Spannung angesteuert

werden, d. h. es werden für die vier US-Werkzeuge lediglich zwei Spannungen mit einer Phasenverschiebung von 90° benötigt (\sin , \cos). Eine genaue Beschreibung bzw. eine schematische Darstellung der Ansteuerung und der Art und Weise der angelegten Spannung ist der Abbildung 41 zu entnehmen.

Im mittleren Bereich des US-Werkzeuges, in dem das Bondtool montiert wird, sind je US-Werkzeug drei Festkörpergelenke zu erkennen. Diese Festkörpergelenke dienen als Entkopplungszonen der zueinander senkrecht eingepprägten Bewegung. Mit Hilfe dieser Festkörpergelenke werden einerseits die Bewegungen und Kräfte in Richtung des jeweiligen US-Werkzeuges übertragen und andererseits die Bewegung der anderen US-Werkzeuge so minimal wie möglich beeinflusst.

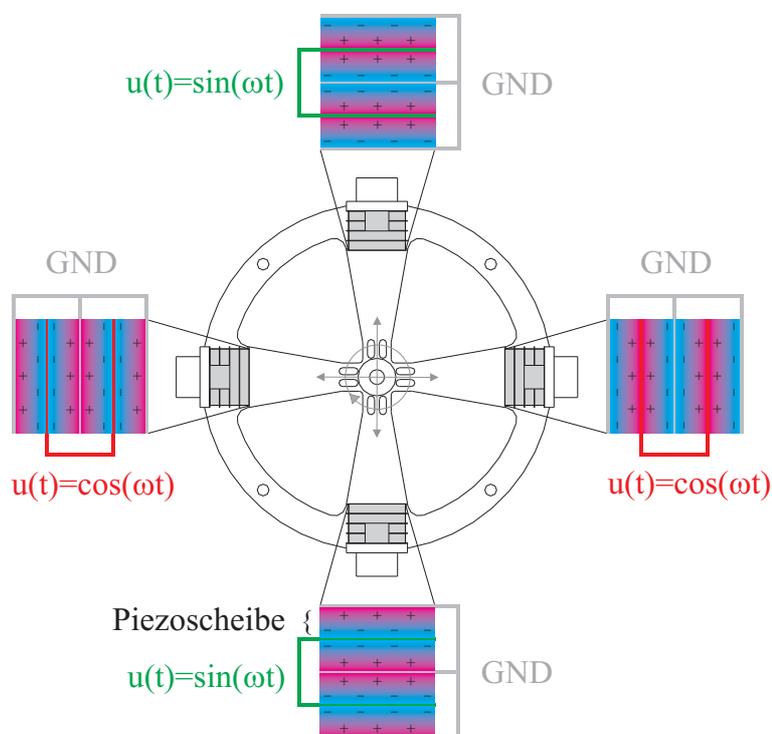


Abbildung 41: Funktionsweise des zweidimensionalen US-Werkzeuges

6.2 Mögliche Ansteuerungskonzepte

Zur Validierung der zuvor entwickelten und analytisch durch ein entsprechendes Ersatzmodell bestätigten These der Energiebilanzen bei einer linearen bzw. elliptischen (idealerweise kreisförmigen) Anregung eines US-Werkzeuges bedarf es neben dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen US-Werkzeuges auch einer elektrischen

Ansteuerung. Diese Ansteuerung muss das gewählte US-Werkzeug in der Art anregen, dass an der Verbindungsstelle eine kreisförmige Bewegung ausgeführt wird. Dazu gibt es zwei mögliche Ansätze eine derartige Ansteuerung aufzubauen. Zum einen die gesteuerte Anregung und zum anderen die geregelte Anregung. Beide Konzepte werden kurz vorgestellt und deren Eignung zur Anregung eines US-Werkzeuges unter Last geprüft.

6.2.1 Resonant angeregter zweidimensionaler Ultraschall

Bei der Nutzung einer resonanten Anregung eines zweidimensionalen US-Werkzeuges zur Erzeugung einer Kreisbewegung an der Spitze des Bondtools wird davon ausgegangen, dass sich die beiden US-Werkzeuge, die zu unabhängigen Schwingungen angeregt werden, exakt gleich verhalten. Dies bedeutet gleiche Resonanzfrequenzen und gleiche mechanische und elektrische Impedanzen beider US-Werkzeuge. Durch den fest vorgegebenen Phasenwinkel und die gleiche Amplitude der beiden Ansteuerungssignale kann in diesem Fall eine Kreisbewegung erzeugt werden.

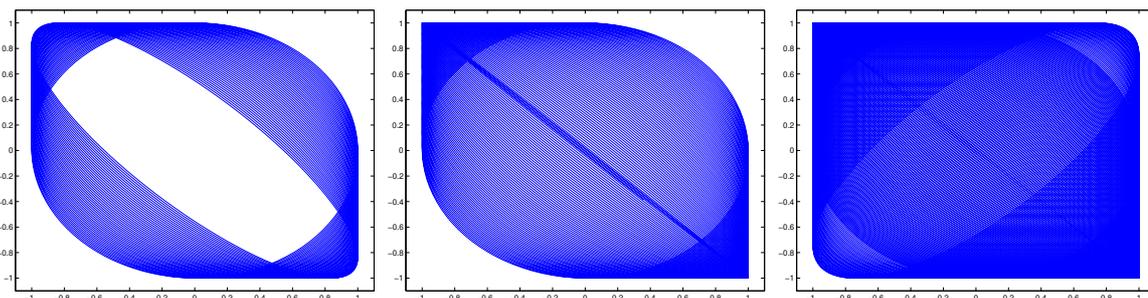


Abbildung 42: Bahn der Spitze des Bondtools bei Anregung mit unterschiedlichen Frequenzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Allerdings ist diese Art der Ansteuerung in der Praxis nicht zu verwenden, da sich die einzelnen US-Werkzeuge sowohl in ihrer Resonanzfrequenz als auch in ihrer Impedanz unterscheiden. Der Grund für die Abweichung der einzelnen Systeme voneinander liegt neben den Fertigungstoleranzen der einzelnen Bauteile auch in der Montage. Abbildung 42 zeigt mögliche Bewegungen (Lissajous-Figuren) eines US-Werkzeuges, wenn sich die Frequenzen der Anregungen in einem Bereich von 60 kHz um 150 Hz zueinander unterscheiden. Dabei werden in der Abbildung zum besseren Verständnis der Bewegung die durchlaufende Bahn zu drei unterschiedlichen Zeitpunkte nach Beginn der Anregung dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bewegung ein Rechteck beschreibt und sich Zustände ergeben, in denen die Geschwindigkeiten zu Null werden. Deshalb kann eine gesteuerte Anregung im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt werden, da bei dem gewählten Modellansatz die Geschwindigkeit beim Bondprozess nie Null werden darf. Deshalb ist es für das

aufgebaute System notwendig, eine Ansteuerung zu nutzen, die trotz unterschiedlicher Resonanzfrequenzen und unterschiedlicher Impedanzen das US-Werkzeug in der Art anregt, dass die geforderte kreisförmige Bewegung an der Spitze des Bondtools sichergestellt wird.

6.2.2 In einem Arbeitspunkt angeregter zweidimensionaler Ultraschall

Im Gegensatz zu der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methode werden beim geregelten zweidimensionalen Ultraschall beide Systeme mit der gleichen Frequenz angeregt. Unabhängig von der gewählten Frequenz ist die Geschwindigkeit der Toolspitze während der gesamten Prozessdauer ungleich Null, wenn eine Phasendifferenz von 90° und für beide US-Werkzeuge Amplituden größer Null gewährleistet werden. Damit die Bahn einer kreisförmigen Bewegung möglichst nahe kommt, müssen unterschiedliche Impedanzen bei der Arbeitsfrequenz möglichst vermieden oder durch eine Regelung kompensiert werden. Hierzu wird eine der beiden Anregespannungen als „Master“ und die andere Anregespannung als „Slave“ realisiert [61].

Wie schon beschrieben weichen die Resonanzfrequenzen der beiden Transducer voneinander ab, deshalb muss ein geeigneter Arbeitspunkt (Betriebsfrequenz) für das System bestimmt werden. Dieser Arbeitspunkt soll nach Möglichkeit sehr nahe an den Resonanzfrequenzen der beiden US-Werkzeuge liegen und die Impedanzen in diesem Punkt, bei den zur Verfügung stehenden Anregespannungen, noch eine ausreichende Amplitude ermöglichen. Da dieser Arbeitspunkt im Verlauf eines Bondvorgangs nicht konstant bleibt, wird die Phasenlage zwischen Strom und Spannung des Masters zur Regelung genutzt. Ein entsprechender Phasenregelkreis wurde implementiert. Neben der Phasenregelung bedarf es zur Erzeugung einer Kreisbewegung auch einer Amplitudenregelung. Die Stromamplitude des Slaves wird auf den gleichen Wert wie die Stromamplitude des Masters geregelt. Dass die Vorgabe einer gleichen Stromamplitude in erster Näherung auch zu einer kreisförmigen Bewegung an der Bondtoolspitze führt, wurde in [61] gezeigt.

Da sowohl ein Tausch als auch eine veränderte Einspannung des Bondtools zu einer Veränderung des bei der Regelung genutzten Arbeitspunktes führen kann, verfügt der Ultraschallgenerator über eine Arbeitspunktbestimmung. Die Funktionsweise der Arbeitspunktbestimmung wird kurz erläutert und dazu ein Bildschirmabzug der Eingabemaske der Softwareumgebung in Abbildung 43 dargestellt.

Neben der Start- und Endfrequenz der Messungen können im oberen Bereich der Eingabemaske der Abstand der einzelnen Messpunkte und die erlaubten Spannungswerte für die Ansteuerung der beiden Systeme gewählt werden. Zur Bestimmung des Arbeitspunktes muss mit Hilfe des Start-Buttons die Messung gestartet werden. Nach der Ermittlung

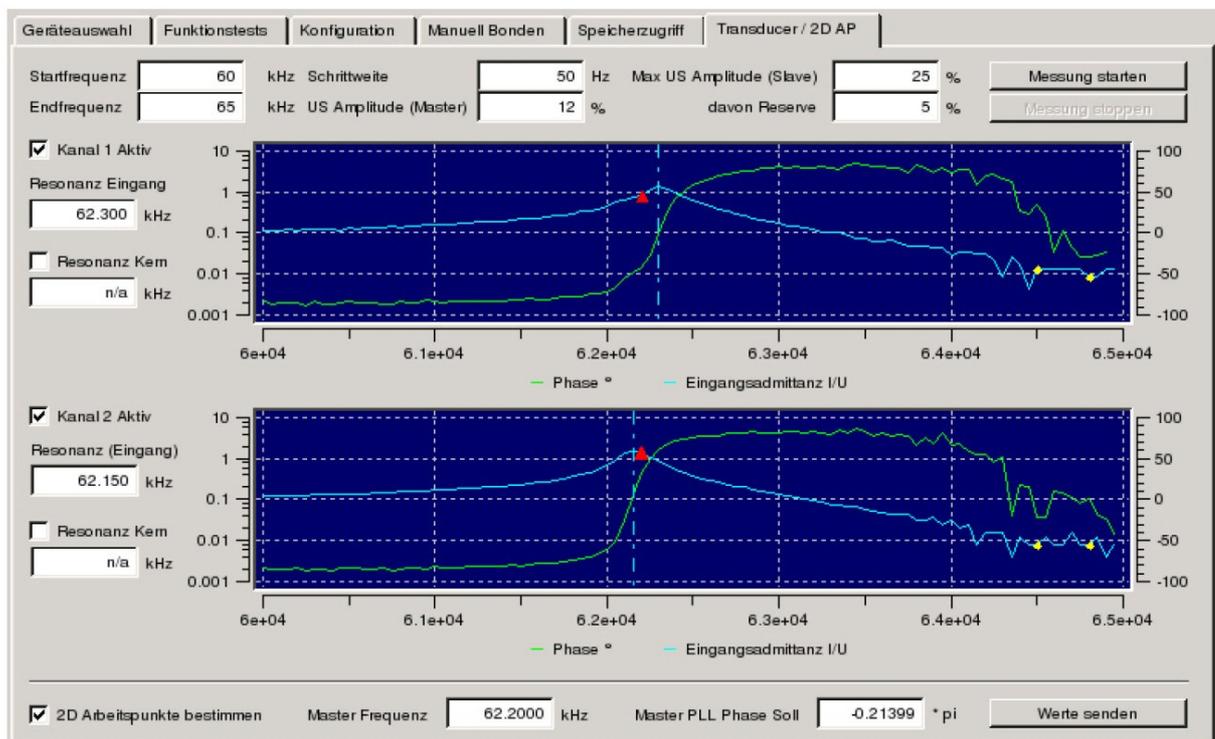


Abbildung 43: Ermittlung eines Arbeitspunktes durch Messung der Admittanzen [61]

der beiden Admittanz- bzw. Phasenverläufe werden diese im mittleren Bereich der Maske dargestellt und es startet die eigentliche Arbeitspunktsuche. Dazu werden beide Admittanzverläufe addiert und es wird nach lokalen Maxima gesucht. Liegt in einem lokalen Maximum der Phasenwinkel des Masters unterhalb von 70° , so wird die zugehörige Frequenz zwischengespeichert. In einem weiteren Schritt wird in den Umgebungen der zwischengespeicherten Frequenzen geprüft, ob die Amplitudenregelung des Slaves der Stromamplitude des Masters folgen kann. Werden mehrere Bereiche gefunden in denen die Amplitudenregelung des Slaves dem Master folgen kann, wird der Arbeitspunkt gewählt, in dem die Summe der Admittanzen am größten ist. Nach erfolgter Messung bzw. einer erfolgreichen Arbeitspunktbestimmung werden die ermittelte Frequenz und der Phasenwinkel im unteren Bereich der Maske angezeigt, gespeichert und dienen bei jedem Bondvorgang als Ausgangspunkt für die Regelung der Ultraschallsignale. Ein beispielhafter Signalverlauf eines Bondvorgangs mit Nutzung des hier beschriebenen zweidimensionalen Ultraschallgenerators ist in den Abbildungen 48 und 49 im folgenden Abschnitt zu sehen.

6.3 Charakterisierung der aufgebauten Bauform

Vor dem experimentellen Vergleich zwischen dem neu entwickelten zweidimensionalen US-Werkzeug und dem eindimensionalen US-Werkzeug werden die Ergebnisse der zur Charakterisierung der aufgebauten Variante durchgeführten Messungen dargestellt. Zuerst werden die Daten des freischwingenden US-Werkzeuges diskutiert. Daran anschließend folgen die Ergebnisse einiger Messungen während einzelner Bondvorgänge. Dabei wird jedoch nicht die Qualität der Bondverbindung untersucht, sondern lediglich das Verhalten des US-Werkzeuges unter der in der Fertigung zu erwartenden Last. Die Art und Weise der durchgeführten Messungen wurde bereits in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben. Der einzige Unterschied zu den dort beschriebenen Vorgehensweisen ist die Verwendung eines 3d-Laserinterferometers. Dies ermöglicht die Darstellung der Kreisbahn bei einer einzelnen durchgeführten Messung.

6.3.1 Freischwingendes US-Werkzeug

Die erste durchgeführte Messung zur Charakterisierung des zweidimensionalen US-Werkzeuges ist eine Eingangsadmittanzmessung beim freischwingenden Werkzeug inklusive Bondtool. Diese Messung, es werden beide Systeme gleichzeitig gemessen, erfolgt montiert in der späteren Fertigungsmaschine unter Verwendung des im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Ultraschallgenerators. Mit Hilfe dieser Messung wird neben der allgemeinen Beurteilung auch die optimale Ausspannlänge des Bondtools ermittelt. Nur bei einer optimalen Ausspannlänge des Bondtools ergibt sich eine Admittanzkurve mit einer ausgeprägten Resonanz. Nach einigen Versuchen mit unterschiedlichen Ausspannlängen ergab sich ein guter Admittanzverlauf bei einer Länge von 9 mm. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 43 dargestellt. Dabei entspricht der Wert von 9 mm der noch freischwingenden Bondtoollänge (siehe Abbildung 44). Es ist zu berücksichtigen, dass dieses freischwingende Ende des Bondtools bei Anregung durch das zweidimensionale US-Werkzeug keine starre Kreisbahn durchläuft, sondern seinerseits in Resonanz angeregt eine Biegeschwingung ausübt und dabei an der Spitze der Kreisbewegung des US-Werkzeuges folgt.

