



Spezielle Messtechnik (MST2) – Labor

Laborversuch V3: SAM

Teilnehmer:

Alaa Albasha, Matr. Nr.: 943167
Jan-Manuel Megerle, Matr. Nr.: 942883
Nathan Kirori, Matr. Nr.: 941689
Ahmed EN-NOUR, Matr. Nr.: 937048

MST2_M2 - Team 1

Professor:

Prof. Dr.-Ing. Aylin Bicakci

Fachhochschule Kiel
Sommersemester 2025
Informatik und Elektrotechnik

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Theoretische Grundlagen	3
3 Aufgabenstellung	5
4 Proben und Methoden	5
5 Durchführung	9
6 Ergebnisse	9
6.1 Probe 1	9
6.2 Probe 2	10
6.3 Probe 3	12
7 Zusammenfassung	14
8 Fazit	15
9 Literaturverzeichnis	17

1 Einleitung

In dem letzten Versuch wurde die Anwendung des Rasterelektronenmikroskops (REM) dargestellt und erklärt. Allerdings tritt häufig das Problem auf, dass einige Proben in den inneren Schichten Schäden aufweisen, die mit dem REM nicht erkennbar sind, da es lediglich die Oberfläche analysieren kann.

An dieser Stelle kommt die SAM-Technologie (Scanning Acoustic Microscopy) zum Einsatz, da sie mithilfe von Ultraschallwellen die innere Struktur der Schichten sichtbar machen kann. In diesem Versuch wird dies nun durch praktische Anwendung bewiesen..

2 Theoretische Grundlagen

Das Scanning Acoustic Microscope (SAM), auch bekannt als akustisches Mikroskop, wurde 1974 an der Stanford University entwickelt und stellte das erste Instrument dar, das in der Lage war, ein akustisches Bild zu erzeugen [1].

Das Grundprinzip der SAM basiert auf einem Wandler (Transducer), der Ultraschallwellen erzeugt. Diese werden mithilfe einer akustischen Linse fokussiert und auf die zu untersuchende Probe gerichtet. Beim Auftreffen auf das Material werden die Wellen absorbiert, reflektiert oder gestreut, abhängig von den Eigenschaften der inneren Strukturen [2, 3]. Die reflektierten Wellen werden von Detektoren meist oberhalb oder unterhalb der Probe erfasst und in elektrische Signale umgewandelt.

Diese elektrischen Signale liefern Informationen über materialinterne Eigenschaften wie Schichtdicke, Dichte und Grenzflächenbeschaffenheit [2]. Die verwendeten Frequenzen der Ultraschallwellen sind dabei entscheidend, da sie die Auflösung und Eindringtiefe bestimmen. Je nach Frequenz können innere Strukturen wie Risse, Delaminationen, Lufteinschlüsse oder Hohlräume detektiert werden [3].

Eine Vielzahl von Materialien, die in der industriellen Fertigung verwendet werden etwa Silizium, Epoxidharz, Bonding-Materialien und Metallrahmen übertragen Ultraschallwellen ausreichend gut, um eine bildgebende Analyse zu ermöglichen [1].

Das am häufigsten genutzte Verfahren der SAM ist der Reflexionsmodus (Pulse-Echo-Verfahren). Dabei wird eine Ultraschallwelle in die Probe eingekoppelt. Ein Teil der Welle wird an inneren Grenzflächen reflektiert und gelangt zurück zum Wandler, wo sie erneut in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Die Intensität und Polarität dieser Signale liefern Rückschlüsse auf die inneren Strukturen des untersuchten Materials [2, 3].

