TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

AVT

Studienunterlagen

Studentengruppe KPI

Material zur Vorlesung „ Aufbau- und Verbindungstechnik“
Material zur Vorlesung „Montagetechnologien“
Material zur Vorlesung „Qualitätsmanagement“

Anhang:

Anleitung Praktikum „SMT I + SMT II“
Anleitung „Ultraschallmikroskopie“
Anleitung „Röntgendiagnostik“
Übersicht „Rasterelektronenmikroskop“

Ausgabe 2012

Bearbeitet von:

Prof Dr.-Ing. habil. T. Zerna

PD Dr.-Ing. habil. T. Herzog
Dr.-Ing. habil. H. Wohlrabe

Dr.-Ing. G. Hielscher

Dr.-Ing. M. Oppermann

FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIONSTECHNIK

Inhaltsverzeichnis

1 Entwurf einer Leiterplatten-Baugruppe 3
1.1 Überblick zum Gesamtablauf der Leiterplatten-Entwicklung 3
1.2 Konzeption und Aufbau des CAD-Systems "Eagle 5" 4
2 Leiterplattenherstellung 6
2.1 Einleitung 6
2.2 Leiterplattenherstellungsverfahren 6
2.2.1 Übersicht 6
2.2.2 Subtraktiv-Verfahren 6
2.3 Theoretische Grundlagen ausgewählter Verfahrensabschnitte 7
2.3.1 Ätzverfahren 7
2.3.2 Arten und Anwendung von Ätzreserven und Galvano-Resisten 8
2.3.3 Leiterbildschutz 9
2.3.4 Basismaterialien und Verfahren zur Leiterplattenherstellung 10
3 Oberflächenmontage 11
3.1 Überblick und Einordnung 11
3.2 Aufbringen des Lotwerkstoffes 14
3.3 Bauelementebestückung 18
3.4 Lötverfahren 20
4 Grundlagen der Prüfung von Leiterplatten-Baugruppen 24
5 Qualitätsmanagement 28
5.1 Qualitätskenngrößen und -modelle 28
5.1.1 Qualitätskenngrößen elektronischer Erzeugnisse 28
5.1.2 Toleranzen 28
5.1.3 Prozesscharakteristik 29
5.1.4 Ausbeute technologischer Prozesse 30
5.1.5 Ausbeute in Systemen 30
5.1.6 Ausbeute als Wahrscheinlichkeit 30
5.1.7 Fehlerquote technologischer Prozesse 31
5.1.8 Fehlerquote elektronischer Erzeugnisse 31
5.1.9 Arbeitspunkt technologischer Prozesse 32
5.1.10 Prozessfähigkeit (process capability) 32
5.2 Der Prüfprozess - Kenngrößen und Modelle 33
5.2.1 Einführung 33
5.2.2 Nicht reparierbare Fehler 33
5.2.3 Reparierbare Erzeugnisse 33
5.2.4 Annahme und Rückweisung 34
5.2.5 Kostenoptimale Prüfung 34
5.2.6 Idealer und realer Prüfprozess 35
5.3 DIN EN ISO 9000 ff 37
5.3.1 Das Qualitätsmanagement-Handbuch 37
5.3.2 Aufgabenstellung Qualitätssimulation 39
6 Verzeichnisse 43
6.1 Verzeichnis der Abbildungen 43
6.2 Verzeichnis der Tabellen 43

1 Entwurf einer Leiterplatten-Baugruppe

1.1 Überblick zum Gesamtablauf der Leiterplatten-Entwicklung

Der prinzipielle Ablauf bei der Entwicklung einer elektronischen Baugruppe gliedert sich in folgende Schwerpunkte:

- Untersetzung der Schaltungsidee mit funktionellen, technischen, ökonomischen und anderen Anforderungen
- Entwicklung des Stromlaufplanes, ggf. mit Funktionstest durch Simulation oder vereinfachten Aufbau
- Entwicklung des Baugruppenkonzepts mit Gliederung der Schaltung/Module sowie der Technologie- und Bauelementeauswahl
- Entwicklung der geometrischen Gestaltung der Baugruppe sowie Erfassen der funktionellen und technologischen Restriktionen
- Untersuchung des Betriebsverhaltens, der Fertigbarkeit, der Testbarkeit und anderer Parameter der Baugruppe durch Simulation und /oder Testaufbau bzw. Prototyping
- Re-Design der Baugruppe und abschließende Definition zur Fertigung einschließlich Prüfung
- Erarbeitung von Fertigungsunterlagen und Erstellen von Datensätzen für die nachfolgenden Prozessschritte
- Fertigung der Baugruppe

Ausgangspunkt des Entwurfs einer elektronischen Baugruppe ist die Entwicklung einer elektronischen Schaltung durch die Verknüpfung einzelner Schaltungselemente im Stromlaufplan zur Realisierung der gewünschten Funktion. Dieser Stromlaufplan wird in den meisten CAD Systemen unter Nutzung bereits weitestgehend vorliegenden Schaltzeichen in eine grafische Oberfläche der Software eingegeben. Daraus abgeleitet wird eine Verbindungsliste aufgestellt, die alle elektronischen Verbindungen für die Schaltung erfasst.

Die Entscheidung, welche Technologie zur Realisierung der Baugruppe genutzt werden soll, ist wesentlich für die erreichbare Qualität und Packungsdichte. Von wesentlicher Bedeutung ist die Unterscheidung, ob Bauelemente mittels Durchstecktechnik (Through Hole Technology THT) oder durch Oberflächenmontage (Surface Mount Technology SMT) auf der Leiterplatte befestigt werden. Weiterhin sind die minimalen Leiterzugbreiten und -abstände festzulegen. Außerdem müssen Forderungen hinsichtlich der Testbarkeit der Baugruppe berücksichtigt werden.

Nach der Auswahl der Technologie und der Bauelementformen erfolgt die Zuordnung der Bauelemente zu den Schaltzeichen und zu den Geometrien, meist unter Nutzung von Bauelementbibliotheken. Außerdem wird die Geometrie der Leiterplatte festgelegt und ggf. der Bereich zur Bauelementplatzierung genauer eingegrenzt.

Im nächsten Schritt wird die Bauelementplatzierung vorgenommen. Dies wird trotz der Automatisierbarkeit im CAD System meist interaktiv durchgeführt. Zuerst sollten die Bauelemente platziert werden, deren Lage auf der Leiterplatte durch Restriktionen festgelegt ist (z.B. Außenanschlüsse, Sensorelemente) oder eine große Anzahl von Verbindungen besitzen. Nachfolgend werden alle weiteren Bauelemente platziert. Wesentliches Kriterium für die Platzierung ist bereits eine möglichst gute Entflechtung der Verbindungen der Bauelemente, um möglichst keine Leiterzugkreuzungen und damit zusätzliche Leitebenen zu erhalten. Andererseits werden durch die Bauelementplatzierung die Packungsdichte der Baugruppe und die Möglichkeiten zur Leiterzugführung mitbestimmt. Die sich anschließende Entwicklung der Leiterzugführung auf der Leiterplatte zur Verdrahtung der Bauelemente (Routing) wird in modernen CAD-Systemen in einem speziellen Softwaremodul (Router) interaktiv durchgeführt. Dabei wird in mehreren Durchläufen eine optimale Leiterzugführung gesucht und in mehreren Etappen auch eine Optimierung der Bauelementeplatzierung durch Umordnung, Drehung etc. angestrebt.

Abgeschlossen wird der Baugruppenentwurf durch die Aufbereitung der Daten für die nachfolgenden Prozesse, insbesondere für die Erstellung der Fotoschablonen im Photoplotter, CAD-Daten für den Bestückautomaten und für die mechanische Bearbeitung der Leiterplatte im Fräs-Bohrplotter.

In komfortablen CAD-Systemen werden oft zusätzliche Möglichkeiten zur Simulation der Funktion der Schaltung und zur Simulation der Betriebsbedingungen der Baugruppe, z.B. des thermischen Verhaltens, angeboten.

1.2 Konzeption und Aufbau des CAD-Systems "Eagle 5"

EAGLE wird in verschiedenen Ausführungen angeboten. Sie können den Layout-Editor mit einem zusätzlichen Autorouter-Modul oder/und mit einem Schaltplan-Modul erweitern. Modul deshalb, weil sich EAGLE auch mit Zusatz-Modul(en) immer so verhält wie ein in sich geschlossenes Programm. Die Bedienung ist immer einheitlich.

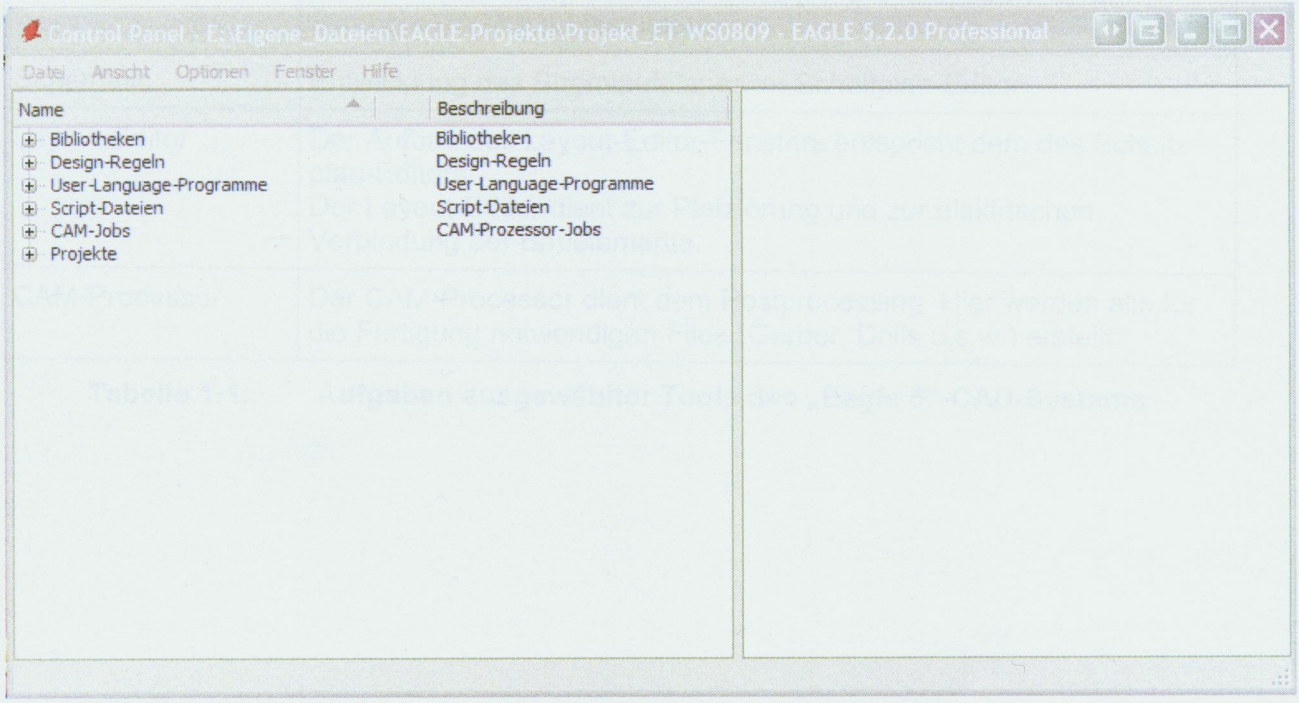


Abbildung 1-1: Haupt- und Kontrollfenster von Eagle 5

Layout-Editor, das Grundprogramm

Die Grundausführung von EAGLE enthält den Layout-Editor, mit dem Sie Platinen entwerfen können. Darin enthalten sind der Bibliotheks-Editor, der CAM-Prozessor und ein Texteditor. Mit dem Bibliotheks-Editor können Sie schon in der Grundausführung Gehäuse und Schaltplansymbole bearbeiten. Der CAM-Prozessor ist das Ausgabeprogramm, mit dem Sie die Fertigungsdaten (z. B. Fotoplot- und Bohrdateien) erzeugen. Es ist ebenfalls möglich User-Language-Programme und Script-Dateien zu nutzen.

Schaltplan-Modul

Wenn Sie das Schaltplan-Modul besitzen, zeichnen Sie zunächst einen Stromlaufplan. Man kann mit einem Mausklick jederzeit die zugehörige Platine erzeugen. EAGLE wechselt dann in den Layout-Editor, wo die Bauelemente mit den Luftlinien (Sollverbindungen) neben einer Leerplatine platziert sind. Von da an können Sie wie gewohnt im Layout-Editor weiterarbeiten. Schaltplan und Layout werden von EAGLE automatisch konsistent gehalten (Forward&Back-Annotation).

Autorouter

Ist das Autorouter-Modul vorhanden, haben Sie im Layout-Editor die Möglichkeit, vorher definierte Sollverbindungen (dargestellt als Luftlinien) automatisch verdrahten zu lassen. Dabei können Sie einzelne Netze, Gruppen von Netzen oder alle noch nicht gerouteten Verbindungen dem Autorouter übergeben (AUTO-Befehl). Dabei werden verschiedene Netzklassen mit unterschiedlichen Leiterbahnbreiten und Mindestabständen berücksichtigt.

In Tabelle 1-1 werden die Aufgaben wichtiger Tools des "Eagle 5"-CAD-Systems für den Baugruppen-Entwurf wiedergegeben.

Tool	Aufgaben
Control Panel	Arbeitsoberfläche des CAD-Systems. Durch die Baumstruktur erhält man rasch einen Überblick über Bibliotheken, Design Rules, CAM-Jobs und Projekte. Zu den Projekten können, außer Schaltplänen und Layouts, auch spezielle Bibliotheken, Text-, Fertigungs- und Dokumentationsdateien gehören.
Libraries	Im Bibliotheks-Editor werden Geometrien für verschiedene Bauelemente [DEVICE], deren Gehäuse [PACKAGE] sowie deren Symbole [SYMBOL] festgelegt.
Schematic	Entwicklung des Stromlaufplanes im Schaltplan-Editor.
Layout-Editor	Der Aufbau des Layout-Editor-Fensters entspricht dem des Schaltplan-Editors. Der Layout-Editor dient zur Platzierung und zur elektrischen Verbindung der Bauelemente.
CAM-Processor	Der CAM-Processor dient dem Postprocessing. Hier werden alle für die Fertigung notwendigen Files (Gerber, Drills u.s.w.) erstellt.

Tabelle 1-1: Aufgaben ausgewählter Tools des „Eagle 5"-CAD-Systems

2 Leiterplattenherstellung

2.1 Einleitung

In einem amerikanischen Patentgesuch wurde im Jahre 1925 erstmals die Idee festgehalten, Leiterzüge mit Hilfe leitfähiger Pasten auf eine isolierende Trägerplatte zu drucken und sie anschließend galvanisch zu verstärken (daher auch die allgemeine Bezeichnung "gedruckte Schaltung" bzw. engl. "printed circuit board") /1/. Seitdem hat sich auf dem Gebiet der Leiterplattenherstellung - speziell in den letzten 30 Jahren - eine rasante Entwicklung vollzogen. Das betrifft sowohl Qualität als auch Quantität. Der Wert der amerikanischen Leiterplattenfertigung betrug beispielsweise 1998 ca. 3 Mrd. US$.

2.2 Leiterplattenherstellungsverfahren

2.2.1 Übersicht

Die Einsatzbereiche der Leiterplatte sind heutzutage recht vielfältig. Vor allem aus Gründen der Qualität, Funktionssicherheit und kostengünstigen Produktion sind im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Verfahren zur Leiterplattenherstellung entwickelt worden. Die Mehrzahl von ihnen basiert auf einer Abfolge chemischer und elektrochemischer Prozesse, in denen das spätere Leiterzugbild entsteht. Der Charakter eben dieser Prozesse wurde bei der Einteilung der drei Verfahrensgruppen in Abbildung 2-1 zugrunde gelegt.

Bei subtraktiven Verfahren erfolgt ein Abtrag der bereits auf dem Trägermaterial befindlichen geschlossenen Leitschicht in "überflüssigen" Bereichen, so dass am Ende nur das Leiterzugbild übrig bleibt. Additive Verfahren dagegen bauen es erst durch gezielte Materialanlagerung in den gewünschten Gebieten auf. Die dritte Gruppe umfasst verschiedene "Kombinationen" additiv und subtraktiv wirkender Prozesse.

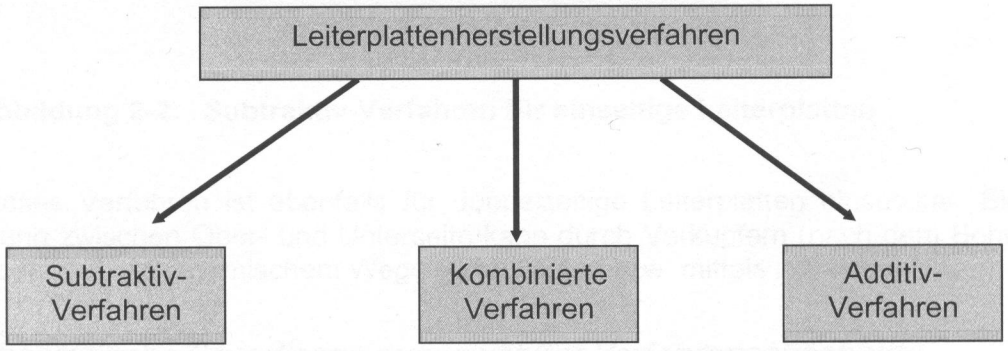


Abbildung 2-1: Systematik der Leiterplattenherstellungsverfahren

2.2.2 Subtraktiv-Verfahren

Das Subtraktiv-Verfahren erlangte großtechnisch in Deutschland - und damit in Europa - erstmals 1956 an Bedeutung, als die erste, auf diese Weise gefertigte Leiterplatte in Serie ging. Eine wesentliche Grundlage dafür war Ende der 40er Jahre mit der Einführung neuer Basismaterialien geschaffen worden. Sie bestanden aus einem isolierenden Schichtpressstoff als Träger, auf den man eine dünne Kupferfolie als Leitschicht auflaminiert (kaschiert) hatte. Aus dieser Folie wurde durch Ätzen das spätere Leiterzugbild herausgearbeitet.

Verwendet werden können sämtliche bekannten Basismaterialien, die in der Regel eine 18µm oder 35µm starke Kupferkaschierung tragen. Es besteht alternativ die Möglichkeit erst die Leiterplatte zu strukturieren und anschließend die Bohrungen einzubringen oder zuerst das Basismaterial zu bohren (Abbildung 2-2). Der Ätzresist, welcher vor dem Kupferabtrag aufgebracht wird, bedeckt die zu bildenden Leiterzüge und verhindert einen Angriff des Ätzmediums. Aufgrund der relativ starken Schichten darf die Unterätzung nicht vernachlässigt werden.

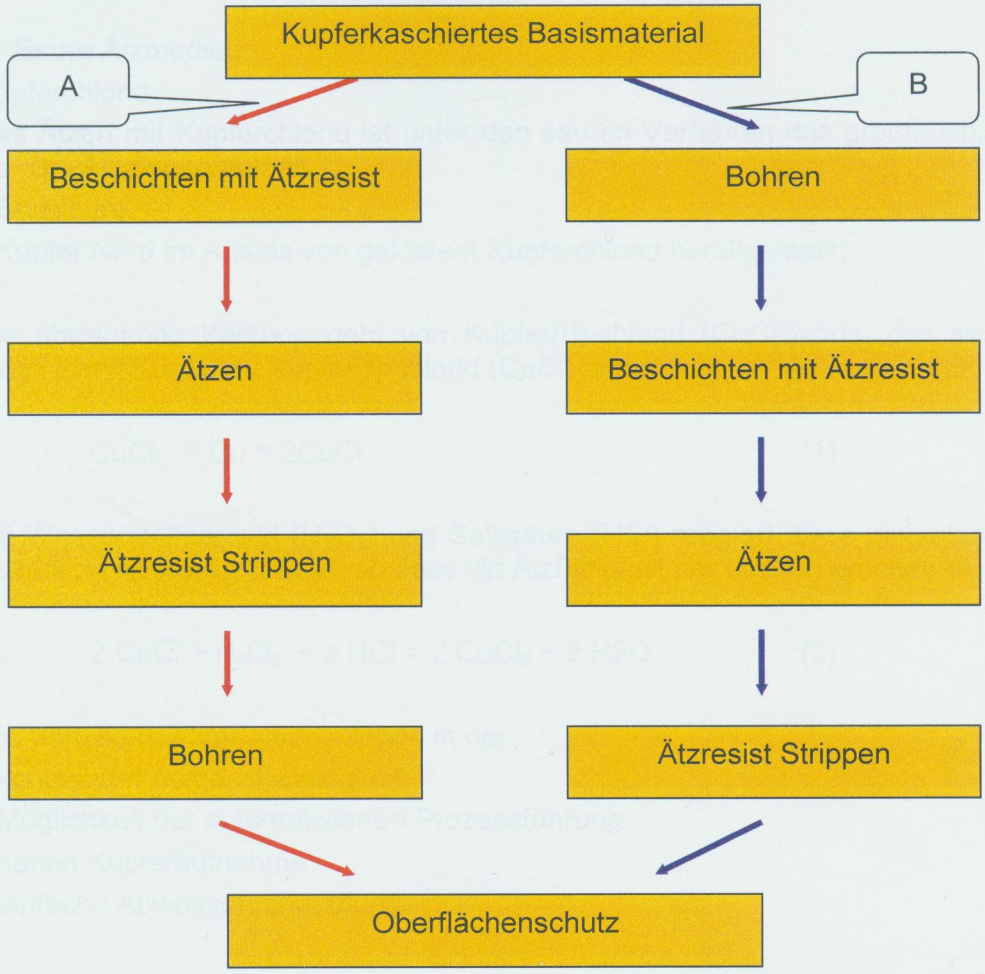


Abbildung 2-2: Subtraktiv-Verfahren für einseitige Leiterplatten

Dieses Verfahren ist ebenfalls für doppelseitige Leiterplatten einsetzbar. Eine elektrische Verbindung zwischen Ober- und Unterseite kann durch Verkupfern (nach dem Bohren, Abbildung 2-2, B) oder auf nichtchemischem Wege durch Nieten bzw. mittels leitfähiger Pasten erfolgen.

2.3 Theoretische Grundlagen ausgewählter Verfahrensabschnitte

2.3.1 Ätzverfahren

Beim Ätzen von Leiterplatten wird durch Einwirkung spezieller Lösungen die Kupferschicht abgetragen und so das gewünschte Leiterzugbild erzeugt. Mit der Wahl des Ätzmediums legt man fest,

- welche Abdeckschichten verwendet werden können,
- wie groß die Kupferaufnahme der Lösung ist,
- wie sich die Ätzgeschwindigkeit verhält,
- welcher Aufwand zur Entsorgung notwendig bzw. ob eine Regenerierung möglich ist,
- wie wirtschaftlich man arbeiten kann,
- wie groß die Unterätzung und damit die realisierbaren Leiterzugbreiten und -abstände sind.

Geätzt wird sowohl im Tauch-, Schaum- als auch im Sprühverfahren mit alkalischen sowie sauren Ätzlösungen.

2.3.1.1 Saure Ätzmedien

Kupferchlorid

Das Ätzen mit Kupferchlorid ist unter den sauren Verfahren das großtechnisch am meisten genutzte. Die Ätzlösung enthält

- Salzsäure
- Kupfer (wird im Ansatz von gelöstem Kupferchlorid bereitgestellt)

Die abtragende Wirkung geht von Kupfer(II)-chlorid ($CuCl_2$) aus, das sich entsprechend Gleichung (1) mit Kupfer zu Kupfer(I)-chlorid (CuCl) umsetzt.

$$CuCl_2 + Cu = 2CuCl \qquad (1)$$

Mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Salzsäure (HCl) reagiert diese nichtätzende Verbindung sofort wieder zu Kupfer(II)-chlorid, so dass die Ätzfähigkeit der Lösung erhalten bleibt.

$$2\,CuCl + H_2O_2 + 2\,HCl = 2\,CuCl_2 + 2\,H2O \qquad (2)$$

Die Vorteile des Verfahrens liegen in der

- konstanten Ätzgeschwindigkeit
- Möglichkeit der automatisierten Prozessführung
- hohen Kupferaufnahme
- einfache Abwasserbehandlung.

Weitere mögliche saure Ätzverfahren sind: Wasserstoffperoxid + Schwefelsäure
Ammonium-/Natriumpersulfat
Eisen(III)-chlorid

2.3.1.2 Alkalische Ätzmedien

Die Entwicklung von Verfahren mit alkalischen Ätzmedien erfolgte vorwiegend unter dem Gesichtspunkt, uneingeschränkt auch metallische Ätzreserven einsetzen zu können, die zum Teil von sauren Lösungen selbst angegriffen werden. Aufgrund des niedrigen pH-Wertes (<9) ermöglichen sie auch die Verwendung aller alkalisch entwickelbaren Photoresiste.

Wesentliche Bestandteile einer alkalischen Ätzlösung sind ein Kupfersalz und Ammoniak.

Aufgrund des ständigen Entweichens von Ammoniak sind die Verfahren weniger für einen diskontinuierlichen Betrieb geeignet. Die damit verbundene starke Geruchsbelastung sowie ätzende Wirkung auf die Atemwege machen eine Absaugung zwingend notwendig.

2.3.2 Arten und Anwendung von Ätzreserven und Galvano-Resisten

2.3.2.1 Übersicht

Wie bereits geschildert, entsteht das Leiterzugbild durch selektiven Materialauf- und -abtrag. Bereiche, die von diesen Prozessen nicht betroffen werden sollen, müssen vorher mit einer geeigneten Schutzschicht versehen werden. Man bezeichnet diese Schichten nach ihrem Verwendungszweck als Ätzreserven und Galvano-Resiste.

Ätzreserven (auch Ätzresiste) haben die Aufgabe, den Angriff von ätzenden Chemikalien auf die unter ihnen liegende Metalloberfläche zu verhindern. Sie müssen demnach

- resistent gegen das eingesetzte Ätzmedium sein,
- gut auf der Kupferoberfläche haften,
- sich einfach und ohne Beeinträchtigung des Untergrundes entfernen lassen oder
- Schutz gegen Korrosion bieten, wenn sie auf Kontaktflächen verbleiben.

Die Dicke der Schutzschicht spielt eine untergeordnete Rolle.

Der Galvano-Resist wird an Stellen aufgebracht, die frei von galvanisch abgeschiedenem Metall bleiben sollen.

Je nach gewähltem Verfahren verwendet man für solche Schichten

- Metalle (mit Einschränkungen)
- Lacke
- Fotoresiste.

Fotoresiste sind Stoffe, deren Lichtempfindlichkeit bei der Übertragung des Leiterzugbildes genutzt wird. Die aufgebrachte Schicht bedeckt man mit einer Fotovorlage der Leiterzüge und belichtet mit UV-Licht. In einem geeigneten Bad lässt sich anschließend der Resist an den unbelichteten (negativ-arbeitend) oder belichteten Stellen (positiv- arbeitend) entfernen (entwickeln).

2.3.2.2 Flüssigresiste

Am Anfang der Leiterplattenfertigung arbeitete man zunächst ausschließlich mit Flüssigresisten (Lacke). Diese wurden selektiv aufgebracht. Heute kommen verstärkt Fotoresiste zum Einsatz.

Alle Lacke sind im Allgemeinen in alkalischen Lösungen bzw. mittels spezieller Lösungsmittel entfernbar und somit nur für saure und leicht alkalische (pH<9) Medien zu verwenden. Sie bestehen aus Lackbindemitteln, Farbpigmenten oder Farb- und Füllstoffen, Lösungsmitteln sowie Lackadditiven und werden im Siebdruckverfahren mit entsprechenden Druckformen aufgetragen. Fotostrukturierbare Lacke können ganzflächig durch Tauch-, Sprüh- und Gießverfahren aufgebracht werden.

2.3.2.3 Festresiste

Festresiste liegen als auf Rollen gewickelte Folien vor. Die Beschichtung erfolgt mittels geeigneter Laminatoren. Unter der gleichzeitigen Einwirkung von Wärme und Presskräften haftet der erweichte Resist auf der mikrorauhen Kupferoberfläche.

2.3.3 Leiterbildschutz

2.3.3.1 Lotstoppmaske

Als Lotstoppmaske bezeichnet man eine Schutzschicht aus Lotstopplack oder Photoresist, die nach Abschluss der leiterzugbildenden Prozesse beidseitig auf die Leiterplatte aufgebracht wird. Sie schützt die Leiterzüge vor äußeren mechanischen und chemischen Einwirkungen. Dabei müssen alle Kontaktflächen für Bauelemente unbedeckt bleiben.

2.3.3.2 Schutz freiliegender Kupferflächen

Kupfer ist ein Metall, das sehr leicht oxidiert und dabei seine elektrischen und physikalischen Eigenschaften verändert. So weist es danach eine verminderte Lötbarkeit sowie einen erhöhten elektrischen Widerstand auf. Aus diesen Gründen heraus ist es notwendig, vorgesehene Lötflächen über einen längeren Zeitraum so zu schützen, dass auch danach eine problemlose Weiterverarbeitung möglich ist.

In der Praxis haben sich verschiedene Methoden bewährt:

- Heißverzinnen
- Abscheiden geeigneter metallischer Schichten
- Aufbringen einer organischen Schutzschicht (Preflux)

Das Heißverzinnen ist eine weit verbreitete und für viele Einsatzbereiche anerkannte Möglichkeit des Oberflächenschutzes. Man arbeitet heute vorwiegend nach einem Verfahren, das als Hot Air Leveling (HAL) bekannt ist und Mitte der 70er Jahre in den USA entwickelt wurde. Das Prinzip besteht darin, die lotstoppbeschichtete Leiterplatte in eine eutektische Zinn/Blei-Schmelze zu tauchen und sie beim Herausziehen zwischen zwei Luftmessern hindurchzuführen. Der heiße

Luftstrahl bläst das noch flüssige überschüssige Lot aus den Löchern sowie von den Leiterzügen, so dass diese am Ende nur von einer dünnen, gleichmäßig ebenen Lotschicht bedeckt werden.

Als alternative Verfahren, speziell für SMT-Schaltungen, nutzt man die chemische Abscheidung metallischer Schichten oder arbeitet mit Lösungen auf organischer Basis (sog. Prefluxe).

Prefluxe bieten auch nach dem Lötvorgang einen guten Oberflächenschutz. Sie werden im Tauchverfahren 0,3...0,6 µm dick aufgebracht zu werden und haften nur auf Kupfer. Beim Lötprozess verschwinden sie durch die Einwirkung organischer Lösungsmittel rückstandsfrei. Die Verarbeitungszeit solcherart beschichteter Platten liegt bei ca. 6 Monaten.

2.3.4 Basismaterialien und Verfahren zur Leiterplattenherstellung

Mit der Wahl des Basismaterials werden bereits ganz entscheidend die mechanischen und elektrischen Qualitätskenngrößen der entstehenden Leiterplatte bestimmt, zum Teil auch das Herstellungsverfahren festgelegt. Als starre Trägermaterialien kommen Schichtpressstoffe auf der Basis Harz - Trägerfolie/-gewebe zum Einsatz. Zu ihrer Herstellung werden das noch flüssige Harz und der flexible Träger abwechselnd lagenweise übereinandergeschichtet und anschließend bei hohen Temperaturen verpresst.

In der Praxis bevorzugt man Materialien aus

- Phenolharz-Hartpapier (FR 2)
- Epoxidharz-Hartpapier (FR 3)
- Epoxidharz-Glasgewebe (FR 4).

In der Literatur und im fachlichen Sprachgebrauch werden oft nur die in Klammern aufgeführten Kurzbezeichnungen benutzt, die der amerikanischen NEMA-LI-1 Vorschrift (National Electrical Manufacturers Association) entstammen.

Allgemein lassen sich folgende Forderungen an ein starres Trägermaterial nennen:

- gute mechanische Festigkeit und Biegesteifigkeit
- geringe Wölbung der Platten
- hohe Kriechstromfestigkeit
- geringe Schrumpfung
- an die Beschichtung angepasste Ausdehnungskoeffizienten
- allgemein gute Wärmebeständigkeit
- gute Prüfbarkeit durch AOI-Systeme (Automatische Optische Inspektionssysteme)
- schlechte Brennbarkeit

Von den praxisrelevanten Materialien entspricht FR 4 noch am besten diesen Forderungen, ist jedoch auch am teuersten, wogegen Papierlaminate nur bedingt einsetzbar sind.

