

Ultraschallprüfung in der Elektronikfertigung – ein neuer Markt?

Susan WALTER*, Annika OETTL*, Johannes BOHM*, Henning HEUER**,
Thomas ZERNA*

* TU Dresden, Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (01062
Dresden)

** Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden

Kurzfassung. Mit zunehmender Verkleinerung der Strukturgrößen und der damit einhergehenden höheren Integrationsdichte bei Halbleiterbauelementen steigen auch die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik. Die zerstörungsfreie Prüfung während des Herstellungsprozesses gewinnt neben einer anschließenden funktionellen, elektrischen Prüfung immer weiter an Bedeutung. Aufgrund des steigenden Einsatzes von flächig kontaktierten Bauelementen, einer steigenden Verwendung organischer Materialien sowie eingebetteter Komponenten werden zerstörungsfreie Volumenprüfverfahren wie z.B. Ultraschall unerlässlich.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten ForMaT-Projektes beschäftigt sich das Teil-Projekt „inspect inline“ mit dem Bedarf an inlinefähiger und zerstörungsfreier Prüftechnik für die Elektronikfertigung. Eine national ausgeweitete Marktstudie, die in Kooperation zwischen dem IAVT der TU Dresden und dem Fraunhofer IZfP Dresden durchgeführt wurde, zeigt die Notwendigkeit und das Potenzial leistungsfähiger, zerstörungsfreier Prüfverfahren in der Elektronikfertigung. Bisher ist die Ultraschallprüfung in der Elektronikfertigung eher unbekannt und wird hauptsächlich in der Forschung eingesetzt. Eine enge Zusammenarbeit mit der Industrie ermöglicht eine umfassende Darstellung zukünftiger Anwendungsgebiete und der Anforderungen an ein Prüfsystem.

E-Mail: walter@avt.et.tu-dresden.de

Einführung

Elektronische Produkte bestimmen immer mehr unseren Alltag. Bewusst oder unbewusst begleiten sie uns beispielsweise im Auto bei allen Straßenverhältnissen sicher und auf kürzestem Wege zum Ziel und sorgen dabei für Konzertatmosphäre, wenn nicht gerade das Mobiltelefon via Bluetooth eine Verbindung zur Freisprecheinrichtung durchstellt. Wir sind nahezu abhängig von elektronischen Systemen, die uns bei alltäglichen Aufgaben unterstützen. Durch wachsende Ansprüche an Sicherheit und Komfort erwarten wir von diesen vielfältigen Produkten eine immer längere Lebensdauer und Zuverlässigkeit, welche maßgeblich durch die Qualität in der Elektronikfertigung bestimmt werden. Leider sind die Entwicklungen der Prüfmethoden in der Elektronikfertigung nicht im gleichen Maße vorangeschritten. In der Mikroelektronik geht man sogar davon aus, dass eine Verzögerungszeit zwischen Technologieentwicklung und Prüftechnik von bis zu drei Jahren auftritt ([1]). Oft sind geeignete Verfahren nur im Labormaßstab verfügbar und werden nur sehr verhalten oder als Dienstleistung in Anspruch genommen. Im Projekt „inspect inline“ wird daher ein Konzept für die inline-Prüfung elektronischer Baugruppen

mit Ultraschall entwickelt und hinsichtlich der Chancen und Forderungen der Industrie an ein solches System untersucht.

1. Motivation

1.1 Projekt „inspect inline“

Insbesondere Universitäten wird häufig vorgeworfen, dass ihre Forschung für die Industrie zu wenig Relevanz hat. Dazu gehört nicht nur, dass die Bedürfnisse der Industrie nicht berücksichtigt werden, sondern auch, dass viele der Ideen den Weg aus der Forschung in die Industrie gar nicht schaffen. Um das zu verbessern, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in Rahmen der Initiative „Unternehmen Region“ das Förderprogramm ForMaT – Forschung für den Markt im Team – ins Leben gerufen, wo wissenschaftliche Forschungsteams gezielt durch die Zusammenarbeit mit Wirtschaftswissenschaftlern unterstützt werden.

Ziel unseres Projektes „inspect inline“ ist die Entwicklung von Sensorik für die zerstörungsfreie Prüfung direkt in der Elektronikfertigung und dazu passender Konzepte für die wirtschaftliche Verwertung.