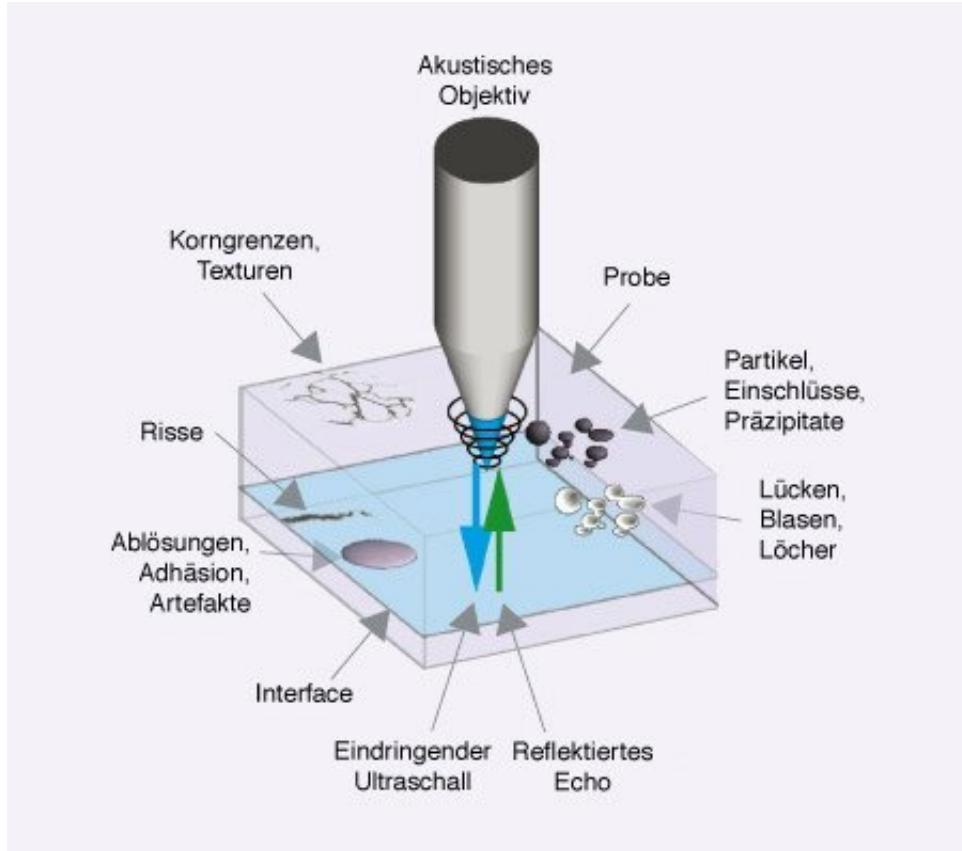


Abb. 1: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Scanning Acoustic Microscopy (SAM) im Reflexionsmodus. Die eingestrahlten Ultraschallwellen werden an inneren Strukturen wie Rissen, Grenzflächen, Einschlüsse oder Delaminationen reflektiert und ermöglichen so eine zerstörungsfreie Analyse der Probe.[2]

Zur optimalen Übertragung der akustischen Wellen befindet sich die Probe während der Messung in einem Wasserbad. Wasser dient dabei als Kopplungsmedium, da es eine homogene akustische Impedanz aufweist und eine gleichmäßige Grenzfläche zwischen Wandler und Probe bildet. Die starke Reflexion an der Grenzfläche zwischen Wandler und Luft entsteht, weil die akustische Impedanz von Luft stark von der des Wandlers und der Probe abweicht. Dadurch gelangen fast keine Schallwellen in die Probe, da sie bereits an der Oberfläche reflektiert werden (siehe Abbildung 1).

Zusammenfassend betrachtet der Versuch drei zentrale Verbindungstechnologien der Leistungselektronik, die maßgeblich die interne Struktur der Module und somit auch das akustische Reflexionsverhalten im SAM beeinflussen:

Das Silbersintern (Ag) ermöglicht eine metallurgische Verbindung zwischen Halbleiterchip und Träger. Aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der exzellenten Wärmeleitfähigkeit

bietet Silber eine äußerst stabile und thermisch belastbare Kontaktierung [4]. Reine Silber-Sinterverbindungen steigern nachweislich die Lebensdauer moderner Leistungsmodule [4].

Beim Ultraschallschweißen kommt ein hochfrequentes, mechanisches Fügen zum Einsatz, das sich besonders für spröde Materialien wie Keramik eignet. Torsionale Ultraschallpressen ermöglichen beispielsweise die schonende Verbindung von Kupfer-Leadframes mit keramischen Substraten, ohne diese mechanisch zu beschädigen [5].

Das Laminieren kombiniert metallische Leiterbahnen mit isolierenden Folien durch Druck und Hitze. Dieser Prozess erfolgt innerhalb definierter Parameter für Temperatur, Druck und Dauer, um eine homogene, blasenfreie Schichtbildung sicherzustellen [6]. So entstehen stabile, elektrisch isolierende Grenzflächen zwischen Kupferstruktur und Trägermaterial [6].