Zur Leiterplattenherstellung erhält der Träger eine Kaschierung aus hochreiner Kupferfolie (Reinheitsgrad mindestens 99,95%), die man in Stärken von 5, 9, 18, 35, 70, 105, 175 und 210 µm auflaminiert.

Literatur: *G. Herrmann*
Handbuch der Leiterplattentechnik
Eugen Leuze Verlag; Saulgau/Württ., 2. Auflage 1989

M. Hummmel
Einführung in die Leiterplattentechnologie
Eugen Leuze Verlag; Saulgau/Württ., 3. Auflage, 1991

3 Oberflächenmontage

3.1 Überblick und Einordnung

In der „herkömmlichen" Montagetechnik für Elektronikbaugruppen wurden bis etwa 1975 ausschließlich Bauelemente in der so genannten Durchstecktechnik (THT – Through Hole Technology) verwendet. Die Anschlüsse dieser Bauelemente, sowohl von passiven Zweipolern (Widerstände, Kondensatoren) als auch von aktiven Mehrpolern (Transistoren, Integrierte Schaltkreise) wurden beim Bestücken auf die Leiterplatte durch entsprechende Bohrungen durchgesteckt und dann auf der Unterseite zur Herstellung einer mechanischen und elektrischen Verbindung gelötet. Dieser Prozess des Lötens geschah sequentiell (so genannte Selektivlötverfahren wie z.B. auch Handlöten mit dem Lötkolben) oder quasiparallel in der industriellen Fertigung mittels Schwall- oder Wellenlöten.

Die Gestaltung elektronischer Baugruppen wird in besonderem Maße durch die Anforderungen an die mit ihnen aufgebauten Produkte und durch die Vorreiterrolle der Halbleiterindustrie bestimmt. Die wichtigsten Technologietreiber sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

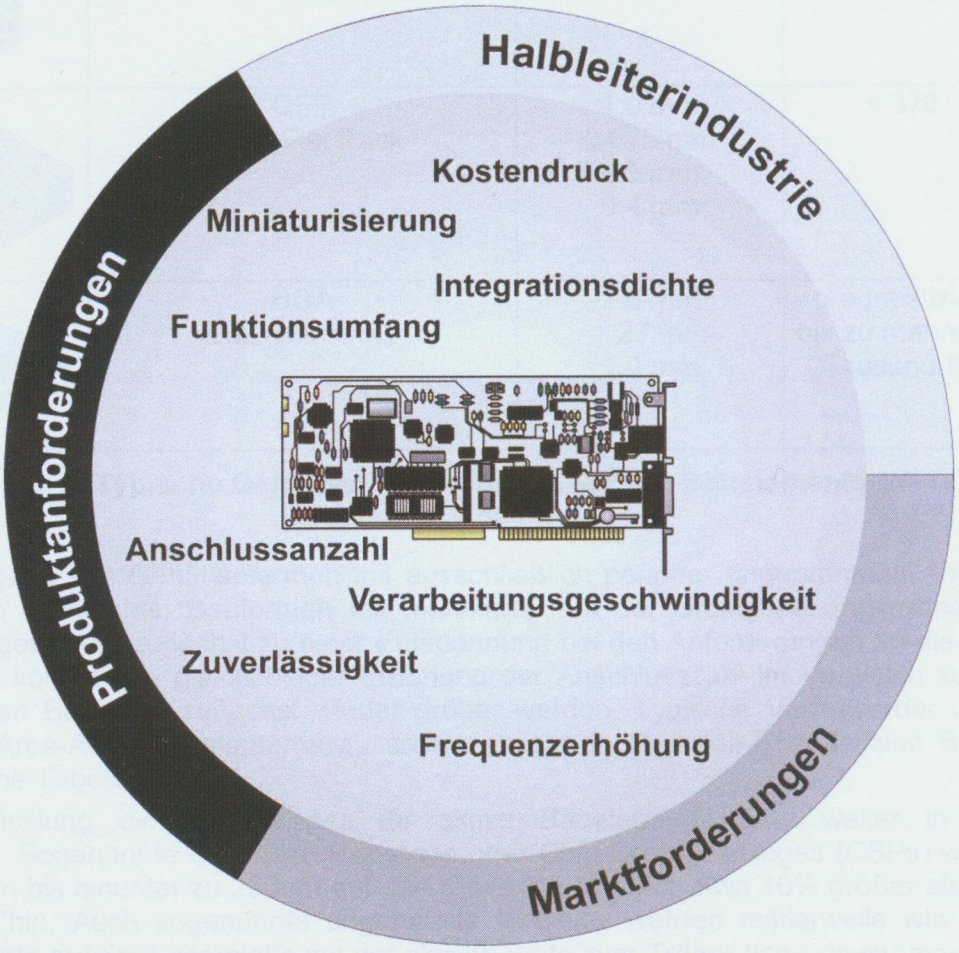


Abbildung 3-1: Technologietreiber in der Elektronikproduktion

Die Potenziale der THT-Bauelemente, insbesondere bezüglich Erhöhung der Anschlusszahlen und Verringerung des Platzbedarfes, waren sehr bald ausgeschöpft und konnten mit dem Innovationsdruck der Halbleiterindustrie nicht mehr Schritt halten.

Aus diesen Gründen geschah sehr schnell der Übergang zu den oberflächenmontierbaren Bauelementen (SMD – Surface Mounted Devices). Die Anschlüsse der Bauteile werden dabei nur noch auf die Oberfläche des Trägers (der Leiterplatte) aufgesetzt. Damit ist eine Verringerung der Abstände (Pitch) zwischen den Bauelementeanschlüssen weit unter das für THT-Bauelemente gesetzte Limit möglich. Typische Gehäuseformen (Packages) für aktive SMD-Bauelemente zeigt Tabelle 3-1.

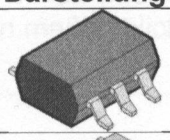
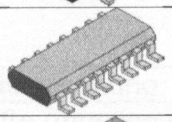
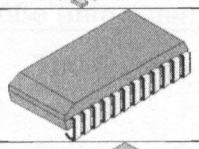
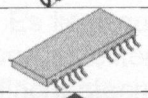
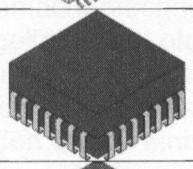
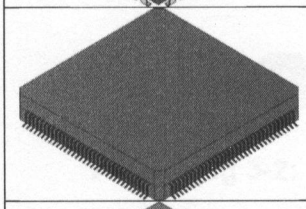
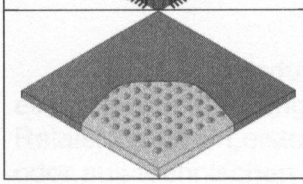
Darstellung	Bezeichnung	typ. Pitch	I/O-Zahl
	DIP Dual Inline Package	1.27 mm	16
	SO Small Outline	1.27 mm	6 – 32
	SOJ Small Outline J-Lead	1.27 mm	< 42
	TSOP Thin Small Outline Package	1.27 mm 0.8 mm	< 80
	PLCC Plastic Leaded Chip Carrier	1.27 mm	28, 44, 68, 84
	QFP Quad Flat Pack	1.0 mm 0.625 mm 0.5 mm 0.4 mm	< 376
	BGA Ball Grid Array	1.5 mm 1.27 mm 1.0 mm	prognostiziert bis zu mehreren Tausend I/O

Tabelle 3-1: Typische Gehäuseformen für aktive SMD-Bauelemente

Der Übergang von Gehäuseformen mit ausschließlich peripher angeordneten Anschlüssen (z.B. QFPs) hin zu solchen Bauformen mit matrixartig auf der Unterseite angeordneten Pins, Säulen oder Kugeln führt zunächst zu einer Entspannung bei den Anforderungen an die Montage. Anschlussraster können bei gleichzeitiger Erhöhung der Anschlusszahl im Vergleich zu peripher anzuschließenden Bauteilen zunächst wieder gröber werden. Typische Vertreter der unter dem Sammelbegriff Area-Array-Bauelemente zusammengefassten Package-Formen sind BGAs (Ball Grid Arrays, siehe Tabelle 3-1).

Die Entwicklung dieser Packages für aktive Bauelemente geht weiter in Richtung Miniaturisierung. Sogenannte Chip Size Packages oder Chip Scale Packages (CSPs) warten mit Anschlussrastern bis hinunter zu 250µm auf. Die Gehäuse sind nur etwa 10% größer als der darin befindliche IC-Chip. Auch sogenannte ungehäuste IC-Chips werden mittlerweile wie „normale" SMD-Bauelemente auf der Leiterplatte mit der aktiven Seite zum Träger (face-down) montiert (Flip-Chip-Technik).

Passive Bauelemente, d.h. Widerstände und Kondensatoren, werden zumeist als quaderförmige oder zylindrische Keramikbauelemente mit metallisierten Kappen als Anschlussflächen angeboten (siehe Tabelle 3-2). Elektrolytkondensatoren u.ä. haben Sonder-Gehäuseformen.

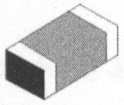
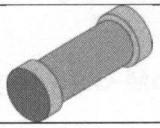
	Bauform Chip		Bauform MELF

Tabelle 3-2: Bauformen passiver Bauelemente

Auch passive Bauelemente unterliegen dem Trend der Miniaturisierung. Tabelle 3-3 zeigt einen maßstäblichen Größenvergleich am Beispiel der Chip-Bauform.

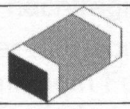
					
Bezeichnung	1206	0805	0603	0402	0201
Größe (mm x mm)	3.2 x 1.6	2.0 x 1.2	1.6 x 0.8	1.0 x 0.5	0.6 x 0.3

Tabelle 3-3: Größenvergleich für Chip-Bauelemente

Es liegt auf der Hand, dass die herkömmlichen Montageprozesse der Durchstecktechnik bei den vorgestellten Bauformen nicht weiter angewendet werden können. Grundsätzlich wird in der Oberflächentechnik (SMT – Surface Mount Technology) das spätere Verbindungsmaterial, im Regelfall eine Lotpaste, zunächst auf die unbestückte Leiterplatte aufgebracht, danach werden die Bauelemente bestückt und anschließend wird die elektrische (und mechanische) Verbindung durch Aufschmelzen des aufgebrachten Lotwerkstoffes realisiert. Dies kann sowohl einseitig als auch auf beiden Seiten einer Leiterplatte geschehen (Abbildung 3-2).

Abbildung 3-2: Ein- und zweiseitig bestückte LP in (reiner) SMD-Technik

In realen Produkten sind „reine" SMD-Baugruppen seltener anzutreffen. Vorherrschend ist eine Mischbestückung, d.h. diverse Komponenten, insbesondere Sonderbauelemente wie Stecker, Relais, Spulen, Leistungsbauelemente etc., werden häufig noch nicht in SMD-Technik angeboten oder aus technischen Anforderungsgründen heraus nicht eingesetzt.

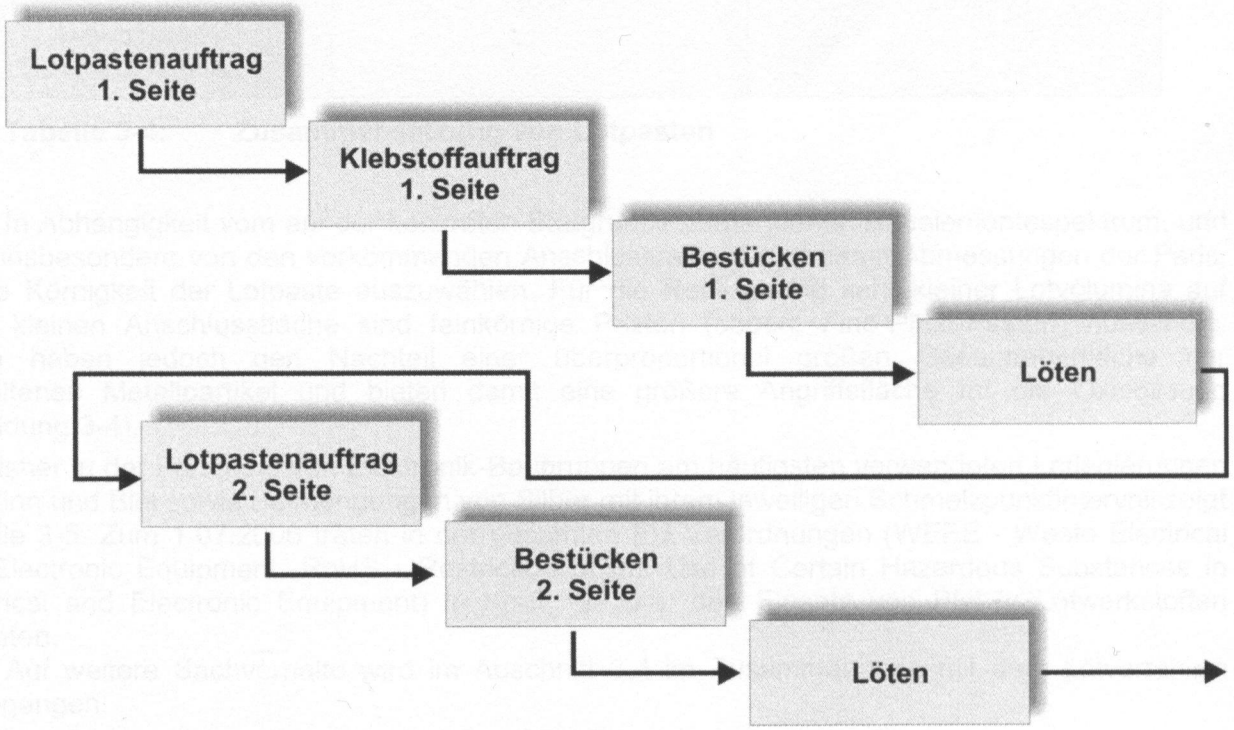


Abbildung 3-3: Prozessablauf bei doppelseitiger SMD-Montage

Bei der Gestaltung des Prozessablaufes für eine konkrete Baugruppe spielt eine Vielzahl von Faktoren eine Rolle. Nicht zuletzt ökonomische Gründe können daher zu einer Entscheidung führen, in einer nahezu vollautomatisierten Fertigung einzelne Bauelemente auf einer Baugruppe an Handarbeitsplätzen nachträglich montieren zu lassen.

Im Mittelpunkt der hier vorliegenden Betrachtungen soll jedoch eine Baugruppe mit „reiner" SMD-Technik stehen mit dem Fokus auf solche Verfahren und Prozesse, die bei einer Prototypen-Fertigung gut einsetzbar sind.

Der schematisierte Verfahrensablauf für die Montage einer doppelseitigen Baugruppe in SMT ist in Abbildung 3-3 dargestellt. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Gewichtskraft eines Bauelementes zu den Adhäsionskräften des beim zweiten Lötprozess wieder aufschmelzenden Lotes auf der (nunmehr) Unterseite der Baugruppe kann der Prozessschritt des Klebstoffauftrages unter Umständen entfallen.

3.2 Aufbringen des Lotwerkstoffes

Für die spätere Herstellung einer elektrischen Verbindung, d.h. einer Lötstelle zwischen dem Bauelemente-Anschluss (Pin, Ball o.a.) und der Anschlussfläche auf der Leiterplatte (Pad), ist in der Oberflächenmontage das vorherige Aufbringen des Lotwerkstoffes notwendig.

Der Lotwerkstoff wird in der Regel in Form einer Paste verarbeitet. Die thermischen Eigenschaften einer Lotpaste werden hauptsächlich durch die sie bestimmende Metalllegierung festgelegt. Die Prozessierbarkeit der Paste, d.h. ihre Eignung für die anzuwendenden Verarbeitungsverfahren, hängt hingegen in erster Linie von den organischen Beimengungen ab (Tabelle 3-4).

	typ. Volumenanteile	typ. Gewichtsanteile
Metallpulver	50%	80%
Flussmittel Bindemittel Lösungsmittel Aktivatoren Thixotropiemittel	50%	20%

Tabelle 3-4: Zusammensetzung von Lotpasten

In Abhängigkeit vom auf der konkreten Baugruppe vorhandenen Bauelementespektrum, und zwar insbesondere von den vorkommenden Anschlussrastern und damit Abmessungen der Pads, ist die Körnigkeit der Lotpaste auszuwählen. Für die Realisierung sehr kleiner Lotvolumina auf einer kleinen Anschlussfläche sind feinkörnige Pasten (sogen. Fine-Pitch-Pasten) notwendig. Diese haben jedoch den Nachteil einer überproportional großen Gesamtoberfläche der enthaltenen Metallpartikel und bieten damit eine größere Angriffsfläche für die Oxidbildung (Abbildung 3-4).

Die bisher in der Fertigung von Elektronik-Baugruppen am häufigsten verwendeten Lotlegierungen aus Zinn und Blei sowie Beimengungen von Silber mit ihrem jeweiligen Schmelzpunktintervall zeigt Tabelle 3-5. Zum 1.07.2006 traten in der gesamten EU Verordnungen (WEEE - Waste Electrical and Electronic Equipment, RoHS - Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) in Kraft, die u.a. den Einsatz von Blei in Lotwerkstoffen verbieten.

Auf weitere Sachverhalte wird im Abschnitt 3.4 im Zusammenhang mit dem Lötverfahren eingegangen.

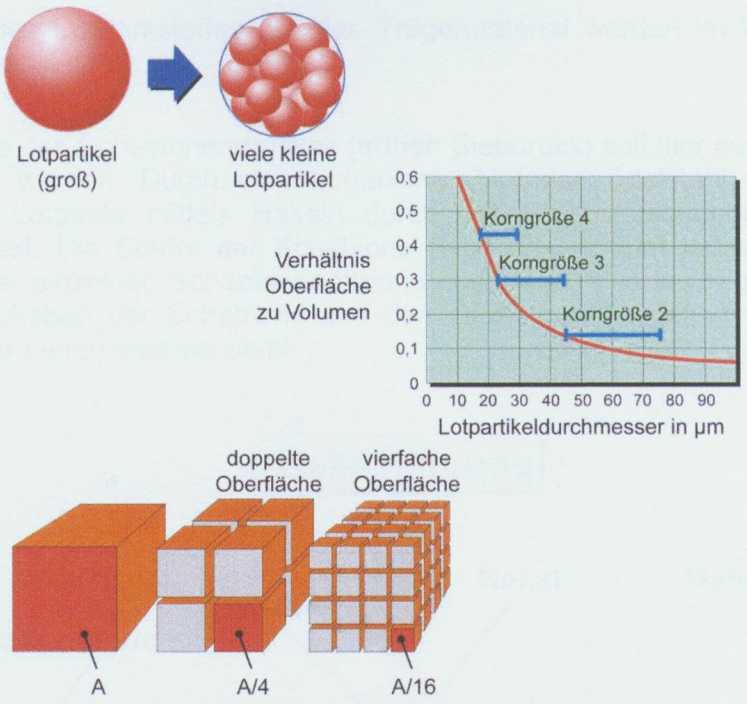


Abbildung 3-4: Einfluss der Partikelgröße in der Lotpaste

bleifrei	SnAg3.8Cu0.7	SnAg3.5	SnAg4Cu0.5	Sn91Zn9
Liquidustemperatur in °C (Temp., über der flüssiger Zustand stabil ist)	219	221	219	199
Solidustemperatur in °C (Temp., unter der fester Zustand stabil ist)	217	221	217	199
bleihaltig, nur noch mit Ausnahmegenehmigung!	Sn63Pb37 (eutektische Leg.)	Sn60Pb40		Sn62Pb36Ag2
Liquidustemperatur in °C (Temp., über der flüssiger Zustand stabil ist)	183	190		189
Solidustemperatur in °C (Temp., unter der fester Zustand stabil ist)	183	183		179

Tabelle 3-5: Schmelzpunktintervall häufig verwendeter Lotwerkstoffe

Verfahren	Eigenschaften, Vor- / Nachteile
Schablonendruck	• Verfahren für die industrielle Serienfertigung • quasisimultan, hochproduktiv, teil- / vollautomatisch • produktspezifisches Werkzeug (Schablone) notwendig
Dispensen	• flexibles Verfahren • sequentiell, daher vergleichsweise langsam • sinnvoll bei Prototyping und manueller Fertigung
Metal Jet	• neues Verfahren nach dem Wirkprinzip des (Tinten-)Strahldrucks • vollautomatisiert, flexibel • wenige Geräte marktreif

Tabelle 3-6: Übersicht der Lotpastenauftragsverfahren

Zum Aufbringen des Lotwerkstoffes auf das Trägermaterial werden im Wesentlichen drei Verfahren eingesetzt (Tabelle 3-6).

Die Wirkungsweise des Schablonendruckes (früher: Siebdruck) soll hier nur am Prinzipbild in Abbildung 3-5 erläutert werden. Durch eine Schablone (Material: Edelstahl, Kupfer, Messing, Kunststoff,...) wird die Lotpaste mittels Rakeln durch definierte Vorschubbewegung auf die Leiterplatte durchgepresst. Die Stärke der Schablone (typ. 100...150µm je nach Bauelemente-Pitch) und die Größe der einzelnen Schablonenöffnung bestimmen das jeweilige Lotvolumen auf dem Pad, das nach Abheben der Schablone aus den Öffnungen ausgelöst wird und auf den Anschlussflächen auf der Leiterplatte verbleibt.

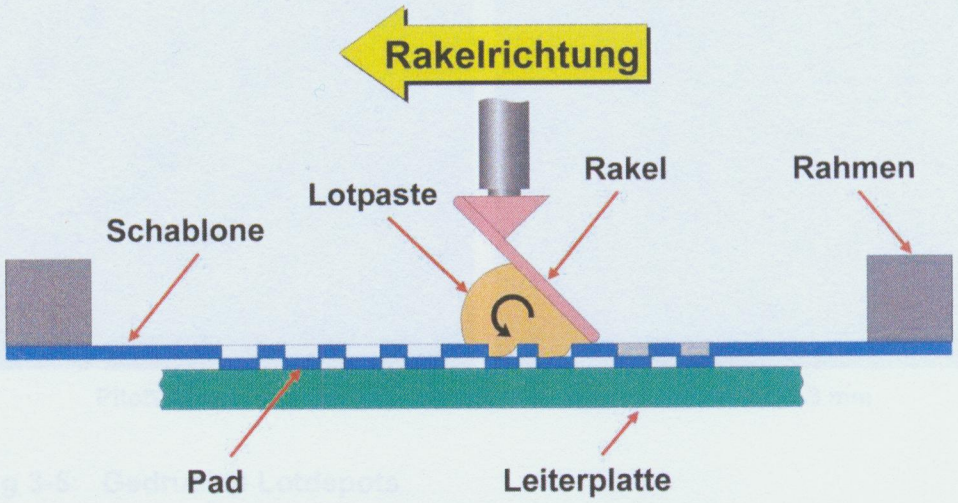


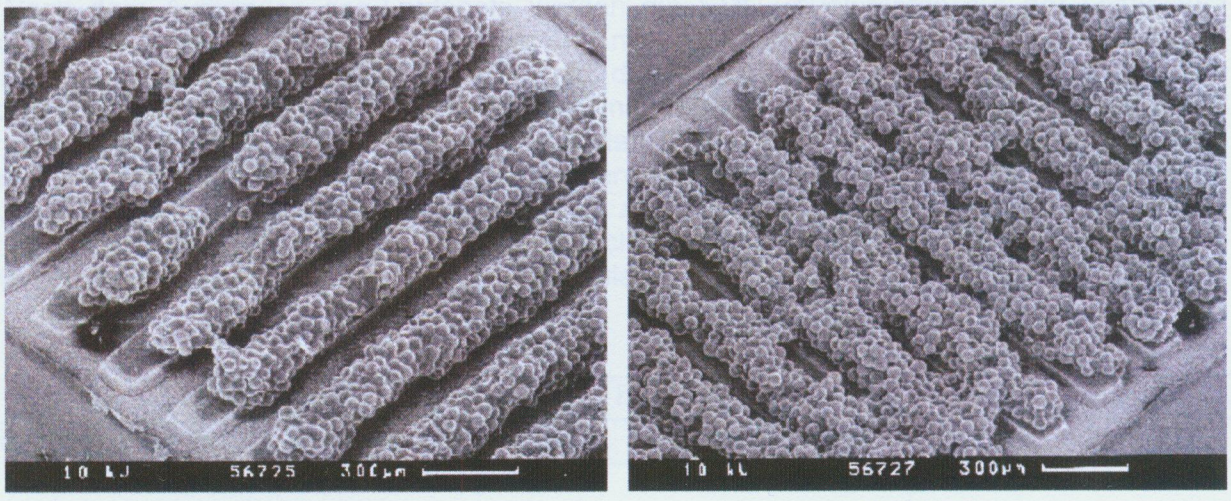
Abbildung 3-5: Prinzipdarstellung des Schablonendruckes

Der Prozessschritt des Lotpastenauftrages wird als die wesentlichste Fehlerquelle im gesamten Fertigungsprozess von elektronischen Baugruppen angesehen. Zwischen 60 und 65% der an fertig montierten Baugruppen festgestellten Fehler liegen ursächlich in einem nicht sicher beherrschten Druckprozess begründet. Mögliche Fehler, Ursachen und Auswirkungen können sein:

Fehlerklasse	Ursachen	Auswirkungen
Lageversatz von Lotdepots	• Fehlpositionierung Leiterplatte zu Schablone • Maßtoleranz Schablone und/oder Leiterplatte	• Kurzschlüsse zu benachbarten Pads • keine Lötverbindung Pin-Pad
zu viel Lot	• Fehldimensionierung Schablone (Dicke, Öffnung)	• „fette" Lötstelle, Gefahr des „Überschwappens" zu benachbarter Lötstelle
zu wenig Lot	• Fehldimensionierung Schablone (Dicke, Öffnung) • Verschmutzung Schablone	• „magere" Lötstelle • keine Lötverbindung Pin-Pad
Brückenbildung im Druckbild	• Verschmutzung Schablonenunterseite	• Kurzschlussbildung

Tabelle 3-7: Fehler beim Lotpastendruck

Auch die REM-Aufnahmen in Abbildung 3-6 zeigen zum Teil solche Erscheinungsbilder, die später Fehler zur Auswirkung haben **können**. Insbesondere in der rechten Darstellung ist ersichtlich, dass zu viel Lotwerkstoff aufgebracht wurde. Dem kann in der Regel mit einer Verringerung der Schablonendicke begegnet werden, jedoch ist ein Gleichgewicht mit den Anforderungen durch auf der gleichen Baugruppe befindliche Bauelemente mit großen Anschlussflächen herzustellen. Eine Verringerung der Schablonenöffnung birgt bei Feinststrukturen erhöhte Verschmutzungsgefahr bis hin zu fehlerhaftem Auslöseverhalten der Lotpaste in sich.



Pitch 0.5 mm Pitch 0.3 mm

Abbildung 3-6: Gedruckte Lotdepots

Beim Dispensen wird aus einem Vorratsbehälter (Kartusche o.ä.) durch mechanischen und/oder pneumatischen Druck eine Dosiermenge Lotpaste auf das Trägermaterial aufgebracht. Je nach eingesetzter technologischer Ausrüstung können dabei die notwendigen Teilprozesse:

- Relativpositionierung Leiterplatte – Dispenserkanüle,
- Druckzu- und –abschaltung,
- Dosierung,
- Verfahren beim Dosieren,
- Abriss etc.

teilweise oder vollständig gesteuert bzw. geregelt sein.

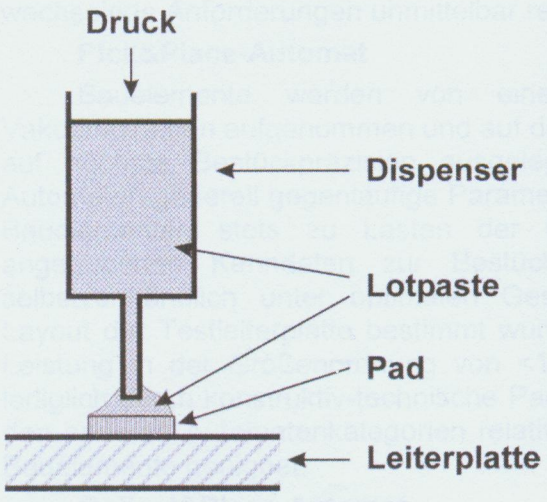


Abbildung 3-7: Dispensprinzip

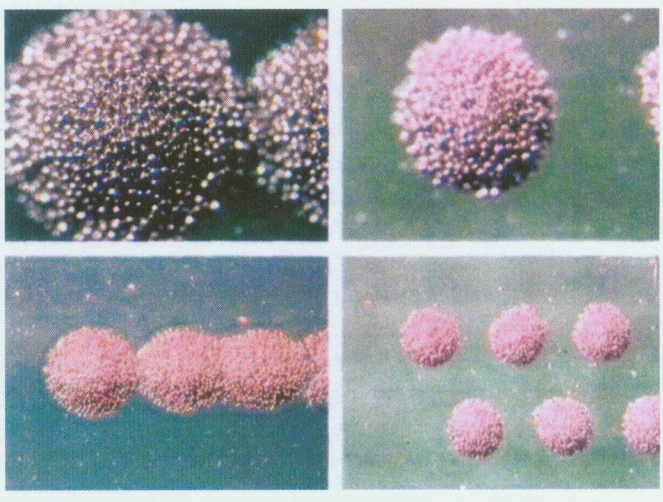


Abbildung 3-8: Lotdepots durch Dispensen

Das Dispensen bietet sich insbesondere für die Prototypen- oder Einzelfertigung an sowie als ergänzendes Verfahren an manuellen Arbeitsplätzen in der Elektronik-Montage. Die Vorteile liegen in der Flexibilität (z.B. bei kurzfristigen Layout-Änderungen), in der Möglichkeit der differenzierten Lotvolumenvariation selbst innerhalb einer Baugruppe und in der Option, auch auf bereits teilbestückten Baugruppen eventuell noch nachträglich Montagen vornehmen zu können.

3.3 Bauelementebestückung

Nach dem Aufbringen der Lotdepots werden die SMD-Bauelemente auf der Leiterplatte positioniert. Aus den im Abschnitt 3.1 gezeigten Entwicklungstrends für die Bauelemente hin zu immer feineren Anschlussrastern wird deutlich, dass einige Bestückaufgaben nur noch mit hochpräzisen vollautomatisierten Ausrüstungen mit integrierter optischer Lageerkennung für Leiterplatten und Bauelemente bewältigt werden können. Da jedoch Investitions- und Betriebskosten solcher Ausrüstungen verständlicherweise sehr hoch sind und die Montage eines Produktes auf solchen Maschinen einen nicht zu unterschätzenden Vorbereitungsaufwand benötigt, sind Handarbeitsplätze mit unterschiedlichem Ausbaustand an Hilfs- und teilautomatisierten Unterstützungsmitteln nach wie vor auch in der industriellen Fertigung unverzichtbar.

	Bestückleistung	Bestückgenauigkeit	Flexibilität
Manuelle Bestückung	gering	mittel	hoch
Pick&Place	mittel	hoch	hoch
Collect&Place	mittel	mittel	hoch
Chip-Shooter	hoch	mittel	mittel
Simultanbestücker	hoch	mittel	gering

Tabelle 3-8: Systematik der Bestückprinzipien

In Tabelle 3-8 ist eine Systematik der wichtigsten Bestückprinzipien nach Leistung, Genauigkeit und Flexibilität vorgenommen. Dazu nachfolgend noch einige Erläuterungen:

Manuelle Bestückung

Sie erweist sich bei einerseits sehr kleinen Stückzahlen (Prototyp, Sonderanfertigung,...) oder als Ergänzung zu automatisierten Linien (Sonderbauformen, die nicht auf der Linie bestückt werden können), sowie als Reparaturtechnologie als vorteilhaft. Die „Bestückleistung" liegt bei versierten Fachkräften durchaus im Bereich von 500 BE/h (Bauelementen pro Stunde). Entsprechende Hilfsmittel vorausgesetzt können Bauelemente mit Anschlussrastern bis hinunter zu 500µm problemlos bestückt werden. Die hohe „Flexibilität" liegt auf der Hand, da auf wechselnde Anforderungen unmittelbar reagiert werden kann.