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Messung bzw. der Arbeitspunktbestimmung aufgelistet. Wie schon bei der Beschreibung der Arbeitspunktbestimmung angesprochen, ergibt sich bei der Admittanzmessung für jedes System eine eigene Resonanzfrequenz, die nicht mit der des anderen Systems übereinstimmt. Bei dem hier genutzten US-Werkzeug ergibt sich eine Differenz von 150 Hz zwischen den beiden Systemen.

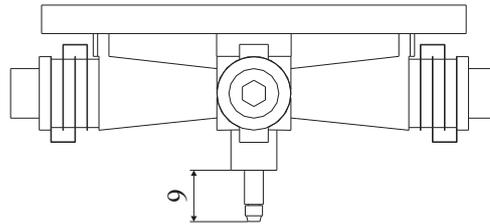


Abbildung 44: Optimale Ausspannlänge des Bondtools beim zweidimensionalen US-Werkzeug

	Messwerte
Startfrequenz der Messung [Hz]	60000
Endfrequenz [Hz]	65000
Schrittweite [Hz]	50
Messung im Bondkopf	ja
System 1	
Impedanz [Ohm]	25,3
Resonanzfrequenz [Hz]	62300
System 2	
Impedanz [Ohm]	28,7
Resonanzfrequenz [Hz]	62150
Arbeitspunkt	
Master Frequenz [Hz]	62200
Master PLL Phase Soll [rad]	$-0,21399 \pi$

Tabelle 13: Ergebnisse der Arbeitspunktbestimmung bei optimaler Ausspannlänge

Nach der ersten Charakterisierung und der Ermittlung der Ausspannlänge des Bondtools wurden Kernadmittanzmessungen mit einem 3d-Laserinterferometer durchgeführt. Dabei wurden die Messungen direkt an der Spitze des Bondtools durchgeführt und neben den Geschwindigkeiten auch die Spannungen und die Ströme der beiden Systeme aufgezeichnet. In Abbildung 45 sind die Geschwindigkeiten dargestellt. In der linken Abbildung sind die Verläufe der Geschwindigkeiten über die gesamte Messung gezeigt, in den rechten drei Abbildungen wurden beispielhaft drei Zeitpunkte der Messung über ein kleineres Zeitintervall aufgelöst. Abbildung 46 zeigt die Verläufe der Anregespannungen und der anliegenden Ströme. Im rechten Bereich sind die Signale beispielhaft über das gleiche Zeitintervall aufgelöst dargestellt.

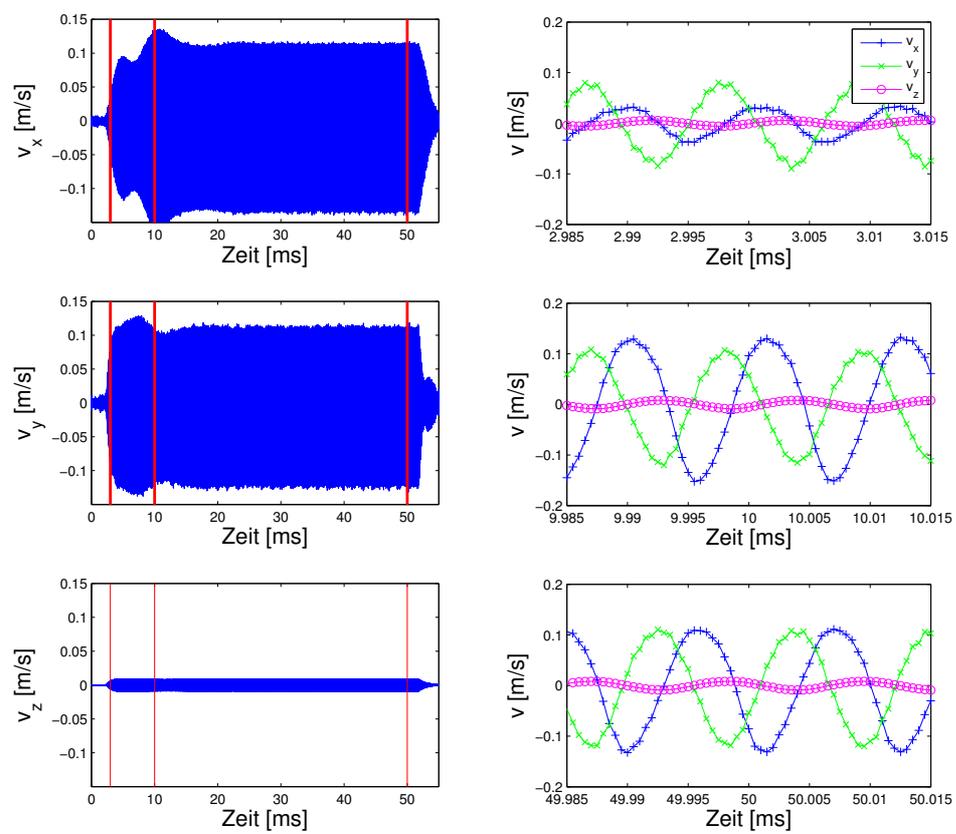


Abbildung 45: 3d-Lasermessung bei freischwingendem Wedge

Da die hier gezeigten Messungen der Kernadmittanzen im Labor und nicht an der späteren Fertigungsmaschine durchgeführt werden mussten, konnte auch nicht auf den im Vorfeld beschriebenen Ultraschallgenerator und die Ermittlung des Arbeitspunktes zurückgegriffen werden. Es musste die vorhandene Laborausstattung genutzt und eine vereinfachte Ansteuerung für die Kreisbewegung implementiert werden. Diese vereinfachte und nicht optimal arbeitende Ansteuerung führt zu den Oberwellen auf den Geschwindigkeits-, Anregenspannungs- und Stromsignalen zu Beginn der Messung. Bei der späteren Verwendung des eigentlichen zweidimensionalen US-Generator ist dieses Verhalten nicht mehr zu erkennen.

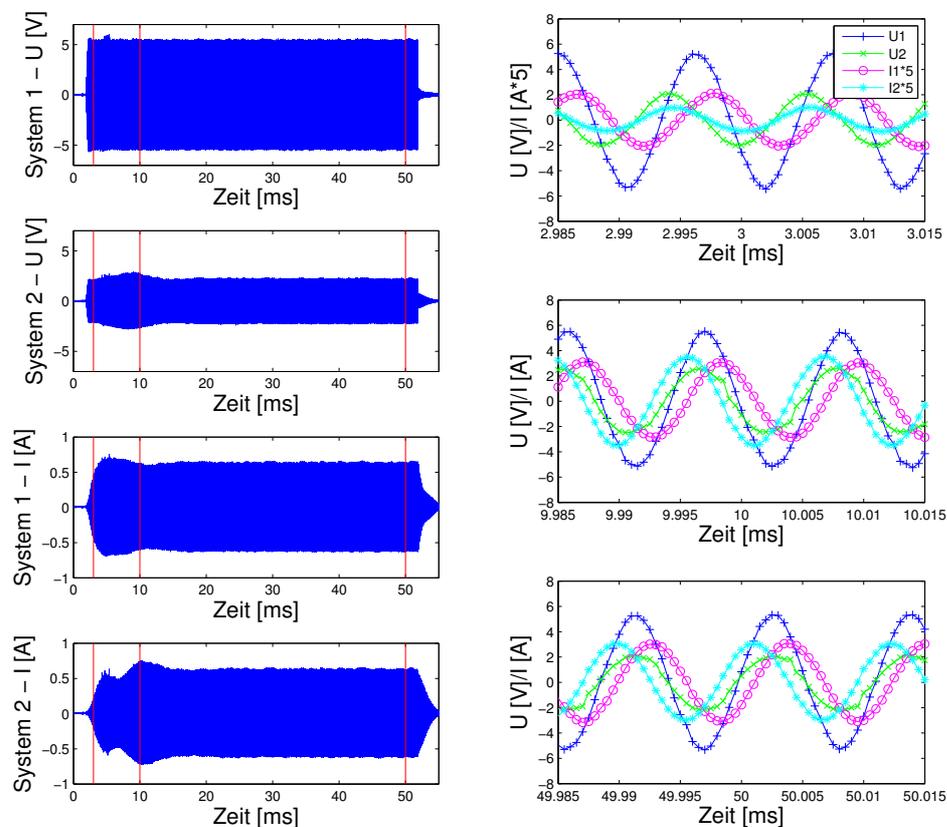


Abbildung 46: Spannungen und Ströme bei freischwingendem Wedge

Mit Hilfe der hier dargestellten Messung kann der direkte Zusammenhang zwischen den anliegenden Strömen und den Geschwindigkeiten des Bondtools gezeigt werden. Wie schon bei der Erläuterung der geregelten Ansteuerung angesprochen, dienen später lediglich die gemessenen Ströme als Anhaltspunkt, ob die Spitze des Bondtools eine kreisförmige Bewegung vollzieht oder nicht. In Abbildung 47 ist zu erkennen, dass die Messwerte für die Geschwindigkeit und die Ströme annähernd auf einem Kreis liegen.

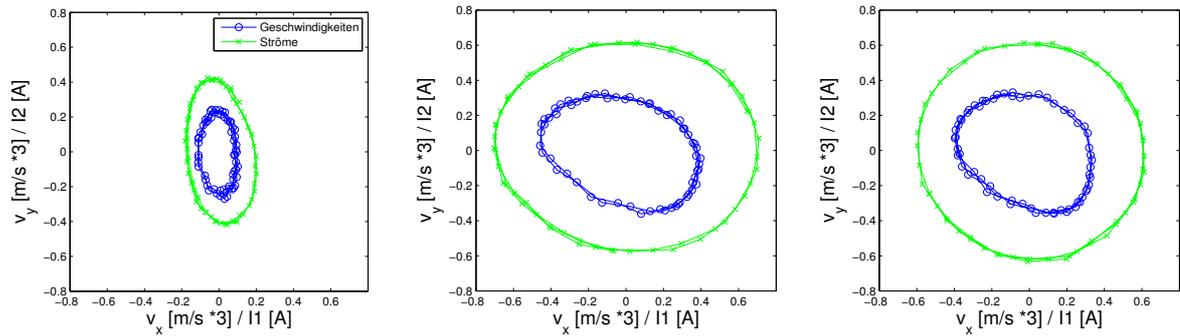


Abbildung 47: XY-Darstellung der Geschwindigkeiten und Ströme bei freischwingendem Wedge

6.3.2 Belastetes US-Werkzeug

Nach den Untersuchungen am freischwingenden Werkzeug wurden Messungen während eines Bondprozesses durchgeführt. Dabei wurden die Spannungs- und Stromverläufe sowie die Phasenlage zueinander aufgezeichnet. Diese Aufzeichnung der Daten erfolgt automatisch in der Maschine und kann zu jeder Zeit zur Analyse des Verhaltens genutzt werden. In Abbildung 48 sind entsprechend zu den freischwingenden Versuchen die Spannungs- und Stromverläufe und drei Ausschnitte gezeigt. Abbildung 49 zeigt die Stromverläufe von fünf hintereinander durchgeführten Bonds in den drei ausgewählten Abschnitten. Den Spannungs- und Stromverläufen ist zu entnehmen, dass die Spannung nicht wie bei der Messung der Eingangsadmittanz sprunghaft eingeschaltet wurde, sondern mit Hilfe der Maschinenparameter die Anregespannung über eine Rampe auf den endgültigen Wert erhöht wurde. Diese zusätzlich eingefügte Bondphase einer linearen Erhöhung der Spannung dient der besseren Qualität der Verbindung und ist abhängig von den zu verbindenden Produkten.

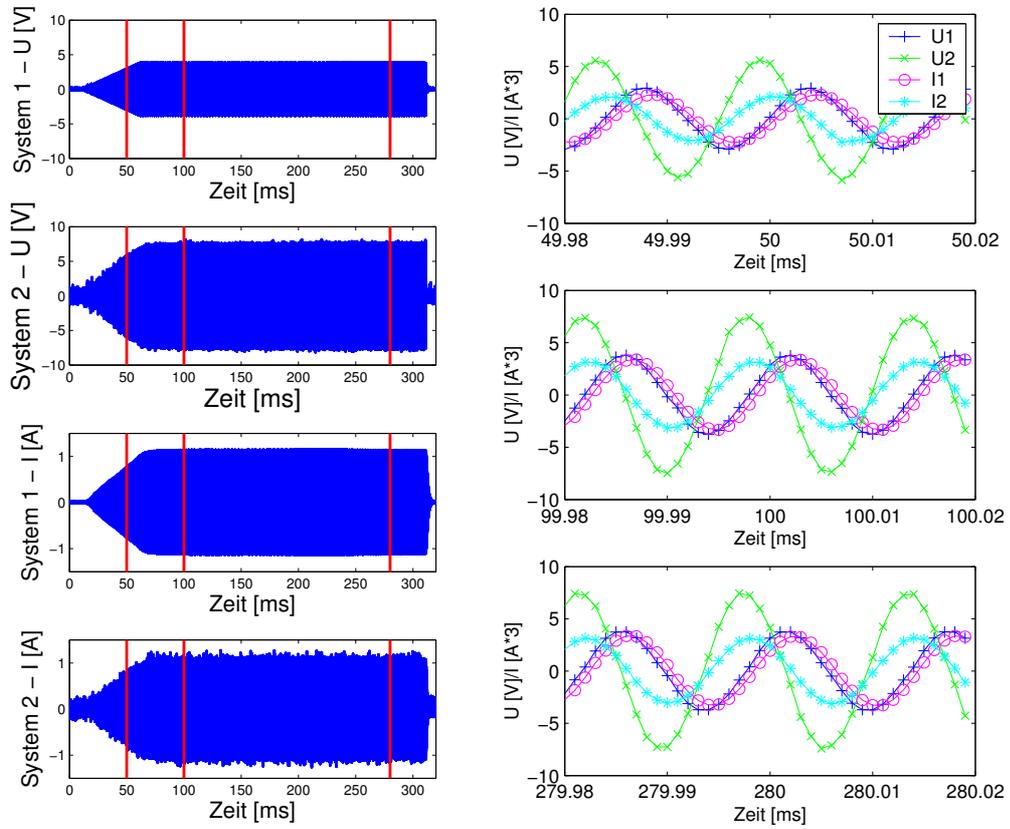


Abbildung 48: Spannungen und Ströme eines Bondvorgangs

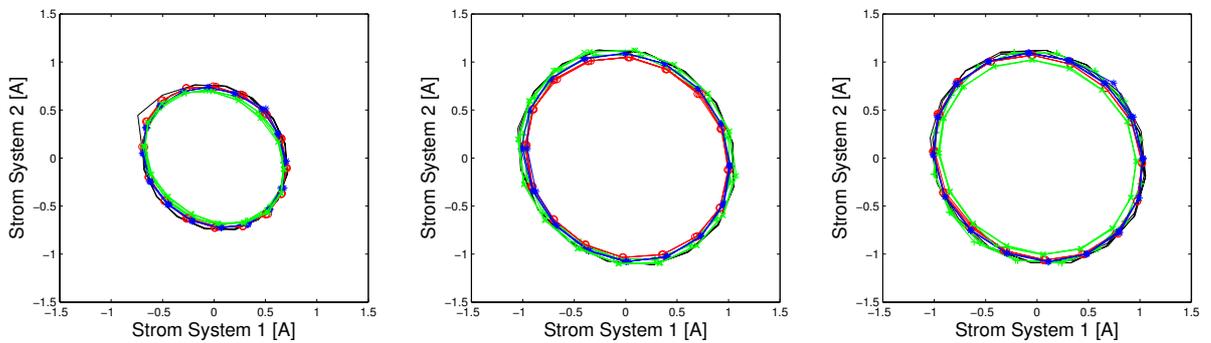


Abbildung 49: XY-Darstellung der Ströme mehrerer Bondvorgänge

7 Vergleich der ein- bzw. zweidimensionalen Anregung

Zur experimentellen Beurteilung des neu entwickelten zweidimensionalen US-Werkzeuges werden in diesem Kapitel vergleichende Versuche zwischen einer eindimensionalen und einer zweidimensionalen Anregung durchgeführt. Für diese Experimente wird eine Versuchsumgebung benötigt, die zu Beginn dieses Kapitels beschrieben wird. Im Anschluss daran wird die Vorgehensweise bei der Planung und die Durchführung der Experimente erläutert, bevor die gewonnenen Ergebnisse diskutiert werden.