Durch die gezielte Wahl unterschiedlicher Fokusebenen im SAM lassen sich innerhalb dieser Verbindungsschichten Kontraste und potenzielle Defektstellen sichtbar machen. Die gewonnenen Bilddaten geben somit Aufschluss über die Qualität der Materialanbindung und das strukturelle Verhalten unter realen Belastungsbedingungen.

3 Aufgabenstellung

In diesem Versuch wird die akustische Mikroskopie (SAM) eingesetzt, um zu demonstrieren, wie eine zerstörungsfreie bildgebende Untersuchung innerer Strukturen in Materialien durchgeführt werden kann. Dabei sollen insbesondere potenzielle Defekte wie Risse, Delaminationen, Lufteinschlüsse oder andere strukturelle Schäden identifiziert und analysiert werden. Die Untersuchung erfolgt an drei verschiedenen Proben, bei denen gezielt geeignete Untersuchungsebenen gewählt werden müssen, um relevante Fehlstellen sichtbar zu machen. Ziel ist es, auffällige Bereiche zu dokumentieren, die jeweiligen Fehlerarten zu identifizieren und deren Ursache sowie Auswirkungen auf die Materialstruktur zu erläutern.

4 Proben und Methoden

Zunächst wird die akustische Mikroskopie verwendet, um darstellen zu können, wie eine Zerstörung freie Untersuchung erfolgen kann, darüber hinaus werden nach Risse und Schaden untersucht und mögliche Darstellung bemerken zu können wie Luftblasen. Diese Untersuchung wird mit drei Proben durchgeführt. Aufgabe bei den Proben ist auch die Ebenen zu wählen, die für eine solchen Untersuchung sinnvoll sind. Potentielle Defekte oder Fehler müssen dokumentiert und erläutert werden.

In diesem Experiment werden drei unterschiedliche Proben untersucht, um innere Strukturen und Defekte zerstörungsfrei zu erkennen. Die Messung erfolgt im Reflexionsmodus, wobei Ultraschallwellen über ein Wasserbad eingekoppelt und reflektierte Signale ausgewertet werden.



Abb. 2: *KSI v300E Ultrasmallmikroskop am Messplatz. Die Probe wird in einem Wasserbad positioniert und mittels eines piezoelektrischen Wandlers im Reflexionsmodus untersucht.*

Die erste Probe ist eine keramische DCB-Leiterplatte mit gesinterten Halbleitern (siehe Abbildung 3). Sie dient zur Einführung in die SAM-Bedienung und zur Darstellung verschiedener Materialübergänge in mehreren Ebenen .



Abb. 3: *DCB-Leiterplatte mit gesinterten Halbleitern. Die Probe dient zur Einarbeitung in die Bedienung des akustischen Mikroskops sowie zur Analyse von Materialübergängen.*

Die zweite Probe besteht aus einem Kupfer-Leadframe, der auf ein keramisches Substrat geschweißt wurde (siehe Abbildung 4). Hier liegt der Fokus auf der Analyse der Schweißverbindungen und der Untersuchung möglicher Defekte durch Wahl geeigneter Scanebenen



Abb. 4: Keramisches Substrat mit angeschweißtem Kupfer-Leadframe. Die Untersuchung konzentriert sich auf die Qualität der Schweißverbindungen und das Auffinden potenzieller Defekte.

Die dritte Probe ist ein DoL-Leistungselektronikmodul ohne Bonddrähte (siehe Abbildung 5). Statt keramischer Isolation kommt eine organische Trägerfolie zum Einsatz. Die Ebenenwahl und Bewertung erfolgen selbstständig.