Pick&Place-Automat

Bauelemente werden von einem Bestückkopf mit mechanischen Greifern oder Vakuumpipetten aufgenommen und auf die Leiterplatte gesetzt. Diese Kategorie von Automaten ist auf höchste Bestückpräzision ausgelegt. Bestückgenauigkeit und Bestückleistung sind bei Automaten generell gegenläufige Parameter, da die genaue Lagevermessung von Leiterplatte und Bauelementen stets zu Lasten der Geschwindigkeit geht. Die von Maschinenherstellern angegebenen Kenndaten zur Bestückleistung sind mit Skepsis zu betrachten, da sie selbstverständlich unter optimalen Gestaltungsbedingungen von Bauelementezuführung und Layout der Testleiterplatte bestimmt wurden. Als Richtwert kann für Pick&Place-Automaten eine Leistung in der Größenordnung von <10.000 BE/h angenommen werden. Die Flexibilität wird lediglich durch konstruktiv-technische Parameter der Ausrüstung begrenzt und ist im Vergleich zu den anderen Automatenkategorien relativ hoch. Diese Automaten sind besonders für hochpolige Bauelemente geeignet.

Collect&Place-Automat

Bauelemente werden von einem Mehrfachbestückkopf gesammelt und dann platziert. Je nach Konstruktionsprinzip des Bestückkopfes kann dabei das Sammeln oder Setzen mehrerer

Bauelemente auch gleichzeitig erfolgen. Damit kann naturgemäß die Genauigkeit nur noch bedingt pro Bauelement garantiert werden. Werkzeuge und konstruktive Gegebenheiten der Maschine engen die Flexibilität weiter ein. Die Bestückleistung liegt bei 10.000 bis 40.000 BE/h.

Chip-Shooter

Wie aus der Bezeichnung bereits abgeleitet werden kann, sind diese Automaten ausschließlich für das Hochleistungsbestücken von passiven Bauelementen (und sehr kleinen aktiven Bauelementen wie Transistoren o.ä.) bestimmt. Damit kann die Genauigkeit zugunsten einer sehr hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit eingeschränkt werden. Werte größer als 50.000 BE/h sind realistisch. Zur Flexibilität gilt die Aussage wie bei Collect&Place-Automaten.

Simultanbestücker

Diese besondere Klasse von Bestücksystemen kann nur bei außerordentlich hohen Produktstückzahlen (z.B. Consumer-Electronic) und relativ „einfachen" Baugruppen eingesetzt werden. Alle auf eine Baugruppe zu bestückenden Bauelemente werden von einem speziell angefertigten Werkzeug in einem Arbeitsschritt aufgenommen und ebenfalls in einem Schritt auf der Baugruppe platziert. Das setzt natürlich die Bereitstellung der Bauelemente in genau der Anordnung, die sie später auf der Baugruppe haben müssen, voraus (meist mehrere Vorbereitungsplätze dafür nötig!). Lagekorrekturen sind nur als Mittelwert über alle Positionsabweichungen möglich. Die Flexibilität ist absolut eingeschränkt, da jede Änderung am zu fertigenden Produkt neue Werkzeuge und neue Bauelementezuführungen bedingt. Angaben zur Bestückleistung sind hier noch schwieriger, da sie unmittelbar von der Anzahl der Bauelemente pro Baugruppe abhängt.

Der prinzipielle Verfahrensablauf beim Bestücken folgt dem Schema in Abbildung 3-9. In Anhängigkeit vom Konstruktionsprinzip des Automaten werden die einzelnen Schritte unterschiedlich realisiert und zum Teil auch parallel ausgeführt. Die Lagekorrektur der Leiterplatte kann z.B. durch simples mechanisches Klemmen (setzt eine für das zu bestückende Bauteilspektrum hinreichende Genauigkeit der Leiterplatten voraus) oder durch optische Inspektion, Vermessung von Vergleichsstrukturen und anschließende Korrekturrechnung für alle Bauelemente erfolgen. Auch die Lagekorrektur für Bauelemente ist durch mechanisches Zentrieren mittels Zangen oder durch optische Vermessung und Versatzberechnung möglich. Genauigkeitsuntersuchungen an Bestückautomaten in Korrelation zu konkreten Bauelemente-Typen erhalten zunehmend Bedeutung.

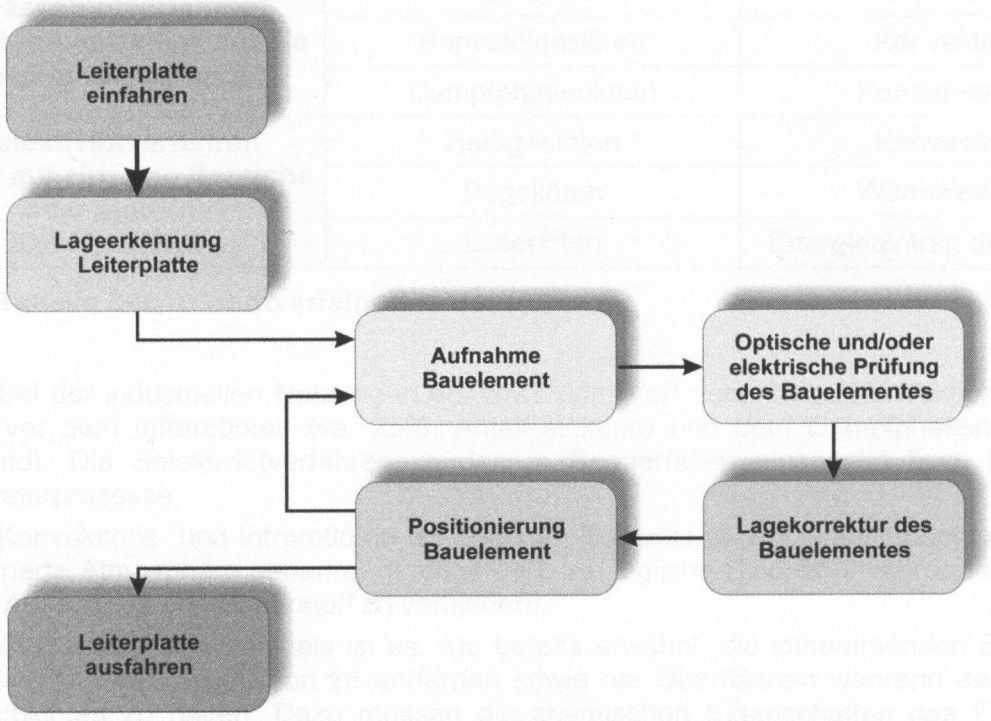


Abbildung 3-9: Prinzipieller Verfahrensablauf beim Bestücken

3.4 Lötverfahren

Unter Löten versteht man die stoffliche Verbindung metallischer Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalls durch Legierungsbildung und Diffusion. Die Verbindungsteile schmelzen nicht, da die Löttemperatur niedriger ist als die Schmelztemperatur der Verbindungsteile. Überschreitet die Liquidustemperatur den Wert von 450°C, so spricht man von Hartlöten, unterhalb dieses Temperaturpunktes von Weichlöten.

Charakteristisch für das Weichlöten ist:

- die Realisierbarkeit auch kleiner Verbindungsstellen,
- die gute elektrische und thermische Leitfähigkeit,
- die gute Automatisierbarkeit des Prozesses und
- die relativ leichte Lösbarkeit der Verbindung bei Reparatur.

Die Legierungsbildung setzt eine geeignete Werkstoffpaarung voraus, z.B. Cu – Sn. Diese Verbindung wird durch die beiden intermetallischen Phasen Cu_3Sn (ε-Phase) und Cu_6Sn_3 (η-Phase) gebildet. Beide Phasen wachsen an der Grenzfläche zwischen Cu Sn. Ihre Schichtdicke beträgt ca. 0.5 ... 0.7µm. Kurze Löt- und Abkühlzeiten ergeben ein feinkristallines Gefüge, das eine optimale Festigkeit der Lötverbindung garantiert. Derzeit gebräuchliche Lotwerkstoffe in der Elektronik wurden bereits in Abschnitt 3.1, Tabelle 3-5, genannt.

Voraussetzung für die Reaktionen ist eine von Verunreinigungen freie Oberfläche der Fügepartner. Störende Verunreinigungen (Oxide, Sulfide,...) müssen vor dem Löten entfernt werden. Diese Aufgabe übernimmt das im Lotwerkstoff vorhandene Flussmittel. Es verhindert gleichzeitig während des Lötens die Bildung einer neuen Oxidschicht.

Bei der Montage von „reinen" SMT-Baugruppen wird, wie in Abschnitt 3.2 erläutert, das Lot vor der Bestückung von Bauelementen aufgebracht und beim Lötvorgang selbst „aufgeschmolzen". Die verschiedenen Lötverfahren werden daher zusammenfassend als Reflowlötverfahren (="Aufschmelzlötverfahren") bezeichnet. Sie unterscheiden sich hauptsächlich nach dem Wirkprinzip der Wärmeeinbringung.

	Lötverfahren	**Wirkprinzip**
Massenlötverfahren (wirkt „gleichzeitig" auf die gesamte Baugruppe)	Infrarotlöten	Strahlung
	Konvektionslöten	Konvektion
	Dampfphasenlöten	Kondensation
Selektivlötverfahren (wirkt auf einzelne Bereiche oder einzelne Kontaktstellen)	Heißgaslöten	Konvektion
	Bügellöten	Wärmeleitung
	Laserlöten	Energieeintrag durch Laser

Tabelle 3-9: Lötverfahren in der SMT

Bei der industriellen Nutzung in der SMT dominiert derzeit das Konvektionslöten (Anteil ca. 70%) vor dem Infrarotlöten (ca. 25%, Anteil sinkend) und dem Dampfphasenlöten (Anteil 5%, steigend). Die Selektivlötverfahren werden in Sonderfällen eingesetzt bzw. hauptsächlich für Reparaturprozesse.

Konvektions- und Infrarotlöten werden zum Teil unter Schutzgasatmosphäre (z.B. Stickstoff, auch inerte Atmosphäre genannt) durchgeführt, um jegliche Oxidation während des Lötvorganges durch Ausschluss von Sauerstoff zu verhindern.

Aufgabe des Flussmittels ist es, wie bereits erwähnt, die löthemmenden Schichten auf den Oberflächen durch Reduktion zu entfernen sowie die Oberflächen während des Lötens frei von Oxidschichten zu halten. Dazu müssen die chemischen Eigenschaften des Flussmittels derart beschaffen sein, dass es kurz vor Erreichen der eigentlichen Löttemperatur aktiviert wird.

Für die Massenlötverfahren muss ein bestimmtes Temperatur-Zeit-Regime an der Lötstelle eingehalten werden. Abbildung 3-10 zeigt ein solches typisches Profil für bleifreie Lotpasten (siehe Tabelle 3-5).

Das Temperaturprofil muss für bleifreie Lotpaste (Tabelle 3-5) dabei folgende Randbedingungen erfüllen:

- an der kältesten Stelle der LP soll mindestens 15-20 s die Schmelztemperatur des Lotes überschritten werden, maximal sollte die Liquidustemperatur für 90 s überschritten werden
- der maximal zulässige Temperaturgradient liegt bei 5 K/s,
- Die Peaktemperatur sollte 250°C nicht überschreiten; optimal ist eine Peaktemperatur von 235°C; minimal sollten 225 °C erreicht werden
- die Peakphase soll möglichst kurz sein,
- Temperaturunterschiede auf der Leiterplatte sollten minimiert werden,
- die Gesamtlänge des Durchlaufs sollte 6 min nicht überschreiten.

(Anmerkung: Vorstehend genannte Zeit- und Temperaturwerte sind als Orientierung zu verstehen. Die Vorgaben, wie gelötet werden sollte, erhält man gewöhnlich vom Lotpastenhersteller)

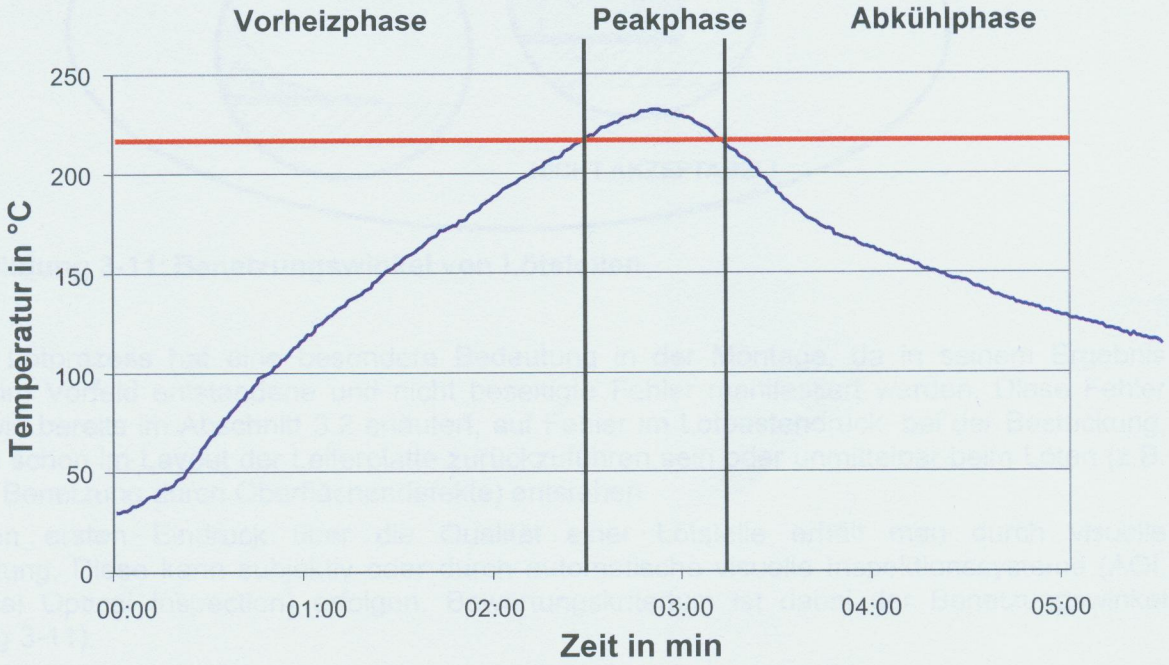


Abbildung 3-10: Beispiel für ein Temperaturprofil beim Reflowlöten (SnAg4Cu0.5)

Das Profil wird in industriellen, für die Linienfertigung vorgesehenen Anlagen in einem Durchlauf durch mehrere getrennt regelbare Heizzonen realisiert. Üblich sind Durchlauföfen mit drei bis zehn Zonen (typisch 5..8). Temperaturprofile sollten für jeden produzierten Flachbaugruppentyp nachgemessen werden. Dies erfolgt mittels spezieller Messgeräte, die gemeinsam mit einer Probeleiterplatte durch den Lötprozess geleitet werden.

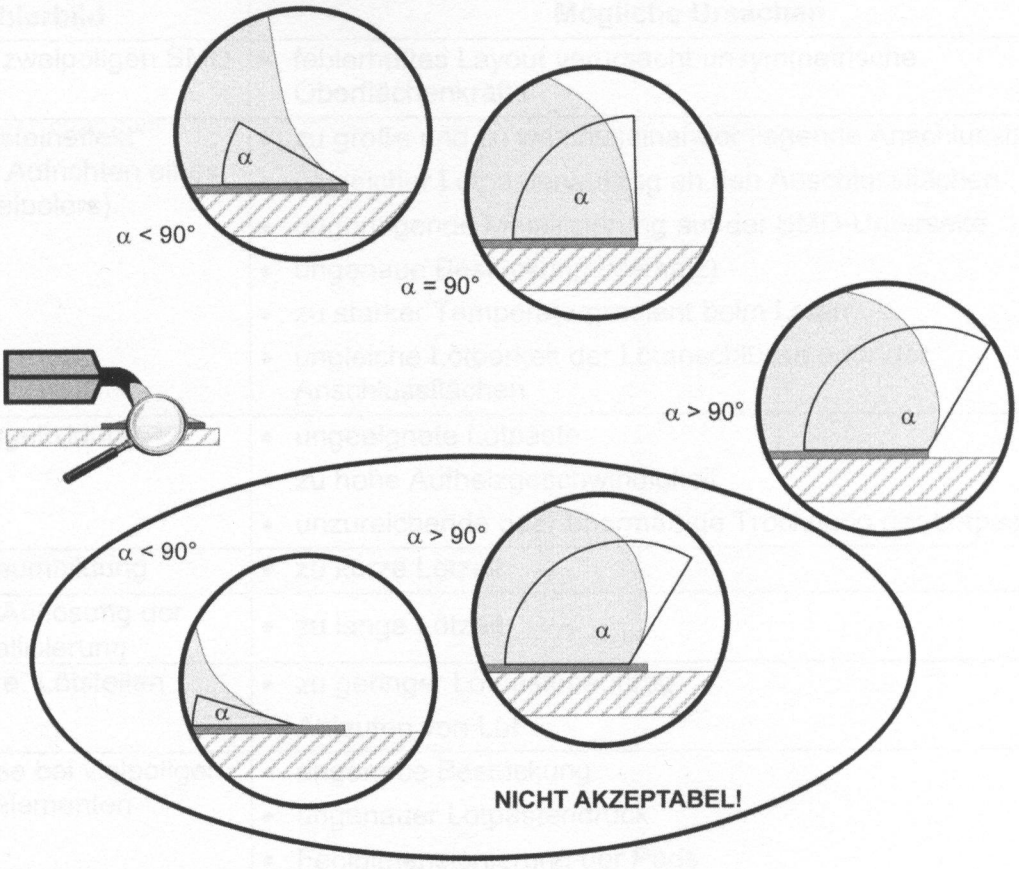


Abbildung 3-11: Benetzungswinkel von Lötstellen

Der Lötprozess hat eine besondere Bedeutung in der Montage, da in seinem Ergebnis eventuell im Vorfeld entstandene und nicht beseitigte Fehler manifestiert werden. Diese Fehler können, wie bereits im Abschnitt 3.2 erläutert, auf Fehler im Lotpastendruck, bei der Bestückung, aber auch schon im Layout der Leiterplatte zurückzuführen sein oder unmittelbar beim Löten (z.B. schlechte Benetzung durch Oberflächendefekte) entstehen.

Einen ersten Eindruck über die Qualität einer Lötstelle erhält man durch visuelle Begutachtung. Diese kann subjektiv oder durch automatische visuelle Inspektionssysteme (AOI, Automatical Optical Inspection) erfolgen. Bewertungskriterium ist dabei der Benetzungswinkel (Abbildung 3-11).

Häufig zu beobachtende Fehlerbilder sind in Tabelle 3-10 dargestellt.

Die visuelle Begutachtung vermittelt lediglich einen ersten Eindruck von der Qualität der Lötstellen und ist auf die Sichtbarkeit von Fehlerbildern an der Oberfläche der Verbindung angewiesen. Area-Array-Bauelemente entziehen sich durch ihren Aufbau der lichtoptischen Inspektion. Hier müssen Verfahren wie Ultraschall- und Röntgenmikroskopie zum Einsatz kommen. Für die Einführung eines neuen Produktes oder gar einer neuen Technologie (neue Bauelementeform, veränderte Materialien, veränderte Prozessparameter, neue Maschine,...) sind Langzeittests zur erreichten Zuverlässigkeit der hergestellten Verbindungen unerlässlich.

Fehlerbild	Mögliche Ursachen
Versatz von zweipoligen SMD	• fehlerhaftes Layout verursacht unsymmetrische Oberflächenkräfte
„Grabsteineffekt“ (einseitiges Aufrichten eines Zweipolers)	• zu große und zu weit auseinander liegende Anschlussflächen • ungleicher Lotpastenauftrag an den Anschlussflächen • ungenügende Metallisierung auf der SMD-Unterseite • ungenaue Bestückung (Versatz) • zu starker Temperaturgradient beim Löten • ungleiche Lötbarkeit der Lötanschlüsse oder der Anschlussflächen
Lotkugelbildung	• ungeeignete Lotpaste • zu hohe Aufheizgeschwindigkeit • unzureichende oder übermäßige Trocknung der Lotpaste
Hohlraumbildung	• zu kurze Lötzeit
partielle Auflösung der Metallisierung	• zu lange Lötzeit
"magere" Lötstellen	• zu geringer Lotpastenauftrag • Ablaufen von Lot
Kurzschlüsse bei vielpoligen Bauelementen	• ungenaue Bestückung • ungenauer Lotpastendruck • Fehldimensionierung der Pads • zu viel Lot
Nichtbenetzen oder Entnetzen	• schlechte Lötbarkeit der Oberflächen

Tabelle 3-10: Fehlerbilder nach dem Reflowlöten

Literatur: *Scheel, W. (Hrsg.)*
Baugruppentechnologie der Elektronik – Montage
2. Auflage 1999, Huss-Medien, ISBN 3-341-01234-6

Vorlesungsskript „AVT 1“
TU Dresden, Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik, 2006

4 Grundlagen der Prüfung von Leiterplatten-Baugruppen

Die Fertigung elektronischer Geräte ist ein komplexer Prozess mit vielen komplizierten Fertigungsschritten, in dessen Ablauf fehlerhafte Produkte entstehen können. Auch werden in dieser Fertigung eine große Anzahl angelieferter Bauelemente und Komponenten verarbeitet, unter denen durchaus auch fehlerhafte Exemplare sein können. Es ist deshalb in der Elektronikfertigung (wie in jeder anderen Fertigung) immer mit einem Anteil fehlerhafter Produkte zu rechnen.

In der Elektronikfertigung wird die Beseitigung eines Fehlers umso teuerer, je später der Defekt im Durchlauf

- Bauelemente und Komponenten
- bestückte Leiterplatte (Baugruppe)
- vollständiges Gerät
- Gerät beim Kunden

entdeckt und beseitigt wird. Fachleute sprechen von einer Kostensteigerung um den Faktor vier bis zehn je Stufe. [1]

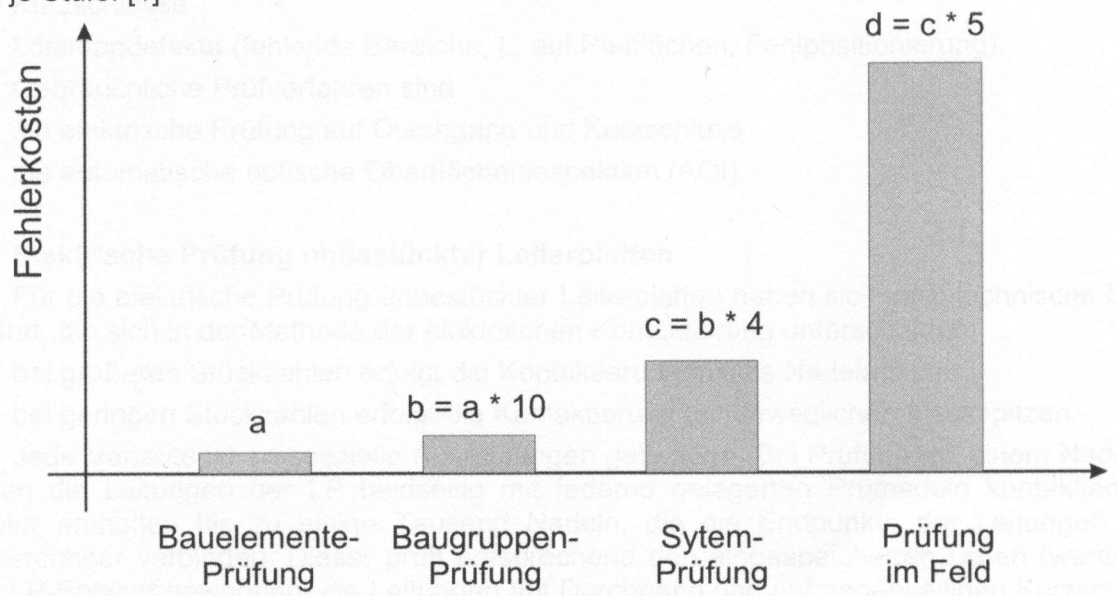


Abbildung 4-1: Kosten pro Fehler im Fertigungsablauf

Deshalb sind in den Fertigungsablauf Tests eingefügt, die fehlerhafte Zulieferteile oder fehlerhafte Komponenten der eigenen Fertigung frühzeitig erkennen und die Auslieferung nicht funktionsfähiger Geräte an Kunden vermeiden sollen. Die Kosten für diese Tests sind hoch und es bedarf einer ausgewogenen Strategie, um Testkosten und Nutzen zu bilanzieren. Fehlererfassung, Statistik, Optimierungsverfahren, Kostenrechnung und detaillierte Kenntnisse des technologischen Prozesses sind die wissenschaftlichen Grundlagen für Fehlervermeidung und Qualitätssicherung. Die Fertigung von speziellen Testausrüstungen bildet einen beachtlichen Zweig der Elektronikindustrie, die Testkosten können in der Elektronikfertigung bis zu 40% der Gesamtkosten ausmachen.

Prüfung von Leiterplattenbaugruppen

Bei der Fertigung von Leiterplattenbaugruppen wird geprüft

- die unbestückte LP — bei Zwei-, Mehrlagen- und Feinleiter-LP im Regelfall, bei einseitigen LP mit groben Strukturen kann auf die Prüfung verzichtet werden.
- die zu bestückenden Bauelemente — nur im Ausnahmefall 100%-ig. Stichproben in unterschiedlichem Umfang, insbesondere bei unbekannten Zulieferern. Einfache passive Bauelementen werden von modernen

	Bestückautomaten während des Bestückvorgangs geprüft. Oft wird die Wareneingangsprüfung mit dem Bauelementehersteller vereinbart und von diesem durchgeführt.
➢ die fertig bestückte Leiterplatte (LP)	immer.

Nur selten ist der Baugruppen- und Gerätehersteller gleichzeitig LP-Fertiger. Dementsprechend prüft der LP-Fertiger sein Endprodukt, die unbestückte LP, während der Gerätehersteller die bestückte LP prüft.

Prüfung unbestückter Leiterplatten

Typische Fehler an LP sind:

- Leitungsunterbrechungen und -einschnürungen
- fehlerhafte Durchkontaktierungen
- Kurzschlüsse
- Lötstoppdefekte (fehlende Bereiche, L. auf Padflächen, Fehlpositionierung).

Gebräuchliche Prüfverfahren sind

- die elektrische Prüfung auf Durchgang und Kurzschluss
- die automatische optische Oberflächeninspektion (AOI).

Elektrische Prüfung unbestückter Leiterplatten

Für die elektrische Prüfung unbestückter Leiterplatten haben sich zwei technische Lösungen bewährt, die sich in der Methode der elektrischen Kontaktierung unterscheiden:

- bei größeren Stückzahlen erfolgt die Kontaktierung mittels Nadeladapter
- bei geringen Stückzahlen erfolgt die Kontaktierung mit beweglichen Messspitzen.

Jede Variante ist an spezielle Ausrüstungen gebunden. Bei Prüfung mit einem Nadeladapter werden die Leitungen der LP beidseitig mit federnd gelagerten Prüfnadeln kontaktiert. Solche Adapter enthalten bis zu einige Tausend Nadeln, die die Endpunkte der Leitungen mit dem Steuerrechner verbinden. Dieser prüft entsprechend den eingespeicherten Daten (werden schon beim LP-Entwurf gewonnen) die Leitungen auf Durchgang und auf gegenseitigen Kurzschluss. Die Prüfung geht sehr schnell (wenige Sekunden), weil nach der Kontaktierung die eigentliche Prüfung rein elektronisch erfolgt. Zu- und Abführung der LP ist in diesen Automaten integriert.

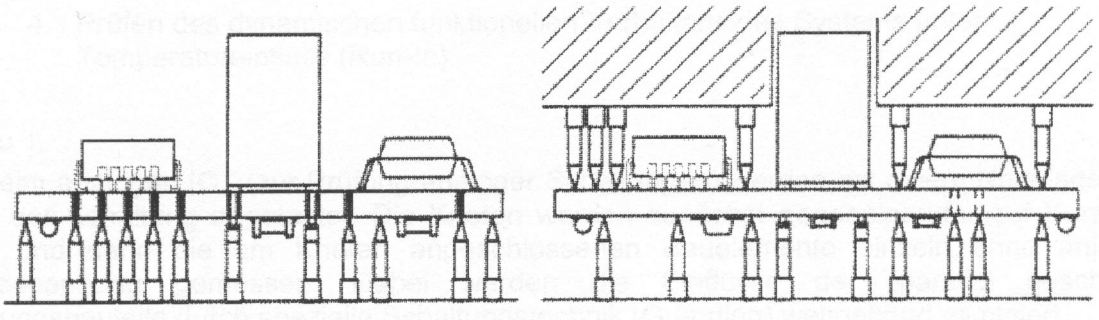


Abbildung 4-2: Prinzip des Nadeladapters – ein- und zweiseitige Kontaktierung

Der wesentliche Nachteil dieser Methode besteht darin, dass zu jedem LP-Typ ein zugehöriger Adapter benötigt wird. Dieser Nachteil fällt besonders bei kleinen Stückzahlen ins Gewicht, da ein Adapter einige Tausend Euro kostet und das Umlegen dieser Kosten auf wenige LP deren Preis unzumutbar erhöhen würde.

Die Alternative bei kleinen Stückzahlen ist der Test mit beweglichen Messspitzen (Flying Probes). Mindestens je zwei bewegliche Messspitzen auf Ober- und Unterseite der LP tasten die Endpunkte der Leitungen an und geben der Messelektronik Gelegenheit, auf Durchgang und Kurzschluss zu prüfen. Der gravierende Nachteil dieses Verfahrens ist der Zeitaufwand, der sich aus dem mechanischen Bewegen der Messspitzen ergibt. Prüfzeiten von mehreren Minuten pro LP sind normal. Damit ist die wirtschaftliche Anwendung dieser Methode auf solche Stückzahlen beschränkt, für die sich die Anfertigung eines Nadeladapters nicht lohnt.

Der elektrische Test erfasst auch Fehler, die in den Durchkontaktierungen und den inneren Lagen der LP liegen. Nicht erfasst werden Fehler am Lötstopp, es sei denn, der Antastpunkt (Prüfpad) ist vom Lötstopp bedeckt. Kaum erfasst werden durch den elektrischen Test Leitungseinschnürungen, weil die Widerstandsvergrößerung durch die meist kurze Einschnürung gering ist gegenüber dem Gesamtwiderstand der viel längeren Leitung. Solche Fehler werden in den Außenlagen durch die optische Prüfung gefunden.

Optische Prüfung unbestückter Leiterplatten

Das manuelle optische Prüfen der unbestückten LP erscheint auf den ersten Blick nicht zeitgemäß, ist aber infolge der Flexibilität und der Erfahrung der Durchführenden sehr leistungsfähig. Mit Arbeitslupe und Mikroskop lässt sich die Prüfschärfe erhöhen. Selbst führende LP-Hersteller verzichten nicht auf die manuelle optische Inspektion. Für die Massenfertigung haben maschinelle Verfahren den Vorrang.

Bei der automatischen optischen Inspektion (AOI) wird die Oberfläche der LP durch Kamerasysteme abgerastert und das aufgenommene digitalisierte Bild mit dem eingespeicherten Normbild verglichen. Spezielle Objektive und ausgefeilte Beleuchtungen gewährleisten die weitgehende Erkennung sichtbarer Fehler. Die inneren Lagen der Multilayer-LP können vor dem Laminieren einzeln geprüft werden, so dass die AOI auch bei mehrlagigen LP eine zufrieden stellende Fehlerabdeckung ermöglicht. Nicht erkannt werden bei dieser Prüfung Schäden in den Durchkontaktierungen.