7.1 Die Versuchsumgebung

Zur Untersuchung der Wirkung der unterschiedlichen Anregungen wird eine im Markt eingeführte Fertigungsmaschine verwendet. Auf diese Weise können die notwendigen Untersuchungen an in der Serienfertigung befindlichen Produkten durchgeführt werden.



Abbildung 50: Der US-Flipchip-Bonder FJ520 der Hesse & Knipps GmbH [36]

7.1.1 Die Maschine

Bei der für diese Arbeit genutzten Fertigungsmaschine handelt es sich um einen US-Flipchip-Bonder FJ520 der Firma Hesse & Knipps GmbH. Da die gesamte Maschine als Versuchsumgebung dient, in Ihrem Aufbau aber nur in wenigen Teilen direkten Einfluss auf den Bondprozess hat, wird die allgemeine Funktionsweise der Maschine einleitend kurz erläutert. Die für den Prozess relevanten Bestandteile der Maschine werden daran anschließend ausführlicher beschrieben. Zusätzliche Informationen über die Maschine und eine genauere Beschreibung der Funktionsweise können den entsprechenden Dokumenten des Herstellers [36] entnommen werden. Prinzipiell kann die Maschine in vier Bereiche unterteilt werden:

- Wafer-Handling
- Chip-Handling
- Bondbereich
- Substrat-Handling

Im Bereich des Wafer-Handlings werden die zu verarbeitenden, geschnittenen Wafer³ der Maschine zugeführt und verarbeitet. Die Wafer befinden sich auf einer selbstklebenden Folie, die wiederum an einem Spannrahmen befestigt ist. Der Spannrahmen dient zur definierten Aufnahme bzw. Fixierung des Wafers in der Maschine. Die Position der sich auf dem Wafer befindlichen Chips wird mit einer Kamera und einer Bilderkennungssoftware erkannt. Anhand der so berechneten Position können die Chips nacheinander mittig über eine Aushubstation, dem sogenannten Die-Ejector, positioniert werden. Hier werden die Chips mit Hilfe einer Nadel von der Folie abgelöst und vom Die-Collet übernommen.

Der Die-Collet ist am Ende des Fliparms montiert. Dieser ist bereits Bestandteil des Bereiches Chip-Handling. Angebunden an eine Drehachse kann dieser Arm eine Schwenkbewegung von 180° durchführen. Dieser Drehung des Chips verdankt der Prozess den Namen Flipchip. Über eine translatorische Achse wird der Arm mit dem gedrehten Chip der Übergabeposition zugeführt.

In der Übergabeposition wird der Chip vom eigentlichen Werkzeug, dem Bondtool (siehe Abbildung 51), übernommen und zum Bondbereich transportiert. Nach der Übergabe des Chips an das Bondtool werden die Position des Chips unter dem Bondtool und die

³Als Wafer wird in der Halbleiterindustrie die kreisrunde, wenige 100 μm dicke Scheibe bezeichnet, auf der elektronische Bauelemente, vor allem integrierte Schaltkreise durch verschiedene technische Verfahren hergestellt werden [62].

Position der Bondstelle auf dem Substrat optisch vermessen. Hierzu werden zwei Kameras eingesetzt. Die erste Kamera ist fest installiert und dient im Bereich der Übergabeposition zur Positionserkennung des Chips und hat ein nach oben gerichtetes Objektiv. Die zweite Kamera ist mit einem nach unten gerichteten Objektiv an den beweglichen Bondachsen der Maschine installiert und wird über die Substratposition gefahren. Nach der Positionserkennung des Chips und des Substrates mit der Bilderkennungssoftware wird der Chip über dem Substrat so positioniert, dass die Gold-Bumps des Chips exakt über den Bondpads des Substrates liegen.

Im letzten Abschnitt der Maschine, dem Substrat-Handling, werden die Substrate mit Hilfe eines Versorgungs- und eines Entnahme-Systems automatisch dem Bereich zu- und abgeführt, in dem die Chips auf das Substrat gebondet werden. Dieser Bereich wird als Bondstation bezeichnet. Auf der beheizbaren Bondstation (bis 400 °C) wird das zu bondende Substrat derart fixiert, dass es beim eigentlichen Bondprozess nicht in Schwingung geraten oder durch Verrutschen die Position ändern kann. Die Fixierung oder Klemmung kann bei mangelhafter Ausführung einen großen Einfluss auf das Bondergebnis haben. Da die Klemmung und die verwendeten Substrate für alle während dieser Arbeit durchgeführten Versuche gleich sind, können diese Faktoren die spätere Bewertung der unterschiedlichen Anregungskonzepte nicht beeinflussen. Entsprechend wird die Bondstation und die Art der Klemmung bei den Versuchen nicht weiter berücksichtigt. Die genutzten Substrate werden in der Bondstation über Vakuum fixiert.

Nachdem die allgemeine Funktionsweise dargestellt wurde, werden die Komponenten der Maschine beschrieben, die den Bondprozess direkt beeinflussen. Diese Komponenten befinden sich im sogenannten Bondkopf und im Ultraschallgenerator.

Der Bondkopf dient als Aufnahme und als Bindeglied zwischen den Bewegungsachsen der Maschine und dem US-Werkzeug. In Abbildung 51 ist der genutzte Bondkopf inklusive des zweidimensionalen US-Werkzeuges dargestellt. Im Wesentlichen besteht dieser neben dem US-Werkzeug aus einem Grundkörper, einem Kraftaktor, einem Linearencoder und einem im US-Werkzeug eingebauten Bondtool.

Der Grundkörper besteht aus den Kanten eines Quaders. In zwei zueinander parallelen Flächen sind zwei rechteckige Rahmen enthalten, die mit einer der beiden längeren Seiten mit einer Kante des Rechtecks fest verbunden sind, die gegenüberliegende Seite des Rahmens ist beweglich. Die Rahmen besitzen in der senkrechten Richtung eine geringe Steifigkeit, während sie in allen anderen Raumrichtungen über eine hohe Steifigkeit verfügen. Somit kann zwischen einem beweglichen Teil (nur in senkrechter Richtung) und einem festen

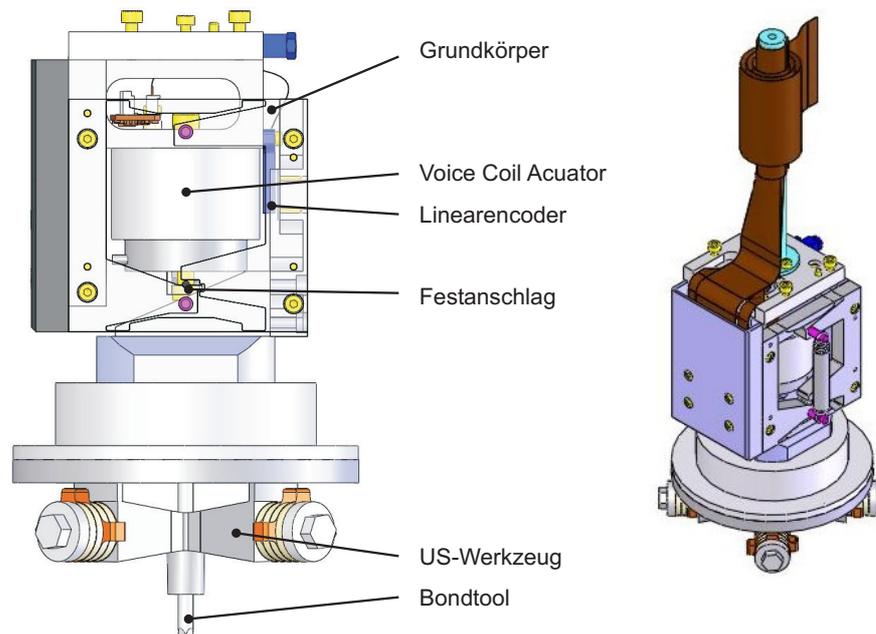


Abbildung 51: Bondkopf mit US-Werkzeug

Teil unterschieden werden. Der feste Teil ist an der senkrechten Achse des Achssystems der Maschine befestigt und an dem beweglichen Teil ist das US-Werkzeug montiert. Dieser Aufbau wird auch als Parallelogramm bezeichnet und entkoppelt die Bewegung des Bondtools in senkrechter Richtung vom Achssystem. Eine Entkopplung ist für den Prozess erforderlich, damit zum einen die Kräfte beim Aufsetzen des Chips auf das Substrat nicht zu groß werden, und zum anderen ermöglicht diese Entkopplung dem Werkzeug der beim Schweißprozess auftretenden Verformung zu folgen.

Über einen Kraftaktor (Voice Coil Actuator) lassen sich die erforderlichen Bondkräfte während des Schweißprozesses einstellen. Die an diesem Aktor wirkende Kraft ist proportional zum eingepprägten Strom.

Zur Überwachung der durch den Ultraschall ausgelösten Verformung der Bumps wird ein Linearencoder eingesetzt. Mit Hilfe dieses Encoders lassen sich die Verformungsverläufe für jeden verarbeiteten Chip anzeigen und qualitativ bewerten. Wie eine solche Bewertung aussehen kann und welche Aussagen aus dem Verformungsverlauf gezogen werden können, wird in einem späteren Abschnitt (7.2.3) näher erläutert.

Neben der Erfassung der Verformung dient der Encoder auch als Signalgeber für den Touch Down, dem Aufsetzen des Chips auf dem Substrat. Durch das Aufsetzen des sich im

Werkzeug befindlichen Chips auf das Substrat wird die Bewegung des beweglichen Teils des Parallelogramms verhindert und der fest mit den Bewegungsachsen verbundene Teil bewegt sich weiter in Richtung Substrat. Nach Überschreiten eines definierten Schwellwertes des Encoders erhält die Maschine ein Signal, damit die Bewegung der vertikalen Achse nach Durchfahren eines definierten Überfahrweges gestoppt wird. Durch den beim Aufsetzen des Bondkopfes wirkenden Impuls werden die Bumps bis zum Erreichen des Schwellwertes vorverformt. Da die Maschine erst mit dem Erkennen des Touch Downs die Veränderung messen kann, ist die Ermittlung der bis dahin erfolgten Vorverformung während des normalen Fertigungsablaufes nicht möglich.

Das Bondtool wird je nach Bauart des US-Werkzeuges und den aus der Anwendung resultierenden Anforderungen ausgewählt. Dabei sind die verschiedensten Bauformen denkbar. Exemplarisch werden in Abbildung 52 zwei unterschiedliche Bauformen gezeigt. Links ist ein Bondtool mit einem pyramidenförmigen Ausschnitt dargestellt und rechts ein flaches Bondtool. Der wesentliche Unterschied dieser beiden Toolformen liegt darin, dass beim flachen Tool der Chip während des eigentlichen Bondvorganges nur über Reibung bzw. ein angelegtes Vakuum gehalten wird und somit eine Relativbewegung zwischen Chip und Tool nicht ausgeschlossen werden kann. Eine eintretende Relativbewegung kann zu einer Fehlpositionierung nach dem Bondvorgang führen. Bei einem Tool mit einem pyramidenförmigen Ausschnitt liegt der Chip mit seinen Kanten auf den Flächen des Ausschnittes auf und wird zusätzlich durch Vakuum gehalten. Durch den formschlüssigen Kontakt der Chipkante mit dem Tool ist ein Verrutschen des Chips beim Bonden nicht möglich.

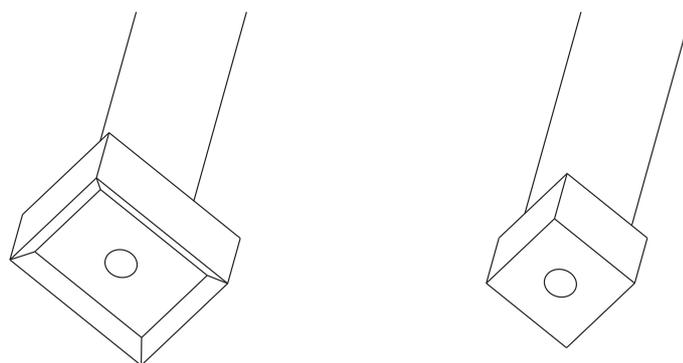


Abbildung 52: Pyramidenförmiges und ein flaches Bondtool

Zur Ansteuerung des US-Werkzeuges wird der in Abschnitt 6.2 beschriebene Ultraschallgenerator eingesetzt. Genauere Angaben und die genaue Beschreibung der Funktionsweise des Ultraschallgenerators sind in [61] beschrieben.

7.1.2 Versuchsmaterial

Damit bei den Experimenten eine möglichst große Nähe zu realen Produkten der Halbleiterfertigungsindustrie gewährleistet ist, werden für die Versuche sowohl Chips als auch Substrate eingesetzt, die millionenfach bei einem Kunden des Maschinenherstellers in einer Serienfertigung verarbeitet werden. Dies ermöglicht es auch, auf Erfahrungen und Qualitätskennzahlen des Kunden in Bezug auf das eindimensionale US-Flipchip-Bonden zurückzugreifen bzw. aufzubauen.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines zweidimensionalen Prozesses zur Verbindung von Chips mit Substraten, wobei besonderes Augenmerk auf die Zuverlässigkeit der Verbindung gelegt wird. Die Versuche werden an einem kleinen Chip mit geringen Anschlusszahlen durchgeführt, um den angestrebten Vergleich zwischen der eindimensionalen und der zweidimensionalen Anregung durchführen zu können. Ein Vergleich zweier Versuchsreihen ist nur möglich, wenn mit Hilfe beider Anregekonzepte das gleiche Produkt verarbeitet werden kann.

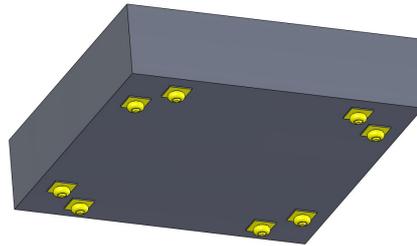


Abbildung 53: Modell des genutzten Chips

Der verwendete Chip ist ein $500 \mu\text{m}$ dicker Baustein mit einer Fläche von ca. $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Dieser Chip besitzt eine Aluminium-Metallisierung mit je einem auf den acht Anschlusspads aufgetragenen Studbump. In Abbildung 54 ist eine schematische Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Studbumps zu sehen. Die verwendeten Studbumps haben einen Durchmesser von $D = 90 \mu\text{m}$ und eine Höhe von $H_2 = 60 \mu\text{m}$. Die Werte für die Höhen H_1 und H_3 liegen bei $H_1 = 50 \mu\text{m}$ und $H_3 = 65 \mu\text{m}$.