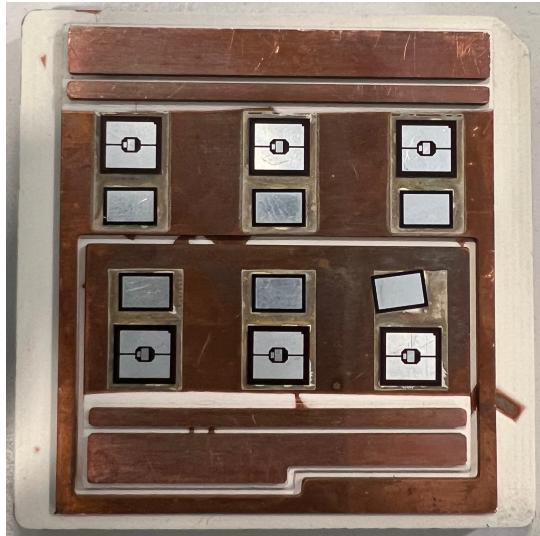


Abb. 5: *DoL-Leistungselektronikmodul ohne Bonddrähte. Statt keramischer Isolation kommt eine organische Trägerfolie zum Einsatz. Ziel ist die eigenständige Auswahl und Bewertung geeigneter Fokusebenen.*

Alle Proben werden im Wasserbecken positioniert, wobei auf die Entfernung von Luftblasen geachtet wird. Die Steuerung erfolgt über den integrierten PC, und nach jeder Messung wird das Gerät in die Home-Position zurückgefahren.

Die Untersuchung erfolgt mit dem Scanning Acoustic Microscope KSI V8 [1].

Das System bietet mehrere Scanmodi, die eine detaillierte Untersuchung unterschiedlicher Strukturen ermöglichen. Im sogenannten C-Scan-Modus wird eine zweidimensionale Darstellung einer definierten Fokusebene erzeugt, die sich besonders zur Erkennung von Hohlräumen und Rissen innerhalb einzelner Materialschichten eignet. Ergänzend dazu erlaubt der B-Scan die Darstellung eines Tiefenprofils, während der 3D-Scan durch die Kombination mehrerer Ebenen eine volumetrische Abbildung des Probenaufbaus liefert.

5 Durchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgt im Gebäude C12, Raum 3.28.

Die Proben werden im Wasserbad umgekehrt eingelegt. So liegen die relevanten Schichtübergänge näher an der Fokuszone des Ultraschallwandlers. Dies verbessert die akustische Kopplung. Die Orientierung erleichtert außerdem die gezielte Analyse von Grenzflächen zwischen Halbleiter, Bondschicht und Substrat.

Nach dem Positionieren der Probe wird über die Gerätesoftware der C-Scan-Modus ausgewählt. Anschließend scannt der Ultraschallwandler die gewählte Fokusebene, und das Bild baut sich schrittweise auf dem Bildschirm auf. Über die integrierte Software des internen Rechners lassen sich die gemessenen Frequenzen ablesen. Ziel ist es, jene Frequenzen zu ermitteln, bei denen das Reflexionssignal am stärksten ausgeprägt ist.

Bei Probe 2 (siehe Abbildung 4) erfolgt die Messung in mehreren Fokusebenen, um die innere Struktur möglichst genau zu erfassen. Dazu wird die Höhe der Probe schrittweise angepasst, wobei jede Ebene erneut im C-Scan-Modus aufgenommen wird. Die einzelnen Scans zeigen unterschiedliche Materialgrenzen und mögliche Defekte. Durch den Vergleich dieser Ebenen lassen sich Aussagen über die Position und Tiefe der Fehlstellen treffen.

6 Ergebnisse

6.1 Probe 1

Die erste Probe zeigt eine gleichmäßige, klar abgegrenzte Struktur mit regelmäßig angeordneten quadratischen Elementen (siehe Abbildung 6). Die Reflexionssignale erscheinen homogen, ohne sichtbare Unterbrechungen oder Unregelmäßigkeiten innerhalb der Materialübergänge. Auffällig ist die hohe Signalklarheit in den bondfreien Zonen. Es lassen sich weder Risse noch Delaminationen erkennen, was auf eine saubere Verarbeitung und intakte Schichten schließen lässt.

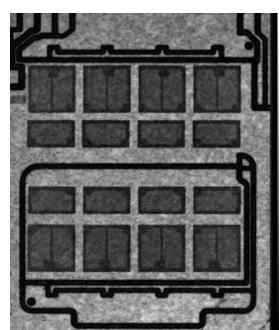


Abb. 6: C-Scan der Probe 1 mit klar erkennbaren Strukturen und homogener Reflexion.



Abb. 7: Schematische Darstellung der Materialschichten der Probe 1 (DCB-Modul) mit farblich gekennzeichneten Ebenen. Die grüne Linie stellt den gesinterten Halbleiter dar, die rote Linie die Bondschicht, die blaue Linie das Keramiksubstrat und die orangefarbene Linie die Kupferbasis.