Prüfung bestückter Leiterplatten

Nach dem Bestücken und Löten können durch AOI und elektrische Prüfung Fertigungsfehler gefunden werden. Die AOI erkennt fehlende oder falsche Bauteilbestückung, Kurzschlüsse durch das Lot und manchmal auch nicht erfolgte Lötung. Der letztgenannte Fehler ist aus der Perspektive der Kamera schwierig zu erkennen. Er wird meistens erst durch elektrische Prüfungen entdeckt. Die elektrische Prüfung lässt sich in vier Klassen einteilen:

1. Prüfen auf Fertigungs- und Bauelementefehler (In-Circuit-Test, ICT)
2. Prüfen der Funktion der Baugruppe (Funktionstest, FT)
3. Prüfen des dynamischen funktionellen Verhaltens (Systemtest, ST)
4. Prüfen des dynamischen funktionellen Verhaltens des Systems unter Temperatureinfluss (Run-In).

Zu 1.

Beim analogen ICT (zur Prüfung analoger Schaltungen) werden mit einem Nadeladapter die Knoten der Schaltung angetastet. Die Knoten werden zunächst gegeneinander auf Kurzschluss geprüft und dann die am Knoten angeschlossenen Bauelemente einzeln ohne anliegende Betriebsspannung gemessen. Dabei werden die Einflüsse der (parallel geschalteten) Umgebungsbauteile durch spezielle Schaltungstechnik (Guarding) weitgehend eliminiert.

Beim digitalen ICT (zur Prüfung digitaler Schaltungen bei angelegter Betriebsspannung) werden die Pins der ICs kontaktiert (Nadeladapter) und deren Ausgänge kurzzeitig mit Bitmustern aus niederohmigen Signalquellen überschrieben. Das Anliegen dieser Bitmuster an den angeschlossenen Eingängen wird über die dort kontaktierten Nadeln geprüft und ist die Gewähr für den Leitungsdurchgang und die erfolgte Lötung. Die aufgeprägten Bitmuster erlauben auch eine teilweise Funktionsprüfung der ICs.

Zu 2.

Beim Funktionstest wird die LP-Baugruppe an einem speziell ausgerüsteten Messplatz mit Betriebsspannungen und allen Signalen versorgt, die die volle Funktion gewährleisten. Der FT beinhaltet die vollständige Funktionsprüfung aller Komponenten einschließlich der ICs.

Zu 3. und 4.

Im Systemtest werden die Baugruppen des Gerätes einschließlich des Verbindungssystems (die sog. Rückverdrahtung) in ihrem Zusammenwirken getestet. Die Funktion der Rückverdrahtung, Anpassungsprobleme, Laufzeiteffekte sowie dynamische Kennwerte sind Prüfparameter des ST. Im Run-In versucht man versteckte Defekte zu erkennen, die erst bei thermischer Beanspruchung wirksam werden. Haarrisse in Leiterzügen, die erst bei thermisch bedingter Verwölbung als Leiterunterbrechung wirken, sind ein typisches Beispiel für solche Fehler.

Literatur: *Prüfung von Leiterplattenbaugruppen*
VDI/VDE-Gesellschaft
Carl Hanser Verlag München 1990

5 Qualitätsmanagement

5.1 Qualitätskenngrößen und -modelle

5.1.1 Qualitätskenngrößen elektronischer Erzeugnisse

Die Qualität eines elektronischen Erzeugnisses wird durch elektrische, mechanische, geometrische, thermische u.a. Kenngrößen (Erzeugniskenngrößen) beschrieben, im allgemeinen wählt man die jeweils wichtigste(n) davon zur Charakterisierung aus (z.B. Ohmscher Widerstand, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Haftfestigkeit).

Kenngrößen bestehen aus einem Zahlenwert und einer Maßeinheit.

Unter dem Aspekt der Qualität wird für die Erzeugniskenngröße ein Sollwert x_S festgelegt, der theoretische Wert für die Qualität. Der "produzierte" Wert für die Erzeugniskenngröße, der Istwert x, weicht im Allgemeinen von x_S ab und muss für ein fehlerfreies Erzeugnis innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen liegen (T_o = obere Toleranzgrenze, T_u = untere Toleranzgrenze).

Eine Qualitätskenngröße $\boldsymbol{X}$ für eine elektronisches Erzeugnis ist somit eine Erzeugniskenngröße mit den zusätzlichen Werten x_S, T_u und T_o (Der Großbuchstabe X deutet darauf hin, dass die Istwerte x von Erzeugnis zu Erzeugnis schwanken; mathematisch heißt X auch "Zufallsgröße" und x auch "Realisierung").

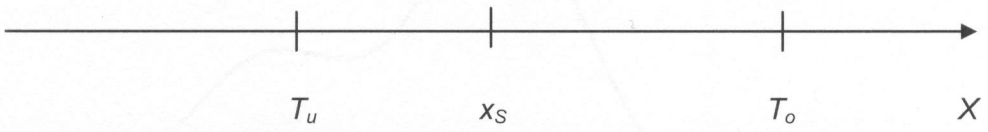


Abbildung 5-1: Qualitätskenngröße *X*

5.1.2 Toleranzen

Die Anwendung eines elektronischen Produktes erfordert das Einhalten der Kenngrößenwerte in einem bestimmten Bereich, der zwischen Hersteller und Anwender vereinbart wird (als "Anwender" kann im Produktionsprozess auch der auf einen technologischen Prozess folgende Prozess angesehen werden).

Man berechnet mit Abbildung 5-1

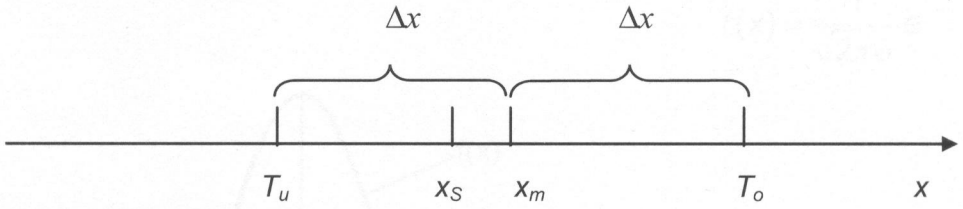


Abbildung 5-2: Toleranzbereich

$$x_m = \frac{T_o + T_u}{2}$$ Toleranzmitte

$$\Delta x = \frac{T_o - T_u}{2}$$ Toleranzbreite (absolut)

für $x_m = x_S$ (symmetrischer Toleranzbereich) bildet man oft

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_m} = \frac{\Delta x}{x_S}$$ Toleranzbreite (relativ)

Die relative Toleranzbreite wird im Allgemeinen bei elektronischen Bauelementen verwendet, z.B. 1%, 5%,10%.

Der bisherige Toleranzbereich (symmetrisch oder unsymmetrisch) heißt zweiseitig. Einseitige Toleranzbereiche besitzen demgegenüber nur eine Toleranzgrenze. Sie kommen häufig vor (z.B. besitzt der Durchgangswiderstand einer Lötstelle nur eine obere Toleranzgrenze, dagegen ihre Haftfestigkeit nur eine untere).

5.1.3 Prozesscharakteristik

Bei der Herstellung elektronischer Erzeugnisse treten die Werte x mit unterschiedlicher Häufigkeit auf; (im Allgemeinen werden Erzeugnisse, bei denen die Werte x in der Nähe von x_S liegt häufiger hergestellt als solche, wo der Abstand $|x - x_S|$ gering ist). Geht man zur Zufallsgröße X über, so ist $f(x)$ die sog. Dichte oder Prozesscharakteristik. Dieser Verlauf der Werte der Erzeugnisgröße charakterisiert gleichsam den technologischen Prozess.

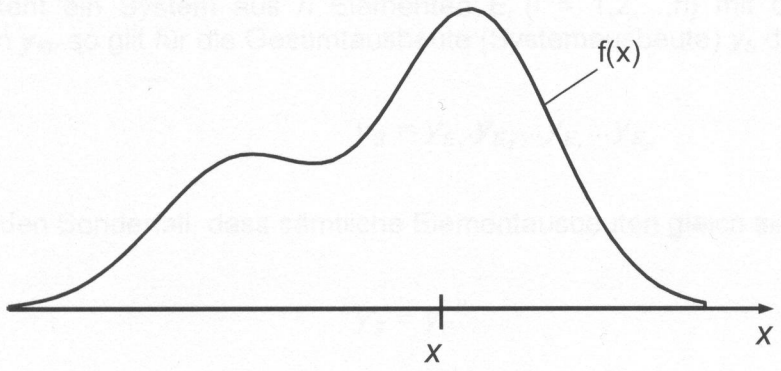


Abbildung 5-3: Prozesscharakteristik

Bei vielen technologischen Prozessen ist X normalverteilt. Dann ist

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

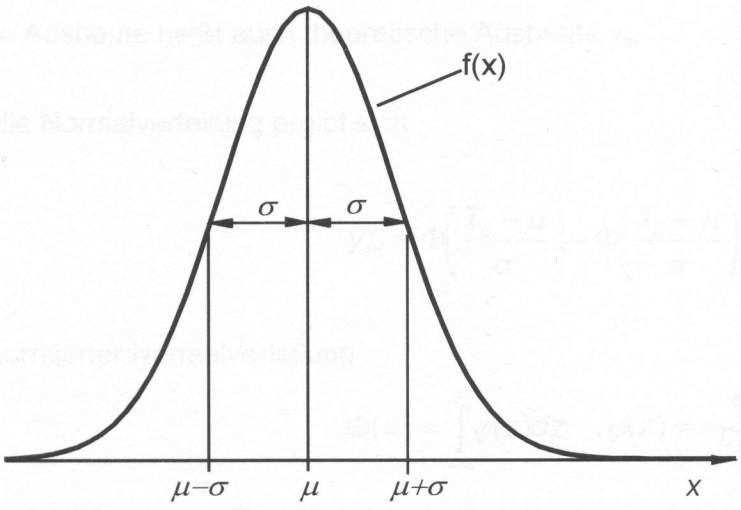


Abbildung 5-4: Normalverteilte Prozesscharakteristik

5.1.4 Ausbeute technologischer Prozesse

Die Ausbeute (*yield*) ist eine Qualitätskenngröße zur Charakterisierung technologischer Prozesse. Sie ist definiert zu

$$y = \frac{\text{Anzahl der fehlerfreien Erzeugnisse}}{\text{Anzahl der geprüften Erzeugnisse}}$$

($y \leq 1$; oftmals in % angegeben)

Die Anzahl der geprüften Erzeugnisse bezeichnet man mitunter als Losgröße. Die Ausbeute schwankt von Los zu Los und ist folglich ebenfalls eine Zufallsgröße *Y*.

5.1.5 Ausbeute in Systemen

Besteht ein System aus *n* Elementen E_i (i = 1,2,...,*n*) mit den jeweiligen unabhängigen Ausbeuten y_{Ei}, so gilt für die Gesamtausbeute (Systemausbeute) y_S das sog. Produktgesetz

$$y_S = y_{E_1} \cdot y_{E_2} \cdots y_{E_i} \cdots y_{E_n}$$

Für den Sonderfall, dass sämtliche Elementausbeuten gleich sind, erhält man

$$y_S = y_E^{\,n}$$

5.1.6 Ausbeute als Wahrscheinlichkeit

Kennt man die Prozesscharakteristik $f(x)$ und die Toleranzgrenzen T_u, T_o, so lässt sich die Ausbeute y_{th} berechnen zu

$$y_{th} = \int_{T_u}^{T_o} f(x)dx$$

Diese Ausbeute heißt auch theoretische Ausbeute y_{th}.

Für die Normalverteilung ergibt sich

$$y_{th} = \Phi\left(\frac{T_o - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_u - \mu}{\sigma}\right)$$

mit normierter Normalverteilung

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{x} \varphi(z)dz \quad , \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}$$

5.1.7 Fehlerquote technologischer Prozesse

Die Fehlerquote p ist eine Qualitätskenngröße zur Charakterisierung technologischer Prozesse.

$$p = \frac{\text{Anzahl der fehlerhaften Erzeugnisse}}{\text{Anzahl der geprüften Erzeugnisse}}$$

(p<1); oftmals in % angegeben, aber bei kleinen Werten auch in ‰ oder in dpm (defects per million).

Es gilt die Beziehung

$$p + y = 1$$

Die "Fehlerquote in Systemen" und die "Fehlerquote als Wahrscheinlichkeit" entspricht den Ausführungen der Abschnitte 5.1.5 und 5.1.6.

5.1.8 Fehlerquote elektronischer Erzeugnisse

Der Begriff Fehlerquote (in Verbindung mit Systemen und Wahrscheinlichkeiten) wird auch für elektronische Erzeugnisse verwendet.

Am Beispiel der Lötfehler in elektronischen Baugruppen soll die Vorgehensweise aufgezeigt werden.

Beim Löten entstehen Lötfehler. Die mittlere Anzahl aller Lötfehler in einer Baugruppe sei λ (Erwartungswert). Bezeichnet man mit n die Gesamtzahl aller Lötstellen, dann ist

$$p_L = \frac{\lambda}{n}$$

die "Lötfehlerquote".

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Baugruppe genau k Lötfehler besitzt, wird durch die Binomialverteilung angegeben.

$$p_k = \binom{n}{k} \cdot p_L{}^k \cdot (1 - p_L)^{n-k}$$

Die Baugruppe wird quasi als System mit n Elementen betrachtet, die sämtlich die gleiche Ausbeute haben. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Leiterplatte keinen Fehler hat (k=0) ist dann

$$p_0 = (1 - p_L)^n = y_S$$

(vgl. Ausbeute in Systemen). p_0 heißt damit auch Lötausbeute.

Für sehr große n und sehr kleine p_L verwendet man die einfache Poisson-Verteilung

$$p_k = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda} \qquad \left(= \lim_{\substack{n \to \infty \\ p_L \to 0}} \binom{n}{k} \cdot p_L^k \cdot (1 - p_L)^{n-k} \right)$$

mit der Ausbeute

$$y_S = p_0 = e^{-\lambda} = e^{-n.p_L}$$

5.1.9 Arbeitspunkt technologischer Prozesse

Der Arbeitspunkt x_A eines technologischen Prozesses wird durch den Erwartungswert der Prozesscharakteristik gebildet; dieser Arbeitspunkt ist einstellbar, d.h. man kann ihm (bildlich gesprochen) auf der x-Achse jeden beliebigen Punkt (in der Umgebung von x_S) geben.

Je nach Einstellung unterscheidet man

1. zentrische Prozesse

$$x_A = \mu = T_m$$

d.h. der Arbeitspunkt liegt in der Mitte des Toleranzbereiches. Damit errechnet man für die Ausbeute bei normalverteilten Prozessen

$$y = 2 \cdot \Phi(\tau) - 1 \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{\Delta T}{\sigma}$$

$$(T_0 - \mu = \mu - T_u = \Delta T\,;\ \Phi(-x) = 1 - \Phi(x))$$

Die Ausbeute y hängt nur von τ ab:

$\tau = 1$:	sog. ein-Sigma-Prozess	y = 68,27 %
$\tau = 2$:	sog. 2σ-Prozess	y = 95,45 %
$\tau = 3$:	sog. 3σ-Prozess	y = 99,73 %

2. nicht zentrische Prozesse

$$x_A = \mu \neq T_m \qquad \mu - T_m = \Delta\mu$$

d.h. der Arbeitspunkt liegt nicht in der Mitte des Toleranzbereiches. Dann berechnet man die Ausbeute bei normalverteilten Prozessen

$$y = \Phi(\tau + \varepsilon) + \Phi(\tau - \varepsilon) - 1$$

mit der Exzentrität ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta\mu}{\sigma} = \frac{\mu - T_m}{\sigma}$$

5.1.10 Prozessfähigkeit (process capability)

In jüngster Zeit wird immer häufiger der Prozessfähigkeitskoeffizient c_p, verwendet.

$$C_p = \frac{\tau}{3} \qquad \text{(zentrische Prozesse)}$$

$$C_{pk} = \frac{\tau - |\varepsilon|}{3} \quad \text{(nichtzentrische Prozesse).}$$

Diese Koeffizienten stellen ein Maß für die "Fähigkeit" eines technologischen Prozesses zur Herstellung qualitätsgerechter Erzeugnisse dar.

Für die Normalverteilung existiert ein fester Zusammenhang zwischen C_p und der Fehlerquote p.

$C_p = 1$	$p =$	2700	dpm	3σ-Prozess
$C_p = 1{,}33$	$p =$	63	dpm	4σ-Prozess
$C_p = 1{,}67$	$p =$	0,6	dpm	5σ-Prozess
$C_p = 2{,}0$	$p =$	0,002	dpm	6σ-Prozess

5.2 Der Prüfprozess - Kenngrößen und Modelle

5.2.1 Einführung

Technologische Prozesse mit einer Fehlerquote *p* erfordern einen Prüfprozess zur Feststellung, welches Erzeugnis fehlerhaft ist und welches fehlerfrei. Da man jedes Erzeugnis prüft, spricht man von 100%-Prüfung.

Jeder Prüfprozess besteht im Wesentlichen aus drei Schritten

1. Bewertung, d.h. Feststellen des Zahlenwertes der Erzeugniskenngröße (durch Messen, durch Zählen oder durch "Beurteilen")
2. Entscheiden, d.h. Festlegen, ob das Erzeugnis fehlerfrei oder fehlerhaft ist (Beim Beurteilen und beim "Lehren" werden Schritt 1 und Schritt 2 zusammen vollzogen)
3. Sortieren (Trennen) der Erzeugnisse in ein "Lager" für fehlerfrei und fehlerhaft oder: Markieren(Inken), Mappen o.ä., falls ein Sortieren nicht möglich ist (z.B. defekte Chips auf einem Wafer, defekte Lötstellen und Bauelemente auf einer elektronischen Baugruppe)

Im Prüfprozess werden gewöhnlich mehr oder weniger umfangreiche Fehlerkataloge zur Klassifizierung der verschiedensten Fehler verwendet.

5.2.2 Nicht reparierbare Fehler

Fehlerhafte Erzeugnisse, die nicht reparierbar sind (bzw. deren Reparatur nicht "lohnt"), stellen Ausschuss dar. In diesem Fall spricht man von Ausschussquote p_A.

$$p_A = \frac{\text{Anzahl der Ausschuss-Erzeugnisse}}{\text{Anzahl der geprüften Erzeugnisse}}$$

Die Ausschussquote ist eine Qualitätskenngröße zur Charakterisierung technologischer Prozesse. Sie wird aber auch für Erzeugnisse verwendet, (z.B. Ausschussquote der Chips auf einem Wafer). Die Ausschussquote kann auch als Wahrscheinlichkeit berechnet werden. (z.B. Ausschussquote = Anteil abgleichbarer Ohmscher Widerstände oberhalb T_0).

5.2.3 Reparierbare Erzeugnisse

Fehlerhafte Erzeugnisse, die reparierbar sind, d.h. deren Fehler beseitigt werden können, werden als Nacharbeit bezeichnet. In diesem Fall spricht man von Nacharbeitsquote p_N

$$p_N = \frac{\text{Anzahl der Nacharbeits-Erzeugnisse}}{\text{Anzahl der geprüften Erzeugnisse}}$$

Die Nacharbeitsquote (auch oft Reparaturquote) ist eine Qualitätskenngröße zur Charakterisierung technologischer Prozesse. Sie wird aber auch für Erzeugnisse verwendet (z.B. für fehlerhafte Baugruppen). Die Nacharbeitsquote kann auch als Wahrscheinlichkeit berechnet werden (z.B. Nacharbeitsquote = Anteil der abgleichbaren Widerstände unterhalb T_u).

5.2.4 Annahme und Rückweisung

Jeder Prüfprozess besitzt für den Erzeugnisfluss zwei Ausgänge

1. Annahmeausgang
   für fehlerfreie Erzeugnisse mit der Annahmequote *a*

$$a = y$$

2. Rückweiseausgang
   für fehlerhafte Erzeugnisse mit der Rückweisequote *r*

$$r = p = p_A + p_N$$

Je nach Erzeugnis und Fehlerart können p_A und p_N auch Null sein.

5.2.5 Kostenoptimale Prüfung

Prüft man reparierbare Erzeugnisse unmittelbar im Anschluss an einen technologischen Prozess, so entstehen Kosten für das Prüfen aller Erzeugnisse sowie für das Reparieren der fehlerhaften Erzeugnisse. Für sehr kleine Fehlerquoten ergibt sich nun die Frage, ob man darauf verzichtet und dafür dann "später", d.h. erst nach weiteren technologischen Schritten die Fehler beseitigt.

Stellt man N Stück Erzeugnisse mit der Fehlerquote p her, d.h. $N \cdot p$ ist die Anzahl fehlerhafter Erzeugnisse, so entstehen folgende Kosten

Prüfen	1.	Prüfkosten	$K_P = N \cdot k_P$
		mit k_p = Prüfkosten pro Stück	
	2.	Nacharbeitskosten	$K_R = N \cdot p \cdot k_R$
		(Rückweisekosten)	
		mit k_R = Rückweisekosten pro Stück	
Nichtprüfen		Fehlerfolgekosten	$K_F = N \cdot p \cdot k_F$
		mit k_F = Fehlerfolgekosten pro Stück.	

Da im Allgemeinen die Fehlerbeseitigung am billigsten ist, wenn man sie unmittelbar nach der Fehlerentstehung macht, gilt

$$k_F > k_R$$

Die Kostengleichungen für Prüfen und Nichtprüfen in Abhängigkeit von *p* zeigt Abbildung 5-5 (dabei wurden die Kosten durch *N* geteilt).

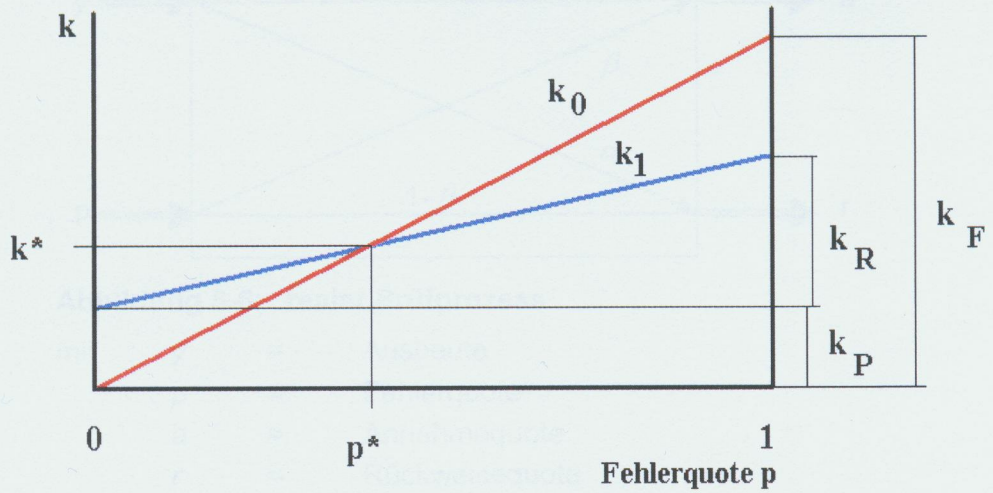


Abbildung 5-5: Optimierung von Prüfprozessen

k_o = Nichtprüfen
k_1 = Prüfen

Sie stellen Geraden dar und schneiden sich im Punkt p^* (Trennfehlerquote) und k^* (Trennkosten).

Man berechnet leicht

$$p^* = \frac{k_P}{k_F - k_R}$$

5.2.6 Idealer und realer Prüfprozess

Auch Prüfprozesse können beim Entscheiden bzw. Sortieren fehlerhaft sein, d.h. die beiden Entscheidungen

- das Erzeugnis ist fehlerfrei
- das Erzeugnis ist fehlerhaft

sind im allgemeinen "unscharf".

Man definiert daher zwei Kenngrößen der Prüfunschärfe.

Prüfunschärfe 1. Art α

α ist der Anteil der fehlerfreien Erzeugnisse, der (durch den Prüfprozess "versehentlich") zurückgewiesen wird.

Prüfunschärfe 2. Art β

β ist der Anteil der fehlerhaften Erzeugnisse, der (durch den Prüfprozess "versehentlich") angenommen wird.

Damit entsteht folgender Zusammenhang

$$a = y(1-\alpha) + p \cdot \beta$$

$$r = p(1-\beta) + y \cdot \alpha$$

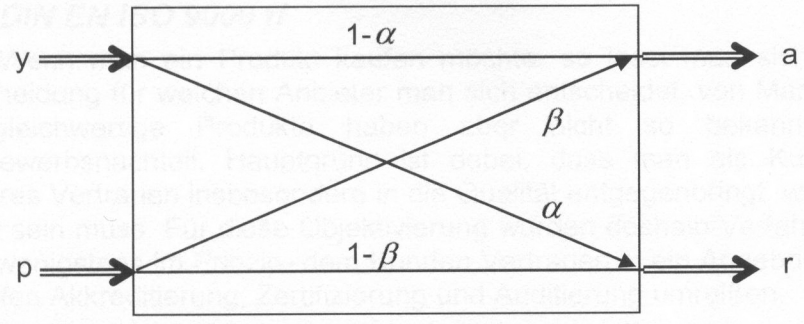


Abbildung 5-6: realer Prüfprozess

mit y = Ausbeute
p = Fehlerquote
a = Annahmequote
r = Rückweisequote

Die Annahmequote beinhaltet damit einen Anteil fehlerfreier und fehlerhafter Erzeugnisse. Der Anteil D_A

$$D_A = \frac{p \cdot \beta}{a}$$

stellt eine Fehlerquote der angenommenen Erzeugnisse dar.

Ebenso beinhaltet die Rückweisequote r fehlerhafte und fehlerfreie Erzeugnisse. Der Anteil D_R

$$D_R = \frac{y \cdot \alpha}{r}$$

ist die Quote der fehlerfreien Erzeugnisse in den zurückgewiesenen Erzeugnissen. Damit ist D_R quasi eine Ausbeute im zurückgewiesenen Erzeugnisstrom.

Mit D_A und D_R lassen sich formulieren

$$y = a(1 - D_A) + r \cdot D_R$$

$$p = r(1 - D_R) + a \cdot D_A$$

Für $\alpha = 0$ und $\beta = 0$ heißt der Prüfprozess ideal (Dann sind auch $D_A = 0$ und $D_R = 0$).

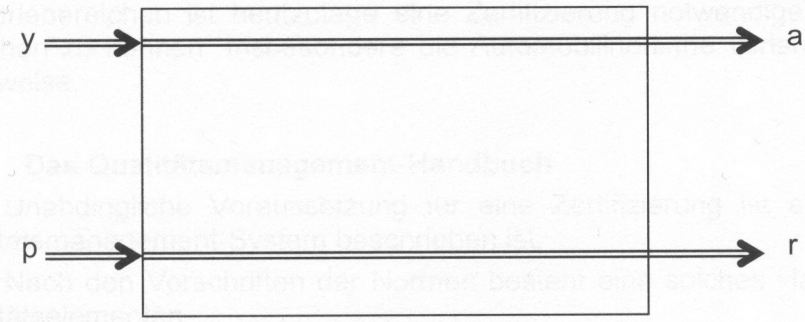


Abbildung 5-7: idealer Prüfprozess

5.3 DIN EN ISO 9000 ff

Wenn man ein Produkt kaufen möchte, so lässt man sich zumindest teilweise in seiner Entscheidung für welchen Anbieter man sich entscheidet, von Markennamen u.ä. leiten. Anbieter, die gleichwertige Produkte haben aber nicht so bekannt sind, haben somit einen Wettbewerbsnachteil. Hauptgrund ist dabei, dass man als Kunde einem Markennamen ein größeres Vertrauen insbesondere in die Qualität entgegenbringt, was aber nicht unbedingt objektiv richtig sein muss. Für diese Objektivierung wurden deshalb Verfahren und Instrumente entwickelt, die – wenigstens im Prinzip- dem Kunden Vertrauen in ein Angebot geben. Sie lassen sich mit den Begriffen Akkreditierung, Zertifizierung und Auditierung umreißen.

Akkreditieren heißt einfach, die Kompetenz zur Durchführung von Prüfungen zu bestätigen.

Zeritfizieren heißt vereinfacht, die Übereinstimmung mit einem Sollwert oder einer Vorgabe festzustellen (Konformitätsbestätigung). Sie sind in Normen, technischen Spezifikationen, aber auch Ausbildungssystemen o.ä. festgelegt. Zertifiziert werden Produkte, Qualitätsmanagement-Systeme und Personen.

Auditieren ist der Vorgang der Überprüfung, ob Kompetenz in einem Laboratorium, bei der Entwicklung und Produktion eines Betriebes oder auch bei der Arbeit einer Zertifizierungsstelle vorliegt.

Eine (aber eigentlich nicht ausreichende) Voraussetzung für das Kundenvertrauen in die Qualität von Produkten ist ein funktionierendes Qualitätsmanagementsystem. Wie ein solches System auszusehen hat, ist in der Normenreihe DIN EN ISO 9000–9004 festgelegt.

- DIN EN ISO 9000 Leitfaden zur Auswahl und Anwendung der Normen zu Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung
- DIN EN ISO 9001 Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung für Entwicklung und Konstruktion, Produktion, Montage und Kundendienst
- DIN EN ISO 9002 Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung für Produktion und Montage
- DIN EN ISO 9003 Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung für Endprüfungen
- DIN EN ISO 9004 Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätssicherungssystems Leitfaden

Die Normen 9001-9003 sind spezielle Anwendungsfälle für bestimmte Bereiche, wobei Schärfe und Umfang der Forderungen in gleicher Reihenfolge abnimmt.

Die Zertifizierung nach ISO 9000 ff für ein Unternehmen ist eine vertrauensbildende Maßnahme für den Kunden. Ein zertifiziertes Unternehmen ist prinzipiell in der Lage Qualität zu produzieren. Dies ist nicht gleichzusetzen mit der Aussage, dass Qualität produziert wird. In vielen Industriebereichen ist heutzutage eine Zertifizierung notwendige Voraussetzung, um am Markt bestehen zu können. Insbesondere die Automobilindustrie verlangt von ihren Zulieferern solche Nachweise.

5.3.1 Das Qualitätsmanagement-Handbuch

Unabdingliche Voraussetzung für eine Zertifizierung ist ein QM-Handbuch, in dem das Qualitätsmanagement-System beschrieben ist.

Nach den Vorschriften der Normen besteht eine solches Handbuch aus den so genannten Qualitätselementen.

QM-Element 1	Verantwortung der Leitung
QM-Element 2	Qualitätsmanagement-System
QM-Element 3	Vertragsprüfung
QM-Element 4	Designlenkung
QM-Element 5	Lenkung der Dokumente und Daten
QM-Element 6	Beschaffung
QM-Element 7	Lenkung der vom Kunden beigestellten Produkte
QM-Element 8	Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit von Produkten

QM-Element 9	Prozesslenkung
QM-Element 10	Prüfungen
QM-Element 11	Prüfmittelüberwachungen
QM-Element 12	Prüfstatus
QM-Element 13	Lenkung fehlerhafter Produkte
QM-Element 14	Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen
QM-Element 15	Handhabung, Lagerung, Verpackung, Konservierung und Versand
QM-Element 16	Lenkung von Qualitätsaufzeichnungen
QM-Element 17	Interne Qualitätsaudits
QM-Element 18	Schulung
QM-Element 19	Wartung
QM-Element 20	Statistische Methoden

5.3.2 Aufgabenstellung Qualitätssimulation

Praktische Durchführung: **Barkhausenbau Raum I/63**
Versuchsverantwortlicher: Dr.-Ing. habil. H. Wohlrabe
Zentrum für mikrotechnische Produktion
Barkhausenbau Raum I/64
Telefon: 463 35479
Mail: wohlrabe@zmp.et.tu-dresden.de

Einführung

Bei vielen Prozessen der Elektronik können Auswirkungen von zufälligen Einflüssen nicht ausgeschlossen werden. Um negative Auswirkungen solcher zufälligen Einflüsse zu minimieren und möglichst auszuschließen ist es notwendig, die dabei herrschenden mathematisch-statistischen Gesetzmäßigkeiten zu kennen und deren Wirken auszunutzen. Ausgegangen wird dabei zunächst von einem Prozess aus der mechanischen Fertigung, da dies zunächst anschaulicher ist.