Das Substrat ist eine Multilayer-Keramik mit einer Gesamtdicke von $200 \mu\text{m}$ und einer Fläche von $25 \times 12,5 \text{ mm}^2$. Auf diesem Substrat befinden sich 26 Bondstellen in einer doppelreihigen Anordnung von je 13 Bondpositionen. Die Bondpads des Substrates, mit denen die Gold-Studbumps verbunden werden sollen, bestehen aus einer

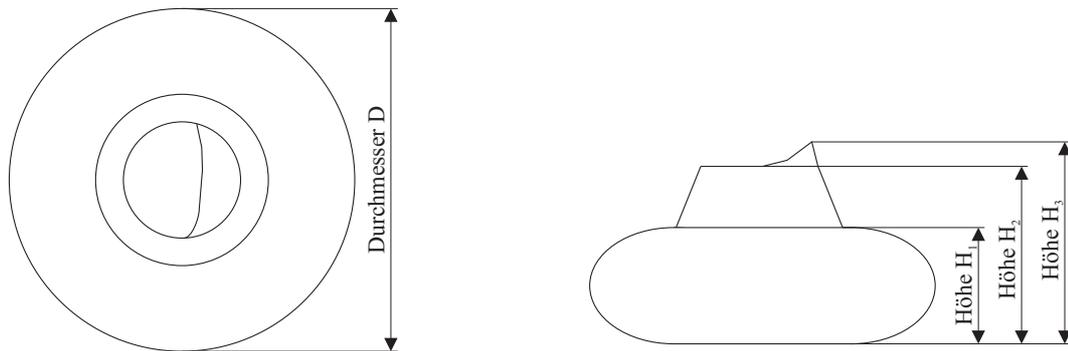


Abbildung 54: Studbump

Kupfer-Nickel-Metallisierung mit einer Goldbeschichtung der Dicke $0,5 \mu\text{m}$. Diese Bondpads besitzen zum späteren Anschluss des fertigen Produktes Durchkontaktierung zur Unterseite der Keramik.

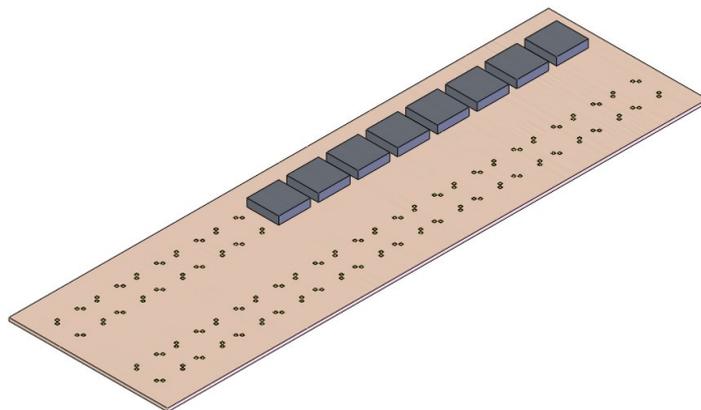


Abbildung 55: Modell des genutzten Substrates

7.2 Die Versuchsplanung

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Planung der einzelnen Versuche mit der ein- bzw. zweidimensionalen Anregung erläutert. Die Versuche sollen mit Hilfe des DOE-Verfahrens (DOE = Design Of Experiments) geplant, durchgeführt und ausgewertet werden. Dazu werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Schritte der Vorgehensweise nach DOE für die für diese Arbeit notwendigen Versuche vollständig dargestellt. Die Durchführung der Versuche und die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen werden in dem folgenden Abschnitt den jeweiligen Anregungen (ein- oder zweidimensional) zugeordnet. Die einzelnen Schritte einer DOE lauten nach *Taguchi* [63]:

1. Identifikation bzw. Beschreibung des Problems
2. Definition der Ziele
3. Auswahl geeigneter und messbarer Qualitätsmerkmale
4. Festlegung der einzelnen Versuchsbedingungen
5. Durchführung der Versuche
6. Analyse der Versuchsdaten
7. Interpretation der Ergebnisse
8. Validierung der gewonnenen Erkenntnisse

Es wird im Folgenden nicht eine allgemeine Beschreibung der Ablaufschritte geliefert, sondern eine speziell auf den vorliegenden Sachverhalt zugeschnittene Erläuterung gegeben.

7.2.1 Identifikation bzw. Beschreibung des Problems

Im ersten Schritt einer Versuchsplanung muss das Problem identifiziert und eindeutig beschrieben werden. Je eindeutiger und klarer ein Problem an dieser Stelle beschrieben werden kann, umso leichter und effizienter wird die Durchführung der Versuche und umso aussagekräftiger ist das Ergebnis.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit handelt es sich nicht um ein klassisches Problem im Sinne einer Fehlfunktion oder eines fehlerhaften Produktes. Die mit Hilfe dieser Versuchsplanung abzuarbeitende Aufgabenstellung liegt viel mehr darin, eine optimale Bondverbindung zwischen Gold-Bumps und den Bondpads auf einem Substrat herzustellen. Dabei unterliegt die Güte der Verbindung neben den eigentlichen Bondparametern wie Bondkraft, Bondleistung, Bondzeit und Temperatur auch der Art der Anregung. Damit der Aufwand und die Komplexität der Planung der Experimente überschaubar gehalten werden kann, wird die DOE nicht gesamtheitlich für die ein- und zweidimensionale Anregung genutzt. Sie wird auf jede Anregung separat angewandt und erst am Ende der Arbeit werden die Ergebnisse der Bondversuche miteinander verglichen.

Identifikation bzw. Beschreibung des Problems

Herstellung einer auf die jeweilige Anregung des US-Werkzeuges bezogene optimale Bondverbindung zwischen Chip und Substrat.

7.2.2 Definition der Ziele

Das Ziel der durchzuführenden Versuche ist es herauszufinden, ob die in Abschnitt 5.3.4 aufgestellte These richtig ist, dass das US-Flipchip-Bonden mit einer zweidimensionalen Anregung besser geeignet ist, eine qualitativ hohe Bondverbindung zu erzeugen als mit eindimensionaler Anregung und gleichzeitig den Chip geringer zu belasten. Dazu muss für beide Anregungen ein optimaler Parametersatz gefunden und bestätigt werden. Mit Hilfe der so gewonnenen Parameter pro Anregung werden abschließend Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse sowohl zur Verifizierung der gewonnenen Parameter als auch als Grundlage zum Vergleich der unterschiedlichen Anregung dienen. Da zum Abschluss der Versuche zu jeder Anregung die durch die Optimierung gefundenen Parameter und das dazugehörige Bondergebnis vorliegen, kann eine Aussage über die in der These dargestellten Vorteile einer zweidimensionalen Anregung getroffen werden.

Definition des Zieles

Die Ermittlung optimaler Parametersätze pro Anregungskonzept.

7.2.3 Auswahl geeigneter und messbarer Qualitätsmerkmale

Im nun folgenden Schritt werden die Qualitätsmerkmale ausgewählt. Bei dem hier beschriebenen Problem werden die Merkmale wie folgt festgelegt.

1. Der Chip und das Substrat dürfen nicht beschädigt werden.
2. Die durch den Prozess erreichte Verformung der Studbumps soll in einem definierten Bereich liegen und von Verbindung zu Verbindung nur gering abweichen.
3. Durch den Prozess soll eine hohe Festigkeit (Scherkraft) zwischen Chip und Substrat erreicht werden.
4. Es muss eine gute elektrische Verbindung erzeugt werden.

Wie schon erwähnt handelt es sich bei dem für die Tests verwendeten Material um ein Produkt aus einer laufenden Serienfertigung. Ein sehr banales Qualitätsmerkmal ist die Forderung, dass das zu erzeugende Produkt während des Verbindungsprozesses nicht beschädigt werden darf. Das Problem beim Flipchip-Bonden liegt darin, eine

eventuelle Beschädigung festzustellen. Das zerstörungsfreie Auffinden einer Beschädigung der Verbindung zwischen Chip und Substrat ist nur durch aufwendige Verfahren oder erst am Ende des gesamten Fertigungsprozesses möglich (siehe Kapitel 4).

Zum Auffinden von Beschädigungen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine erste Begutachtung mit einem Mikroskop. Dabei werden die Kanten des Chip nach Brüchen und daran anschließend die Rückseite auf Beschädigungen untersucht. Zeigt diese Untersuchung keine Auffälligkeiten können eventuelle Beschädigungen in Form von Rissen nur durch die Anwendung der Ultraschall-Mikroskopie gefunden werden. Das Vorgehen einer solchen Untersuchung wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 beschrieben. Da sie sehr aufwendig ist und nur sinnvoll erscheint, wenn alle anderen Untersuchungsmethoden ausgeschöpft sind, wird dieses Verfahren hier nicht eingesetzt. Eine zerstörende Möglichkeit einen Riss im Chipmaterial zu finden ist der Die-Schertest. Tritt beim Die-Schertest bei einem Muster ein unter dem Mittelwert liegender Scherwert auf und befinden sich auf dem Substrat Bumps mit ausgebrochenen Chipteilen, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Schaden (das Cratering) durch den Prozess und nicht erst durch den Die-Schertest entstanden ist. Das genaue Vorgehen beim Schertest und die unterschiedlichen Fehlercodes wurden in Abschnitt 4.2.1 dargestellt. Ein typisches Fehlerbild von Cratering und einer guten Verbindung wird in Tabelle 14 gezeigt und weiter unten erläutert.

Das nächste zu beschreibende Qualitätsmerkmal ist die Verformung der Gold-Bumps während des US-Flipchip-Bondens. Die Verformung für das vorliegende Produkt ist durch die weiteren Fertigungsprozesse bestimmt. Der Wert für die angestrebte Verformung liegt bei $25 \mu\text{m}$. Dieser Wert resultiert aus der Forderung, nach dem Prozess einen Zwischenraum zwischen Chip und Substrat von mindestens $20 \mu\text{m}$ zu erreichen. Da der unverformte Bump eine Höhe von $60 \mu\text{m}$ aufweist und eine Vorverformung von ca. $15 \mu\text{m}$ durch das mechanische Aufsetzen erfolgt, ergibt sich eine zulässige Verformung von $25 \mu\text{m}$ durch den Prozess. Der Wert von ca. $15 \mu\text{m}$ durch das mechanische Aufsetzen ist stark von der eingestellten Aufsetzkraft und der Aufsetzgeschwindigkeit abhängig. Diese beiden Maschinenparameter wurden während der durchgeführten Versuche konstant eingestellt und haben somit keinen Einfluss auf die Untersuchungen. Neben dem absolut zu erreichenden Verformungswert spielt die Abweichung unter den einzelnen Verbindungen eine große Rolle. Liegen die einzelnen Verformungswerte weit auseinander, läuft der eigentliche Bondprozess nicht stabil. Es ist davon auszugehen, dass die zur Verbindungserzeugung eingeleitete Energie entsprechend den Unterschieden in der Verformung auch stark voneinander abweicht und somit keine einheitliche Qualität der einzelnen Bondverbindung gewährleistet ist.

Zur Sicherstellung eines stabilen Fertigungsprozesses wurde für dieses Produkt eine Abweichung der Verformung mit einem Wert von 20 % der angestrebten Verformung festgelegt. Dieser Wert wurde dem Prozessleitfaden des Serienfertigers für dieses Produkt mit einer eindimensionalen Anregung entnommen. Mit Hilfe dieses Wertes kann der Prozessfähigkeitsindex C_{pK} ⁴ berechnet werden, da die obere Spezifikationsgrenze (OSG) und die untere Spezifikationsgrenze (USG) mit $OSG = 25 \mu m + 5 \mu m = 30 \mu m$ und $USG = 25 \mu m - 5 \mu m = 20 \mu m$ definiert ist. Zur Beurteilung, ob eine ausreichende Prozessfähigkeit vorliegt, wird in der Halbleiterindustrie ein Wert von $C_{pK} \geq 1,33$ angestrebt. Der C_{pK} -Wert berechnet sich mit den hier gegebenen Vorgaben wie folgt [64]:

$$C_{pK} = \frac{\min(D_M - USG; OSG - D_M)}{3\sigma} \quad (50)$$

$$C_{pK} = \frac{\min(D_M - 20 \mu m; 30 \mu m - D_M)}{3\sigma} \quad (51)$$

Dabei entspricht D_M dem Mittelwert der gemessenen Verformungen und σ der aus den Verformungswerten berechneten Standardabweichung.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle Verformungswerte in den gezeigten Graphen oder Tabellen immer ein negatives Vorzeichen besitzen. Dies liegt an der in Maschinenkoordinaten negativ ausgeübten Bewegung und wurde für die Darstellung der Ergebnisse übernommen.

Für die Festigkeit zwischen Chip und Substrat gilt die Regel, je höher die Festigkeit desto besser ist dies für das Produkt. Diese Forderung ist einsichtig, jedoch steht sie im Widerspruch zum ersten diskutierten Qualitätsmerkmal. Der Versuch eine hohe Festigkeit zu erreichen führt häufig zu einer Beschädigung des Chips, was beim Betrachten der einzelnen Versuchsergebnisse im späteren Verlauf dieses Abschnittes deutlich wird.

Eine hohe Festigkeit zwischen Chip und Substrat lässt sich an zwei Größen messen. Zum einen an dem Scherwert, welcher beim Schertest ermittelt wird, und zum anderen an der Art und Weise, wie die Verbindung beim Scheren versagt. Die Beschreibung und die Durchführung kann wie schon erwähnt Abschnitt 4.2.1 entnommen werden. In Tabelle 14 werden die unterschiedlichen Formen des Versagens der Verbindung zwischen Chip und Substrat gezeigt. Diese entsprechen den in Abbildung 20 schematisch dargestellten Fehlercodes. Dabei handelt es sich beim I. Fehlercode um ein Abscheren ohne jegliche

⁴Der Prozessfähigkeitsindex C_{pK} ist eine Kennzahl zur statistischen Bewertung eines Prozesses in der Produktionstechnik. Er gibt an, wie sicher die laut Spezifikation vorgegebenen Ziele erreicht werden.

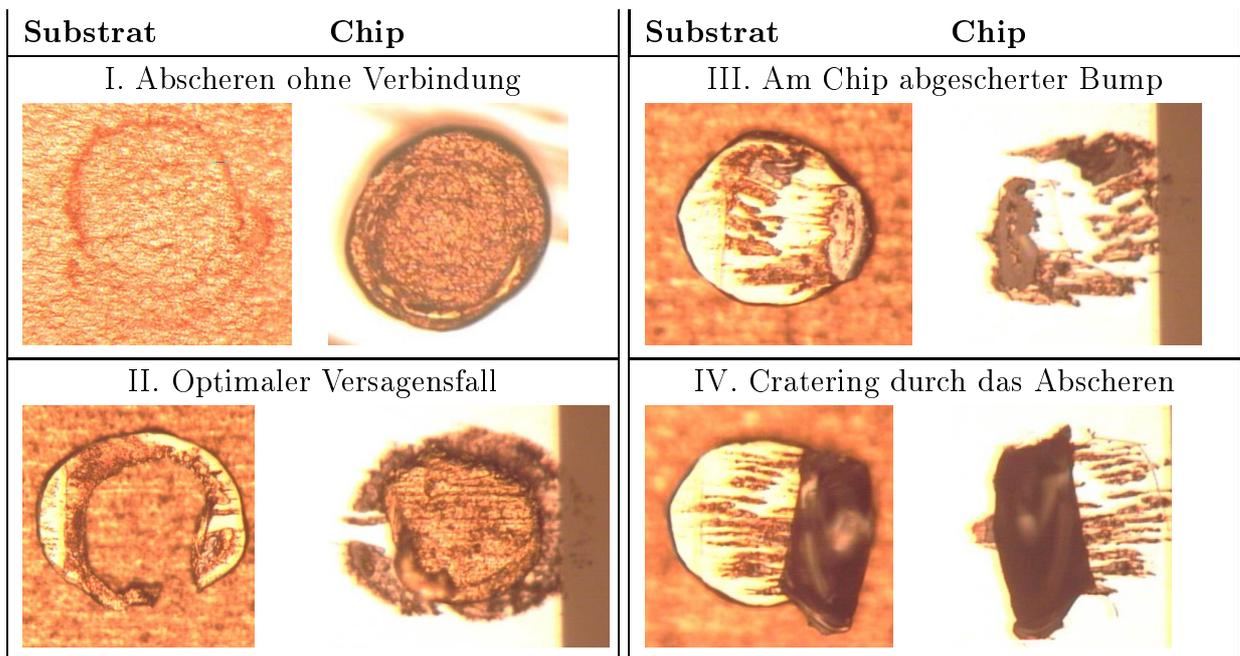


Tabelle 14: Versagensformen des Versuchsproduktes beim Die-Schertest

Verbindung zwischen der Bumpoberfläche und der Metallisierung des Bondpads auf dem Substrat. Lediglich ein Abdruck des Bumps ist zu erkennen. Der II. Fehlercode zeigt hingegen einen völlig am Chip abgescheren Bump. Die Festigkeit am Substrat war nach dem US-Flipchip-Bonden größer als die Festigkeit am Bondpad auf dem Chip. Mit Fehlercode III ist der optimale Versagensfall dargestellt. Der Bump hat sowohl eine gute Haftung am Chip als auch am Substrat, der Bump wurde während des Schertests in zwei Teile getrennt. Dagegen ist Fehlercode IV der nicht gewünschte Versagensfall. Beim Schertest wurden Stücke aus dem Chip gerissen, was auf eine Beschädigung während des Verbindungsprozesses hindeutet. Da es sich bei dem Produkt um einen Chip mit 8 Bumps handelt und für das US-Flipchip-Bonden Scherkräfte pro Bump von ca. 50 - 80 cN gefordert sind [44], wird der für die Versuche zu erreichende Wert der Scherkraft auf 600 cN pro Chip als Qualitätsmaß festgelegt. Ähnlich der Verformung wird auch beim Scherwert eine maximale Abweichung des Mittelwertes von 20 % spezifiziert. Daraus ergeben sich die Werte für die untere Spezifikationsgrenze und obere Spezifikationsgrenze als $USG = 480 \text{ cN}$ und $OSG = 720 \text{ cN}$. Der geforderte Prozessfähigkeitsindex C_{pK} lässt sich somit schreiben als:

$$C_{pK} = \frac{\min(F_M - 480 \text{ cN}; 720 \text{ cN} - F_M)}{3\sigma} \quad (52)$$

Dabei entspricht F_M dem Mittelwert der gemessenen Scherkraft und σ der aus den Scherwerten berechneten Standardabweichung.