6.2 Probe 2

An Probe 2 wird eine schichtweise Analyse durchgeführt. In den insgesamt fünf gewählten Fokusebenen zeigen sich deutliche Unterschiede in Signalintensität und den erkennbaren Strukturen. Die obersten Bildebenen (Abbildung 8, obere Aufnahmen) wirken relativ glatt und homogen. Allerdings ist bereits hier eine kreisförmige Auffälligkeit in Form eines dunklen Spots zu erkennen. Diese runde dunkle Stelle sticht in der rechten Abbildung 8 deutlich hervor und könnte auf einen Lufteinschluss oder eine lokale Delamination direkt unter der Metalloberfläche hindeuten. Möglich ist, dass sich an dieser Stelle eine kleine Luftblase im Schweißpunkt gebildet hat oder die Verbindung zum Substrat nicht vollflächig gelingt. Mit zunehmender Tiefe (Abbildungen 9) treten mehr Leiterstrukturen hervor, die in den oberen Schichten noch nicht sichtbar sind. Insbesondere werden die im Kupfer-Leadframe eingebetteten Leiterbahnen und Bondflächen in den mittleren Ebenen klarer erkennbar. In den tieferen Fokusebenen (Abbildung 10, tiefste Ebene) zeigen sich zudem feine Schattenbildungen und leichte Signalunterbrechungen entlang einzelner Linienstrukturen. Diese Unregelmäßigkeiten konzentrieren sich vor allem im unteren Bildbereich der Abbildung 10, wo Bond- oder Kontaktzonen zum Keramiksubstrat verlaufen. Das deutet darauf hin, dass in den unteren Schichten etwa an der Grenzfläche zwischen einer Bondschicht und dem Substrat Stellen mit geringerer akustischer Kopplung vorhanden sind. Mögliche Ursachen dafür sind Mikrorisse in der Bond bzw. Lötverbindung. Eine solche Schwachstelle in der Materialanbindung ruft genau solche lokalen Abschwächungen im Reflexionssignal hervor. Auch der Umstand, dass die Probe im Scan leicht geneigt ist (siehe unterschiedliche Schärfe in den Bildecken), kann zu kleinen Helligkeitsunterschieden beitragen, erklärt jedoch nicht vollständig die beobachteten Schatten entlang der Leiterbahnen. Insgesamt weist Probe 2 damit auf vereinzelte Defizite in der Schweißverbindung hin, ein potenzieller Lufteinschluss nahe der Oberfläche und mögliche Delaminationen in tieferen Bondschichten. Diese Defekte entstehen durch ungleichmäßiges Aufschweißen des Kupfers auf die Keramik, durch unzureichenden Druck oder Verunreinigungen beim Fügen, und führen langfristig möglicherweise zu thermischen Problemen oder mechanischer

Instabilität.

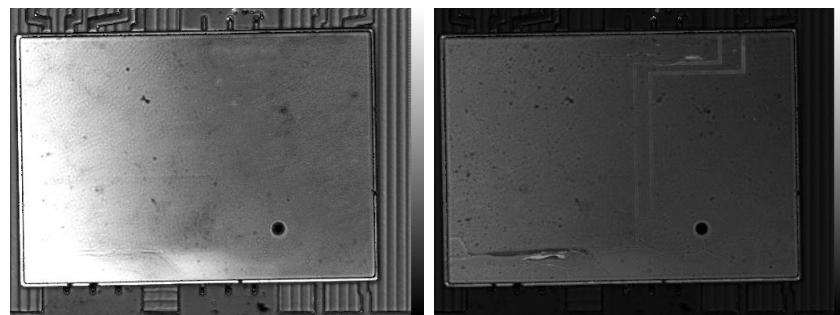


Abb. 8: Obere Fokusebenen der Probe 2. Die rechte Abbildung zeigt eine auffällige Reflexionsunterbrechung.