Betrachtung einer mechanischen Fertigung (Teilaufgabe 1)

Auf einer Drehmaschine (Maschine 1) sollen Wellen hergestellt werden. Dabei ist bekannt, dass der zu bearbeitende Durchmesser der Welle nicht konstant ist, sondern durch zufällig wechselnde Fertigungsbedingungen (schwankende Umgebungseinflüsse, Bedienungsfehler, Materialeinflüsse usw.) schwankt. Dieser Sachverhalt wurde über einen längeren Zeitraum beobachtet. Es wurde festgestellt, dass sich diese Abweichungen unabhängig vom eingestellten Arbeitspunkt der Drehmaschine (im Folgenden mit μ bezeichnet) mit Hilfe einer symmetrischen Dreiecksverteilung beschreiben lassen. Bild 1 illustriert diesen Sachverhalt.

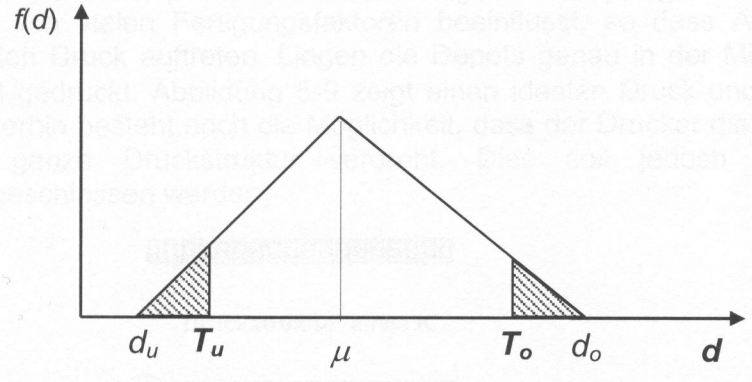


Abbildung 5-8 Veranschaulichung einer Dreiecksverteilung (schraffiert ist der Ausschussanteil)

Dies bedeutet, dass der Durchmesser einer gefertigten Welle immer im Intervall $[d_u, d_o]$ liegt. Gesucht ist der Anteil (Wahrscheinlichkeit oder Ausbeute y_1) der Wellen, die innerhalb von gegebenen Toleranzgrenzen $[T_u, T_o]$ liegen, wenn das oben genannte Modell der Dreiecksverteilung zutreffend ist und das Intervall $[d_u, d_o]$ bekannt ist. Weiterhin ist der Sollwert μ_{Soll} des Durchmessers bekannt.

Berechnet werden soll die Ausbeute y (= Gutanteil) für folgende Werte:

μ_{Soll}	=	2,0	mm
T_u	=	1,98	mm
T_o	=	2,02	mm
d_u	=	1,977	mm
d_o	=	2,021	mm
μ	=	1,999	mm

Hinweis:

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Durchmesser in einem beliebigen Intervall (z.B. $[d_1, d_2]$) liegt, kann auch als der Flächeninhalt (berechenbar durch das Flächenintegral) interpretiert werden. Da die Wahrscheinlichkeit, dass der Durchmesser im Intervall $[d_u, d_o]$ liegt, genau 1 ist, ist somit der Flächeninhalt unter der Dreiecksverteilung identisch 1. Unter Benutzung der geg. numerischen Werte (siehe oben) kann die Funktion $f(d)$ (siehe Abbildung 5-8) ermittelt werden.

Betrachtung eines Trends (Teilaufgabe 2)

Auf einer zweiten Drehmaschine (Maschine 2) werden die gleichen Wellen wie auf der Maschine 1 gefertigt. Die Steuerung der Fertigung erfolgt in Takten. Ein Takt hat 10 s, so dass alle 10 s eine gedrehte Welle die Maschine 2 verlässt. Von dieser Maschine ist bekannt, dass ihr Arbeitspunkt μ nicht konstant ist, sondern sich im Laufe der Zeit ändert. Ursache ist eine Abnutzung des Werkzeuges (Drehmeißels). Diese Änderung (auch Trend bezeichnet) lässt sich näherungsweise durch folgende Trendgleichung beschreiben:

$$\mu(t) = \mu_a + a\,t$$

mit:

μ_a	Arbeitspunkt zu Beginn des betrachteten Zeitabschnitts
t	Zeit (in Takten)
a	Trendparameter (Längeneinheit pro Takt)

Der augenblickliche Arbeitspunkt $\mu(t)$ ist somit linear von der Zeit abhängig. Ein solcher Trend wird als linearer Trend bezeichnet.

Gesucht ist der Zeitpunkt t_a, zu dem die Ausbeute der Wellen 95 % unterschreitet, wenn zum Zeitpunkt $t = 0$ der Arbeitspunkt der Drehmaschine μ genau auf den Sollwert μ_{Soll} eingestellt wird und der Trendparameter a= 0,004 µm/Takt beträgt.

Betrachtung eines Lotpastendruckprozesses (Teilaufgabe 3)

Ein Lotpastendrucker bedruckt Leiterplatten mit Lotpaste. Die gedruckten Strukturen sind im wesentlichen Lotpastenquader (im Folgenden Depot genannt). Die Druckgenauigkeit der Depots wird von vielen Fertigungsfaktoren beeinflusst, so dass Abweichungen (Versätze) von einem idealen Druck auftreten. Liegen die Depots genau in der Mitte des Pads der Leiterplatte, wurde ideal gedruckt. Abbildung 5-9 zeigt einen idealen Druck und einen Druck mit einem Versatz Δx. Weiterhin besteht noch die Möglichkeit, dass der Drucker die Depots in y-Richtung versetzt, sowie die ganze Druckstruktur verdreht. Dies soll jedoch in den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen werden.

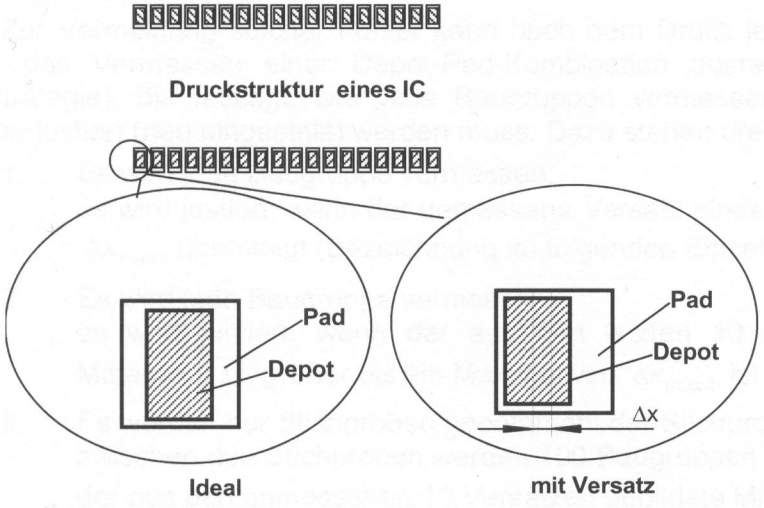


Abbildung 5-9 Veranschaulichung eines idealen und eines versetzten Drucks

Diese zufällig schwankenden Abweichungen (Versätze) lassen sich mit einer Normalverteilung beschreiben. Abbildung 5-10 zeigt eine solche Verteilung.

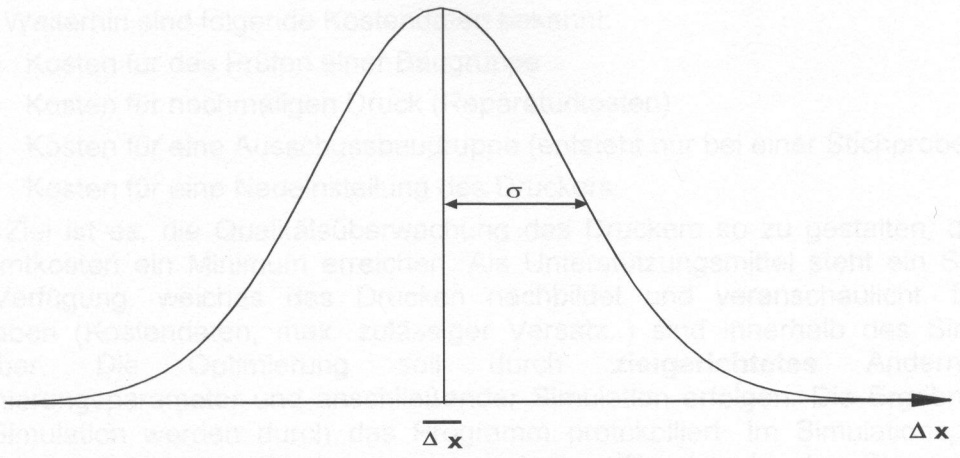


Abbildung 5-10 Darstellung einer Normalverteilung

$\overline{\Delta x}$ - mittlerer Versatz in *x*-Richtung

σ - Standardabweichung dieses Versatzes

Die Standardabweichung σ ist ein Maß dafür, wie stark einzelne konkrete Versätze vom mittleren Versatz $\overline{\Delta x}$ abweichen. Dieser Versatz darf nicht zu groß (Maximalwert Δx_{max}) und nicht zu klein (Δx_{min}) werden, wobei in der Regel für diese Toleranzgrenzen $\Delta x_{max} = -\Delta x_{min}$ gilt. Bei Verletzung dieses maximal zulässigen Versatzes können im nachfolgenden Lötprozess z.B. Lötbrücken entstehen. Entstehen keine Lötbrücken, so haben diese „versetzten" Lötstellen keine ausreichende Zuverlässigkeit (geringe mittlere Lebensdauer).

Der mittlere Versatz $\overline{\Delta x}$ ist im Idealfall Null. Im vorliegenden Beispiel ist jedoch bekannt, dass sich der mittlere Versatz systematisch in Form eines linearen Trends von Null entfernt. Der Trend beginnt zu einem unbekannten Zeitpunkt, die Parameter des Trends sind ebenfalls unbekannt. Es ergeben sich somit zusätzliche und stetig steigende Versätze der gedruckten Depots und damit steigt die Gefahr von Toleranzverletzungen. Wird ein zu großer Versatz durch eine Messung erkannt, so wird die entsprechende Leiterplatte gereinigt und der Druck wird nochmals ausgeführt. Dieses nochmalige Drucken kann man auch als „Reparatur" interpretieren. Wird ein solcher Fehler nicht erkannt, so entsteht Ausschuss, der aber erst später entdeckt wird und somit zu höheren Kosten führt.

Zur Vermeidung solcher Fehler kann nach dem Druck jede Baugruppe kontrolliert werden, wobei das Vermessen einer Depot-Pad-Kombination ausreicht. Gesucht ist eine Vorschrift (Prüfstrategie), die festlegt, wie viele Baugruppen vermessen werden müssen und wann der Drucker justiert (neu eingestellt) werden muss. Dazu stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung.

1. Es wird jede Baugruppe vermessen;
   es wird justiert, wenn der gemessene Versatz eines Depots Δx einen bestimmten Wert Δx_{max1} übersteigt (Bezeichnung im folgenden Einzelwertkorrektur)
2. Es wird jede Baugruppe vermessen;
   es wird justiert, wenn der aus den letzten 10 gemessenen Versätzen gebildete Mittelwert $\overline{\Delta x}$ größer als ein Maximalwert Δx_{max2} ist (gleitender Mittelwert)
3. Es werden nur Stichproben genommen; der Stichprobenumfang beträgt n=10;
   zwischen den Stichproben werden 100 Baugruppen nicht geprüft; es wird justiert, wenn der aus den gemessenen 10 Versätzen gebildete Mittelwert $\overline{\Delta x}$ größer ist, als ein zulässiger Maximalwert Δx_{max3} (Stichproben)

Die Größen $\Delta x_{max..}$ sind die Optimierungsparameter.

Weiterhin sind folgende Kostendaten bekannt:

- Kosten für das Prüfen einer Baugruppe
- Kosten für nochmaligen Druck (Reparaturkosten)
- Kosten für eine Ausschussbaugruppe (entsteht nur bei einer Stichprobenprüfung!)
- Kosten für eine Neueinstellung des Druckers

Ziel ist es, die Qualitätsüberwachung des Druckers so zu gestalten, dass die anfallenden Gesamtkosten ein Minimum erreichen. Als Unterstützungsmittel steht ein Simulationsprogramm zur Verfügung, welches das Drucken nachbildet und veranschaulicht. Die entsprechenden Vorgaben (Kostendaten, max. zulässiger Versatz..) sind innerhalb des Simulationsprogramms abrufbar. Die Optimierung soll durch **zielgerichtetes** Ändern der jeweiligen Optimierungsparameter und anschließender Simulation erfolgen. Die Ergebnisse und der Ablauf der Simulation werden durch das Programm protokolliert. Im Simulationsprogramm sind zwei verschiedene Lotpastendrucker zu analysieren. Die Anzahl der Simulationsexperimente ist begrenzt.

Als Ergebnisse sind für jeden der beiden Drucker festzuhalten und zu diskutieren:

1. optimale Parameter für **jede** der drei möglichen Strategien
2. optimale Prüfstrategie
3. Kurze Diskussion über die auftretenden Unterschiede und deren Ursachen
4. Vergleich der beiden Drucker

6 Verzeichnisse

6.1 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Haupt- und Kontrollfenster von Eagle 5 4
Abbildung 2-1: Systematik der Leiterplattenherstellungsverfahren 6
Abbildung 2-2: Subtraktiv-Verfahren für einseitige Leiterplatten 7
Abbildung 3-1: Technologietreiber in der Elektronikproduktion 11
Abbildung 3-2: Ein- und zweiseitig bestückte LP in (reiner) SMD-Technik 13
Abbildung 3-3: Prozessablauf bei doppelseitiger SMD-Montage 13
Abbildung 3-4: Einfluss der Partikelgröße in der Lotpaste 15
Abbildung 3-5: Prinzipdarstellung des Schablonendruckes 16
Abbildung 3-6: Gedruckte Lotdepots 17
Abbildung 3-7: Dispensprinzip 17
Abbildung 3-8: Lotdepots durch Dispensen 17
Abbildung 3-9: Prinzipieller Verfahrensablauf beim Bestücken 19
Abbildung 3-10: Beispiel für ein Temperaturprofil beim Reflowlöten (SnAg4Cu0.5) 21
Abbildung 3-11: Benetzungswinkel von Lötstellen 22
Abbildung 4-1: Kosten pro Fehler im Fertigungsablauf 24
Abbildung 4-2: Prinzip des Nadeladapters – ein- und zweiseitige Kontaktierung 25
Abbildung 5-1: Qualitätskenngröße *X* 28
Abbildung 5-2: Toleranzbereich 28
Abbildung 5-3: Prozesscharakteristik 29
Abbildung 5-4: Normalverteilte Prozesscharakteristik 29
Abbildung 5-5: Optimierung von Prüfprozessen 35
Abbildung 5-6: realer Prüfprozess 36
Abbildung 5-7: idealer Prüfprozess 36
Abbildung 5-8 Veranschaulichung einer Dreiecksverteilung (schraffiert ist der Ausschussanteil) 39
Abbildung 5-9 Veranschaulichung eines idealen und eines versetzten Drucks 40
Abbildung 5-10 Darstellung einer Normalverteilung 41

6.2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1: Aufgaben ausgewählter Tools des „Eagle 5"-CAD-Systems 5
Tabelle 3-1: Typische Gehäuseformen für aktive SMD-Bauelemente 12
Tabelle 3-2: Bauformen passiver Bauelemente 12
Tabelle 3-3: Größenvergleich für Chip-Bauelemente 13
Tabelle 3-4: Zusammensetzung von Lotpasten 14
Tabelle 3-5: Schmelzpunktintervall häufig verwendeter Lotwerkstoffe 15
Tabelle 3-6: Übersicht der Lotpastenauftragsverfahren 15
Tabelle 3-7: Fehler beim Lotpastendruck 16
Tabelle 3-8: Systematik der Bestückprinzipien 18
Tabelle 3-9: Lötverfahren in der SMT 20
Tabelle 3-10: Fehlerbilder nach dem Reflowlöten 23

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik
Zentrum für mikrotechnische Produktion
AVT

Praktikumsunterlagen zur Lehrveranstaltung

Aufbau- und Verbindungstechnik 1

Versuch SMT I + SMT II

Ausgabe Sommersemester 2009

Bearbeitet von

Dr.-Ing. M. Oppermann
Dr.-Ing. habil. H. Wohlrabe
Dr.-Ing. habil. T. Zerna

FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIONSTECHNIK

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Überblick über die Baugruppe 5

2.1 Reflowseite 5

2.2 Wellenlötseite 6

3 Lotpastendruck 7

3.1 Druckverfahren im Gesamtprozess der SMT 7

3.2 Metallmaskendruck 7

4 Automatische Bestückung von SMD 9

5 Löten 9

5.1 Grundlagen des Lötens 9

5.2 Flussmittel 9

5.3 Lötverfahren und Wärmezufuhr beim Löten 10

5.4 Lötfehler beim Reflowlöten 10

5.5 Wellenlöten 11

5.6 Lötfehler beim Wellenlöten 12

6 Montage-Kleben 12

7 Messung und Auswertung von Temperaturprofilen 13

1 Einleitung

Das Praktikum soll die in der Lehrveranstaltung vermittelten Kenntnisse über die technologischen Teilprozesse bei der Montage elektronischer Baugruppen vertiefen.

Im Rahmen des Praktikums wird eine Leiterplatte im Europaformat (100mm x 160mm) mit Teststrukturen (Technologieteil) und einer elektronischen Schaltung (Funktionsteil) aufgebaut.

Folgender Ablauf wird während der beiden Praktikumstermine realisiert:

SMT I

- schriftlicher Eingangstest
  Verfahrensablauf in der SMT-Montage
  Druckverfahren für Lotpaste
  wesentliche Merkmale und Vergleich der Verfahren
  Eigenschaften und Zusammensetzung von Lotpasten
  automatische Bestückverfahren
  Bauformen von SMT-Bauelementen und deren Lieferformen
  Vergleich von automatischen Bestückverfahren (Vor- und Nachteile)
  Löten
  grundsätzliche Vorgänge beim Löten
  Vergleich der Lötverfahren (Reflow- und Wellenlöten)
  Anforderungen an Temperaturprofile
  Flussmittel
  Lötfehler und deren Ursachen (Auswahl)
- Lotpastendruck Bestückseite
  Diskussion der Einflussparameter und Fehlermöglichkeiten
  Realisierung von Probedrucken
  Bewertung der Druckqualität
- automatische Bauelementebestückung SMT Bestückseite
  Demonstration der Programmerstellung
- Konvektionslöten Bestückseite

SMT II

- Kolloquium mit den Schwerpunkten
  Bewertung der Lötergebnisse vom Konvektionslöten aus Versuchsteil I
  Zuverlässigkeit von Lötstellen
  Benetzungsprobleme
- Temperaturprofilmessung des Konvektionslötens
  2 Messungen mit Diskussion
- Automatisches Dispensen der Klebepunkte auf die Unterseite
- Automatisches Bestücken der Unterseite
- Kleber aushärten im Konvektionsofen
- Handbestückung der Oberseite (Durchsteckbauelemente)
- Schwalllöten der Unterseite
  Einstellung der Maschine
  Löten der Praktikumsplatinen
  Diskussion der Ergebnisse
- Funktionstest der Leiterplatten

Achtung: Gilt für den gesamten Versuch!

Von allen praktisch durchgeführten Schritten ist die Qualität der gefertigten Leiterplatten unmittelbar nach jedem einzelnen Fertigungsschritt zu erfassen. Dazu steht für jede einzelne Platine das gedruckte Layout zur Verfügung, in dem die Fehler und die Fehlerorte festgehalten werden können. Im Protokoll sind aufgetretene Fehler unter folgenden Aspekten zu diskutieren:

- Kurzbeschreibung des Fehlers
- Fehlerursachen
- Möglichkeiten zur Vermeidung dieser Fehler

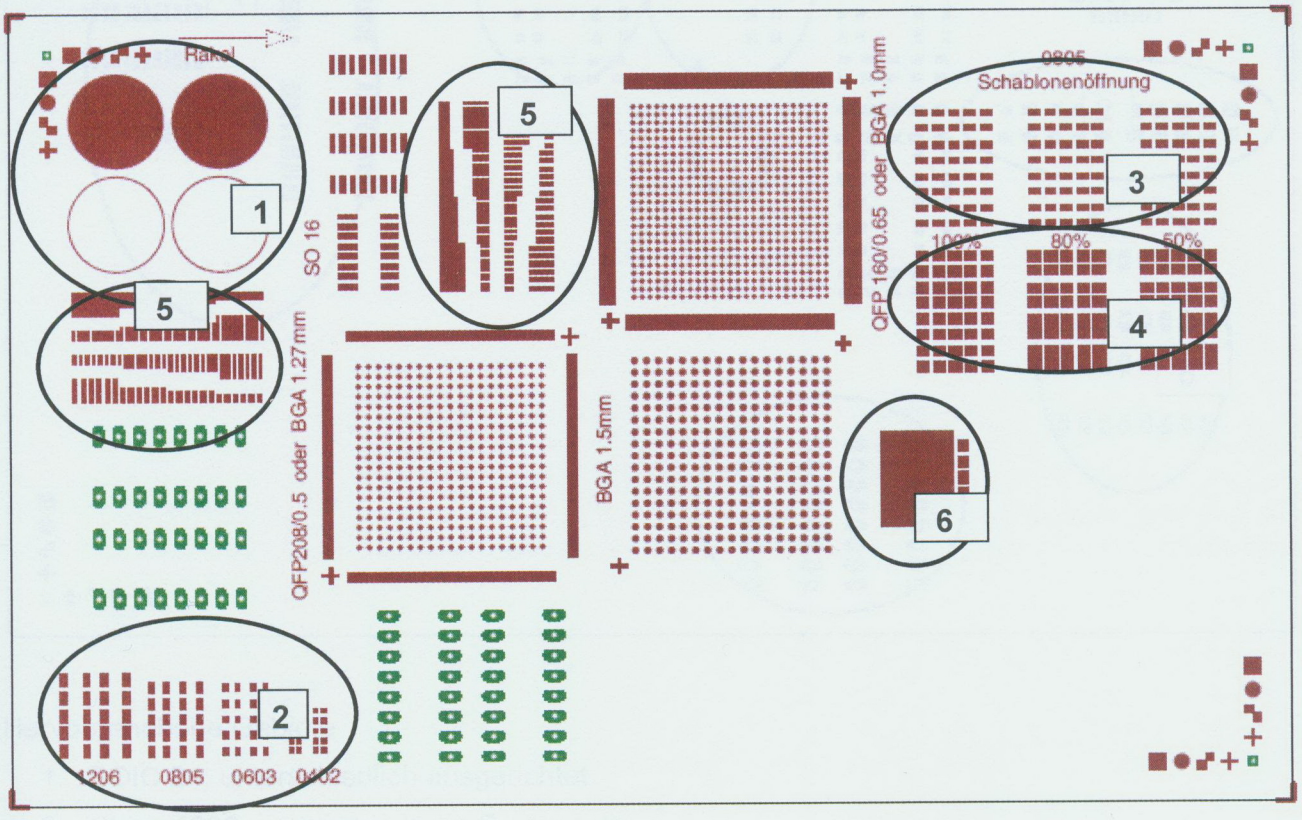
Organisatorische Hinweise zum Praktikum erhalten Sie in den entsprechenden Lehrveranstaltungen sowie

- in **Aushängen** im Barkhausenbau, neben Raum I/63
- unter **http://www.avt.et.tu-dresden.de/**

2 Überblick über die Baugruppe

Die im Praktikum herzustellende und zu montierende Leiterplatte stellt keine elektrisch funktionale Baugruppe dar, sondern lediglich einen Technologie-Demonstrator, an dem verschiedene Prozessschritte, Fehlerbilder etc. nachvollzogen werden können.

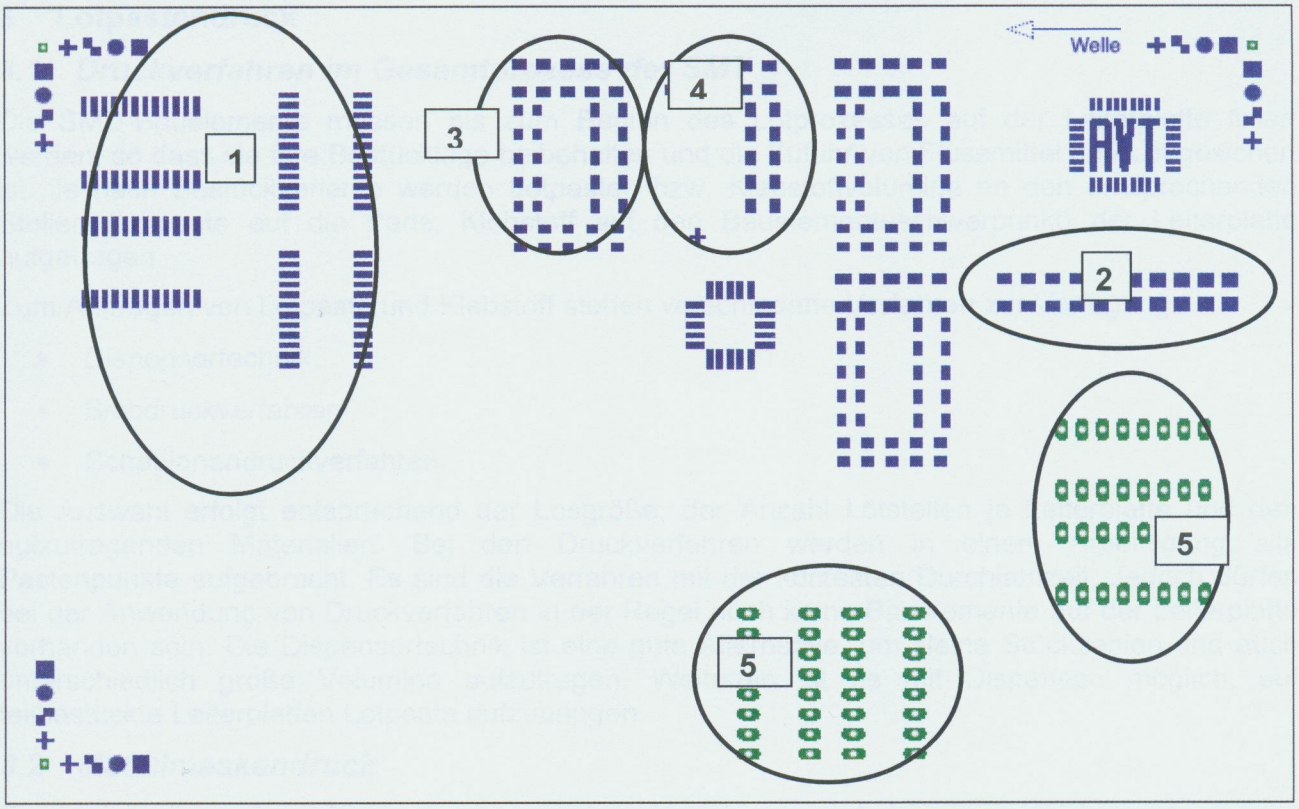
2.1 Reflowseite



Hervorgehobene Gebiete

1. Druck von Lotpastendepots auf ein „großes“ Pad und auf eine nicht benetzbare Oberfläche
2. Bestückung von Chips auf vorschriftsmäßige Padlayouts (Philipsvorschriften)
3. Bestückung von 0805-Chips auf vorschriftsmäßige Padlayouts, aber mit schrittweise verkleinerten Schablonenöffnungen
4. Bestückung von 0805-Chips auf vergrößerte Padlayouts mit schrittweise verkleinerten Schablonenöffnungen
5. Teststrukturen für den Lotpastendruck
6. Bestückung von Chips mit einseitig stark vergrößerten Padlayouts (z.B. für eine Massefläche

2.2 Wellenlötseite



Hervorgehobene Gebiete

1. SOIC 24, unterschiedlich ausgerichtet
2. Chips 1206, unterschiedliche Padlayouts
3. Chips 0805 und 1206 unterschiedlich ausgerichtet
4. Melf-Bauelemente, unterschiedlich ausgerichtet
5. DIP-Package

3 Lotpastendruck

3.1 Druckverfahren im Gesamtprozess der SMT

Die SMD-Bauelemente müssen bis zum Beginn des Lötprozesses auf der Leiterplatte fixiert werden, so dass sie ihre Bestücklage beibehalten und die Zufuhr von Flussmittel und Lot gesichert ist. Je nach Bestückvariante werden Lotpasten bzw. Klebstoffvolumina an den entsprechenden Stellen (Lotpaste auf die Pads, Klebstoff auf den Bauelementeschwerpunkt) der Leiterplatte aufgetragen.

Zum Auftragen von Lotpaste und Klebstoff stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- Dispensertechnik
- Siebdruckverfahren
- Schablonendruckverfahren.

Die Auswahl erfolgt entsprechend der Losgröße, der Anzahl Lötstellen je Leiterplatte und den aufzutragenden Materialien. Bei den Druckverfahren werden in einem Arbeitsgang alle Pastenpunkte aufgebracht. Es sind die Verfahren mit der kürzesten Durchlaufzeit. Jedoch dürfen bei der Anwendung von Druckverfahren in der Regel noch keine Bauelemente auf der Leiterplatte vorhanden sein. Die Dispensertechnik ist eine gute Alternative, um kleine Stückzahlen und auch unterschiedlich große Volumina aufzutragen. Weiterhin ist es mit Dispensen möglich, auf teilbestückte Leiterplatten Lotpaste aufzubringen.

3.2 Metallmaskendruck

Der Metallmaskendruck ist das vorherrschende Verfahren zur Aufbringung der Lotpaste auf die unbestückten Leiterplatten.

Mit Metallmasken (bzw. auch Metallschablonen) wird ohne Absprung mit direktem Kontakt zwischen Leiterplatte und Maske (On-contact-Druck) gearbeitet. Die Paste wird durch geätzte (bzw. gelaserte) Öffnungen einer Metallfolie mit Hilfe der Rakel gepresst und so auf die Leiterplatte aufgebracht. Nach dem Druck wird die Metallmaske über die gesamte Fläche des Druckbildes gleichzeitig abgehoben. Die Maske kann aus Edelstahl, Neusilber, Bronze, Messing oder Kupfer bestehen. Die Metallfoliendicke (75..250 □m) bestimmt direkt die Dicke des Pastenauftrages. Für den Lotpastendruck wird als Standard meistens eine Maskendicke von 150 □m verwendet, für geringere Pastenmengen auf Fine-Pitch-Strukturen eine Dicke bis zu 75 □m. Da es mit entsprechender Bearbeitung möglich ist, die Dicke der Maske partiell zu verringern, ist das Drucken unterschiedlicher Schichtdicken mit einer Maske möglich.

Einfluss der Druckparameter auf die Qualität beim Metallmaskendruck

Der Druckprozess wird von einer Vielzahl von Prozessvariablen beeinflusst:

Paste	Zusammensetzung, Rheologie, Viskosität, Homogenität, Partikelgröße, Temperatur, Pastenmenge
Metallmaske	Material, Schablonendicke, Herstellungsverfahren, Sauberkeit
Rakel	Material, Härte, Form, Anstellwinkel, Rakeldruck, Rakelgeschwindigkeit
Drucker	Absprung, Parallelität zwischen Substrat und Form, Positionierung von Substrat zur Druckform
Leiterplatte	Material, Adhäsionsverhalten, Sauberkeit

Die Kriterien für die Qualität des Druckbildes sind:

- eine gleichmäßige Schicht definierter Dicke
- eine hohe Kantenschärfe der gedruckten Lotpastenstrukturen
- eine hohe Positioniergenauigkeit des Druckbildes zu den Strukturen der Leiterplatte.

Um ein optimales Druckbild zu erzielen, muss die Paste ein bestimmtes rheologisches Verhalten aufweisen. Das Fließverhalten ist abhängig von Viskosität, Pseudoplastizität, Thixotropie, Oberflächenspannung, Temperatur, Adhäsion zwischen Paste und Leiterplatte, Kohäsion innerhalb der Paste, sowie von den hydrodynamischen Kräften, die während des Druckes in der Paste entstehen.