Eine gute elektrische Verbindung kann am Besten mit Hilfe eines elektrischen Tests überprüft werden. Da die meisten elektrischen Funktionstests nicht direkt nach der Montage der Bauelemente durchgeführt werden, sondern erst das fertige Produkt aufgebaut wird, prüft der elektrische Funktionstest nicht nur die Bondverbindung. Beim Funktionstest werden alle angewandten Fertigungsprozesse überprüft und ein Ausfall des fertigen Produktes kann in jedem einzelnen Fertigungsprozess begründet liegen. Damit die Ergebnisse dieser Funktionstests möglichst auch den Einsatz des Produktes beim Verbraucher widerspiegeln, werden die Bauteile Temperaturwechsel- und Klimatests ausgesetzt. Genaue Angaben zu diesen Tests können den Quellen im Abschnitt 4.2.2 entnommen werden. Da die Funktionsweise der einzelnen Produkte unterschiedlich ist, müssen auch die Testmethoden der entsprechenden Funktion angepasst werden. Aufgrund der Nähe zum Serienprodukt kann nicht auf das hier verwendete Testverfahren und die erlangten Ergebnisse im Detail eingegangen werden.

Auswahl geeigneter und messbarer Qualitätsmerkmale

Der Chip muss mit einer definierten Verformung und Festigkeit, ohne Beschädigung und unter Sicherstellung der elektrischen Funktion verarbeitet werden.

7.2.4 Festlegung der einzelnen Versuchsbedingungen

Bevor die eigentlichen Versuche durchgeführt werden können, müssen die Versuchsbedingungen festgelegt werden. Bei einer typischen Versuchsreihe im Bereich der Verbindungstechnik und insbesondere beim Ultraschallbonds unterliegt die Güte der Verbindung hauptsächlich den in der Maschine einzustellenden Bondparametern wie Bondkraft, Bondleistung, Bondzeit und Temperatur. Dies sind Parameter, die bei einer heutigen Fertigungsmaschine frei programmierbar eingestellt werden können. Bei der Bondleistung handelt sich bei der genutzten Maschine um eine Angabe eines Wertes, der proportional zur Anregespannung ist. Auch bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurde auf die Variation dieser Parameter zur Optimierung der Bondergebnisse zurückgegriffen. Damit der Aufwand durch die Anzahl der Versuche und die Komplexität der Analyse der Ergebnisse nicht zu hoch wird, wurde versucht, die Anzahl der zu variierenden Parameter gering zu halten. Daher wurden nur die Parameter variiert, die direkten Einfluss auf die Performance der beim Bonden genutzten Anregung haben. Die Bondkraft, die Bondleistung und die Bondzeit sind Größen, die unmittelbar auf die Anregung und damit auch auf den Verbindungsprozess einwirken. Die Temperatur hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Qualität der Bondverbindung, wird aber auf die Auswahl einer geeigneten Anregung keinen Einfluss haben. Daher wird die Temperatur bei allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen konstant auf 200 °C gehalten.

Neben den Bondparametern spielen noch eine Reihe anderer Faktoren für die Qualität der Bondverbindung eine wichtige Rolle, die konstant gehalten werden müssen. Diese Faktoren sind in äußere und innere Einflussfaktoren zu unterteilen. Die äußeren Faktoren sind neben gleichen klimatischen Bedingungen (Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur etc.) auch die Reinheit des zu verarbeitenden Materials oder die Art und Weise der Substratklemmung. Ferner muss eine für alle Versuche gleichbleibende Qualität der Gold-Bumps und des Keramiksubstrates sichergestellt sein. Zu den inneren Faktoren zählt zum Beispiel die Kalibrierung der Maschine. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk den Geschwindigkeiten und den Beschleunigungen der Bewegungsabläufe, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die beim Aufsetzen ausgeübte Vorverformung der Bumps haben.

Die getroffene Auswahl an unterschiedlichen Faktoren, die die Qualität der Bondverbindungen beeinflussen können, stellt nur die wesentlichen Einflussgrößen für das US-Flipchip-Bonden dar. Daher wurde durch geeignete Maßnahmen versucht, die Bedingungen für die Versuche hinsichtlich der nicht berücksichtigten Größen so konstant wie möglich zu halten.

Im folgenden sind diese Maßnahmen aufgezählt:

- Durchführung aller Versuche in einem engen Zeitraum, damit der Kontaminationsgrad und die Oberflächenbeschaffenheit konstant gehalten werden kann.
- Die Versuchsmaterialien wurden zwischen den Versuchsreihen in einem mit Stickstoff gefüllten Klimaschrank aufbewahrt.
- Alle Chips und Substrate wurden aus einem Fertigungslos entnommen, damit mögliche Schwankungen im Fertigungsprozess (z.B. Beschaffenheit oder Dicke der Metallisierung) ausgeschlossen werden können.
- Die genutzte Maschine wurde für den Zeitraum der Versuche nicht zur Serienproduktion eingesetzt und es wurden keine anderen Versuche mit der Maschine durchgeführt.
- Vor jedem Versuch wurden die Logdateien kontrolliert bzw. verglichen. Alle zusätzlich durchgeführten Kalibrierungen oder Änderungen der Maschinendaten werden automatisch in diesen Dateien hinterlegt und hätten die Wiederholung aller bis zu diesem Zeitpunkt abgeschlossenen Versuche bedeutet.

Festlegung der einzelnen Versuchsbedingungen

Bei der Durchführung der Versuche werden die Bondkraft, die Bondleistung und die Bondzeit variiert. Alle weiteren Einflussfaktoren sollen konstant gehalten werden.

7.2.5 Durchführung der Versuche

Als variable Größen wurden für die Versuche die Bondkraft, die Bondleistung und die Bondzeit festgelegt.

Der wichtigste Aspekt dieses Teilschrittes der DOE ist die Festlegung der Anzahl der durchzuführenden Versuche und die Wahl der Parameter. Damit die Anzahl der Versuche überschaubar gehalten wird, wird auf eine Methode zur Erstellung einer Versuchsmatrix zurückgegriffen. Die gewählte Methode ist die Analysis of Variance-Methode, oder kurz Anova-Methode [65]. Diese Methode ermöglicht nicht nur eine geschickte Auswahl an unterschiedlichen Parameterkombinationen zu erstellen, sondern auch die gewonnenen Daten zu analysieren. Mit Hilfe der Anova-Methode konnte unter Berücksichtigung der drei unabhängigen Bondparameter Bondkraft, Bondleistung und Bondzeit eine Versuchsmatrix mit neun durchzuführenden Versuchen ermittelt werden. Pro Versuch wird die Anzahl der herzustellenden Verbindungen auf 26 Chips beschränkt, da dies der Zahl der Bondpositionen auf einem Substrat entspricht. Alle neun Versuchsreihen mit je 26 Chips wurden hintereinander durchgeführt und anschließend ausgewertet.

Zur Auswertung wurde eine fertig konfigurierte Vorlage eines handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramms genutzt. Diese Vorlage enthält eine für diese Versuche angepasste Eingabemaske und liefert nach Eingabe der Parameter die durchzuführenden Versuchskombinationen. Die für die jeweilige Anregung ausgewählten Parameter und deren Kombination sind in den späteren Abschnitten dargestellt. Die vorgegebenen Parameter für die eindimensionale Anregung wurden auf Basis der durch die Anwender der Maschine während der Serienfertigung gewonnenen Erfahrungen festgelegt.

Durchführung der Versuche

Unter Verwendung der Anova-Methode wird das Versuchsvolumen auf neun Versuchsreihen mit je 26 Chips pro Anregung festgelegt.

7.2.6 Analyse der Versuchsdaten

Bevor eine Analyse der Versuchsdaten durchgeführt werden kann, müssen erst die relevanten Qualitätsmerkmale kontrolliert bzw. dokumentiert werden. Diese wurden im Abschnitt 7.2.3 wie folgt festgelegt: Der Chip muss mit einer definierten Verformung und Festigkeit, ohne Beschädigung und unter Sicherstellung der elektrischen Funktion verarbeitet werden.

Die Verformung wird während des Verbindungsprozesses mit Hilfe der Software der Fertigungsmaschine aufgezeichnet und liegt nach dem Versuch als Datenmatrix vor. Zur Ermittlung der Scherwerte wird ein in der Industrie eingesetzter Scher- und Pulltester

eingesetzt. Zur Beurteilung der Beschädigung wird mit Hilfe eines Lichtmikroskopes der Chip vor und nach dem Schervorgang untersucht. Für die einfachere Auswertung der Ergebnisse wird ein Fehlercode eingeführt. Eine "0" bedeutet keine Beschädigung eine "1" eine Beschädigung des Chips. Da jegliche Beschädigung das Bauteil untauglich macht, wird der Grad der Beschädigung nicht bewertet. Neben der Beurteilung der Beschädigungen am Chip wird mit dem Lichtmikroskop auch der Versagensfall (Bumpübertragung) nach dem Schertest überprüft. Entsprechend wird auch für dieses Qualitätsmerkmal ein Fehlercode definiert. Wurden alle Bumps in der gewünschten Weise übertragen, wird ein Wert von "0" eingetragen. Ein Wert von "8" sagt aus, keiner der 8 Bumps des Chips wurde übertragen. Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen werden in die an die Randbedingungen und die Art der Qualitätsmerkmale angepasste Vorlage zur Anova-Analyse eingetragen. Beispiele für die Form der Vorlage der Analyse und eine geeignete Darstellung der Ergebnisse werden den einzelnen Anregungen zugeordnet im Abschnitt 7.3 dargestellt.

Analyse der Versuchsdaten

Die Ergebnisse der Versuchsreihen werden mit Hilfe der Anova-Methode analysiert.

7.2.7 Interpretation der Ergebnisse

Liegen alle Ergebnisse der neun Versuchsreihen mit den vorher festgelegten Parametern vor, liefert die Analyse zwei Möglichkeiten, die so gewonnenen Daten auszuwerten. Zum einen kann die Interpretation direkt an den Zahlenwerten durchgeführt werden, oder die zusätzlich angebotene grafische Darstellung wird genutzt. Da die grafische Darstellung einen schnelleren Überblick über den Einfluss der verschiedenen Bondparameter auf die gewählten Qualitätsmerkmale bietet, wird diese Form der Präsentation der Analyseergebnisse zur Interpretation genutzt. An dieser Stelle sei beispielhaft auf die Darstellung der Analyse für die eindimensionale Anregung in den Abbildungen 58, 59 und 60 verwiesen. Die eigentliche Interpretation der Daten wird in den jeweiligen Abschnitten zu den beiden Anregungskonzepten vorgenommen.

Interpretation der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt anhand der durch die Analysevorlage erzeugten grafischen Darstellungen.

7.2.8 Validierung der gewonnenen Erkenntnisse

Zur Validierung der gewonnenen Erkenntnisse wird eine weitere zehnte Versuchsreihe unter gleichen Randbedingungen durchgeführt. Diese Versuchsreihe wird entsprechend der in den vorherigen Abschnitten vorgegebenen Weise ausgewertet. Das Ziel dieser

letzten Versuchsreihe ist es, den Nachweis zu erbringen, dass der gefundene Parametersatz alle Qualitätsmerkmale erfüllt. Auf jeden Fall sollte das Bondergebnis den vorherigen Interpretationen der Analyse der neun Versuchsreihen entsprechen.

Bei dieser abschließenden Versuchsreihe wird eine größere Anzahl (104) an Verbindungen erzeugt, um die statistische Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Die Ergebnisse der Versuchsreihen zur Validierung der vorher gewonnenen Erkenntnisse werden den einzelnen Anregungen zugeordnet im Abschnitt 7.3 dargestellt.

Validierung der gewonnenen Erkenntnisse

Eine Versuchsreihe zur Validierung der ausgewählten Bondparameter mit 104 Verbindungen wird durchgeführt und ausgewertet.

7.3 Optimierung der Parameter für die ein- bzw. zweidimensionale Anregung

Nach Abschluss der Beschreibung der Vorgehensweise und der Art wie die Versuche durchgeführt und ausgewertet werden sollen, werden in diesem Abschnitt die aufgezeichneten Daten, die Analyse der Daten und die Ergebnisse der Validierung der optimierten Parameter vorgestellt. Im ersten Abschnitt 7.3.1 werden die Optimierung der Bondparameter und die daraus gewonnenen Ergebnisse einer eindimensionalen Anregung vorgestellt. Diese erzielten Bondergebnisse dienen als Referenz für die Bewertung der zweidimensionalen Anregung. Die Versuche und die Ergebnisse der zweidimensionalen Anregung sind in Abschnitt 7.3.2 beschrieben.

Da die ersten Punkte der Versuchsplanung in den Abschnitten zuvor für die Versuche mit beiden Anregungen allgemeingültig dargestellt wurden, wird im weiteren Verlauf der Arbeit nur auf die letzten vier Punkte der Vorgehensweise bei der DOE getrennt eingegangen.

7.3.1 Die eindimensionale Anregung

In diesem Abschnitt werden die Durchführung und die Ergebnisse der Versuchsreihen mit einer eindimensionalen Anregung diskutiert. Zur Anwendung kommt das in Abschnitt 6.1 beschriebene und in Abbildung 40 dargestellte US-Werkzeug. Jedoch wird für die eindimensionale Anregung nur eine der beiden rechtwinkelig zueinander angeordneten US-Werkzeuge genutzt und mit einer Anregespannung angesteuert. Bei der eindimensionalen Anregung wird das US-Werkzeug entsprechend einem US-Drahtbondprozess in Resonanz betrieben. D.h. der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ist $\phi = 0^\circ$.

Durchführung der Versuche

Als Grundlage für die Versuche mit der eindimensionalen Anregung wurden für die Bondparameter Erfahrungswerte der Prozessingenieure der Hesse & Knipps GmbH und der Prozessleitfaden eines Fertigers solcher Produkte mit ähnlichen US-Werkzeugen gewählt. Mit Hilfe dieser Informationen konnten die in Tabelle 15 dargestellten Versuchsreihen definiert werden. Die für die im nächsten Abschnitt folgende Analyse notwendigen und im vorherigen Abschnitt beschriebenen Qualitätsmerkmale sind in den letzten vier Spalten dieser Tabelle zusammengefasst.