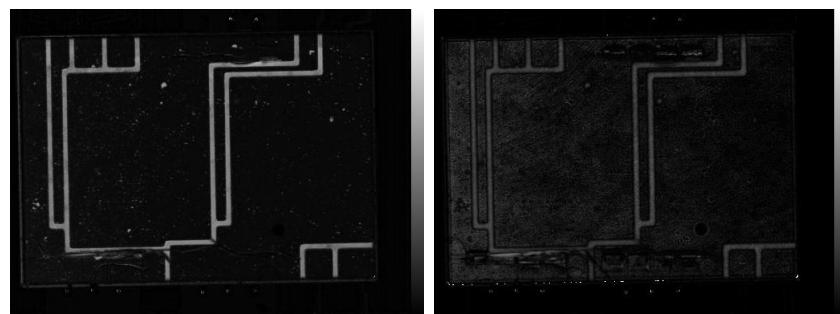


Abb. 9: Mittlere Fokusebenen der Probe 2 mit zunehmender Sichtbarkeit der Leiterstrukturen.

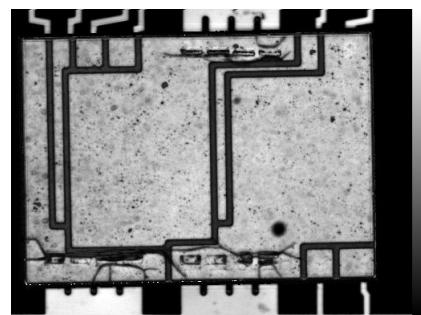


Abb. 10: Tiefste gescannte Ebene der Probe 2. Sichtbare Leiterbahnen mit lokalen Unregelmäßigkeiten im unteren Bereich.



Abb. 11: Visualisierung der in mehreren Fokusebenen gescannten Schichten der Probe 2. Die graue Linie zeigt die Oberfläche bzw. Metallabdeckung, die roten Linien markieren Bond- oder Kontaktzonen, die orangefarbene Linie kennzeichnet Kupferleiterbahnen, und die blaue Linie stellt das keramische Substrat dar.

6.3 Probe 3

In der letzten Probe, einem DoL-Modul, fällt sofort die großflächige, glatte Reflexionsfläche auf (siehe Abbildung 12). Bemerkenswert ist jedoch die gute Lesbarkeit des Schriftzugs „FH-KIEL“ in der Bildmitte. Die klare Abbildung des Schriftzugs lässt darauf schließen, dass auf der Oberfläche des Moduls eine Gravur oder Markierung vorhanden ist, welche die akustische Reflexion lokal beeinflusst. Die gleichmäßige Reflexion dieser Gravur weist auf eine intakte, gleichmäßig metallisierte Oberfläche hin. Kleinere Unregelmäßigkeiten in Form dunkler Punkte oder Flecken lassen sich lediglich vereinzelt beobachten. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um minimale Oberflächenverunreinigungen oder mikroskopisch kleine Lufteinschlüsse, die die Gesamtstruktur jedoch nicht wesentlich beeinträchtigen. Auch in tieferen Schichten etwa in der organischen Trägerfolie oder den eingebetteten Kupferstrukturen zeigen sich keine auffälligen Defekte oder Störungen. Das akustische Bild bleibt über die gesamte Fläche hinweg konsistent. Die Tatsache, dass selbst feine Gravuren wie „FH-KIEL“ deutlich sichtbar sind, unterstreicht die hohe Empfindlichkeit und Auflösung des gewählten Scanverfahrens. Insgesamt weist Probe 3 somit auf einen sehr homogenen Schichtaufbau hin. Die gleichmäßige Verbindung zwischen Kupferstruktur und Folie sowie die fehlenden Delaminationen oder Risse deuten auf eine stabile und qualitativ hochwertige Materialanbindung hin, die für den Einsatz in der Leistungselektronik von entscheidender Bedeutung ist.



Abb. 12: C-Scan der Probe 3 (DoL-Modul) mit gleichmäßiger Reflexionsfläche und klar erkennbarer Gravurstruktur.