Der wichtigste Pastenparameter ist die Viskosität. Unter Einwirkung der Rakelbewegung nimmt die Viskosität ab (Pseudoplastizität). Beim Lotpastenauftrag ist zu beachten, dass die Paste während längeren Druckens als Folge wechselnder Beanspruchung langsam dünnflüssiger wird (Thixotropie). Die Viskosität der Lotpaste ist auch stark temperaturabhängig.

Diese Effekte können gelegentliches Nachregeln der Einstellgrößen erforderlich machen. Die Prozessvariablen, die unmittelbar am Lotpastendrucker einstellbar sind, werden als Druckerparameter bezeichnet, es sind der Rakelwinkel, die Rakelhöhe, der Rakeldruck und die Rakelgeschwindigkeit.

Der Rakelwinkel bestimmt zusammen mit der Rakelgeschwindigkeit den dynamischen Druck auf die Paste. Er sollte 45° betragen. Der Winkel ist korrekt, wenn ausreichend Scherkräfte auf die Paste wirken. Ist der Rakelwinkel zu groß, werden die Maskenöffnungen nur ungenügend gefüllt und es entsteht eine zu geringe Schichtdicke und meist ein unvollständiges Druckbild. Ist der Rakelwinkel zu klein, wird der dynamische Druck auf die Paste zu hoch, so dass es zum Verschmieren der Paste an den Strukturrändern kommt.

Der Rakeldruck ist so zu wählen, dass der Widerstand der Paste überwunden wird. Ein zu hoher Rakeldruck erzeugt meist keine unmittelbare Verschlechterung des Druckbildes. Die Standzeit der Masken wird aber stark verkürzt. Außerdem wird der Rakelabrieb größer und die Rakelkante verformt sich, so dass beim Druck ein undefinierter Rakelwinkel entsteht. Bei zu niedrigem Rakeldruck liegt die Maske nicht gleichmäßig auf der Leiterplatte auf, außerdem werden die Öffnungen der Maske nur unvollständig gefüllt, wodurch ein unvollständiges Druckbild erzeugt wird.

Die Rakelgeschwindigkeit erzeugt den nötigen hydraulischen Druck, der die Paste durch die Öffnungen der Maske presst. Durch fehlerhaft eingestellte Geschwindigkeiten können unvollständige Druckbilder entstehen. Im Allgemeinen ist der Schablonendruck jedoch in Bezug auf Schwankungen der Rakelgeschwindigkeit das robustere Verfahren gegenüber dem Siebdruck.

Die Rakelhärte beeinflusst in Abhängigkeit von der Rakelgeschwindigkeit die Schichtdicke. Beim Metallmaskendruck kommt es bei zu weichem Rakelmaterial in Verbindung mit zu hohem Rakeldruck zum Auswischen der Paste aus den Maskenöffnungen, die Schichtdicke (und damit das gedruckte Volumen) wird geringer.

Fehler, deren Ursachen in einem schlechten Lotpastendruck zu suchen sind, zeigen sich auch in einem schlechten Lötergebnis. Dabei sind im Wesentlichen zu beobachten:

Bauelement nicht gelötet

- zu wenig Lotpaste
- zu enge Öffnungen der Maske
- Maskenöffnungen durch angetrocknete Lotpastenrückstände verklebt

Kurzschluss durch Zinnbrücke

- Lotpastendruck versetzt
- zuviel Lotpaste gedruckt
- Design der Maske nicht zur Padgeometrie passend
- Schablone nicht oder schlecht gereinigt

Lotperlenbildung

- schlecht geeignete Lotpaste
- überalterte Lotpaste

- versetzter Lotpastendruck

Bauelemente nicht zentrisch über den Pads (Versatz)

- versetzter Maskendruck
- Druck ist kegelförmig durch schlechtes Auslösen der Paste aus den Maskenöffnungen

Der Lotpastendruck ist für ca. 60-70% der Fehler in einer Flachbaugruppenfertigung verantwortlich, und deshalb bezüglich der Qualitätssicherung der Schwerpunktprozess ist. Erschwerend kommt hinzu, dass ein Großteil der Fehler erst nach dem Löten sichtbar wird.

4 Automatische Bestückung von SMD

(siehe auch Vorlesungsskript „Aufbau- und Verbindungstechnik I")

Die automatische Bestückung im Praktikum wird mit einem Bestückautomaten Siplace 80F4 durchgeführt. Die Erstellung eines Bestückprogramms wird am Beispiel demonstriert.

5 Löten

5.1 Grundlagen des Lötens

(siehe auch Vorlesungsskript „Aufbau- und Verbindungstechnik I")

Das Löten beruht darauf, dass der Spalt zwischen den zu verbindenden Oberflächen mit geschmolzenem Metall ausgefüllt wird, wobei meistens eine Legierung von zwei oder mehreren Komponenten mit einem niedrigeren Schmelzpunkt als die zu verbindenden Oberflächen verwendet wird.

In der Elektronik werden Legierungen aus Zinn, Silber und Kupfer benutzt, die bei ca. 217°C zu schmelzen beginnen. Beim Löten verschmilzt jedoch das Lot nicht mit den zu verbindenden Oberflächen (Substrat), sondern reagiert lediglich mit ihnen. An dieser Reaktion ist nur das im Lot enthaltene Zinn beteiligt. Ohne diese Reaktion tritt keine Verbindung zwischen Lot und Substrat ein. Durch diese Reaktion entsteht eine Diffusionszone, die das mechanische Verhalten in der Lötstelle bestimmt.

Das Verhalten einer Lötstelle bei mechanischer Beanspruchung wird durch diese Schichtstruktur bestimmt. Während die Diffusionszone hart und spröde ist, ist das Lot selbst relativ weich und damit leicht verformbar. Auf Grund der Verformbarkeit des Lotes kann eine Lötstelle durch Verschiebung der Verbindungspartner entstehende Spannungen in gewissen Grenzen abbauen.

Voraussetzung für diese Reaktionen ist eine von Verunreinigungen freie Oberfläche der zu verbindenden Metalle. Störende Verunreinigungen (Oxide, Sulfide,...) müssen vor dem Löten entfernt werden. Jede Oberfläche ist mit einer Oxidschicht überzogen, die mit Hilfe von reduktiven Bestandteilen des Flussmittels vor dem Löten entfernt wird. Das Flussmittel verhindert weiterhin während des Lötens die Bildung einer neuen Oxidschicht und verringert die Oberflächenspannung.

Unabhängig vom Lötverfahren wird zum Löten folgendes benötigt:

- Lot
- Flussmittel
- Wärme
- metallische Verbindungspartner (lötbar!!)

5.2 Flussmittel

(siehe Abschnitt im Vorlesungsskript „Aufbau- und Verbindungstechnik I")

5.3 Lötverfahren und Wärmezufuhr beim Löten

(siehe Abschnitt im Vorlesungsskript „Aufbau- und Verbindungstechnik I“)

5.4 Lötfehler beim Reflowlöten

Als häufige Lötfehler treten auf:

- Dejustierung von zweipoligen SMD's, fehlerhaftes Layout verursacht unsymmetrische Oberflächenkräfte an den Lötstellen

- Grabsteineffekt als Folge von
  - ⇒ zu großen und zu weit auseinander liegenden Anschlussflächen
  - ⇒ unterschiedliche Wärmeableitung auf beiden Seiten (z.B. durch Masseflächen)
  - ⇒ ungleichem Lotpastenauftrag an den Anschlussflächen
  - ⇒ ungenügender Metallisierung auf der SMD-Unterseite
  - ⇒ unterschiedlichen Aufschmelzzeitpunkten auf beiden Anschlussflächen
  - ⇒ ungleicher Lötbarkeit der Lötanschlüsse oder der Anschlussflächen
  - ⇒ ungenügender Trocknung der Lotpaste
  - ⇒ zu hoher Aufheizgeschwindigkeit
- Lotkugelbildung durch
  - ⇒ ungeeignete Lotpaste
  - ⇒ zu hohe Aufheizgeschwindigkeit
  - ⇒ unzureichende oder übermäßige Trocknung der Lotpaste
  - ⇒ zu langer (zeitlich) Lötprozess
- Hohlraumbildung in der Lötstelle durch zu kurze Lötzeit
- partielle Auflösung der Metallisierung durch zu lange Lötzeit
- "magere" Lötstellen, verursacht durch
  - ⇒ zu geringen Lotpastenauftrag
  - ⇒ Ablaufen von Lot (Durchkontaktierungen, keine thermische Einschnürung der Anschlussflächen
- Kurzschlüsse bei vielpoligen BE mit engen Rasterabständen durch ungenaue Bestückung
- Kurzschlüsse durch zu viel Lot
- Nichtbenetzen oder Entnetzen durch schlechte Lötbarkeit

Die Qualität der Lötstellen soll optisch geprüft werden. An Hand von Prüfkriterien wird eine Zuordnung der Lötstellen in "gut" und "schlecht" vorgenommen, wobei eine Leiterplatte als schlecht gilt, wenn mindestens eine schlechte Lötstelle nachgewiesen werden kann. Es ist zu beachten, dass die optische Prüfung nur eine Form der Prüfung ist, die keineswegs vollständige Aussagen über die Funktionsfähigkeit des Erzeugnisses (besonders der Zuverlässigkeit) zulässt.

Prüfkriterien für gute Lötstellen:

- gute Lotbenetzung am SMD-Anschluss
- Lothohlkehle (konkave Lotböschung) zwischen SMD-Anschluss und Anschlussfläche; wenn eine Lotböschung nicht konkav ist, muss eine gute Benetzung an SMD und an der Anschlussfläche erkennbar sein

- SMD-Anschlüsse sind entlang der lötbaren über der Anschlussfläche positionierten Anschlussfläche >= 75 % von Lot umflossen
- Die Lotoberfläche ist frei von Ausbläsern, Lunkern, Fremdkörpereinflüssen und Rissen. Aufgeplatzte Blasen mit sichtbarem Grund sind bis zu drei Stück pro Lötstelle zulässig. Ihre Größe (bis max. 0,5 mm Durchmesser) muss in einem vernünftigen Verhältnis zur Lötstellengröße stehen
- feinkörnige Lotoberfläche

Prüfkriterien für schlechte Lötstellen

- SMD-Anschlüsse sind entlang der lötbaren über der Anschlussfläche positionierten Anschlussfläche positionierten Anschlusskanten <75 % von Lot umflossen
- Lotmenge zu groß
- Lotzapfen, Lotkugelbildung am SMD-Anschluss
- Blasen, Löcher, Fremdkörpereinschlüsse und Risse in der Lotoberfläche
- entnetzte oder schlecht benetzte SMD-Anschlüsse
- Lotperlen >= 0,2 mm Durchmesser
- Festhaftende Lotperlen < 0,2 mm Durchmesser, wenn sich mehr als fünf Stück auf einer Fläche von 25 x 25 mm befinden oder wenn Berührungsgefahr besteht; z.B. Abstände zwischen SMD-Anschlüssen <0,2 mm

Halogenfreie, festhaftende Flussmittelrückstände sind zulässig, sofern die Kontaktierfähigkeit bei der elektrischen Prüfung nicht beeinträchtigt wird. Auf flussmittelfreie Zonen (Steckerleiste und Kanten) muss geachtet werden.

5.5 Wellenlöten

(siehe auch Abschnitt 5.3.1.3.1 im Vorlesungsskript „Aufbau- und Verbindungstechnik I“)

Verunreinigungen

Neben der Krätze gibt es noch weitere Verunreinigungen.

Verunreinigungsgrenzen von Loten sind in der DIN EN 29453E festgelegt und sind besonders für das Wellenlöten von Bedeutung. Für die in Frage kommenden Elektronik-Lote gelten für folgende Verunreinigungen maximale Gehalte (in %):

Sb	0,12	As	0,01	Al+Zn+Cd	0,002
Bi	0,10	Sonstige	0,08	Fe	0,02

Aufgrund der Auswirkungen von Verunreinigungen auf die Lotschmelze werden sie in zwei Hauptklassen "Grießbildner" und "Hautbildner" unterschieden.

Grießbildner bilden in der Lotschmelze schwimmende Kristalle, die dem Lötbild ein raues und unsauberes Aussehen geben und zu Lotanhäufungen, Brücken und Eiszapfen führen können.

Hautbildner bilden auf der Lotoberfläche eine zähe Oxidhaut, die auch durch wiederholtes Abstreichen nicht entfernt werden kann. Häufige Lotbrücken, Eiszapfen, Lotschleier und Schneckenspuren sind die Folge. Das Lotbad muss in diesem Fall vollständig erneuert werden, während bei Grießbildnern durch einen teilweisen Wechsel des Lotbades die Grenzwerte gesenkt werden können. Als Hautbildner wirken Zink, Cadmium und Aluminium. Neben den Grieß- und Hautbildnern gibt es Verunreinigungen, die als unschädlich angesehen werden bzw. nicht als solche betrachtet werden. Dazu gehören Silber (Ag) und Gold (Au). Silber wird mitunter absichtlich dem Lot zugesetzt, um beim Verlöten von versilberten Oberflächen das Ablegieren von Silber zu verhindern.

Gold wirkt im Lotbad erst bei hohen, in der Praxis kaum vorkommenden Au-Gehalten schädlich. Kritisch wird es jedoch, wenn vergoldete Oberflächen verlötet werden, da der Au-Gehalt im

Lötspalt selbst gefährlich hoch ansteigen kann (=> Entfernen oder Abdecken der Vergoldung vor dem Löten).

5.6 Lötfehler beim Wellenlöten

Die meisten Lötfehler, die beim Wellenlöten auftreten, haben ihre Ursachen in vorgelagerten Prozessen bzw. im verwendeten Material (ca. 70% aller Fehler). Faktoren, wie ungünstiges Leiterplattenlayout, unsachgemäße Lagerung von Bauelementen und Leiterplatten, schlecht dosierter Kleberauftrag, ungenaue Bestückung und viele mehr spielen hier eine Rolle. Aus dieser Vielzahl von möglichen Fehlerursachen ist es daher nicht immer leicht, die richtige zu erkennen, da sich häufig auch mehrere Ursachen überlagern.

Als Hilfsmittel zur Fehlersuche beim SMD-Wellenlöten soll folgende Zusammenstellung dienen:

Erscheinungsbild	mögliche Ursache
Lotbrücken	BE-Abstände zu gering Anschlüsse zu lang keine Lotfänger vorhanden Nichtbeachtung der Vorzugsrichtung und -form der Pads beim Entwurf Transportgeschwindigkeit zu hoch Platzierung der BE mit zu hohem Druck
Lotzapfen/-spitzen	verschmutztes Lotbad ungleichmäßiger Flussmittelauftrag falscher Winkel zwischen Lotwelle und BE falsches Ölgemisch
Lötrückstände (Lotfäden, -häute, -spritzer, -kugeln) oft nur mit Mikroskop erkennbar	falsche Auswahl und Anwendung des Flussmittels durch Flussmittel beeinträchtigte Wirkung des Lötstopplackes falsche Vorwärmzeit oder –temperatur Lotverunreinigungen schlechte Lötbarkeit von LP und BE
Kleberverschmutzung	ungenaue Platzierung des Klebers zu hohe Kleberdosierung Horizontalbewegung des SMD im Kleber nach dem Bestücken
Gasblasen	Luft, Gas oder Flussmittel in Lot eingeschlossen
schlechte Benetzbarkeit	Schatteneffekt Verschmutzung der Metalloberfläche unzureichende Vorwärmung zu wenig Flussmittel zu hohe Packungsdichte falsch dimensionierte Lötflächen
Entnetzung	verschmutzte Lötstellen Ablegieren von SMD-Metallisierungen.

6 Montage-Kleben

(siehe auch Abschnitt 5.3.2.1 im Vorlesungsskript „Aufbau- und Verbindungstechnik I")

Die SMD's müssen auf der Leiterplatte mittels Klebstoff fixiert werden, wenn z.B. durch Mischbestückung bzw. bei einer beidseitigen Bestückung das Schwalllöten notwendig wird. Überwiegend werden thermisch härtende Einkomponenten-Epoxidharze und UV- oder thermisch härtende Acrylharze eingesetzt. Als Auftragsverfahren werden die Dispensertechnik, der Sieb- oder Maskendruck (teilweise auch mit Kunststoffmasken) und das Stempeln genutzt.

Das Druckverfahren ist eine schnelle und wirtschaftliche Methode, weil in einem Arbeitsgang eine Vielzahl von Klebstoffpunkten aufgebracht werden kann. Jedoch dürfen noch keine Bauelemente auf der Leiterplatte vorhanden sein und beim Druck mit Masken können in einem Arbeitsgang nicht unterschiedlich hohe Klebstoffpunkte aufgebracht werden.

An den Klebstoff werden viele Forderungen gestellt. Die sind im Wesentlichen:

- hohe Lagerstabilität
- optimale rheologische Eigenschaften (ausgeprägte Pseudoplastizität)
- Beständigkeit gegen Schwankungen der Verarbeitungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit (möglichst kleine Viskositätsänderung und geringe hygroskopische Eigenschaften)
- Homogenität und Blasenfreiheit
- ideale Tropfenform (relative Tropfenhöhe: d/h=1,4...1,0)
- hervorragende Benetzung und hohe Adhäsionskräfte (Nassklebkraft)
- schnelles, schrumpf- und rissfreies Härten
- gute Haftung zum Bauteil und zur Leiterplatte
- Beständigkeit gegen Fluss- und Reinigungsmittel
- gute Isolationseigenschaften und Korrosionsfreiheit

Nach dem der Kleber aufgebracht ist, erfolgt das Bestücken. Unmittelbar nach dem Bestücken wird der Kleber durch zielgerichtete Wärmezufuhr ausgehärtet. Dies geschieht in Klimaschränken oder das Aushärten erfolgt im Infrarotofen.

7 Messung und Auswertung von Temperaturprofilen

Für das Reflowlöten (unabhängig vom Verfahren; ausgenommen das Laserlöten und das Bügellöten) muss ein bestimmtes Temperatur-Zeit-Regime an jeder Lötstelle eingehalten werden. Abbildung 1 zeigt ein solches typisches Profil.

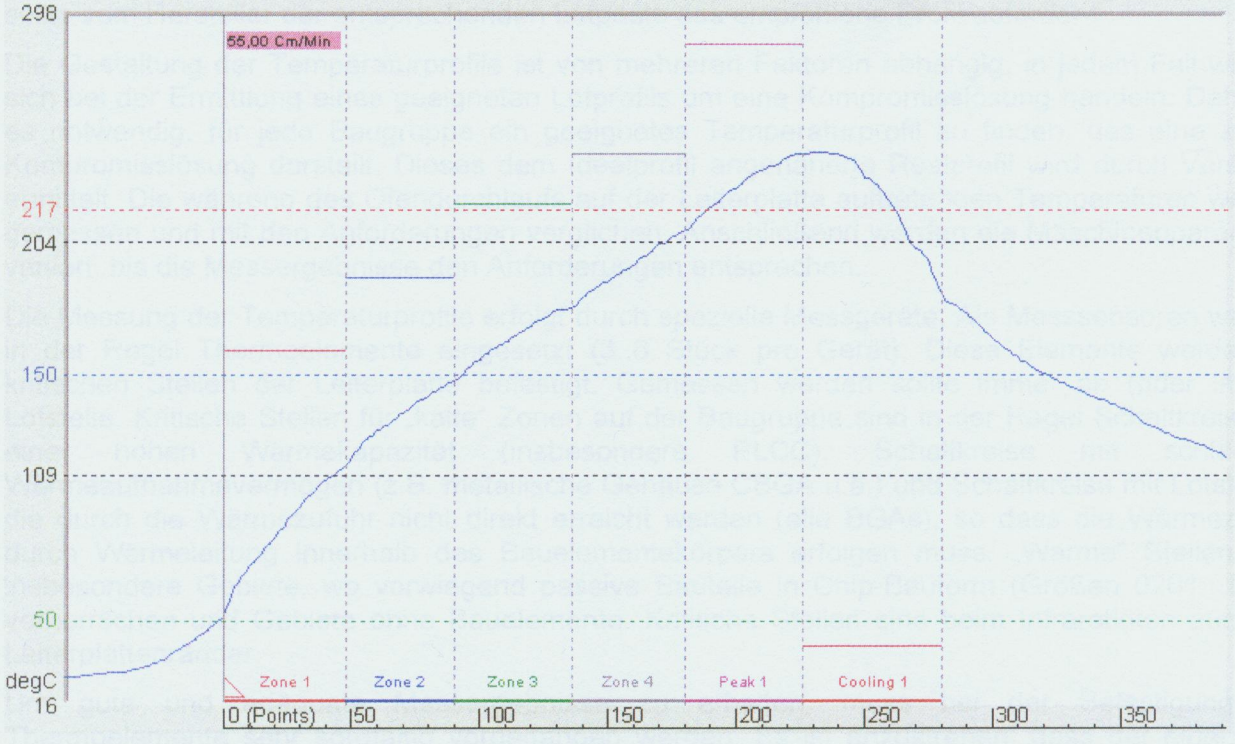


Abbildung 1: Typisches Temperaturprofil mit den zugehörigen Zonen des Reflowofens

Das Temperaturprofil soll an allen Stellen für das Lot SnAgCu folgenden Grenzanforderungen genügen:

- an der kältesten Stelle der LP soll mindestens 15-20 s die Schmelztemperatur des Lotes überschritten werden, maximal sollte die Liquidustemperatur für 90 s überschritten werden
- der maximal zulässige Temperaturgradient liegt bei 5 K/s,
- Die Peaktemperatur sollte 250°C nicht überschreiten; optimal ist eine Peaktemperatur von 235°C; minimal sollten 225 °C erreicht werden
- die Peakphase soll möglichst kurz sein,
- Temperaturunterschiede auf der Leiterplatte sollten minimiert werden,
- die Gesamtlänge des Durchlaufs sollte 5 min nicht überschreiten.

Einige Forderungen werden von den Eigenschaften der Lotpaste diktiert. Bevor es zum eigentlichen Löten kommt, müssen in der Lotpaste bestimmte Vorgänge ablaufen. So sind in der Lotpaste Bestandteile enthalten, die besonders für eine gute Druckbarkeit verantwortlich sind. Diese Bestandteile sind bei höheren Temperaturen flüchtig und müssen bis zum Aufschmelzen der Lotpaste ausgetrieben worden sein. Anderenfalls kann es zu einem Breitlaufen des geschmolzenen Lotes kommen. Weiterhin ist beim Aufschmelzen damit zu rechnen, dass diese Substanzen Lotpartikel aus dem Gesamtverband heraus stoßen können. Damit können Lotperlen entstehen. Der Prozess des Austreibens benötigt eine bestimmte Zeit, so dass ein zu schnelles Aufheizen (auch wenn der zulässige Gradient nicht überschritten wird) zu vermeiden ist. Weiterhin ist für das Aktivieren des in der Lotpaste enthaltenen Flussmittels eine gewisse Zeit notwendig.

Ein zu langes Verharren der Lotpaste unterhalb der Schmelztemperatur ist aber ebenfalls zu vermeiden, da dann die Gefahr besteht, dass die Lotpartikel zu stark oxidiert werden. Diese Gefahr besteht insbesondere bei feinkörnigen Lotpasten (auf Grund der großen Metalloberfläche). Da für Lotpasten im Allgemeinen niedrigaktivierte Flussmittel verwendet werden, kann es dann passieren, dass die neu gebildeten Oxidschichten nicht vollständig reduziert werden und das Lot innerhalb der Lotpartikel nach Erreichen der Schmelztemperatur aufschmilzt. Auf Grund der nicht reduzierten Oxidhaut kann das Lot Partikel aus dem aufgeschmolzenen Gesamtverband ausstoßen. Somit entstehen Lotperlen. Ein solches Verhalten ist bei Löten unter Stickstoff jedoch nicht anzutreffen.

Weiterhin ist es wichtig, dass der genannte Verlauf des Profils nur eine Orientierung darstellt. Man sollte vom Hersteller der entsprechenden Lotpaste das empfohlene Profil abfordern.

Die Gestaltung der Temperaturprofile ist von mehreren Faktoren abhängig, in jedem Fall wird es sich bei der Ermittlung eines geeigneten Lötprofils um eine Kompromisslösung handeln. Daher ist es notwendig, für jede Baugruppe ein geeignetes Temperaturprofil zu finden, das eine solche Kompromisslösung darstellt. Dieses dem Idealprofil angenäherte Realprofil wird durch Versuche ermittelt. Die während des Ofendurchlaufs auf der Leiterplatte auftretenden Temperaturen werden gemessen und mit den Anforderungen verglichen. Anschließend werden die Maschinenparameter variiert, bis die Messergebnisse den Anforderungen entsprechen.

Die Messung der Temperaturprofile erfolgt durch spezielle Messgeräte. Als Messsensoren werden in der Regel Thermoelemente eingesetzt (3..6 Stück pro Gerät). Diese Elemente werden an kritischen Stellen der Leiterplatte befestigt. Gemessen werden sollte immer an (oder in) der Lötstelle. Kritische Stellen für „kalte" Zonen auf der Baugruppe sind in der Regel Schaltkreise mit einer hohen Wärmekapazität (insbesondere PLCC), Schaltkreise mit schlechten Wärmeaufnahmevermögen (z.B. metallische Gehäuse CBGA u.ä.) und Schaltkreise mit Lötstellen, die durch die Wärmezufuhr nicht direkt erreicht werden (alle BGAs), so dass die Wärmezufuhr durch Wärmeleitung innerhalb des Bauelementekörpers erfolgen muss. „Warme" Stellen sind insbesondere Gebiete, wo vorwiegend passive Bauteile in Chip-Bauform (Größen 0201...0603) vorherrschen und Gebiete ohne Bauelemente. Kritische Stellen sind beim Infrarotlöten auch die Leiterplattenränder.

Um gute und adäquate Messergebnisse zu erhalten, muss bei der Befestigung der Thermoelemente sehr sorgfältig vorgegangen werden. Es ist anzustreben, dass der eigentliche Messfühler (Spitze des Thermoelements) einen möglichst engen thermischen Kontakt mit der Messstelle hat. Um dies zu erreichen, können die Messfühler mit hochschmelzenden Lot befestigt

werden. Diese Methode bringt die genauesten Ergebnisse. Kritisch ist hier die Wiederverwendbarkeit der Sensoren und die Tatsache, dass Thermoelemente nicht benetzbar sind, so dass die angestrebte Festigkeit der Verbindungsstelle nicht immer gegeben ist. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von speziellen Klebern, die temperaturbeständig sind. Beim Befestigen muss jedoch einen Kompromiss zwischen Klebervolumen (ergibt immer eine Verfälschung der Messergebnisse durch eine zusätzliche thermische Masse) und der Haltbarkeit der Klebung gefunden werden. Die Verbindung der Sensoren zu dem Messgerät sollten deshalb zusätzlich mechanisch fixiert werden. Damit wird verhindert, dass die befestigten Thermoelemente mechanisch belastet werden. Eine solche mechanische Belastung kann grundsätzlich beim Durchlauf des Messaufbaus durch den Ofen auftreten und muss mit berücksichtigt werden. Im Allgemeinen lassen sich die Sensoren ohne Beschädigung wieder entfernen. Der Kleber gewährleistet eine gewisse thermische Kopplung zum eigentlichen Messobjekt (Lötstelle). Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Fühlerspitze sich möglichst nahe am Messobjekt befindet.

Die einfachste und schnellste Möglichkeit der Befestigung ist die Benutzung von temperaturbeständigen Klebestreifen. Hier kann jedoch kaum garantiert werden, dass der notwendige thermische Kontakt zum Messobjekt vorhanden ist. Selbst wenn dies erreicht wurde, kann durch einwirkende Kräfte während der Messung (insbesondere beim Einbringen der Leiterplatte mit dem zugehörigen Messgerät) dieser Kontakt zerstört werden. Dann entstehen „Luft"messungen, deren Messwerte nicht auswertbar sind.

Sind die Messsensoren angebracht, so wird das Messgerät zusammen mit der zu analysierenden Leiterplatte durch den Reflowofen geschickt, wobei die Messwerte aufgenommen und gespeichert werden. Nach erfolgtem Durchlauf werden die Messwerte an einem Rechner ausgelesen und ausgewertet. Gegebenenfalls sind aus den Messergebnissen Schlussfolgerungen zu ziehen, die entsprechenden Parameter am Ofen sind zu ändern und die Messung ist zu wiederholen. Dabei ist darauf zu achten, dass eine Wiederholungsmessung erst erfolgen kann, wenn das Temperaturregime im Ofen nach Änderungen wieder stabil ist (wird in der Regel von der Ofensteuerung angezeigt!). Auch die Leiterplatte selbst muss wieder vollständig auf Raumtemperatur abgekühlt sein. Weiterhin braucht das Messgerät trotz entsprechender Schutzvorrichtungen eine Abkühlung. Die meisten Messgeräte zeigen eine zu hohe Innentemperatur an, so dass eine Zerstörung des Messgerätes durch zu starkes Aufheizen fast ausgeschlossen ist. Manche Messgeräte „verweigern" jedoch bei Überschreitung der maximalen Innentemperatur eine weitere Aufzeichnung der Messdaten, so dass der laufende Messvorgang keine Ergebnisse bringt.

Aufgabenbeschreibung für die Temperaturprofilmessung

An der Praktikumsbaugruppe sind für das Konvektionslöten (zwei Messungen) die Temperaturprofile zu bestimmen. Die Profile sollen folgenden Anforderungen genügen:

- Durchlaufzeit durch den Ofen < 5.min (aktive Zonen)
- max. Temperaturgradient < 3 K/s
- Vorheizzeit (Zeit zwischen 50°C und 217 °C: 95..120 s)
- Zeit über Solidus 30..45 s
- T_{max}<240°C
- T_{max}>230°C

Der Ofen hat eine vorgegebene Einstellung.

Die ermittelten Profile sind auszuwerten. Entspricht das ermittelte Profil beim Konvektionslöten nicht den Anforderungen, so sind Änderungen der Ofeneinstellungen vorzunehmen. Die notwendigen Änderungen sind zunächst manuell zu ermitteln. Die vorgeschlagenen Änderungen sind damit zu überprüfen. Nach Änderung der Ofenparameter ist die Messung zu wiederholen.

Bei der Auswertung sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Vergleich der einzelnen Messstellen
- Bewertung der Wirksamkeit der vorgenommenen Änderungen

IAVT	**Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik** Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik Technische Universität Dresden
Praktikum	Feinwerktechnik
Versuch	**C2 Prüfung elektronischer Baugruppen mittels Ultraschallmikroskopie**

1. Versuchsziel

An eine einführende Diskussion physikalischer Grundlagen schließen sich Erläuterungen zu Aufbau und Funktionsweise des am IAVT verfügbaren Ultraschallmikroskops C-SAM® GEN5™ (Sonoscan Inc., 5.Gerätegeneration), zum Messprinzip, zu den unterschiedlichen Untersuchungsverfahren und zu Zusammenhängen zwischen Messgrößen und Informationen an. Erläutert werden die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens in der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik und der Feinwerktechnik. An typischen Proben wird der Zusammenhang zwischen der Wahl des Transducers, den Parametereinstellungen am Gerät und dem Untersuchungsmodus einerseits sowie der Materialbeschaffenheit und dem geometrischen Aufbau des Prüflings andererseits erläutert. Ausgewählte Aufbauten werden auf charakteristische Defekte untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf der Interpretation der Echobild-Aufnahmen.

Abb.1 zeigt die Ultraschallaufnahme eines elektronischen Bauelements (IC im QFP-Gehäuse).