V	Leistung [W]	Zeit [ms]	Kraft [N]	Bumpüber- tragung	Scher- kraft [cN]	Verformung [μm]	Cratering
1	1,8	300	2	6,0	371,77	-17,8	0,2
2	1,8	500	4	5,8	508,24	-21,2	0,2
3	1,8	700	6	4,6	680,99	-24,6	0,1
4	2,4	300	4	6,2	543,77	-22,9	0,1
5	2,4	500	6	5,2	688,83	-26,0	0,1
6	2,4	700	2	6,5	591,80	-22,9	0,0
7	3	300	6	4,4	801,37	-29,1	0,4
8	3	500	2	5,1	763,74	-24,5	0,2
9	3	700	4	4,7	793,50	-26,7	0,2

Tabelle 15: Bondparameter und die über 26 Versuche erzielten Mittelwerte der Qualitätsmerkmale bei eindimensionaler Anregung

Analyse der Versuchsdaten

Die neun definierten Versuchsreihen wurden wie in den Abschnitten vorher festgelegt durchgeführt. Dabei wurden die Werte für die einzelnen Qualitätsmerkmale ermittelt. Beispielhaft werden an dieser Stelle die Ergebnisse der Versuchsreihe V8 diskutiert. Die Schar an Verformungsverläufen, die während der Versuche aufgezeichnet wurden, ist in dem linken Bild der Abbildung 56 zu sehen. Die gestrichelte Linie in diesem Bild stellt den geforderten Mittelwert von $25 \mu\text{m}$ und die beiden fett gedruckten Linien die obere und die untere Spezifikationsgrenze dar. Es ist ersichtlich, dass nicht alle Verformungsverläufe im gewünschten Toleranzbereich liegen. Mit dem hier diskutierten Parametersatz ergibt sich ein C_{pK} von 0,9. Somit kann dieser Prozess als nicht prozessfähig eingestuft werden.

Bei allen Versuchen wurde nach dem Aufsetzen und vor dem Einschalten der Ultraschallleistung eine Zeitspanne von 10 ms eingefügt. Diese Zeitspanne hat keinen Einfluss auf den Prozess und dient einzig und allein zur besseren Datenerfassung und einer besseren Darstellung der Verformungsverläufe. Dies kann in Abbildung 56 durch

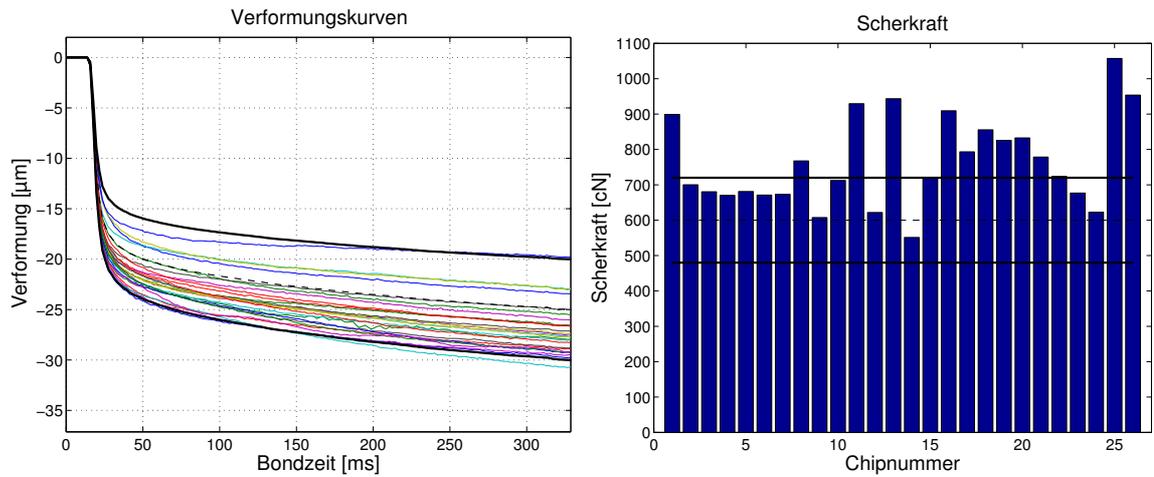


Abbildung 56: Links: Verformungswerte; rechts: Scherwerte von Versuch V8

die verspätet eintretende Verformung nachvollzogen werden. Die durch das Aufsetzen verursachte Vorverformung kann, wie schon in Abschnitt 7.1.1 diskutiert, nicht in dieser Grafik dargestellt werden, da prozessbedingt erst nach dem Auslösen des Touch Down-Signals die Verformung gemessen werden kann.

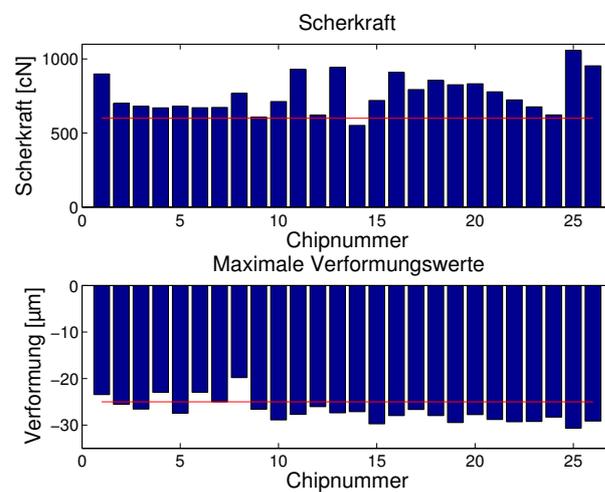


Abbildung 57: Verformungswerte und Scherwerte bei eindimensionaler Anregung

Der rechte Graph der Abbildung 56 zeigt die nach dem Fertigungsprozess durch den Schertest ermittelten Scherwerte. Auch hier stellt die gestrichelte Linie den geforderten Mittelwert (600 cN) der Scherkraft und die zwei durchgezogenen Linien den Bereich für die zulässige Abweichung bezogen auf die Spezifikationsgrenzen dar. Das Ergebnis mit $C_{pK} = 0,46$ für die Scherwerte liegt ebenfalls nicht im festgelegten Qualitätsbereich von einem $C_{pK} = 1,33$.

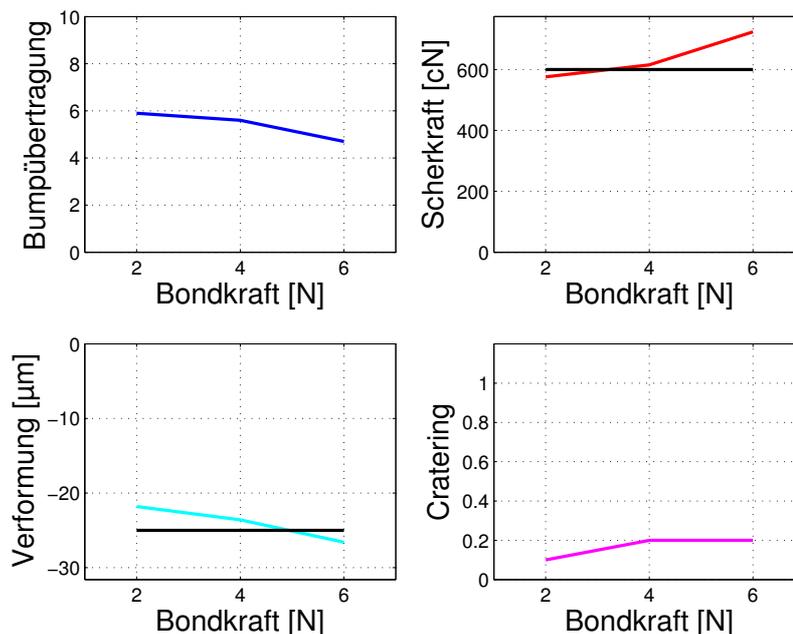


Abbildung 58: Einfluss der Bondkraft bei eindimensionaler Anregung

Während der Durchführung und der Auswertung der Versuche kam die Frage auf, wie und ob die Verformung und die Scherwerte korrelieren. Sollte dies der Fall sein, so könnte anhand der Verformung der Scherwert abgeschätzt werden und die Durchführung des Schertests wäre für alle weiteren Versuche nicht notwendig. Abbildung 57 zeigt grafisch die gemessenen Verformungen und die ermittelten Scherwerte der Versuchsreihe V8 bezogen auf ihre Position. Mit Hilfe dieser Darstellung lassen sich die Verformungswerte den einzelnen Scherwerten zuordnen. Es ist offensichtlich, dass die Werte nicht korrelieren. Es gibt keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen dem Grad der Verformung beim Verbindungsprozess und dem zugehörigen Scherwert.

Interpretation der Ergebnisse

Unter Verwendung des DOE-Tools wurden die Daten ausgewertet und in den Abbildungen 58, 59 und 60 grafisch dargestellt. Diese Form der Darstellung ermöglicht es, auf einfache Weise den Zusammenhang zwischen den variierten Bondparametern und den vier festgelegten Qualitätsmerkmalen zu erkennen.

Zuerst wird der Einfluss der Bondkraft auf die Qualitätsmerkmale beurteilt. Dazu werden die schon angesprochenen Graphen (hier Abbildung 58) hinzugezogen. Das wichtigste Qualitätsmerkmal ist das Cratering. Tritt bei den Verbindungen häufig ein Cratering auf, sind alle anderen Qualitätsmerkmale vernachlässigbar. Aus diesem Grund scheint eine Bondkraft von $F = 2 \text{ N}$ die richtige Wahl zu sein. Die Wahl dieser Bondkraft bestätigt sich nicht beim Betrachten der Bumpübertragung. Die höchste Anzahl an übertragenen Bumps wurde bei Versuchen mit einer Bondkraft von $F = 6 \text{ N}$ erreicht. Dagegen verhält sich die Scherkraft in Bezug auf die ausgewählte Bondkraft bei einem Wert von 4 N am geeignetsten, da hier der angestrebte Wert von 600 cN erreicht wird. Die erreichte Verformung entspricht bei einer Bondkraft von 6 N dem gewünschten Wert von $25 \mu\text{m}$. Da das Cratering das wichtigste Qualitätsmerkmal ist, wird eine Bondkraft von $F = 2 \text{ N}$ gewählt, obwohl die Bumpübertragung nicht optimal ist.

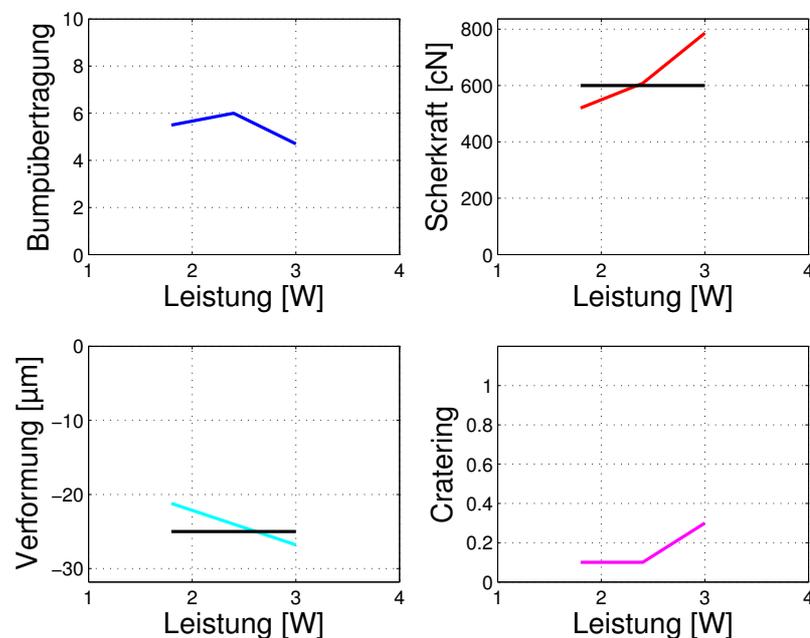


Abbildung 59: Einfluss der Leistung bei eindimensionaler Anregung

Beim Betrachten der Graphen in Abbildung 59 zur Abhängigkeit der Bondergebnisse von der Leistung des Ultraschalls fällt auf, dass die beiden gewählten Leistungswerte $P = 1,8 \text{ W}$ und $P = 2,4 \text{ W}$ die Ansprüche auf ein geringes Cratering erfüllen. Eine gute Bumpübertragung bei den Ergebnissen mit der höchsten Leistung würde für die Wahl dieser Größe sprechen. Auch der Graph für die Abhängigkeit der Scherkraft von der Leistung hat im betrachteten Intervall sein Maximum von $28 \mu\text{m}$ bei $P = 3 \text{ W}$. Da jedoch eine maximale Verformung von $25 \mu\text{m}$ angestrebt wird, führt der Verlauf der Verformung in Abhängigkeit der Leistung schließlich zur Wahl von $P = 2,4 \text{ W}$.

Als letzter Parameter muss die Bondzeit festgelegt werden. Es spiegelt sich in den Graphen in Abbildung 60 ein ähnlicher Verlauf wie beim Einfluss der Leistung wider. Zur Minimierung des Craterings darf nur eine Bondzeit von $T = 700 \text{ ms}$ gewählt werden. Dieser Wert für die Bondzeit wird durch die beste Bumpübertragung, die höchste Scherkraft und einer nahe an einem Wert von $25 \mu\text{m}$ liegenden Verformung bestätigt.

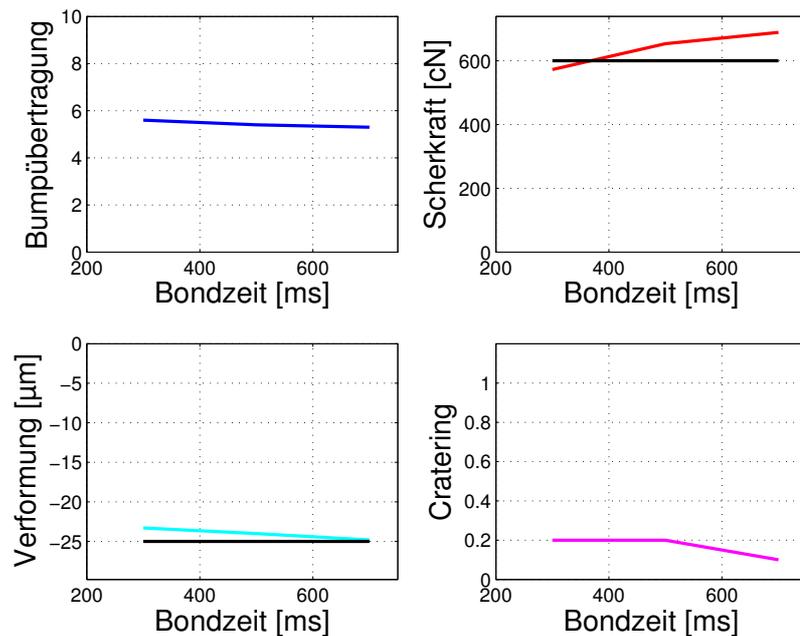


Abbildung 60: Einfluss der Bondzeit bei eindimensionaler Anregung

Tabelle 16 zeigt zusammenfassend die zur Validierung ermittelten Parameter, die der Versuchsreihe V6 entsprechen.