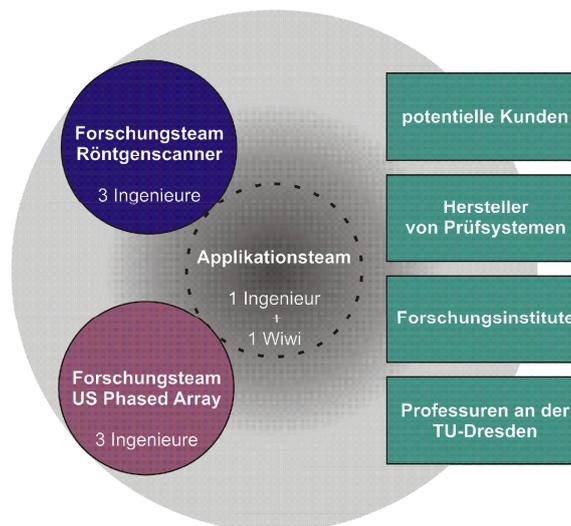


Abbildung 1. Teamstruktur des Projektes „inspect inline“ im Förderprogramm ForMaT der Förderinitiative Unternehmen Region des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

Die Arbeitsgruppe setzt sich aus drei Teams zusammen (Abbildung 1), die sich aufteilen in die vorrangig technologisch arbeitenden Teams „Röntgenscanner“ und „US Phased Array“ sowie dem Applikationsteam. Das Applikationsteam ist zusammengesetzt aus einem Wirtschaftswissenschaftler und einem Ingenieur und bildet einen Rahmen um das Gesamtprojekt und die Schnittstelle zur Industrie und anderen Forschergruppen. Vorrangig unterstützen sie die Technologieteams bei der Bewertung ihrer Entwicklungen und der Erstellung eines Verwertungskonzeptes. Zeitgleich wird die Unterstützung durch den Wirtschaftswissenschaftler auch genutzt, um das Innovationsklima zu verbessern und den Transfertgedanken am Institut zu stärken.

Diese Veröffentlichung stellt die Ergebnisse einer umfangreichen Marktstudie und der Trendanalysen am Beispiel der Ultraschallprüfung in der Elektronikfertigung vor.

2. Bewertung der Prüftechnologie

2.1 Einführung

Die Technologiebewertung dient der Einschätzung der heutigen und vor allem der zukünftigen Attraktivität von Technologien (Vgl. [2]). Zur Bewertung einer Technologie müssen neben Einflussfaktoren aus den übergeordneten Umfeldern eines Unternehmens (z.B. natürliche, sozio-kulturelle, politisch-rechtliche, makroökonomische Einflüsse) auch spezifische Anforderungen von Kunden und potenziellen Kunden einbezogen werden. In der Bewertung durch „inspect inline“ wurde innerhalb des Forschungsinstituts eine unternehmerische Perspektive eingenommen.

Im Rahmen des Projektes wurde die zentrale Frage „Ultraschallprüfung in der Elektronikfertigung: Ein neuer Markt?“ hinsichtlich der unterschiedlichen Einflussfaktoren untersucht, um eine Aussage zu der Attraktivität der Technologie zum Einsatz in bestimmten und bisher irrelevanten Märkten treffen zu können.

Hierfür wurde folgende Vorgehensweise ausgewählt, deren einzelne Schritte den Grad der Informationen zur Bewertung der Attraktivität der Technologie Ultraschallprüfung in der Elektronikfertigung bestimmen.



Abbildung 2. Allgemeine Vorgehensweise zur Technologiebewertung

Während der Bearbeitung der einzelnen Schritte zur Technologiebewertung haben sich immer stärker einzelne Fragestellungen zum späteren Erfolg der Technologie herauskristallisiert, die nur anhand von Methoden wie der Expertenbefragung beantwortet werden konnten, da diese Antworten in der Literatur nicht zu finden waren. Diese Fragen bringen außerdem die Sensibilität der Thematik in der Industrie zum Ausdruck, da kaum ein Unternehmen offen mit Qualitäts- und Prüfproblematiken umgehen würde:

- Gibt es im Bereich der Elektronikfertigung adäquate Lösungen?
- Unter welchen Bedingungen ist der Einsatz überhaupt möglich?
- Welche Anforderungen der Kunden sind zukünftig relevant?
- Welche Prüfparameter müssen erreicht werden, um einen langfristigen Erfolg zu erzielen?

2.2 Handlungsbedarf und Auswahl der Bewertungsverfahren

Auslöser für den Start des Projektes sind Erfahrungen aus der Arbeit am IAVT. Hierbei wurde deutlich, dass es Aufbau- und Verbindungstechniken gibt, die sich durch derzeit gängige Prüfmethoden nicht vollständig überprüfen lassen. Der detektierte Handlungsbedarf wurde durch die Analyse von Trends in aktuellen Roadmaps weiter gestärkt, da außerdem Trends in die Richtung der Notwendigkeit zur Prüfung von dreidimensionalen Strukturen deuten. Zur Technologiebewertung wurden Methoden wie die Technologie-Portfolio-Analyse, die Umfeldanalyse, die Wettbewerbsanalyse, die Patentanalyse und eine vereinfachte Form der Szenarioanalyse herangezogen. In Abschnitt 3 werden die wichtigsten Ergebnisse daraus vorgestellt, auf die Methoden wird nicht detailliert eingegangen.