Abb. 13: Schichtdarstellung der Probe 3 (DoL-Modul) mit farblich codierten Materialien. Die graue Linie stellt die Oberfläche bzw. die Beschriftung dar, die schwarze Linie die Metallkappe, die violette Linie steht für die organische Trägerfolie und die orangefarbene Linie kennzeichnet die eingebetteten Kupferstrukturen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Versuchs zur akustischen Mikroskopie wurden drei unterschiedliche Proben untersucht: ein DCB-Modul mit gesinterten Halbleiterchips, ein Kupfer-Leadframe, der mittels Ultraschallschweißung auf ein Keramiksubstrat aufgebracht wurde, sowie ein DoL-Leistungsmodul mit einer organischen Trägerfolie. Ziel der Untersuchung war es, mithilfe des C-Scan-Modus im Reflexionsverfahren (Puls-Echo-Technik) die inneren Schichtstrukturen und Grenzflächen der Materialien zerstörungsfrei darzustellen und zu analysieren. Dabei macht man sich zunutze, dass Ultraschallwellen an Grenzflächen mit unterschiedlicher akustischer Impedanz reflektiert werden, wodurch innere Materialstrukturen sichtbar gemacht werden können [2, 3].

Zur Erfassung der inneren Defekte und Heterogenitäten wurden die Proben in mehreren Fokusebenen untersucht also bei variierender Tiefeneinstellung im C-Scan [1]. Besonders bei Probe 2 wurde dieses Verfahren genutzt, um schichtabhängige Unterschiede im Reflexionsverhalten aufzudecken. Für eine zuverlässige Kopplung der Schallwellen an das Probenmaterial wurde Wasser als Koppelmedium eingesetzt, da Luft aufgrund ihrer geringen akustischen Impedanz kaum Ultraschall überträgt [2].

Das verwendete akustische Mikroskop vom Typ KSI V8 ermöglichte hochauflösende, kontrastreiche Aufnahmen der Probenquerschnitte. Die dabei gewonnenen Bilddaten lieferten eine klare Visualisierung möglicher Defekte wie Delaminationen, Inhomogenitäten oder Hohlräume [1]. Besonders beim DoL-Modul (Probe 3) zeigten sich einzelne kleine Flecken, vermutlich Oberflächenverunreinigungen oder eingeschlossene Luftblasen, konnten detektiert werden. Solche Inhomogenitäten erzeugen aufgrund des stark abweichenden akustischen Widerstandes besonders helle Reflexionssignale, häufig begleitet von einer Phasenumkehr im Echo [3].

Besonders hervorzuheben ist die klare Darstellung des Gravurschriftzugs „FH-KIEL“ im C-Scan. Dies deutet auf eine gleichmäßige und intakte Oberflächenstruktur hin, die zu einer starken Reflexion und nur geringer Signalabschwächung führt. In Probe 1 (DCB-Modul) ließen sich ebenfalls keine strukturellen Schwächen wie Delaminationen oder Risse nachweisen. Die Bondverbindungen erscheinen vollständig intakt, ebenso die metallischen Kontaktflächen, was auf eine homogene Materialanbindung ohne Hohlräume oder Ablösungen schließen lässt.

Im Gegensatz dazu offenbarte Probe 2, also der Kupfer-Leadframe auf Keramik, bei schrittweiser Tiefenfokussierung mehrere lokal begrenzte Auffälligkeiten in den tiefer liegenden Schichten [1]. Im C-Scan erscheinen diese als deutlich abgegrenzte Zonen mit erhöhter Reflexionsintensität, was auf Schwachstellen in der strukturellen Verbindung hindeutet [2]. Besonders an der unteren Grenzfläche zwischen Bondschicht und Keramiksubstrat wurden

solche Anomalien sichtbar. Es ist anzunehmen, dass es sich hierbei um partielle Delaminationen oder Lufteinschlüsse handelt. Diese verursachen durch den abrupten Wechsel der akustischen Impedanz eine nahezu vollständige Reflexion des Ultraschalls, häufig inklusive Phasenumkehr [3].

Durch die gezielte Fokussierung auf diese tieferliegenden Ebenen und das präzise Setzen eines Laufzeitfensters im C-Scan konnte die exakte Tiefenlage dieser Defekte lokalisiert und in der Bildauswertung eindeutig zugeordnet werden [1].

8 Fazit

Der Versuch verlief reibungslos und zeigte, dass die akustische Mikroskopie mit dem KSI V8 SAM eine effektive und zuverlässige Methode zur zerstörungsfreien Prüfung innerer Strukturen darstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine fundierte Basis für die Beurteilung der Materialqualität und können zur Optimierung von Fertigungsprozessen in der Leistungselektronik beitragen.