Wie sowohl der Tabelle 17 als auch der Abbildung 61 zu entnehmen ist, erreichen die Ergebnisse mit einer eindimensionalen Anregung bis auf die Bumpübertragung die

Leistung [W]	Zeit [ms]	Kraft [N]
2,4	700	2

Tabelle 16: Optimierte Bondparameter

gewünschten Qualitätsziele. Es wird mit den optimierten Parametern eine durchschnittliche Bumpübertragung von 2 Bumps erreicht (8 bedeutet kein Bump übertragen), ohne dabei einen Ausfall durch Cratering zu generieren. Das definierte Qualitätsmerkmal alle Bumps zu übertragen wurde damit nicht erreicht. Die Versuche zeigen, dass es mit einer eindimensionalen Anregung nicht möglich ist, eine komplette Bumpübertragung zu erreichen. Somit ist das hier erreichte Ergebnis bzgl. der Bumpübertragung das bestmögliche Ergebnis. Die Verformung hat den gewünschten Wert von $25 \mu\text{m}$ mit $22,7 \mu\text{m}$ fast erreicht. In der gezeigten Abbildung ist ein sehr enger Verlauf der Verformungsschar zu erkennen. Eine ähnlich geringe Standardabweichung stellt sich bei den Scherkräften ein. Die erreichte Festigkeit liegt im Bereich der Scherkräfte, die während der Serienfertigung mit einer eindimensionalen Anregung erreicht werden. Es wird auch die Forderung nach einem Prozessfähigkeitsindex von $C_{pK} \geq 1,33$ eingehalten. Für die Verformung ergibt sich ein Wert von $C_{pK} = 1,33$ und für die Scherkraft ein $C_{pK} = 1,34$.

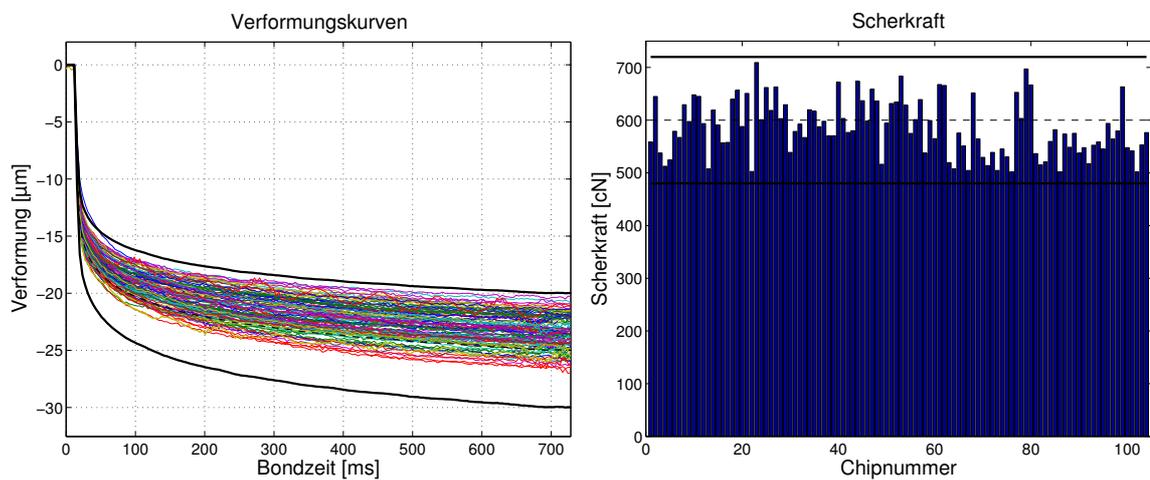


Abbildung 61: Links: Verformungswerte; rechts: Scherwerte bei transversaler Anregung

7.3.2 Die zweidimensionale Anregung in der Ebene

Nach den durchgeführten Versuchen mit der eindimensionalen Anregung werden in diesem Abschnitt die Versuche mit zweidimensionaler Anregung vorgestellt. Für dieses neu

Ergebnisse	V10
Bumpübertragung	5,9
Scherwert [cN]	585,4
Standardabweichung [cN]	26,1
Verformung [μm]	-22,7
Standardabweichung [μm]	1,01
Cratering	0,01

Tabelle 17: Ergebnisse bei eindimensionaler Anregung mit optimierten Bondparametern

entwickelte Werkzeug existieren hinsichtlich der Prozessparameter keine Erfahrungswerte, deshalb wurden für die Parameter Bondkraft und Bondzeit die gleichen Werte genutzt, wie bei der eindimensionalen Anregung.

V	Leistung [W]	Zeit [ms]	Kraft [N]	Bumpübertragung	Scherkraft [cN]	Verformung [μm]	Cratering
1	0,6	300	2	0,8	535,7	-24,2	0,4
2	0,6	500	4	0,0	749,2	-24,7	0,2
3	0,6	700	6	0,2	482,0	-24,8	0,3
4	1,4	300	4	0,0	648,5	-28,9	0,3
5	1,4	500	6	0,0	506,8	-29,0	0,3
6	1,4	700	2	0,0	941,0	-28,9	0,2
7	2,2	300	6	0,0	499,0	-29,3	0,1
8	2,2	500	2	0,0	785,1	-28,2	0,2
9	2,2	700	4	0,0	779,7	-29,8	0,2
10	1,4	500	2	0,0	604,0	-25,8	0,0

Tabelle 18: Bondparameter und die über 26 Versuche erzielten Mittelwerte der Qualitätsmerkmale bei kreisförmiger Anregung

Ausgehend von der Nutzung des gleichen US-Werkzeuges scheint diese Annahmen als sinnvoll. Die Ultraschalleistung wurde gegenüber der Leistung bei einer eindimensionalen Anregung gemäß der aufgestellten These reduziert. Tabelle 18 zeigt zusammenfassend alle Bondparameter der Versuche V1-V9 und die durch die Interpretation der Ergebnisse hergeleiteten Parameter für die Versuchsreihe V10.

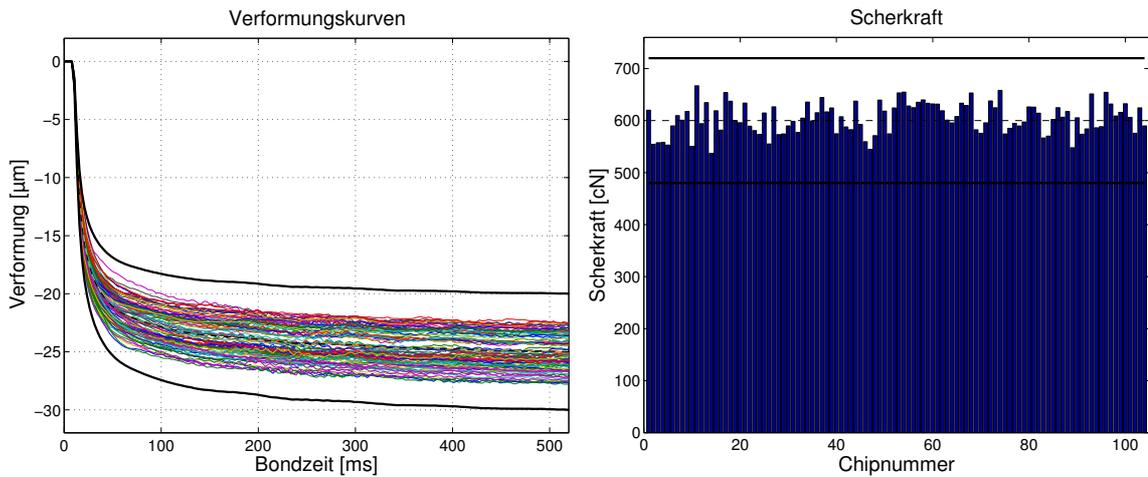


Abbildung 62: Links: Verformungswerte; rechts: Scherwerte bei kreisförmiger Anregung

Die in Tabelle 18 gezeigten Ergebnisse der zur Validierung der optimierten Parameter durchgeführten Versuchsreihe V10 erfüllen die Qualitätsmerkmale in allen Punkten. Trotz einer sehr hohen Festigkeit der Verbindungen ist kein Bauteil beschädigt worden. Es wurden alle Bumps des Chips nach dem Schervorgang auf das Substrat übertragen. Dabei stellte sich bei genauerer Untersuchung der Bumps ein optimales Versagensbild dar, wie es in Bild III. in Tabelle 14 gezeigt wird. Der gewünschte Mittelwert der Verformung wurde mit $25,88 \mu\text{m}$ leicht übertroffen. Dabei ist in Abbildung 62 zu erkennen, dass sowohl die Verformung als auch die Scherkräfte in den vom Mittelwert geforderten Grenzen liegen. Bei einer genaueren Auswertung der Abweichungen der Verformung und der Scherkraft konnten Werte von einem $C_{pK} = 1,45$ für die Verformung und einem $C_{pK} = 1,36$ für die Scherkraft errechnet werden.

7.4 Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse

Zur Bewertung der gewonnenen Ergebnisse sind in Tabelle 19 noch einmal die geforderten und die erreichten Werte für die einzelnen Qualitätskriterien aufgelistet. Beim Betrachten der dort gezeigten Werte ist zu erkennen, dass die zweidimensionale Anregung mit einer gegenüber der eindimensionalen Anregung um 40 % reduzierten Leistung die gleichen Qualitätskriterien erfüllt. Auch wird das Qualitätsmerkmal der Bumpübertragung bei der zweidimensionalen Anregung voll erreicht. Unter Verwendung des optimierten Parametersatzes wurden bei allen Chips alle 8 Bumps auf das Substrat übertragen, ohne nach dem Schertest irgendwelche Ausbrüche an den Chips zu hinterlassen. Beim eindimensionalen Fall ist nur eine 25 %-ige Übertragung der Bumps erreicht worden. Es wurden bei beiden Anregungsformen die geforderten Prozessfähigkeitsindizes erreicht bzw. bei der zweidimensionalen Anregung sogar übertroffen.

Qualitätsmerkmale	Qualitätswerte	Anregung	
		transversale	zweidimensionale
Bumpübertragung	0	5,9	0
Cratering	0,0	0,0	0,0
Scherwert [cN]	600	585,4	604,0
Stand.-Abw. [cN]		26,1	28,7
C_{pK}	1,33	1,34	1,36
Verformung [μm]	-25,0	-23,9	-25,8
Stand.-Abw. [μm]		1,0	1,0
C_{pK}	1,33	1,33	1,45
Bondparameter			
Bondkraft [N]		2	2
Bondleistung [W]		2,4	1,4
Bondzeit [ms]		700	500

Tabelle 19: Zusammenfassung der Ergebnisse mit optimierten Bondparametern

Beim Betrachten der in Tabelle 19 aufgeführten Leistungen könnte der Eindruck entstehen, dass die Leistung bei zweidimensionaler Anregung bei Addition der beiden Kanäle mit $2 \times 1,4$ W über dem Wert der Leistung beim eindimensionalen Bonden liegt. Dazu muss der Begriff Leistung in diesem Fall näher erläutert werden. Es handelt sich hierbei nicht um eine Angabe der elektrischen Leistung, sondern viel mehr um einen Parameter der genutzten Fertigungsmaschine. Mit der Angabe Leistung wird bei diesem Fertigungsautomaten im Sinne der elektrischen Ansteuerung eine Spannung vorgegeben. Es handelt sich also nicht um eine Vorgabe der dem System zur Verfügung gestellten elektrischen Leistung, sondern nur um einen der Spannungsamplitude proportionalen Faktor. Somit entspricht ein Wert von 1,4 W bei zweidimensionaler Anregung gegenüber einem Wert von 2,4 W bei eindimensionaler Anregung einer um den Faktor 0,58 geringeren Amplitude der Anregespannung.

Somit machen die hier gezeigten Daten deutlich, dass die in Abschnitt 5.3.4 aufgestellten Thesen in Bezug auf eine zweidimensionale Anregung beim Verbinden von Chips mit dem US-Flipchip-Verfahren durch die Versuche bestätigt werden. Es ist mit der zweidimensionalen Anregung möglich, die Chips mit einer geringeren Amplitude ohne Beschädigung bei einer gleichen Festigkeit zu bonden. Dies entspricht der aufgestellten These bezüglich der Vermeidung des Slip-Stick-Effektes, der Bewegung auf Bahnen höherer Ordnung und der daraus folgenden Berechnung der Energiebilanzen bei ein- bzw. zweidimensionaler Anregung.

8 Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde der Stand der Technik für unterschiedliche Bondverfahren, der Ultraschallwerkzeuge zum Bonden von Draht- oder Flipchip-Verbindungen und der Qualitätsprüfung von Ultraschallwerkzeugen und Bondverbindungen dargestellt.

Bei der Beschreibung der Bondverfahren wurden die Verbindungsverfahren näher erläutert, bei denen zur Verbindungsbildung Ultraschallenergie genutzt wird. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das für diese Arbeit interessante Ultraschall-Flipchip-Bonden gelegt. Die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens auch im Vergleich zu den anderen Verbindungsverfahren wurden untersucht und gegenübergestellt. Im Rahmen der Analyse der Ultraschallwerkzeuge wird nach der Beschreibung des Aufbaus eines Ultraschallwerkzeuges ein Überblick über die heute in der Halbleiterfertigung eingesetzten Werkzeuge gegeben. Dabei wird zwischen longitudinaler, transversaler oder mehrdimensionaler Anregung unterschieden. Der letzte Abschnitt des ersten Teils der Arbeit gibt einen Überblick über die Qualitätsprüfung von Ultraschallwerkzeugen und von Bondverbindungen. Bei den Qualitätsprüfverfahren für die Ultraschallwerkzeuge werden die unterschiedlichen Messaufbauten und die Analyse der durchgeführten Messungen beschrieben. Die Darstellung der Prüfverfahren der Qualität einer Bondverbindung erstreckt sich von den zerstörenden hin zu den nichtzerstörenden Verfahren. Dabei wird auch hier besonderes Augenmerk auf die Prüfverfahren einer Flipchip-Verbindung gelegt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Ansatz zur Reduzierung der Belastung eines Chips beim Ultraschall-Flipchip-Bonden durch Veränderung des zur Verbindungsbildung genutzten Ultraschallwerkzeuges entwickelt. Dazu werden zuerst die Anforderungen an ein solches Werkzeug zusammengefasst. Daran anschließend wird der heute genutzte eindimensionale Ultraschall-Flipchip-Prozess untersucht und mit Hilfe eines vorliegenden Modells für das eindimensionale Drahtbonden abgebildet. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und mit der Herleitung der während des Bondens bei eindimensionaler Anregung geleisteten Arbeit, wird eine Anregungsform des Ultraschallwerkzeuges zur Reduzierung der Belastung eines Chips beim Ultraschall-Flipchip-Bonden hergeleitet. Es werden dabei drei Ansätze herausgearbeitet und zwei dieser Ansätze weiter verfolgt.

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Ansätze zur Reduktion der Belastung eines Chips beim Ultraschall-Flipchip-Bonden lauten:

- Variation der Schweißzeit
- Vermeidung des Stick-Slip-Effektes
- Bewegung auf Bahnen höherer Ordnungen (z. B. Kreis)

Aus den ausgewählten Ansätzen wird als vielversprechendes Verfahren die zweidimensionale Anregung eines Ultraschallwerkzeuges abgeleitet. Nach einer analytischen Berechnung der bei zweidimensionaler Anregung zu leistenden Arbeit, wird ein Modell für das zweidimensionale Ultraschall-Flipchip-Bonden entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells können die analytisch berechneten Größen bestätigt werden.

Zum Abschluss der Arbeit wird ein für eine zweidimensionale Anregung geeignetes Ultraschallwerkzeug vorgestellt und die möglichen Ansteuerungskonzepte diskutiert, bevor ein experimenteller Vergleich zwischen der ein- und der zweidimensionalen Anregung erfolgt. Während dieses Vergleiches wird für beide Versuchsreihen das gleiche Ultraschallwerkzeug genutzt. Im Fall der eindimensionalen Anregung wird lediglich eines der beiden orthogonal angeordneten Ultraschallwerkzeuge angeschlossen, die Anschlüsse des zweiten Ultraschallwerkzeuges bleiben „offen“. Für beide Anregungsformen wurde mit Hilfe einer DOE (Design of Experiments) ein optimaler Parametersatz für ein Musterprodukt ermittelt und verglichen. Dabei werden die zuvor analytisch und durch die Simulation ermittelten Werte für die Reduzierung der Amplitude und somit der Belastung des Chips bestätigt.