2.3 Datenerhebung und Bewertung

Anfangs wurden die vorhandenen Daten zu den Themen Elektronikfertigung und zerstörungsfreie Prüfung durch Auswertung von mehr als 20 verschiedenen Quellen fachbezogener Literatur, Roadmaps und Marktstudien (z.B. Electronic Trends Publications, iNEMI Roadmaps, Yole Développement, BCC Research, Frost & Sullivan, Geschäftsberichte von Unternehmen aus der Prüftechnik) eingehend analysiert. Diese Auswertung hat einen groben Rahmen für eine tiefere eigene Betrachtung vorgegeben. Zur Klärung bestimmter offener Fragestellungen wurde als primäre Datenerhebung eine schriftliche Befragung durchgeführt sowie Interviews mit Experten.

Schriftliche Befragung:

- Entwicklung und Pretest eines Fragebogens
- Versendung des Fragebogens an ausgewählte Unternehmen in der Elektronikbranche
- Rücklaufquote: 5%, entspricht 65 Antwortbögen

Expertenbefragung:

- Entwicklung eines offenen Leitfadens für das Experteninterview
- Auswahl von 10 Experten
- Durchführung der Gespräche per Telefon (5) oder bei einem persönlichen Termin (5)
- Erstellung von Gesprächsprotokollen

Die Ergebnisse wurden dokumentiert und zusammengefasst. Zur Bewertung der Ergebnisse wurde ein Scoring-Modell entwickelt, in dem durch unterschiedliche Gewichtung verschiedener Aspekte Prioritäten vergeben werden konnten.

3. Ergebnisse

3.1 Trends in der Elektronikfertigung

Elektronische Produkte sind allgegenwärtig und auch die allgemeinen Trends leicht ersichtlich. In allen möglichen Produkten unseres Alltages nimmt der Anteil an Elektronik stetig zu, begonnen beim elektronischen Postpaket über Mobiltelefone bis zum Fahrzeug. Die Anforderungen an elektrische Baugruppen sind in den einzelnen Branchen allerdings sehr unterschiedlich. Mobiltelefone und Unterhaltungselektronik müssen nur eine Lebensdauer von zwei bis fünf Jahren gewährleisten, danach gelten sie meist als veraltet. Hingegen wird beispielsweise im Automobilbau ähnlich wie bei mechanischen Bauteilen schon eine Lebensdauer von 20 Jahren erwartet, in der Luft- und Raumfahrt sogar von 30 Jahren (Abbildung 3).