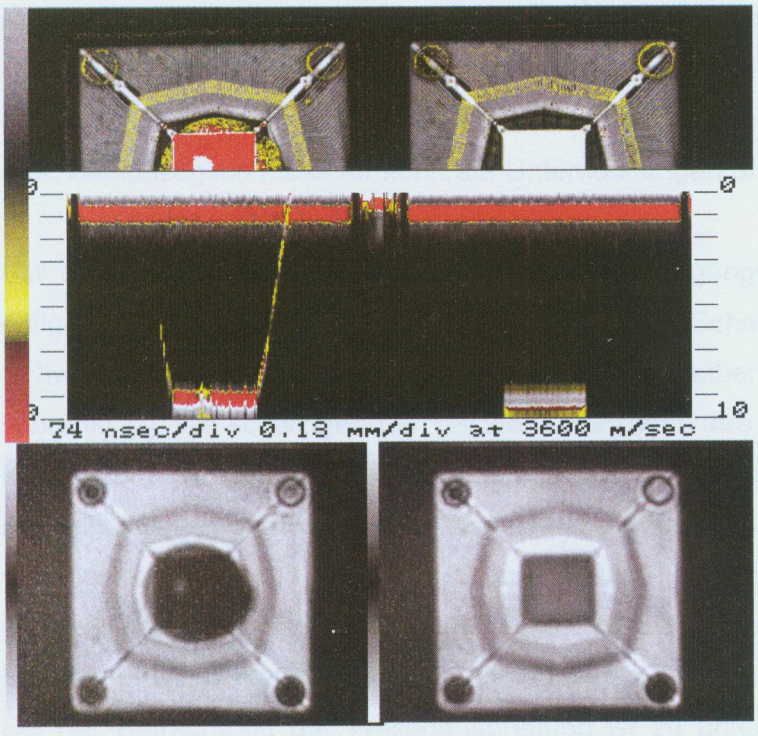


Abb. 1:

Ultraschallbild eines elektronischen Bauelements (QFP) mit Delamination zwischen Chipträger und Moldmasse (Unterseite des IC) sowie Rißbildungen in der Gehäusemasse (verursacht durch den Popcorn-Effekt beim Reflowlöten)

(von oben nach unten:
C-Scan, Q-BAM, THRU-Scan

links defekter IC,
rechts ungeschädigter IC)

2. Grundlagen der Ultraschallmikroskopie

Die Ultraschallmikroskopie ist ein akustisches Prüfverfahren, das neben anderen Verfahren (z.B. radiologischen und röntgenografischen) eine der wichtigsten Möglichkeiten für die zerstörungsfreien Prüfung von elektronischen Bauelementen und Baugruppen auf Defekte unterschiedlichster Art darstellt.

Schall im Frequenzbereich von 20 Hz bis ca. 16 000 Hz ist für das menschliche Ohr wahrnehmbar. Niedrigere Frequenzen werden als Infraschall, höhere (> 20 kHz bis ca. 2 GHz) als Ultraschall bezeichnet. Der angrenzende Bereich umfasst den Hyperschall (10^9 bis $5x10^{12}$) Hz und die sog. Phononen (Gitterschwingungen). Frequenzen um 10 THz bilden die Schallwellen-Obergrenze.

In der Tierwelt (Fledermäuse) dient Ultraschall z.B. zur Orientierung. Die Schallfrequenzen liegen zwischen 40 kHz und ca. 90 kHz. Bestimmte Insekten erzeugen Ultraschall bis zu 250 kHz sowohl zur Orientierung als auch zur Betäubung von Beutetieren oder Gegnern.

Ultraschall wird technisch mittels piezoelektrischer Kristalle oder Keramiken (Bariumtitanat) erzeugt, die beim Anlegen einer elektrischen Wechselspannung mit der Resonanzfrequenz des Piezoelements (oder einem Vielfachen) schwingen. In der medizinischen Diagnostik sind Frequenzen von 0,5 MHz bis 10 MHz üblich. Für die Inspektion elektronischer Aufbauten liegt die Frequenz je nach Objekt und erwartetem Fehlerbild zwischen 5 MHz und 300 MHz, für Oberflächenuntersuchungen bei bis zu 2 GHz.

Relevante physikalische Größen für die Ausbreitung des Ultraschalls sind die Dichte und die elastischen Eigenschaften der Materialien der Proben. Absorption und Streuung bedingen, dass Ultraschallwellen höherer Frequenzen weniger tief als niederfrequente Wellen in das Material eindringen. Mit abnehmender Frequenz sinken aber das laterale und axiale Auflösungsvermögen. Diesbezüglich muss für konkrete Untersuchungen oft ein Kompromiss gefunden werden.

Für das Verständnis der wellenphysikalischen Vorgänge bei der Ultraschallmikroskopie sind einige Grundbegriffe der Schwingungslehre und der Schalleigenschaften nützlich.

Schwingungen in einem deformierbaren Medium bleiben nicht auf das Erregungszentrum beschränkt [2]. Die schwingenden Teilchen übertragen ihre Energie auf benachbarte Teilchen. Es kommt zur Fortpflanzung einer Druckstörung im Medium als Welle.

Als Schallwellen oder elastische Wellen bezeichnet man die zeitlich veränderliche Auslenkung von Masseelementen um ihre Gleichgewichtslage im Inneren kondensierter Materie [1]. Sie sind also im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen an ein Ausbreitungsmedium gebunden und treten in Flüssigkeiten, Festkörpern und Gasen auf.

Bei der Betrachtung der Wellenausbreitung ist zu unterscheiden zwischen Stoffen mit Volumenelastizität (Flüssigkeiten und Gase) und Stoffen mit Formelastizität (Festkörper). Longitudi-

nalwellen (auch Druck- oder Kompressionswellen), die das Medium auf Zug und Druck beanspruchen, treten in allen Stoffen auf. Transversalwellen entstehen in reiner Form nur in Festkörpern, die auch Scherkräfte übertragen können. Abhängig von der Art der Anregung, von der Körperform und von den Abmessungen im Verhältnis zur Wellenlänge treten weitere Wellenarten auf, von denen für Untersuchungen besonders die Oberflächenwellen (Rayleighwellen) bedeutsam sind. Sie können als Überlagerungen von transversalen und longitudinalen Komponenten verstanden werden, beschränken sich auf den unmittelbaren Oberflächenbereich und folgen auch Oberflächenunebenheiten.

Der Abstand zwischen zwei benachbarten Masseelementen, die sich im gleichen Bewegungszustand (Phase) befinden ist die Wellenlänge λ (Abb.2).

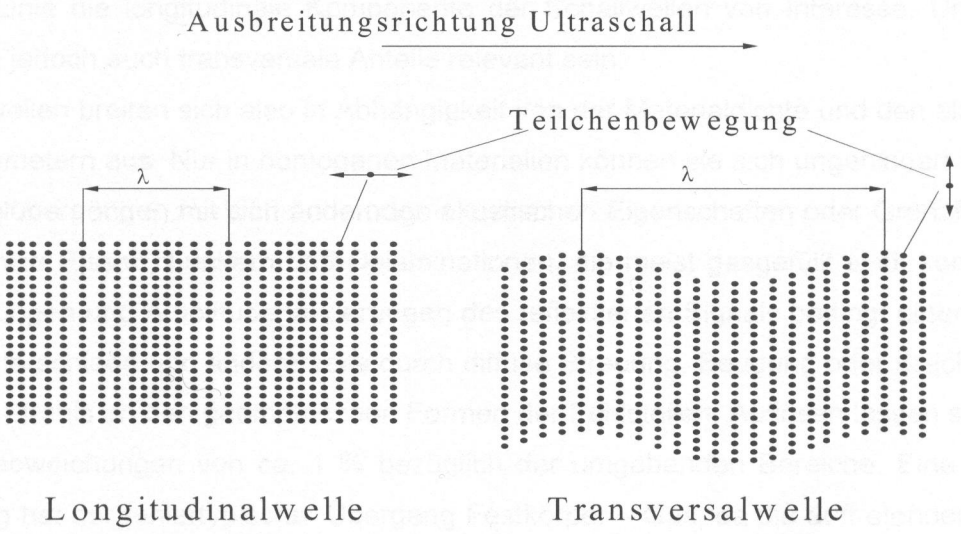


Abb. 2: Longitudinal- und Transversalwellen

Schallwellen pflanzen sich mit einer *materialspezifischen Phasengeschwindigkeit*, der Schallgeschwindigkeit, fort.

Stoffabhängig gelten für Longitudinalwellen in isotropen Medien folgende Zusammenhänge.
Schallgeschwindigkeit in Gasen:

$$c_L^2 = pk/\rho = \text{konst. x } T \qquad (1)$$

c_L – Schallgeschwindigkeit (Longitudinalwellen)

k – Adiabatenexponent ($k = c_p/c_v$ spezifische Wärmen)
p – Druck

ρ - Dichte

Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten:

$$c_L^2 = K/\rho \qquad (2)$$

K – Kompressionsmodul

Schallgeschwindigkeit in Festkörpern:

$$c_L^2 = E/\rho \qquad (3)$$

E – Elastizitäts-Modul

$$c_L \approx 2\, c_T \qquad (4)$$

c_T – Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen

Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten und Gasen ändert sich mit der Temperatur (Druck- und Dichteabhängigkeit). Die Werte für diese Medien sind wesentlich geringer als die Schallgeschwindigkeiten in Festkörpern. Die Geschwindigkeiten in Flüssigkeiten wiederum liegen durchweg über denen in Gasen.

Für Untersuchungen nach den mit dem C-SAM-Ultraschallmikroskop möglichen Verfahren ist in erster Linie die longitudinale Komponente der Schallwellen von Interesse. Unter Umständen können jedoch auch transversale Anteile relevant sein.

Schallwellen breiten sich also in Abhängigkeit von der Materialdichte und den elastischen Materialparametern aus. Nur in homogenen Materialien können sie sich ungehindert fortpflanzen. An Materialübergängen mit sich ändernden akustischen Eigenschaften oder Grenzflächen an Fehlstellen wie Rissen, Lunkern und Delaminationen, die meist gasgefüllt sind, kommt es zu Phasensprüngen und Amplitudenänderungen des reflektierten Signals bedingt einerseits durch Materialunterschiede und andererseits durch diffuse Streuung, Beugung oder Brechung des einfallenden Strahls an den geometrischen Formen der Fehlstellen. Auflösen lassen sich schon Amplitudenabweichungen von ca. 1 % bezüglich der umgebenden Bereiche. Eine besondere Bedeutung hat der fehlertypische Übergang Festkörper – Gas, da die auftretenden Phasensprünge durch Abbildung auf asymmetrische Falschfarbenscalen immer eindeutig detektierbar sind.

Treffen Schallwellen auf Hindernisse, sind in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Wellenlänge und Abmessungen des Hindernisses folgende Fälle zu unterscheiden:

$d >> \lambda$ => geometrische Wellenausbreitung („strahlenförmig“, Schatten)

$d > \lambda$ => Beugung (Wellenbewegung im Schattengebiet)

$d << \lambda$ => Streuung (Hindernis als Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle)

Die Streuung stellt für viele Aufgaben der Ultraschallmikroskopie ein großes Hindernis dar.

Eine wichtige Größe für die Beschreibung der Vorgänge im Schallfeld ist der **Schallwellenwiderstand (auch Schallimpedanz).** Er charakterisiert einerseits die Beziehung zwischen Schallwechseldruck und Schallschnelle und andererseits das Verhalten der Schallwellen an Grenzflächen (Reflexion, Transmission).

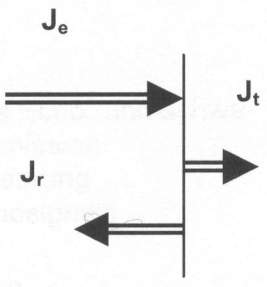
Für das Verhältnis Schallwechseldruck – Schallschnelle gilt (Analogie: u = R i):

$p_o = \rho c v_o$ (5) v_o - Schallschnelle
p_o - Schallwechseldruck

$\rho c = Z$ (6) Schallwellenwiderstand (Schallimpedanz, akustische Impedanz) eines Materials

Schallwechseldruck und Schallschnelle sind die vom Ultraschallmikroskop direkt ausgewerteten physikalischen Größen.

Reflexion und Transmission lassen sich für den vereinfachten Fall des senkrechten Einfalls von Schallwellen auf ebene Hindernisse (keine Richtungsänderung bei reflektiertem und transmittiertem Anteil) vereinfacht derart beschreiben, daß sich zwischen den am Gerät sichtbaren Signalen, den Eigenschaften der jeweiligen Probe und der Theorie eine Einheit ergibt.



Die Summe der Schallintensitäten der reflektierten und transmittierten Wellen ist gleich der Intensität der einfallenden Welle (Energieerhaltung):

$$J_e = J_t + J_r \qquad (7)$$

Der Reflexionsfaktor ist definiert als

$$R = J_r / J_e \quad \text{oder} \quad R = p_r / p_e, \qquad (8)$$

der Transmissionsfaktor als

$$T = J_t / J_e \quad \text{oder} \quad T = p_t / p_e, \qquad (9)$$

An der Grenzfläche zweier Medien gilt weiterhin für die resultierenden Schallwechseldrücke zu beiden Seiten der Grenzfläche:

$$p_e + p_r = p_t \qquad (10)$$

Aus diesen Abhängigkeiten lassen sich folgende für die Interpretation der Echosignale wichtigen Zusammenhänge zwischen den Schallimpedanzen der angrenzenden Materialien und dem Reflexions- bzw. Transmissionsfaktor ableiten:

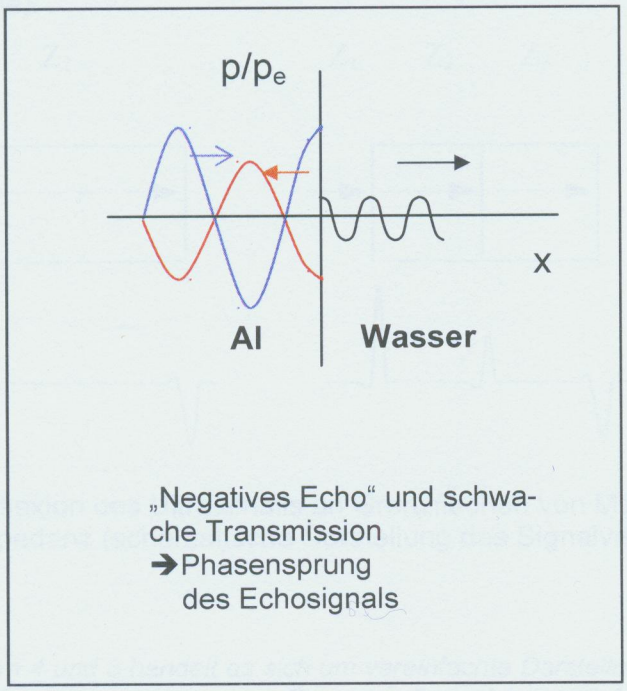
$$R = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \qquad (11)$$

$$T = 2Z_2/(Z_2 + Z_1) \qquad (12)$$

$$R = T - 1 \qquad (13)$$

Abb. 3 und 4 zeigen den Verlauf des Schallwechseldrucks der reflektierten Welle an unterschiedlichen Materialgrenzen, dem das Spannungssignal am Ausgang des Transducers bezüglich Vorzeichen und Amplitudenverhältnissen entspricht.

$Z_1 >> Z_2 \Rightarrow R \rightarrow (-1)$ **„schallweiche" Grenzfläche**



$Z_1 << Z_2 \Rightarrow R \rightarrow (+1)$ **„schallharte" Grenzfläche**

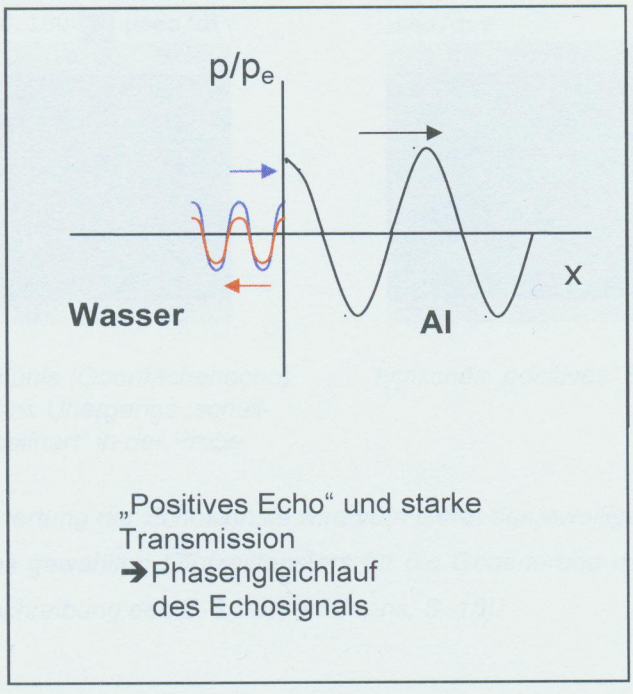


Abb. 3: Schallwechseldruck an „schallharten" und „schallweichen" Grenzflächen

Der Reflexionsfaktor R ist eine dimensionslose, vorzeichenbehaftete Größe zur Charakterisierung von Wert und Verlauf des Reflexionssignals. Positive Werte für Z1 < Z2 und negative Werte für Z1 > Z2 widerspiegeln in sinnvoller Weise den Verlauf (Phasensprung oder Phasengleichlauf) des reflektierten Echosignals an schallharten bzw. schallweichen Übergängen.
Aus (12) folgt, dass der Transmissionsfaktor immer positiv ist (Phasengleichlauf mit der einfallenden Welle).

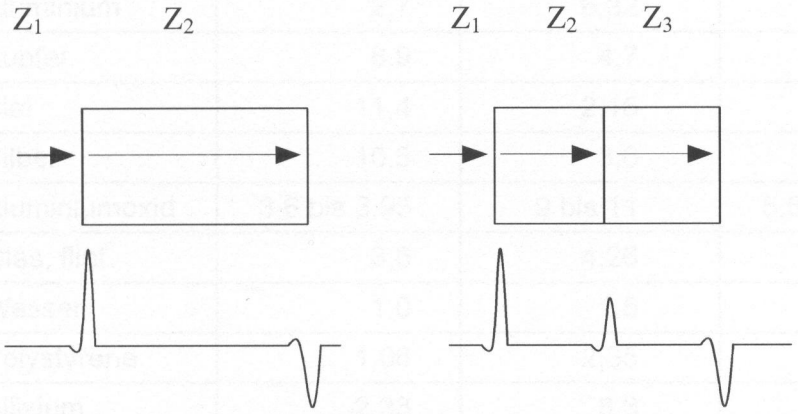
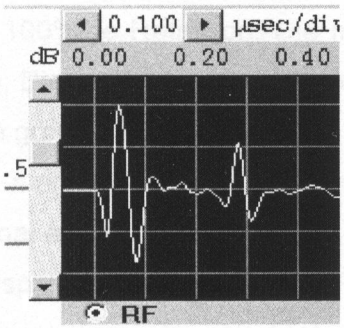
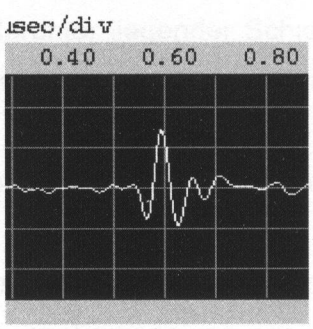


Abb. 4: Reflexion des Ultraschalls an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlicher Schallimpedanz (schematische Darstellung des Signalverlaufs im A-Scan): Z1 < Z2 < Z3

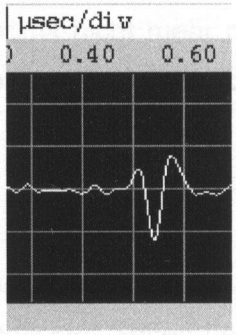
Anmerkung:
In den Bildern 4 und 5 handelt es sich um vereinfachte Darstellungen der positiven bzw. negativen Echosignalverläufe an Materialgrenzen. Das vom Transducer gelieferte Anregungssignal ist ein Burstimpuls mit einer Länge von 1,5 bis 3 Perioden (abhängig von der Ausführung der Transducer). Die Echosignale zeigen abhängig von der Probentiefe einen ähnlichen Verlauf. Nachstehende Bilder zeigen den Signalverlauf am Monitor für einen 30-MHz-Transducer.



Anregungsimpuls (Oberflächenecho) und Echo eines Übergangs „schallweich zu schallhart" in der Probe



typisches „positives" Echo



typisches„negatives" Echo

Bei der Auswertung der Echosignale wird vom Gerät der jeweilige absolute Maximalwert des Echosignals innerhalb des gewählten Laufzeitfensters für die Generierung des Bildpunktes in der Position (x, y) genutzt (s. Beschreibung des C-SAM-Verfahrens, S. 13).

Tabelle 1: Akustische Eigenschaften einiger Materialien

Material	Dichte	Schallgeschwindigkeit (Longitudinalwellen) c_L	Schallgeschwindigkeit (Transversalwellen) c_T	Akustische Impedanz Z
	10^3 kg/m³	10^3 m/s	10^3 m/s	10^6 kg/m²s
Aluminium	2,7	6,32	3,13	17
Kupfer	8,9	4,7	2,26	42
Blei	11,4	2,16	0,7	25
Silber	10,5	3,6	1,59	38
Aluminiumoxid	3,6 bis 3,95	9 bis 11	5,5 bis 6,5	32 bis 43 (Ø 37)
Glas, flint	3,6	4,26	2,56	15
Wasser	1,0	1,5	-	1,5
Polystyrene	1,06	2,35	1,15	2,5
Silizium	2,33	8,6		
Mold Compound (Globtop und IC-Gehäuse)	1,72	3,93		(bitte Berechnen)
Epoxidharz (die attach)	1,2	2,6		
Fe-Ni-Legierung Alloy (Leadframe)	8,1	ca. 5,0		

Der Übergang von einem festen Medium in Luft (oder ein anderes gasförmiges Medium) bedeutet 100%ige Reflexion. Die Inspektion darunter liegender Schichten ist somit nicht mehr möglich. Dieser Effekt ist insbesondere bei der Untersuchung von Einschlüssen und Delaminationen von großem Interesse.

Bei mehrschichtigen Untersuchungsobjekten ist bedeutsam, von welcher Seite das Ultraschallsignal eingekoppelt wird.

Beispielhaft soll dazu ein Probekörper mit der Materialfolge Aluminium-Kupfer-Polystyren-Wasser-Keramik betrachtet werden. Für die Einkopplung von unterschiedlichen Seiten her ergeben sich die Werte nach Tabelle 2.

Abb.5 zeigt qualitativ den resultierenden Signalverlauf (ohne Berücksichtigung der Signalveränderung mit wachsender Eindringtiefe des Ultraschallsignals).

Tabelle 2: Reflexionsfaktor bei unterschiedlichen Einschallrichtungen

Einkopplung in	Material 1	Material 2	Reflexionsfaktor R
Aluminium	Aluminium	Kupfer	42
	Kupfer	Polystyren	-89
	Polystyren	Wasser	-25
	Wasser	Keramik	92
Keramik	Keramik	Wasser	-92
	Wasser	Polystyren	25
	Polystyren	Kupfer	89
	Kupfer	Aluminium	-42

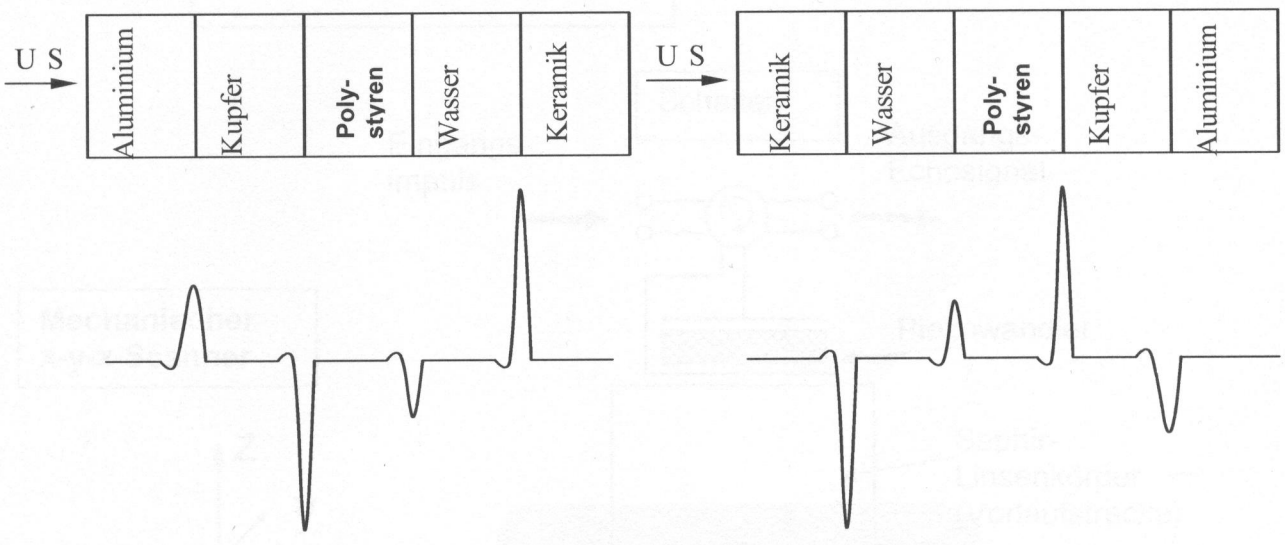


Abb. 5: Echosignalverlauf (schematisch) an Grenzflächen von Materialien bei Einschallung aus unterschiedlichen Richtungen.

3. Verfahren und Gerätetechnik

3.1. Verfahren der Ultraschallmikroskopie

Für unterschiedliche Einsatzgebiete und Inspektionsziele existieren unterschiedliche Untersuchungsverfahren mit jeweils spezifischer Gerätetechnik.

Die verfügbare Anlage ist ein für zerstörungsfreie Prüfungen (insbesondere Fehleranalyse) in den Bereichen Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik, Feinwerktechnik, Mechatronik u. a. geeignetes industrielles C-SAM-Ultraschallmikroskop (Sonoscan Inc., 5.Gerätegeneration).

Abbildung 6 zeigt die grundlegenden Funktionseinheiten:

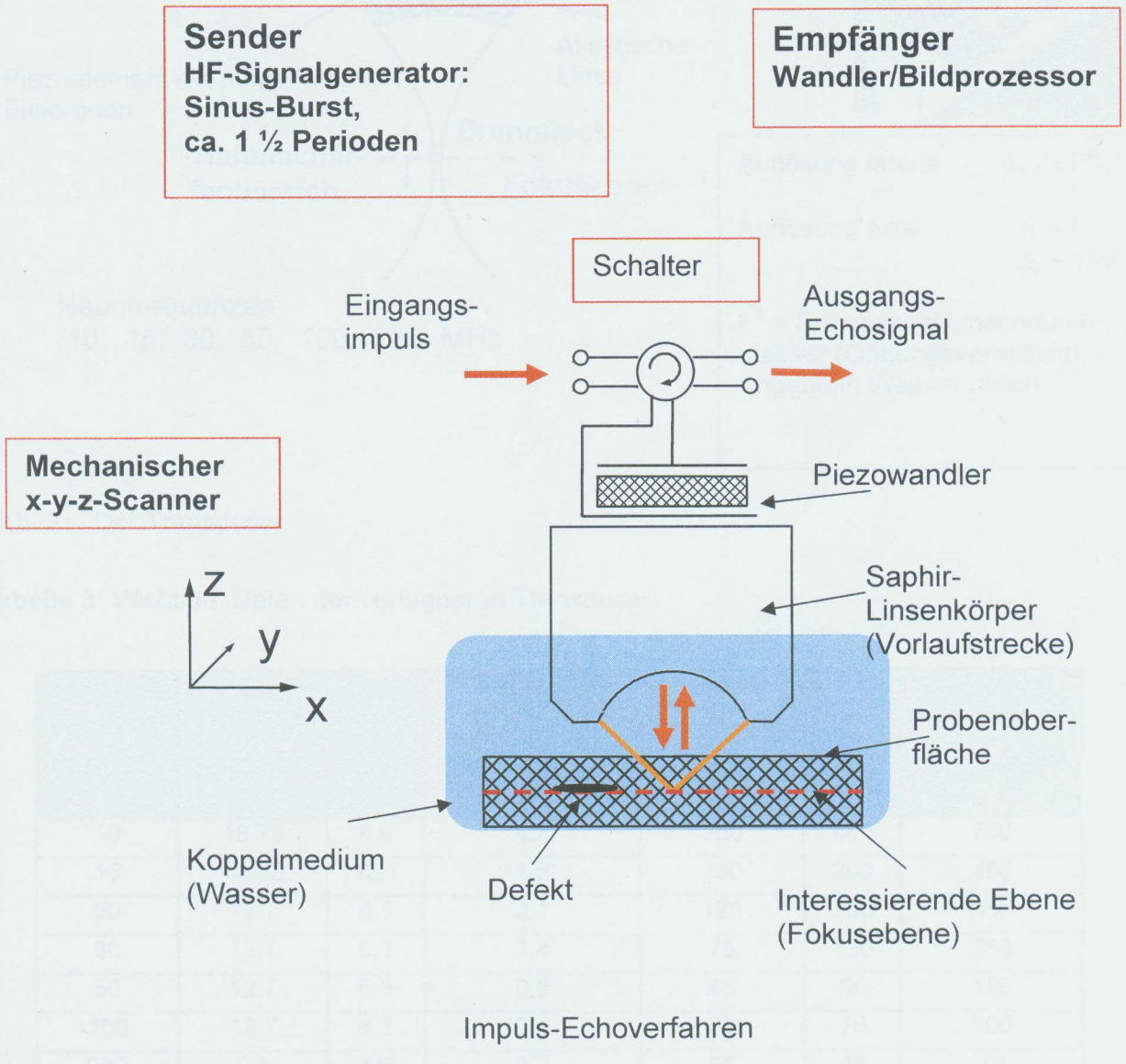
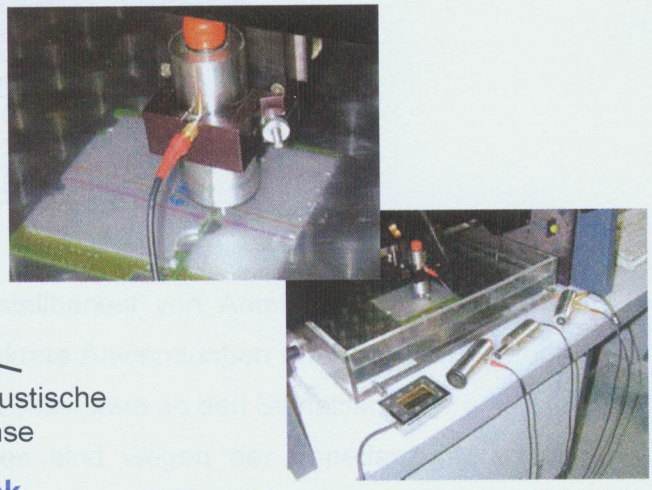
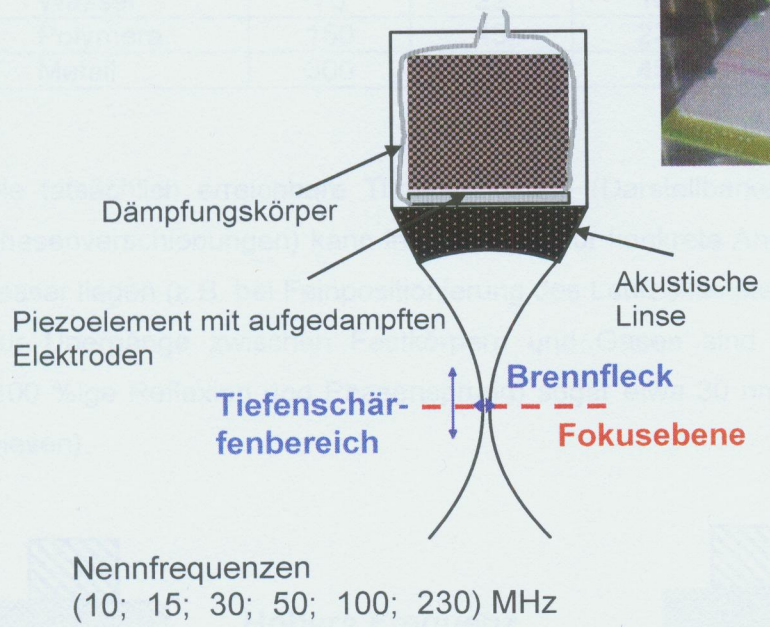


Abb. 6: C-SAM-Ultraschallmikroskop

Als Koppelmedium zwischen Prüfkopf und Probe dient deionisiertes Wasser (Tauchverfahren).