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Scanning Acoustic Microscopy (SAM) im Reflexionsmodus. Die eingestrahlten Ultraschallwellen werden an inneren Strukturen wie Rissen, Grenzflächen, Einschlüsse oder Delaminationen reflektiert und ermöglichen so eine zerstörungsfreie Analyse der Probe.[2]	4
2	KSI v300E Ultraschallmikroskop am Messplatz. Die Probe wird in einem Wasserbad positioniert und mittels eines piezoelektrischen Wandlers im Reflexionsmodus untersucht.	6
3	DCB-Leiterplatte mit gesinterten Halbleitern. Die Probe dient zur Einarbeitung in die Bedienung des akustischen Mikroskops sowie zur Analyse von Materialübergängen.	6
4	Keramisches Substrat mit angeschweißtem Kupfer-Leadframe. Die Untersuchung konzentriert sich auf die Qualität der Schweißverbindungen und das Auffinden potenzieller Defekte.	7
5	DoL-Leistungselektronikmodul ohne Bonddrähte. Statt keramischer Isolation kommt eine organische Trägerfolie zum Einsatz. Ziel ist die eigenständige Auswahl und Bewertung geeigneter Fokusebenen.	8
6	C-Scan der Probe 1 mit klar erkennbaren Strukturen und homogener Reflexion.	9
7	Schematische Darstellung der Materialschichten der Probe 1 (DCB-Modul) mit farblich gekennzeichneten Ebenen. Die grüne Linie stellt den gesinterten Halbleiter dar, die rote Linie die Bondschicht, die blaue Linie das Keramiksubstrat und die orange Linie die Kupferbasis.	10
8	Obere Fokusebenen der Probe 2. Die rechte Abbildung zeigt eine auffällige Reflexionsunterbrechung.	11
9	Mittlere Fokusebenen der Probe 2 mit zunehmender Sichtbarkeit der Leiterstrukturen.	11
10	Tiefste gescannte Ebene der Probe 2. Sichtbare Leiterbahnen mit lokalen Unregelmäßigkeiten im unteren Bereich.	11
11	Visualisierung der in mehreren Fokusebenen gescannten Schichten der Probe 2. Die graue Linie zeigt die Oberfläche bzw. Metallabdeckung, die roten Linien markieren Bond- oder Kontaktzonen, die orange Linie kennzeichnet Kupferleiterbahnen, und die blaue Linie stellt das keramische Substrat dar.	12
12	C-Scan der Probe 3 (DoL-Modul) mit gleichmäßiger Reflexionsfläche und klar erkennbarer Gravurstruktur.	13

9 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] M. Eng. Christian Hennig. Zugriff am 21. Juni 2025. URL: https://learn.fh-kiel.de/pluginfile.php/253050/mod_folder/content/0/Versuch%203%20SAM.pdf?forcedownload=1.
 - [2] PVA Tepla AG. Zugriff am 21. Juni 2025. URL: <https://www.pvatepla-lwt.com/technologien/funktionsweise-der-ultraschallmikroskopie/>.
 - [3] Wikipedia contributors. *Scanning acoustic microscope* — Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_acoustic_microscope. Online; Zugriff am 21. Juni 2025. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_acoustic_microscope.
 - [4] Fraunhofer IZM. *Silber-Sintern in der Leistungselektronik*. Zugriff am 19. Juni 2025. 2020. URL: https://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/system_integrationinterconnectiontechnologieangebot/prozess-_und_productentwicklung/silber-sintern/silber-sintern_ext.html.
 - [5] Herrmann Ultraschall. *Ultraschallschweißen in der Leistungselektronik*. Zugriff am 19. Juni 2025. 2022. URL: [https://www.herrmannultraschall.com/de/schweissen-mit-ultraschall.ultraschallschweissen#:~:text=Wie%20funktioniert%20Ultraschallschwei%C3%9Fen,%20Energie%20\(sogenannte%20Reibungsw%C3%A4rme\)..](https://www.herrmannultraschall.com/de/schweissen-mit-ultraschall.ultraschallschweissen#:~:text=Wie%20funktioniert%20Ultraschallschwei%C3%9Fen,%20Energie%20(sogenannte%20Reibungsw%C3%A4rme)..)
 - [6] RAYMING Technology. *Lamiertechnologie für Leistungsmodule*. Zugriff am 19. Juni 2025. 2021. URL: <https://www.raypcb.com/pcb-lamination-process/>.