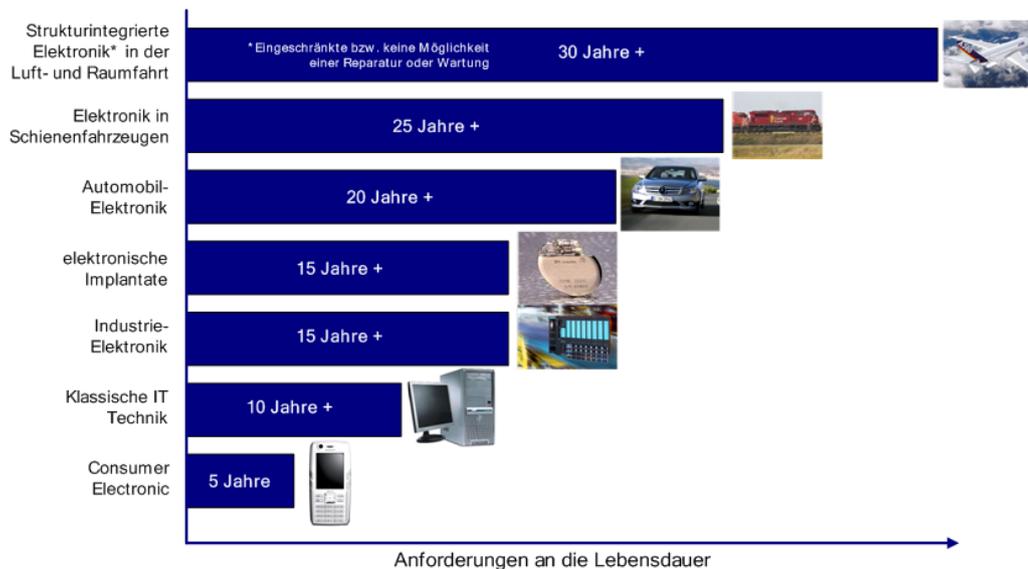


Abbildung 3. Lebensdauer elektronischer Produkte nach Branchen

Insbesondere in sicherheitsrelevanten Bereichen, wie beispielsweise Industrieelektronik, Automobilbau und Luft- und Raumfahrt, ist eine reine Funktionsprüfung nicht mehr ausreichend, sondern sind leistungsfähige, zerstörungsfreie Verfahren erforderlich, um auch strukturelle Fehler erkennen zu können, die zu einer Fehlfunktion oder einer verringerten Zuverlässigkeit und Lebensdauer führen können.

Der zweite wichtige Trend ist die zunehmende Funktionsintegration (Abbildung 4).

Immer mehr Funktionen müssen auf immer kleineren Flächen realisiert werden, was derzeit nicht nur in kleinere Strukturen resultiert, sondern auch in der Eroberung der 3. Dimension und in einer größeren Materialvielfalt [3]. Neben dem verstärkten Einsatz polymerer Materialien wird mittelfristig auch eine zunehmende Integration verschiedenster funktioneller Elemente zur Sensorik und Energieversorgung erwartet.

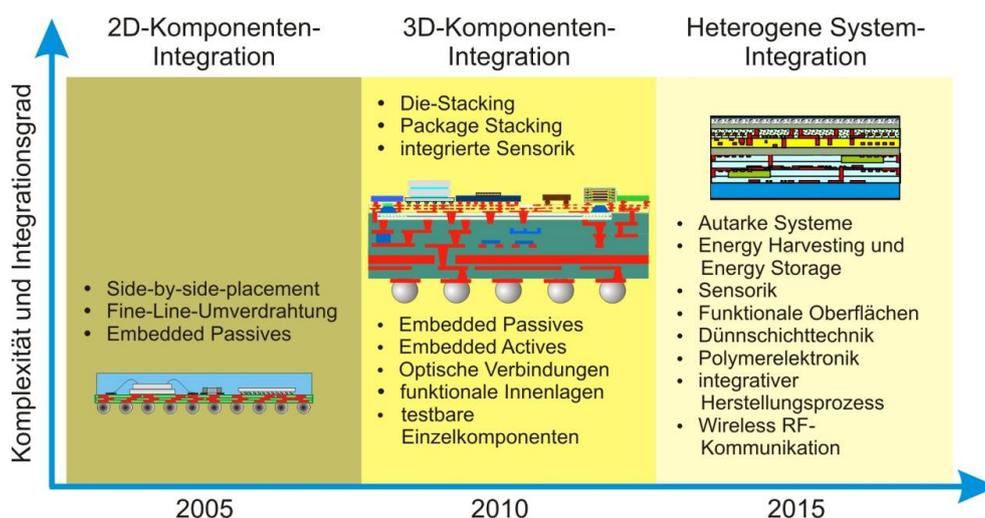


Abbildung 4. Trends in der Elektronikfertigung (in Anlehnung an [3])

3.2 Prüfung in der Elektronikfertigung

Zum Test der hergestellten Bauelemente und Baugruppen dominiert nach wie vor in der Elektronikfertigung eine rein elektrische Prüfung. Diese erlaubt eine Aussage zur Funktion des Produktes, aber nicht zu dessen Qualität und Zuverlässigkeit. Hier sind bildgebende

zerstörungsfreie Prüfverfahren notwendig. Bisher werden diese allerdings hauptsächlich zur Technologieentwicklung und -einführung genutzt sowie zur Fehleranalyse, da zu wenig inline-fähige Prüfsysteme existieren. Ca. 70 % der in Phase I befragten Unternehmen ordnen der Fertigungsprüfung jedoch einen hohen Stellenwert zu (Abbildung 5), was auf einen erhöhten Bedarf hinweist. 60 % der Unternehmen prüfen sowohl inline als auch am Ende der Fertigungslinie.