Ausblick

Wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist, dass bei Vorgabe der zur Herstellung einer Verbindung zwischen einem Chip und einem Substrat benötigten Energie die mechanische Belastung von Chip und Kontaktbumps derart reduziert werden kann, dass das Verfahren für die Serienfertigung einsetzbar wird. Die vorgestellte Lösung eröffnet die Möglichkeit, Chips mit größerer Fläche und einer größeren Zahl von Anschlusskontakten mit dem Ultraschall-Flipchip-Verfahren zu montieren. Hierzu müssen weitere Untersuchungen zur Festigkeit und Größe der Kontaktstellen (Studbumps) durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Toray Engineering Co. *Flip Chip Bonding and Underfill System*. <http://www.electroiq.com/index/display/packaging-article-display/285252/articles/advanced-packaging/new-products/2010/02/flip-chip-bonding-and-underfill-system.html>, 2010.
- [2] J. H. Lau. *Flip Chip Technologies*. McGraw-Hill, 1995. ISBN 0-07-036609-8.
- [3] J. H. Lau. *Low Cost Flip Chip Technologies*. McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-135141-8.
- [4] W. Scheel. *Baugruppentechologie der Elektronik*. Verlag der Technik, Berlin, 2004. ISBN 3-341-01234-6.
- [5] Q. Tan. *Longitudinal Thermosonic Bonding for Flip-Chip-Assembly*. PhD thesis, University of Colorado, 1997. UMI 9812932.
- [6] T. S. McLaren; S. Y. Kang; W. Zhang; Y.C. Lee. Thermosonic bonding for flip-chip assembly. In *Advancing Microelectronics*, pages 14–16, 1994. Vol. 21, Nr. 4.
- [7] T. S. McLaren. *Technology and Compression Modeling for Thermosonic Flip-Chip Bonding*. PhD thesis, University of Colorado, 1998. UMI 9838386.
- [8] J. H. Lau. *Chip On Board-Technologies For Multichip Modules*. Van Nostrand Reinhold, 1994. ISBN 0-442-01441-4.
- [9] U. Geissler. *Übung Bonden*. Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Lehrstuhl Mikrosystemtechnik, 1997.
- [10] The Swedish Institute of Production Engineering Research. *Flip-Chip Technology*. <http://extra.ivf.se/ngl/B-Flip-Chip/ChapterB.htm>, 2001.
- [11] Yole Development. *Flip-Chip - Technologies, Applications, Market report April 2011*. <http://www.i-micronews.com>, 2011.
- [12] R. R. Tummala; E. J. Rymaszewski. *Microelectronics Packaging Handbook*. Van Nostrand Reinhold, 1989. New York.
- [13] V. C. Marcotte; N. G. Koopman; P. A. Totta. Review of flip chip bonding. In *ASM Proc. Int. Elec. Materials and Processing Congress*, pages 73–81, April 1989. Philadelphia.
- [14] D. J. Pedder. Flip chip solder bonding for microelectronic applications. In *Hybrid Circuits*, pages 4–7, Januar 1988. Nr. 15.

- [15] C. A. Armiento; A. J. Negri; M. J. Tabasky; R. A. Boudreau; M. A. Rothman; T. W. Fitzgerald. Gigabit transmitter array modules on silicon waferboard. In *IEEE Trans. on Comp. Hybrids and Manuf. Tech.*, pages 1072–1079, Dezember 1992. Vol. 15, Nr. 6.
- [16] W. Lin; Y.C. Lee; K. M. Johnson. Study of soldering for vlsi/flc spatial light modulators. In *IEEE Elec. Comp. and Tech. Conf.*, Juni 1993. Orlando.
- [17] D. Suryanarayana; R. Hsiao; T. Gall; J. M. McCreary. Enhancement of flip-chip fatigue life by encapsulation. In *IEEE Trans. on Comp. Hybrids and Manuf. Tech.*, pages 218–223, März 1991. Vol. 14, Nr. 1.
- [18] K. Hadata; H. Fujimoto; T. Ochi; Y. Ishida. Led array modules by new technology microbump bonding method. In *IEEE Trans. On Comp. Hyb. And Manuf. Tech.*, Dezember 1990. Vol. 6.
- [19] P. B. Hogerton. Development goals and present status of 3M's adhesive interconnection technology. In *Journal of Electronics Manufacturing*, pages 191–197, Dezember 1993. Vol. 3, Nr. 4.
- [20] N. R. Basavanhally; D. D. Chang; B. Cranston; S. G. Segar. Direct chip interconnect with adhesive conductor films. In *IEEE Trans. on Comp. Hybrids and Manuf. Tech.*, pages 972–976, Dezember 1992. Vol. 15, Nr. 6.
- [21] R. R. Reinke. Interconnection method of liquid crystal driver LSIs by tab-on-glass and board to glass using Ani. In *IEEE Elec. Comp. And Tech. Conf.*, pages 355–361, Mai 1991. Atlanta.
- [22] G. G. Harman. *Reliability and Yield Problems of Wire Bonding in Microelectronics*. N. I. S. T. Washington D.C., 1989.
- [23] W. T. Chen; J. Z. Raski; J. R. Young; D. Y. Jung. Fundamental study of the tape automated bonding process. In *ASME J. of Electronic Packaging*, September 1991. Vol. 113.
- [24] H. Reichl. *Direktmontage: Handbuch für die Verarbeitung ungehäuster ICs*. Springer-Verlag, Berlin, 1998. ISBN 3-540-64203-x.
- [25] RoHS Forum. *Alles über „Bleifrei Löten“*. <http://www.rohs-forum.de/forum/index.php>, 2005.
- [26] WSTS (World Semiconductor Trade Statistics). *WSTS Semiconductor Market Forecast Spring 2012*. <http://www.wsts.org/PRESS/Recent-News-Release>, 2012.

- [27] J. L. Harthoorn. *Ultrasonic Metal Welding*. PhD thesis, University of Eindhoven, 1978.
- [28] Ch. Kauczor. *Entwurf schwach gedämpfter piezoelektrischer Ultraschallsysteme*. PhD thesis, Universität Paderborn, 2008. Heinz Nixdorf Institut, URN urn:nbn:de:hbz:466-20090327020.
- [29] E. Hering; K. Bressler; J. Gutekunst. *Elektronik für Ingenieure*, pages 509–520. Springer-Verlag Berlin, 2001. ISBN 3-540-41738-9.
- [30] R. Best. *Theorie und Anwendung des Phase-locked Loops*. Stuttgart: AT-Fachverlag, 1982.
- [31] D. Ensminger. *Ultrasonics - Fundamentals, Technology, Application*. Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1989.
- [32] J. Koch. *Piezoxide-Eigenschaften und Anwendungen*. Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, 1988. ISBN 3-7785-1755-4.
- [33] Piezofibel. Firmenschrift-Piezsystem Jena, 1999.
- [34] Dr. W. Lehfeldt. *Ultraschall*. Vogel-Verlag Würzburg, 1973. ISBN 3-8023-0060.
- [35] W. Littmann. *Piezoelektrische, resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler*. Universität Paderborn, 2003. Heinz Nixdorf Institut, Band 124.
- [36] Hesse & Knipps GmbH. *Benutzerhandbuch FJ520*, 2008.
- [37] Kulicke & Soffa Industries Inc. *8098 Large Area Ball Bonder - Technical Manual*, 2000.
- [38] R. Furukawa. High pin-count ultrasonic flip-chip bonding and plasma cleaning technology. In *9th Annual KGD Workshop*, September 2002.
- [39] J. Tsujino; H. Yoshihara. Vibration and welding characteristics of high-frequency longitudinal-transverse vibration ultrasonic bonding systems. In *IEEE International Ultrasonics Symposium*, October 5-8 1998.
- [40] J. Tsujino; S. Ihara; Y. Harada; K. Kasahara; Y. Sakamaki. Welding characteristics of coated copper wire specimens using 40 kHz, 60 kHz and 100 kHz ultrasonic complex vibration welding equipments. In *WCU Paris*, September 7-10 2003.
- [41] F. Rudolf. *Prüfverfahren für Bondverbindungen*. Düsseldorf, 1995. 2 Bände.
- [42] G. G. Harman. *Wire Bonding in Microelectronics - Materials, Processes, Reliability, and Yield*. McGraw-Hill, 1997. Second Edition.

- [43] DVS-Merkblatt. *Prüfverfahren für Drahtverbindungen*. Deutscher Verlag für Schweisstechnik, 1996.
- [44] Military Standards. *MIL-Standard 883 C*. Department of Defence, USA, 2005.
- [45] H.-J. Hunger. *Werkstoffanalytische Verfahren*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1995. ISBN 3-342-00430-4.
- [46] H. Blumenauer. *Werkstoffprüfung*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1994. ISBN 3-342-00547-5.
- [47] N. R. Basavanhally; D. D. Chang; B. Cranston; S. G. Segar. Acoustic microscopy (a.m.) applications. In *The 18th International Symposium for Testing And Failure Analysis*, pages 301–306, Oktober 1992.
- [48] S. R. Martell; J. E. Semmens; L. Kessler. *Nondestructive Acoustic Micro Imaging*. Sonoscan, Inc., 1995.
- [49] L. Harms. Prüfstrategien und -verfahren für die mikroelektronische Gerätefertigung. In *7. Symposium Maritime Elektronik, Arbeitskreis Maritime Messelektronik*, pages 132–135, 1992.
- [50] M. Erfurth. Prüfstrategie und Wirtschaftlichkeit beim automatischen Leiterplattentest. In *Feinwerktechnik und Messtechnik*, pages 325–328, 1995.
- [51] M. Weyerer; G. Goldemund. *Prüfbarkeit elektronischer Schaltungen*. Carl Hanser Verlag München, 1988.
- [52] G. Kums; J. van Delft; H. de Vries. Thermosonic bonding of high pin count flip-chips on flexible substrates. In *IMAPS 2005 38th Annual Symposium on Microelectronics*, September 2005.
- [53] G. A. Riley. *Challenges in Flip Chip Assembly*. <http://www.electroiq.com/index/display/packaging-article-display/293849/articles/advanced-packaging/volume-16/issue-4/features/the-back-end-process/challenges-in-flip-chip-assembly.html>, 2008.
- [54] SiliconFarEast.com. *Gallery: Cratering*. <http://www.siliconfareast.com/gallery/cratering.htm>, 2006.
- [55] M. Brökelmann. *Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik*. PhD thesis, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2008. ISBN 978-3-939350-57-6.

- [56] F. Osterwald. *Verbindungsbildung beim Ultraschall-Drahtbonden - Einfluss der Schwingungsparameter und Modellvorstellung*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 1999.
- [57] H. Gaul; M. Schneider-Ramelow; K.-D. Lang; H. Reichl. Predicting the shear strength of a wire bond using laser vibration measurements. In *Proceedings 1. ESTC Dresden (2006)*, pages 719–725, 2006.
- [58] U. Geissler. *Verbindungsbildung und Gefügeentwicklung beim Ultraschall-Wedge-Wedge-Bonden von AlSi1-Draht*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2008. D83.
- [59] M. Mayer. *Microelectronic Bonding Prozess Monitoring by Integrated Sensors*. PhD thesis, ETH Zürich, 2000. ISBN 3-89649-620-4.
- [60] I.N. Bronstein; K.A. Semendjajew; G. Musiol; H. Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch Verlag, 2001. ISBN 3-8171-2005-2.
- [61] S. Hagenkötter. *FPGA-basierter Sinusgenerator zur Optimierung von Ultraschall-Bondverfahren*. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2005. Diplomarbeit.
- [62] Wikipedia Foundation Inc. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. <http://de.wikipedia.org>, 2004.
- [63] G. Taguchi; S Konishi. *Taguchi Methods - Orthogonal Arrays and Linear Graphs*. Center for Taguchi Methods, 1987. ISBN 0-941243-01-X.
- [64] M. Perez-Wilson. *Machine/Process Capability Study*. Motorola Inc., 1989. Motorola.
- [65] P. J. Ross. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw Hill, 1996. ISBN 0-07-053958-8.

A MATLAB[®]-Simulink Blockschaltbild der Reibkraft

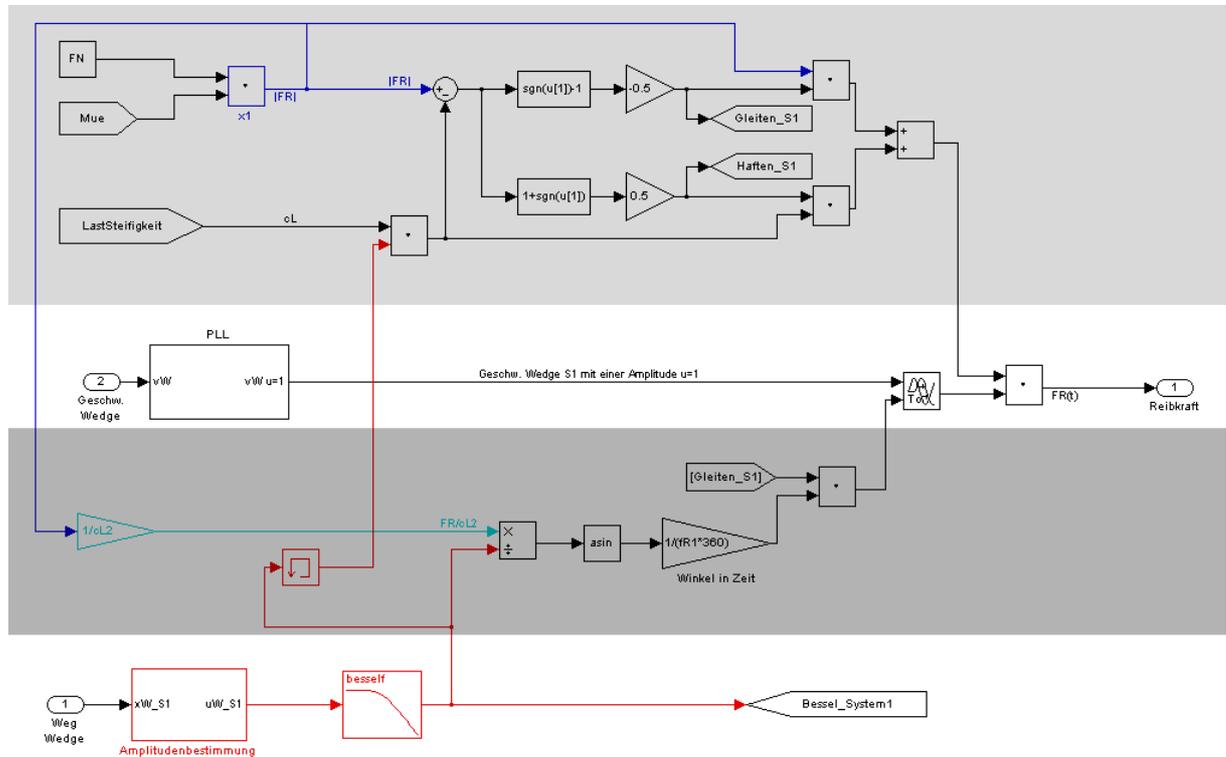


Abbildung 63: MATLAB[®]-Simulink Blockschaltbild der Reibkraftberechnung

Das hier gezeigte Blockschaltbild entspricht der Gleichung 45 bzw. 46. Es ist die Gleichung zur Berechnung der Reibkraft in Richtung eines der beiden Anregungen des zweidimensionalen US-Werkzeuges.

$$F_{Rx} = |\vec{F}_R| \cdot \sin\left(\omega t - \arcsin\left(\frac{F_R}{c}\right)\right) \quad (53)$$

Das Blockschaltbild kann in vier Abschnitte unterteilt werden. Der erste Abschnitt dient zur Erzeugung der Amplitude \hat{F}_{Rx} der Reibkraft. Dabei wird zwischen den beiden Zuständen Haften und Gleiten unterschieden. Im zweiten Abschnitt wird ein der Geschwindigkeit proportionales Signal mit der Amplitude $\hat{u}_{propvW} = 1$ erzeugt. Dieses Signal erhält eine Phasenverschiebung um einen Winkel α , der im dritten Abschnitt berechnet wird. Dieser Winkel entspricht dem in Kapitel 5.5.1 mit Hilfe der Gleichung 40 berechnetem Phasenwinkel zwischen der Reibkraft und der Geschwindigkeit. Der vierte Abschnitt dient zur Erzeugung der Amplitude \hat{u}_{W2D} .