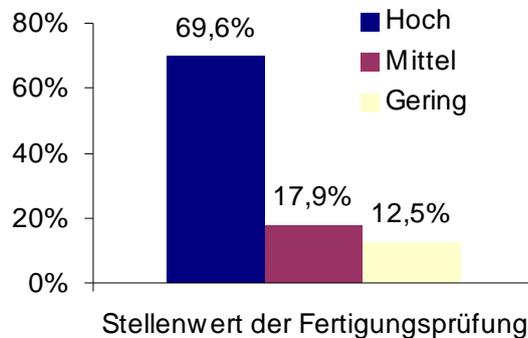


Abbildung 5. Stellenwert der Fertigungsprüfung der befragten Unternehmen

Etabliert hat sich in der Fertigungsprüfung seit 2001 neben der elektrischen Prüfung die automatische optische Prüfung (AOI) und ist seitdem mit durchschnittlich 5,2 % Wachstumsrate pro Jahr stark gewachsen ([4]). Bei Fertigern komplexerer Baugruppen, wie beispielsweise Bestücker von Multilayer-Leiterplatten oder Produzenten sicherheitsrelevanter Elektronik, spielt auch die Radiografie eine wichtige Rolle. Allerdings ist diese aufgrund der hohen Kosten und der bisher erreichbaren Prüfgeschwindigkeit eine Nischenlösung.

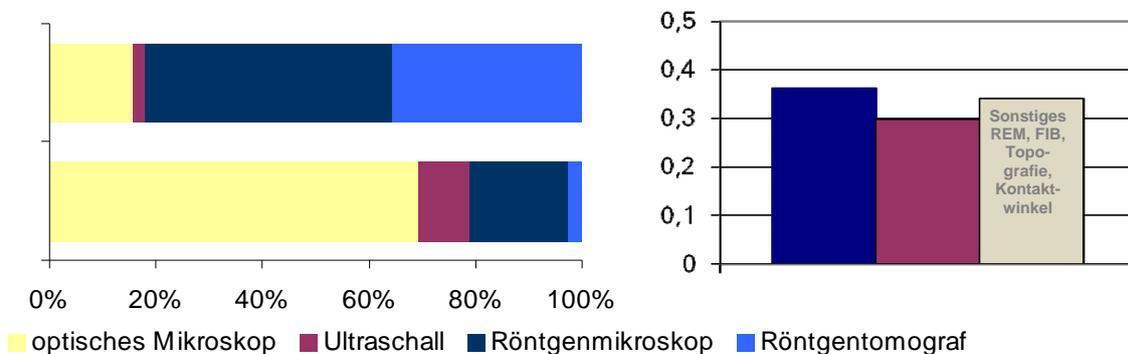


Abbildung 6. Häufigkeit der Nutzung verschiedener Prüfverfahren als Dienstleistung. Rechts: Häufigkeit der Nutzung als Dienstleistung im Vergleich zu eigenen im Unternehmen vorhandenen Prüfgeräten, Ergebnis der Umfrage. Rechts: Durchgeführte Dienstleistungen am Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik an der TU Dresden im Rahmen von nanoeva©.

Andere Verfahren wie die Ultraschallmikroskopie aber auch die Thermografie und Röntgentomografie sind nach wie vor Laboranwendungen und werden in der Regel nur für die Stichprobenprüfung eingesetzt.

Auch die Ergebnisse der Umfrage zeigen deutlich, dass derzeit die optische Prüfung in den Unternehmen mit 69% am häufigsten eingesetzt wird. An zweiter Stelle kommt die Röntgenprüfung, wobei 19% der Unternehmen ein herkömmliches 2D-Gerät besitzen und nur 3% einen Röntgentomografen. Gemeinsam mit der Tomografie ist die Röntgenprüfung mit 58% die am häufigsten genutzte Dienstleistung. In der Umfrage war der Anteil der

Ultraschallprüfung mit 2% sehr gering, jedoch zeigen die Dienstleistungen am IAVT keinen so großen Unterschied. Ursache dafür ist der geringe Bekanntheitsgrad der Ultraschallprüfung in den untersuchten Branchen. Häufig wird die Ultraschallprüfung nur als Ergänzung zur Röntgenprüfung genutzt, wenn mit dieser die auftretenden Strukturen nicht abgebildet werden können.

3.3 Ultraschallprüfung

Anwendungen der Ultraschallprüfung sind besonders in der Luft- und Raumfahrttechnik, der Energieerzeugung und der chemischen Industrie verbreitet (Abbildung 7). In diesen Bereichen ist die Ultraschallprüfung bereits seit Jahrzehnten etabliert und entwickelt sich stetig weiter. Die größte Entwicklung ist dabei bei Phased-Array und anderen scannenden Systemen zu erwarten ([5]).

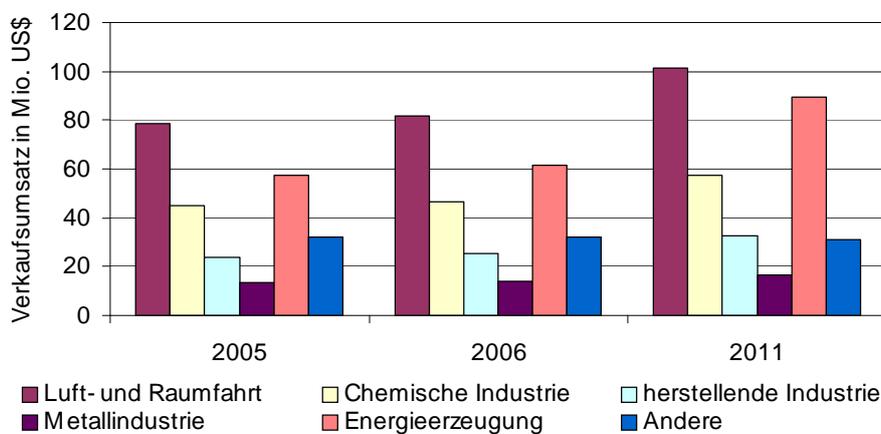


Abbildung 7. Übersicht der umsatzstärksten Industrien für Ultraschallprüfung [5]

3.4 Ultraschallprüfung in der Elektronikfertigung

In der Elektronikindustrie gewinnt die Ultraschallprüfung bei der Fehleranalyse in der Bauelementefertigung immer mehr an Bedeutung. Bei der Prüfung von Substraten vollständig bestückter Baugruppen spielt sie dagegen bisher nur eine untergeordnete Rolle. Typische Defekte, die mit Ultraschall erkannt werden können, sind Delaminationen, (Mikro-) Risse, Poren und Einschlüsse (Abbildung 8).

Je nach Art und Aufbau des Prüfobjektes sowie zu erwartender Defekte werden Frequenzen zwischen 15 MHz und 500 MHz eingesetzt, für spezielle Anwendungen beispielsweise der Materialanalyse auch bis zu 2 GHz. Derzeit werden ausschließlich scannende Einkanallösungen wie Ultraschallmikroskope eingesetzt. Diese Systeme bestehen aus einem Ultraschallprüfkopf und mechanischen Scanvorrichtungen für beide laterale Richtungen und für die Veränderung der Prüfkopfhöhe, der Elektronik zum Senden und Empfangen der Ultraschallsignale und einer Software zur Ansteuerung und zur Bildrekonstruktion. Das Prüfobjekt befindet sich während der Prüfung in einem Wasserbad, um eine ununterbrochene Ankopplung zu gewährleisten. Am Markt existieren derzeit auch einige Lösungen für die inline-Prüfung von Silizium-Wafern und gehäusten Bauelementen, die nicht mit einem Wasserbad sondern mit einer Wasserfall-Ankopplung arbeiten.

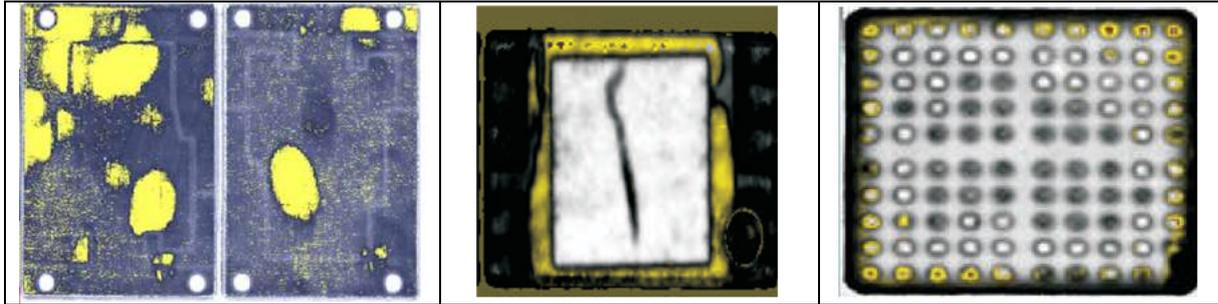


Abbildung 8. Ergebnisse der Ultraschallmikroskopie verschiedener möglicher Defekte elektronischer Bauelemente. Links: Delaminationen; Mitte: Substratriss; Rechts: Fehlerhafte BGA-Kontaktierung.

Die Ankopplung mittels Wasser scheint zwar zunächst für elektronische Baugruppen ungeeignet, stieß aber während der Umfragen und Experteninterviews auf große Akzeptanz. Nur bei Baugruppen mit mechanischen Elementen, wie z.B. Relais-Schaltungen, wurde die Ankopplung über Wasser ausgeschlossen.

4. Anwendungsbeispiele

4.1 Bauteilprüfung - QFN

Bauelemente mit flächigen Anschlussstrukturen haben sich in vielen Anwendungsbereichen bereits etabliert und entwickeln sich stetig weiter. Eine besondere Form sind sogenannte QFNs (Quad-Flat-No-Lead). Diese vollständig eingehausten Bauelemente zeichnen sich dadurch aus, dass sich der Silizium Chip auf einem ebenen Trägersteifen (Leadframe) befindet, der mittels Lötens direkt mit der Leiterplatte kontaktiert wird (Abbildung 9). Im Gegensatz zu anderen Bauelementetypen haben diese keine zusätzlichen Anschlussstrukturen (z. B. Beinchen, Bumps). 16 bis 64 Anschlusspads sind in der Regel peripher auf der Unterseite angeordnet und im Zentrum befindet sich ein großflächiger Anschluss, der als Massekontakt und zur Wärmeabführung dient.

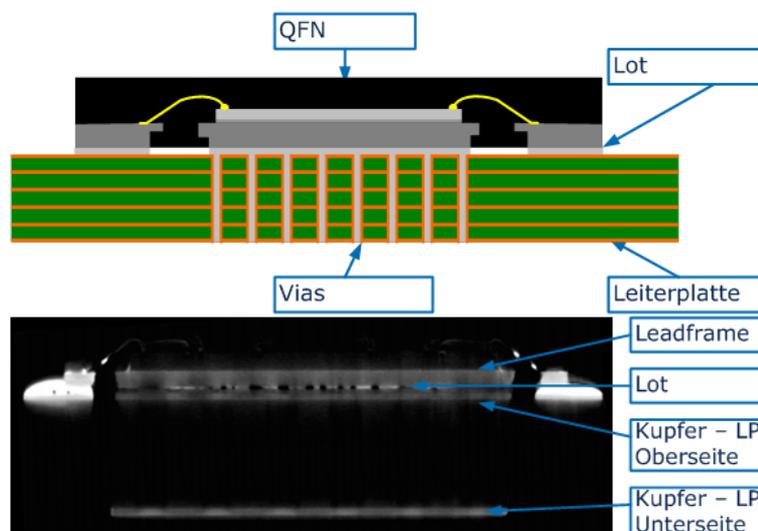


Abbildung 9. Oben: Schematischer Aufbau eines Quad-Flat-No-Lead-Bauelements (QFN), welches mit einer mehrlagigen Leiterplatte kontaktiert ist; Unten: Schnittbild einer Röntgenomografie eines QFN auf einer doppelseitig beschichteten Leiterplatte.

Aus dem speziellen Aufbau ergeben sich viele Vorteile, wie sehr geringe Kontaktwiderstände, eine gute Wärmeabführung und eine sehr flache Bauhöhe. Aufgrund dieser Eigenschaften werden solche Bauelemente häufig in der Kommunikations- und in der Automobilelektronik eingesetzt.

Häufigste Fehler beim Einsatz von QFN-Bauelementen sind Voids und Delaminationen, vor allem im Bereich der Massefläche. Um die Voidbildung kontrollieren zu können, ist der Einsatz einer Röntgentomografie notwendig (Abbildung 9). Die einfache Radiografie ist hier selbst unter Nutzung der Schrägdurchstrahlung nicht ausreichend und die Röntgentomografie nicht inline einsetzbar, so dass hier eine neue Methode gefunden werden muss.

4.2 Prüfung von Multilayer-Leiterplatten

Wohingegen sich die Ultraschallprüfung in der Halbleiter- und Bauelementefertigung schon durchgesetzt hat, wird sie für die Prüfung unbestückter Leiterplatten nur sehr verhalten eingesetzt. Eine Ursache dafür ist die schwere Prüfbarkeit des inhomogenen Basismaterials. Die Faserverbundwerkstoffe wie FR4 die für Leiterplatten genutzt werden, streuen und dämpfen den Ultraschall sehr stark. Das erfordert zum einen leistungsfähige Ultraschallprüfsysteme und zum anderen ein passendes Prüfkonzept.

Ein Problem bei Multilayer-Leiterplatten sind Delaminationen zwischen den Innenlagen. An diesen Stellen sind die Lagen nicht verbunden und dadurch ist ein zunächst sehr schmaler Luftspalt vorhanden. Diese Delaminationen sind mit anderen Prüfverfahren, wie beispielweise der elektrischen Prüfung oder der Radiografie nicht oder nur schwer detektierbar, können sich aber bei Belastung der Leiterplatte in den folgenden Schritten der Baugruppenherstellung sehr schnell ausdehnen und zum Ausfall der Leiterplatte führen.

Erste Voruntersuchungen ergaben bereits vielversprechende Ergebnisse. Abbildung 10 zeigt eine der getesteten Leiterplatten mit 5 Lagen, wobei für die Ultraschallprüfung eine Prüffrequenz von 15 MHz verwendet wurde. Es war möglich, auch Delaminationen zur untersten Lage sowohl im Impuls-Echo-Verfahren als auch im Durchschallverfahren zu detektieren, die in der Radiografie nicht sichtbar waren. Für den Einsatz in der Leiterplattenfertigung ist die Ultraschallmikroskopie insbesondere aufgrund der zu hohen Prüfzeiten noch nicht geeignet. Durch den Einsatz von mehrelementigen Ultraschallwandlern könnte die Prüfzeit allerdings erheblich reduziert werden, so dass eine Prüfzeit von wenigen Minuten je m² realisiert werden könnte.

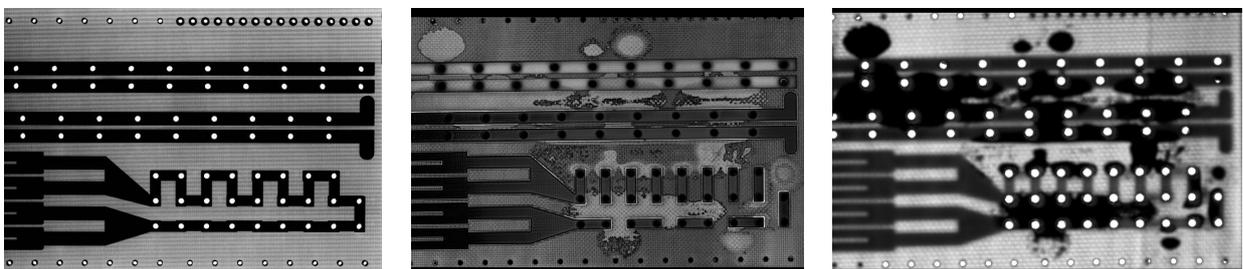


Abbildung 10. 5-lagige Leiterplatte mit Delaminationen zwischen den Innenlagen geprüft. Links: Radiografie; Mitte: Ultraschallmikroskopie im Impuls-Echo-Verfahren; Rechts: Ultraschallmikroskopie im Durchschallverfahren.

5. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Marktstudie und Technologiebewertung zeigen ein großes Potenzial der Prüftechnologie Ultraschall in der Elektronikfertigung auf. Für einen standardisierten Einsatz in einer Elektronikfertigungslinie haben sich jedoch neben den Stärken und Chancen der Technologie auch Schwächen und Risiken für die Durchdringung der anvisierten Märkte ergeben. Ein wichtiger Erfolgsfaktor ist die genaue Abstimmung des Produktes auf die Zielmärkte. Es müssen Nischen definiert und mögliche Produktparameter genau auf diese Nischen abgestimmt werden. Hieraus ergibt sich ein begrenztes Marktvolumen. Des Weiteren konnte in den konservativen Branchen auch eine große Skepsis gegenüber neuer Prüftechnologien festgestellt werden, die nur durch überzeugende Ergebnisse und einen steigenden Bekanntheitsgrad von Ultraschall in der Elektronikfertigung überwunden werden kann. Um zu überzeugenden Ergebnissen zu gelangen, muss ein hoher Entwicklungsaufwand betrieben werden, z.B. das Erreichen der fokussierten Prüfparameter und die Art der Prüfkopf-Ankopplung, der mit zusätzlichen Kosten verbunden ist.

Die Ergebnisse haben jedoch auch gezeigt, dass die von „inspect inline“ konzipierte Prüftechnologie eine optionale Ergänzung zur AOI und zur elektrischen Prüfung darstellt, die große Auswirkungen auf die Qualitätssicherung elektronischer Baugruppen haben kann. Zudem wurde auch anhand der Auswertung der Trends ein wachsender Prüfbedarf bei hochwertigen Elektronikprodukten festgestellt. Der Erfolg der Technologie hängt maßgeblich von dem Erreichungsgrad der anvisierten Prüfparameter hinsichtlich Flexibilität im Einsatz, Geschwindigkeit und Vereinfachbarkeit der Datenauswertung ab.

Referenzen

- [1] Sherman, R.: Nanotechnology Markets and Trends (2005), S.30.
- [2] Trommsdorff, V.; Steinhoff, F.: Innovationsmarketing (2007)
- [3] Wolter, K.-J.; Zerna, Th.: Produktionstechnik für eine Aufbau- und Verbindungstechnik für die Nanoelektronik – Abschlussbericht zur Ermittlung des Forschungs- und Handlungsbedarfs, ZVEI (2005).
- [4] Frost & Sullivan: Global Surface Mount Technology Inspection Equipment Markets (2009), S.58.
- [5] McWilliams, A.: Nondestructive Testing, BCC Research (2006).