Das physikalische „Herzstück" des Ultraschallmikroskops ist der Prüfkopf (Transducer). Er bestimmt wichtige Größen wie axiale und laterale Auflösung, Tiefenschärfenbereich, Frequenzeigenschaften.





Auflösung lateral $\Delta_{x,y} \sim F^{\#}\lambda$

Auflösung axial $\Delta_z \sim \lambda$
$\Delta_z \sim 1/\Delta f$

$F^{\#}$ = Brennweite/ Linsendurchmesser (Öffnungsverhältnis), Angabe in Wasser üblich

Abb. 7: Der Transducer

Tabelle 3: Wichtige Daten der verfügbaren Transducer

Frequenz	Brennweite in Wasser	Dmr. Linse	Tiefenschär-fenbereich	Typische laterale Auflösung in µm		
MHz	mm	mm	mm	Polymere	Metall	Keramik
10	18,75	9,6	4,2	250	450	700
15	18,75	12,7	1,6	150	300	450
20	12,7	6,3	2,1	125	200	350
30	12,7	6,3	1,4	75	150	250
50	12,7	6,3	0,8	45	90	150
100	12,7	6,3	0,4	35	70	100
230	9,5	4,8	0,2	25	45	70

Die Werte der lateralen Auflösung wurden an speziellen Testwafern mit realitätsnahem Aufbau nachgewiesen.

Tabelle 4: Axiale Auflösung (Tiefenauflösung) [1]:

Material	Signalfrequenz, MHz			
	15	50	100	230
	Minimale Tiefenauflösung, µm			
Wasser	75	22	10	<5
Polymere	150	45	22	<10
Metall	300	90	45	<20

Die tatsächlich erreichbare Tiefenauflösung (Darstellbarkeit von Amplitudenänderungen und Phasenverschiebungen) kann in der Praxis für konkrete Anwendungen etwa um den Faktor 10 besser liegen (z.B. bei Feinpositionierung des Laufzeitfensters an den Signalflanken).
Für Übergänge zwischen Festkörpern und Gasen sind wegen der Impedanzunterschiede (100 %ige Reflexion und Phasensprung) sogar etwa 30 nm erreichbar (experimentell nachgewiesen).

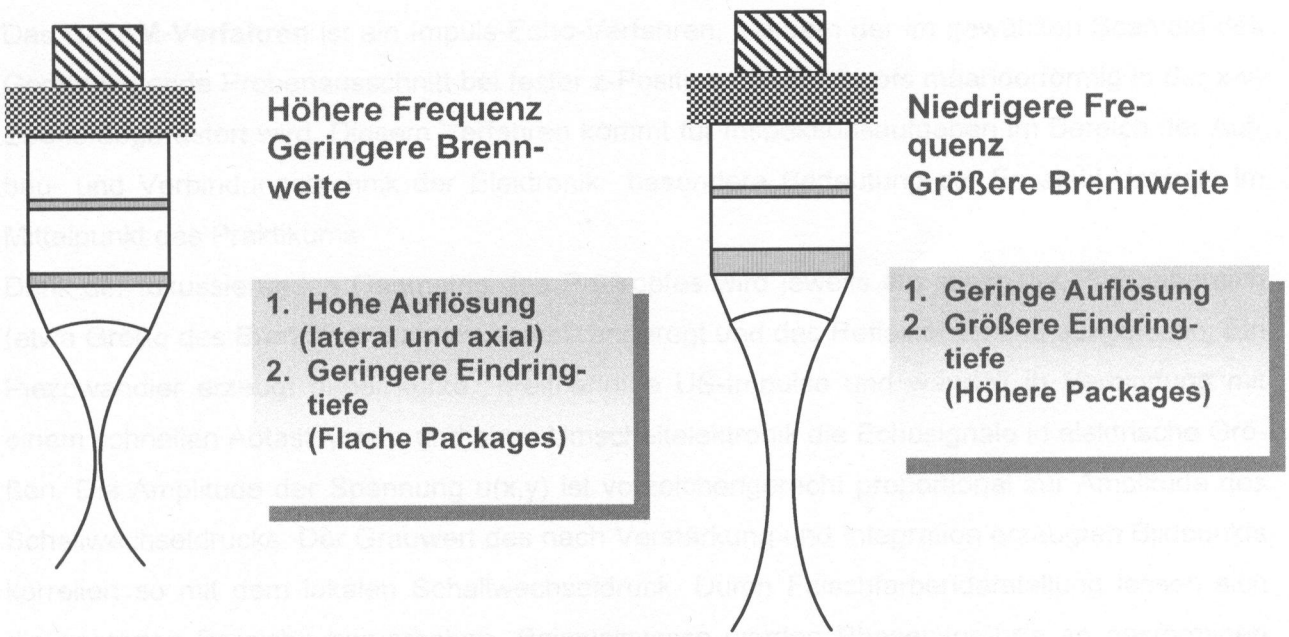


Abb. 8: Prinzip der Transducer-Wahl

Tabelle 5: Wichtigste Untersuchungsverfahren für Inspektionsaufgaben der AVT

Verfahren	C-SAM (Impuls-Echo-Verfahren)	THRU-Scan (Transmissions-verfahren)	Oberflächen-SAM (Impuls-Echo-Verfahren)	SLAM (Transmissions-verfahren)
Prinzip	Reflexion Longitudinalwellen	Transmission Longitudinalwel-len	Reflexion Oberflächenwellen	Transmission Longitudinalwel-len
Frequenz-bereich	(10 – 300) MHz	(10 – 100) MHz	100 MHz – 2 GHz	(10 – 100) MHz
Anregungs-signal	kurze Impulse breitbandig	kurze Impulse breitbandig	kurze Impulse breitbandig	kontinuierlich

- SLAM - Scanning Laser Acoustic Microskopy
- C-SAM - C-Mode Scanning Acoustic Microskopy

Abbildung 9 zeigt zeigt die wichtigsten Untersuchungsmodi der Ultraschallmikroskopie.

Das **C-SAM-Verfahren** ist ein Impuls-Echo-Verfahren, bei dem der im gewählten Scanfeld des Geräts liegende Probenausschnitt bei fester z-Position des Prüfkopfs mäanderförmig in der x-y-Ebene abgerastert wird. Diesem Verfahren kommt für Inspektionsaufgaben im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik besondere Bedeutung zu. Es steht deshalb im Mittelpunkt des Praktikums.

Dank der fokussierenden Geometrie des Prüfkopfes wird jeweils ein minimaler Probenbereich (etwa Größe des Brennfleckdurchmessers) angeregt und das Reflexionssignal ausgelesen. Ein Piezowandler erzeugt dabei kurze breitbandige US-Impulse und wandelt in Verbindung mit einem schnellen Abtastsystem und einer Umschaltelektronik die Echosignale in elektrische Größen. Die Amplitude der Spannung u(x,y) ist vorzeichengerecht proportional zur Amplitude des Schallwechseldrucks. Der Grauwert des nach Verstärkung und Integration erzeugten Bildpunkts korreliert so mit dem lokalen Schallwechseldruck. Durch Falschfarbendarstellung lassen sich die gestörten Bereiche hervorheben. Beispielsweise werden Phasensprünge an gasförmigen Einschlüssen sowie an „Entbindungen" zwischen Fügepartnern (Delaminationen) oft als rote oder gelbe Gebiete dargestellt. Bereiche einer Ebene mit abweichenden elastischen Materialeigenschaften (beispielsweise aushärtungsbedingte Inhomogenitäten oder ungleichmäßige Füllstoffverteilungen) äußern sich oft nur in Amplitudenschwankungen, die als Farbton- oder Grauwertabstufungen erkannt werden.

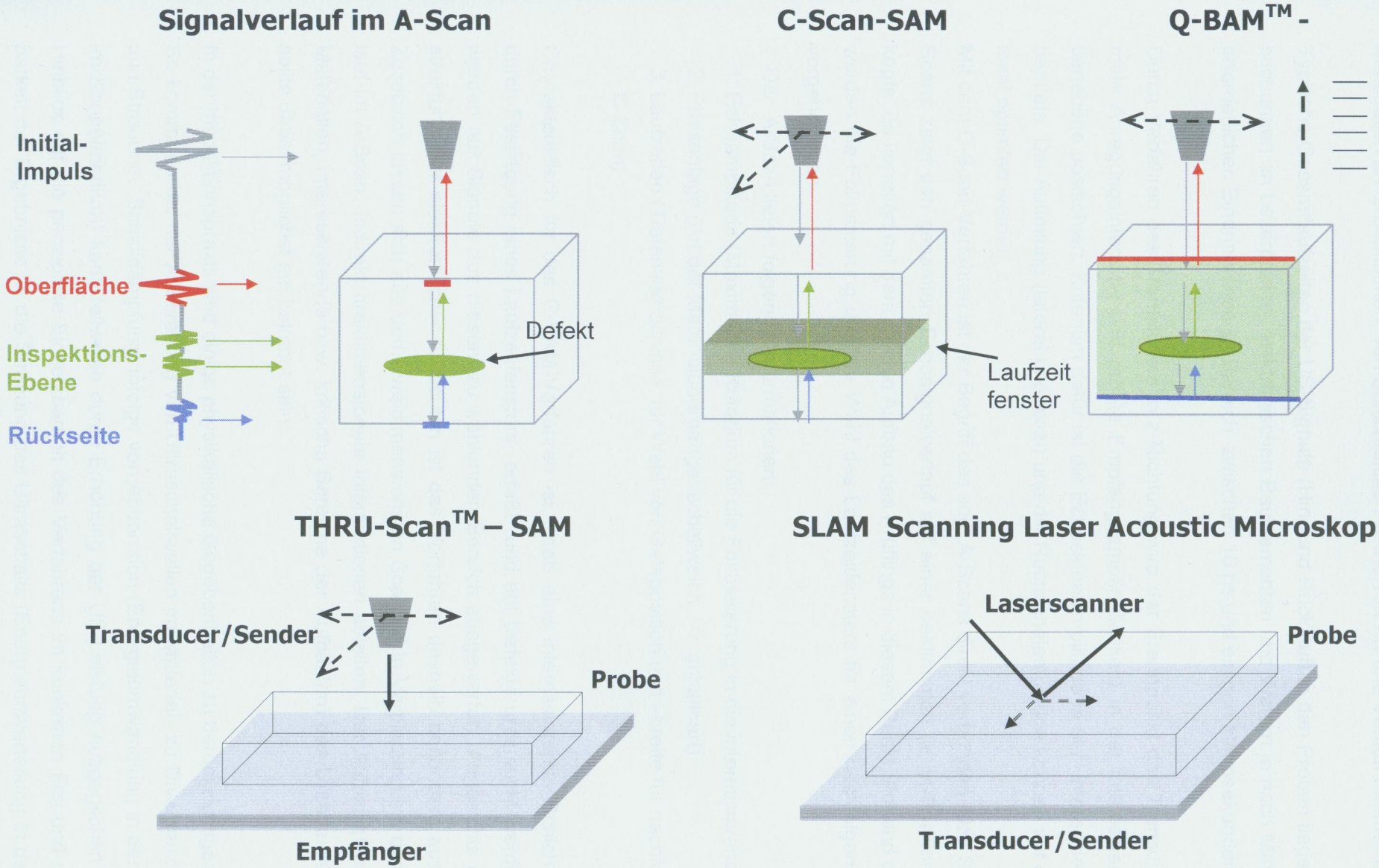


Abb. 9: Untersuchungsverfahren der Ultraschallmikroskopie

Laufzeit, Amplitude und Polarität des Rücksignals sind abhängig von den Eigenschaften der Materialien an Grenzflächen, von Schichtdicken sowie von Art und Verlauf interner Defekte.

Typische Gesamtlaufzeiten der US-Signale (Hin- und Rücklauf) in den Proben liegen bei Untersuchungen an Leiterplatten, elektronischen Bauelementen und Wafern je nach Materialien und erforderlichen Eindringtiefen im Bereich zwischen 10 ns und einigen Mikrosekunden.

Durch Verfahren des Transducers in z-Richtung wird der Brennpunkt des Transducers (maximale Anregungsintensität und größte Empfangsempfindlichkeit) in der interessierenden Probenebene positioniert. Kriterium dafür ist die Echosignalamplitude in der interessierenden Probentiefe. Die Auflösung (lateral und axial) und die Nutzsignalamplitude können auf diese Weise lokal optimiert werden.
Mit dem C-Scan-Verfahren ist der Begriff des sog. A-Scans direkt verbunden. Das Signal des A-Scans zeigt den gesamten Echosignalverlauf auf einer bestimmten (x, y)-Position des Prüfkopfs. Es korreliert mit dem axialen Aufbau des Prüflings in diesem Punkt. Anhand des A-Scans werden die Fokussierung und die Wahl des Laufzeitfensters für einen nachfolgenden C-Scan vorgenommen.

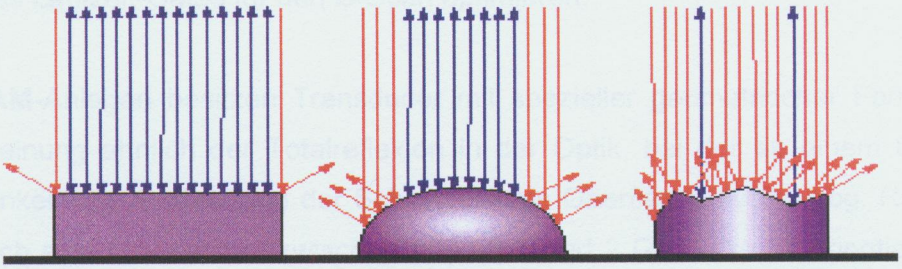
Der A-Scan liefert folgende Informationen:

1. Echoamplitude (Maximum = Kriterium für die Fokussierung in die interessierende Ebene)
2. Phasenlage (Art der Materialübergänge: schallweich ⇔ schallhart)
3. Laufzeiten (Tiefenverhältnisse, für Wahl von Gateposition und –breite für nachfolgenden C-Scan)

Charakteristisch für das C-SAM-Verfahren ist, daß eine interessierende Schicht der Probe durch Festlegung eines Laufzeitfensters erfaßt und auf Defekte untersucht werden kann (es werden nur Signale aus diesem zu wählenden Bereich ausgewertet). Angesichts der Schichtstruktur vieler elektronischer Aufbauten ist das Verfahren deshalb besonders aussagekräftig. Zusätzlich lassen sich aus dem zweidimensionalen Scanbild in Verbindung mit dem Signalverlauf im A-Scan indirekt dreidimensionale Informationen ableiten. Der Aufbau (Geometrie und Materialien, interessierende bzw. kritische Bereiche der Aufbauten) des Untersuchungsobjekts sollte dabei möglichst gut bekannt sein.

In der Inspektionspraxis sind einige physikalische Gegebenheiten zu berücksichtigen.
So kommt es bei der Ausbreitung von Ultraschallwellen im Material zu Divergenz, Absorption und Streuung. Schalldämpfung infolge von Absorption (Energieumwandlung in der Probe bzw. im Koppelmedium) kann teilweise durch Erhöhung der US-Leistung ausgeglichen werden. Im Hinblick auf die prinzipielle Einsetzbarkeit des Verfahrens im konkreten Fall und die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist die Streuung des Ultraschalls (Energieumverteilung in der Probe) an

Inhomogenitäten und Strukturierungen im Volumen und auf der Oberfläche der Proben sowie bei hoher Oberflächenrauhigkeit von größerer Bedeutung. Oft sind diese Unregelmäßigkeiten kleiner als die Wellenlänge des Ultraschalls. Diffuse Streuung verhindert dann die Ausbildung verwertbarer Echosignale bzw. es kommt zur Überdeckung dieser Signale. Beispielsweise ist eine Untersuchung von Mehrlagenleiterplatten (FR4) nur sehr eingeschränkt möglich.



Planparallele ebene Oberfläche: Gute Abbildung, Streuung nur im Kantenbereich

Gewölbte Oberfläche: Abbildung eines begrenzten Mittenbereichs

Hohe Oberflächenrauhigkeit: Keine Abbildung, vollständige Streuung

Abb. 10: Einfluss von Oberflächeneigenschaften auf das Echosignal

Spaltenähnliche Störungen mit gasförmigen Einschlüssen (Delaminationen, Hohlräume und Risse) bewirken sehr starke Veränderungen der Signalverläufe wie Amplitudenänderungen, Phasenverschiebungen und Polaritätswechsel. Von besonderer praktischer Bedeutung ist, dass sich zur Probenoberfläche annähernd parallel verlaufende gasgefüllte Störungen auch bei nicht optimaler Fokussierung bereits für Dicken ab ca. 0,03 µm detektieren lassen.

Bei der Analyse von C-Scans ist weiterhin zu berücksichtigen, daß ungeachtet der Selektierung eines definierten Laufzeitbereichs (Probenschicht) alle eventuell darüber liegenden Beeinträchtigungen der Wellenausbreitung (Strukturen, Defekte usw.) das Nutzsignal beeinflussen und im Bild sichtbar sind.
Zusätzliche Fehlerquellen sind beispielsweise auch Unebenheiten, Verwölbungen, Schrägen der Probenoberflächen. Für die Machbarkeit konkreter Inspektionsaufgaben können sich daraus entscheidende Einschränkungen ergeben. Eine diesbezügliche kritische Analyse ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Ultraschallprüfung.

Der sog. **Q-BAM** basiert ebenfalls auf dem Impuls-Echo-Verfahren und ermöglicht die Aufnahme eines Querschnitts durch eine Probe für eine vorgegebene y-Position des Prüfkopfes. Zuvor ist ein in die interessierende Ebene fokussierter C-Scan erforderlich.
Durch Positionierung des Laufzeitfensters (Breite ca. 50 ns) kann die z-Position (Probentiefe) gewählt werden, ab der der Tiefenscan einsetzt. Der Transducer wird (während der Scanbewegung in x-Richtung) von hier ab in z-Richtung schrittweise nach oben verfahren, wodurch der

Brennpunkt in der jeweiligen z-Position liegt und die axiale und laterale (x-Achse) Auflösung für die einzelnen Probenebenen optimal ist. Diese Nachführung der Fokussierung unterscheidet den Q-BAM von dem bei anderen Geräten ebenfalls möglichen B-Scan. (daher die Bezeichnung Q-BAM, Quantitative B-Scan Analysis Mode). Der Q-BAM ist nützlich für die Tiefenlokalisierung von Defekten, gleichzeitig gibt er Aufschluß über Schräglagen von Package-Elementen im Inneren der Proben. Weiterhin lassen sich mit seiner Hilfe die Positionierung und die Breiteneinstellung des Laufzeit-Gates für den C-Scan optimieren.

Oberflächen-SAM-Anlagen besitzen Transducer mit spezieller geometrischer Form. Genutzt wird eine Erscheinung ähnlich der Totalreflexion in der Optik, bei der ab einem bestimmten Grenz-Einfallswinkel eine Ausbreitung der Schallwelle als Oberflächenwelle (sog. Rayleighwellen) erfolgt. Üblich sind Frequenzen zwischen 100 MHz und 2 GHz. Die Eindringtiefe ist stark frequenzabhängig und liegt im Bereich einer Wellenlänge (ca. 30 µm bei 100 MHz). Nach diesem Verfahren lassen sich mit hoher Empfindlichkeit Inhomogenitäten in der Oberfläche (Risse und Delaminationen) dünner Schichten nachweisen. An derartigen Defekten ändern sich die Ausbreitungsbedingungen gravierend, es kommt zu deutlichen Kontraständerungen im akustischen Abbild. Größere Unebenheiten sind weniger problematisch, da Oberflächenwellen der Oberflächenunebenheit folgen. Störend wirkt sich jedoch eine Oberflächenrauhigkeit in der Größenordnung der Wellenlänge aus.

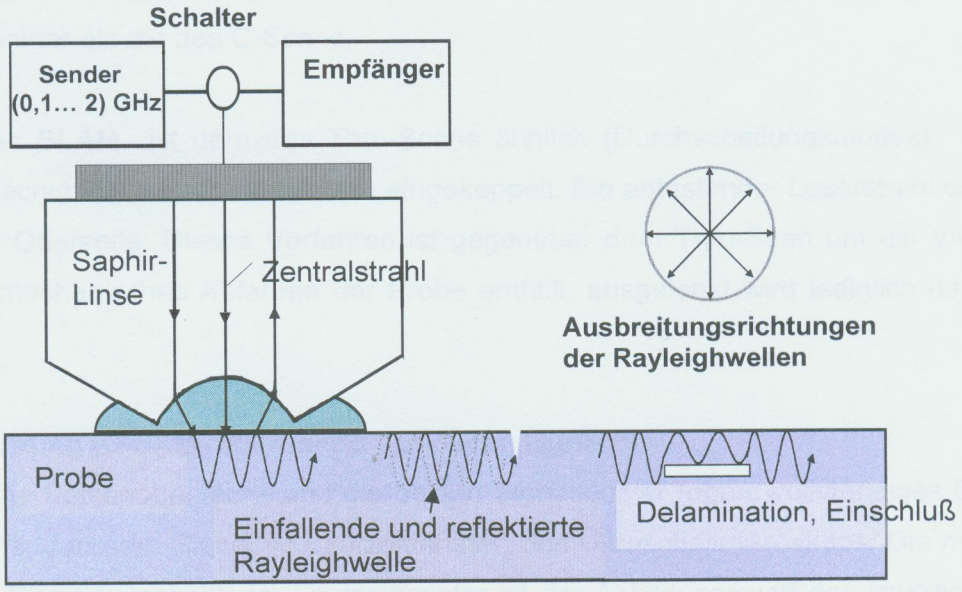


Abb. 11: Oberflächenwellen SAM

Tabelle 6: Gegenüberstellung Oberflächenwellen-SAM und C-SAM

	C-SAM	Oberflächenwellen-SAM
Frequenz	(10...300) MHz	(100...2000) MHz
Eindringtiefe (material- und frequenzabhängig)	(1...30) mm	(<10...500) µm
Erzielbare laterale Auflösung (material- und frequenzabhängig)	ca. 10 µm	ca. 0,6 µm
Einsatzbeispiele	IC-Packages, Flip-Chip-Underfill, Heat- Sink-Kontaktierungen	Wafer, WL-Packages Dünnschichttechnik

Thru-Scan und SLAM

Der **Thru-Scan-Mode** arbeitet nach dem Durchschallungsprinzip. Das Ultraschallsignal wird an Grenzflächen und Defekten reflektiert und gestreut. Aufgenommen wird das Signal, welches durch den Probenkörper gelangt. Die Einkopplung des Ultraschallsignals erfolgt vom Transducer über dem Untersuchungsobjekt. Dieser arbeitet hier nur als Sender. Der flächige Empfänger befindet sich unter dem Untersuchungsobjekt. Die Probe wird wieder mäanderförmig in x- und y-Richtung abgetastet. Durch Fokussierung in einen bestimmten Tiefenbereich kann die laterale Auflösung verbessert werden.

Mit diesem Verfahren können Cracks, Mikrorisse und Delaminationen relativ schnell gefunden werden. Aussagen zur axialen Lage dieser Fehlstellen sind aber nicht möglich, die laterale Auflösung ist schlechter als die des C-Scans.

Das Prinzip des **SLAM** ist dem des Thru-Scans ähnlich (Durchschallungsmodus). Der Ultraschall wird flächig in die Probe von unten eingekoppelt. Ein abtastender Laserstrahl empfängt das Signal der Oberseite. Dieses Verfahren ist gegenüber dem Thru-Scan um ein Vielfaches schneller. Ein mechanisches Abfahren der Probe entfällt, ausgelenkt wird lediglich der Laserstrahl.

3.2. Prüfeinrichtung (C-SAM- Mikroskop Sonoscan Gen5™)

Abb. 12 zeigt die Bedienoberfläche und die beiden Signalfenster (oben: vollständiges Echosignal des A-Scans, darunter: Signal im Laufzeitfenster) des Ultraschallmikroskops. Die maximale Amplitude des Signalausschnitts im Laufzeitfenster ist der Abbildungswert des jeweiligen Bildpunkts.

Neben C-Scans und Q-BAMs ist auch der Thru-Scan (falls erforderlich gleichzeitig mit C-Scan) möglich. Mit dem VRM™-Modul können die kompletten Echosignale (A-Scan-Signale des Probenvolumens) gespeichert und zur nachträglichen Generierung neuer C- und B-Scan-Bilder genutzt werden (virtuelles Rescanning).

Gateposition

+ Gatebreite

+ Fokussierung

↓

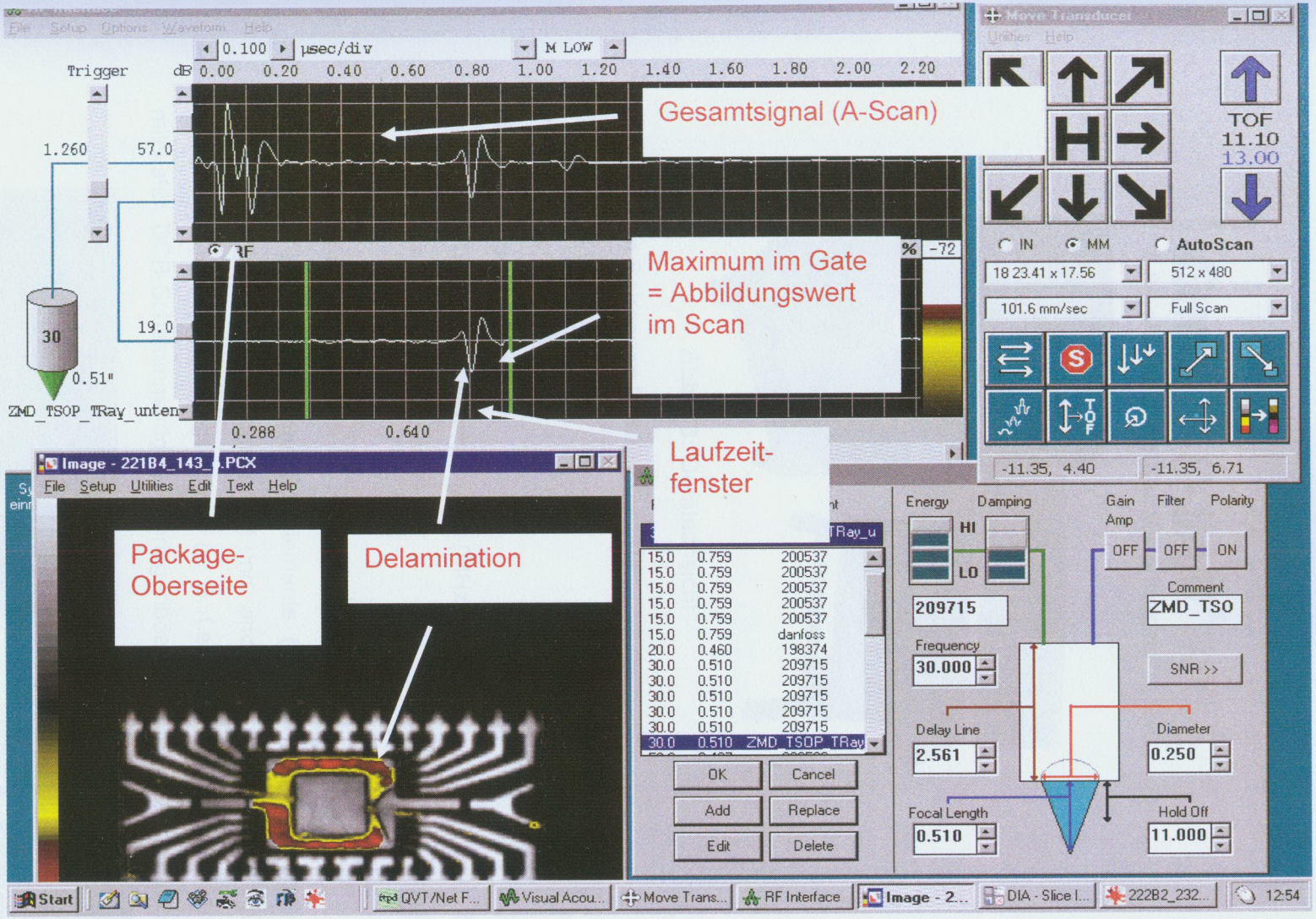
C-Scan

+ Signalverlauf im A-Scan

=

Zweidimensionales Bild

+ Information zu dreidimensionalem Inspektionsbereich



Informations-gehalt

Amplitudenänderungen ➔ Materialinhomogenitäten, Aushärtungsunterschiede, vertikale Risse, kleinere Lunker

Phasensprünge ➔ Delaminationen, Gaseinschlüsse, horizontale Risse

Laufzeitdifferenzen ➔ Schichtdickenbestimmung, Schichtdickenschwankungen, Schräglagen interner Materialgrenzen

Abb. 12: Bedienoberfläche und Signalfenster des C-SAM®

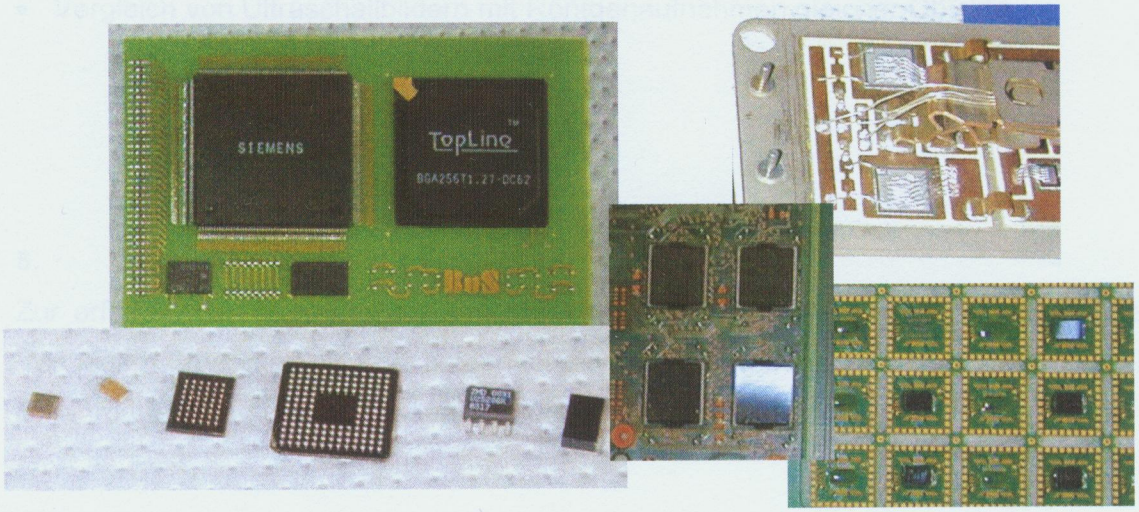
Abb. 13: Geräteansicht

Gerätedaten Sonoscan C-SAM® Gen5™

Scanbereich (mm²):	(1 x 1)...(310 x 310)
Positioniergenauigkeit (µm):	± 0,5
Bildauflösung (Megapixel):	max. 286 (16 000 x 16 000 Pixel)
Verfügbare Transducer, Nennfrequenz (MHz):	10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 230
Virtual Rescanning Mode (VRM™)	für Transducer bis zu 300 MHz

3.3. Prüfobjekte [6]

Prüfobjekte sind elektronische Bauelemente (IC im Plastic-Package, FlipChip, CSP, BGA, Chipkondensatoren und -widerstände) und andere für das Verfahren geeignete Komponenten der Aufbau- und Verbindungstechnik (z. B. Leistungsmodule mit Heatsinks, Laminate, Keramikwafer, DCB-Schaltungsträger, Mehrlagenboards mit integrierten Kühlelementen).



3. Versuchsbeschreibung

Eingangstest

Einführung in die Ultraschallmikroskopie, Kennenlernen des Geräts und der Bedienung

- Diskussion von Applikationsbeispielen aus der Aufbau- und Verbindungstechnik
- Einrichten des Gerätes für eine C-SAM-Inspektionsaufgabe an einem Testobjekt (elektronisches Bauelement)

Einfluß der wesentlichen Geräteeinstellungen auf das Ergebnis

- Signalfrequenz des Transducers
- Breite des Signalfensters und dessen Position
- Fokussierung in die Inspektionsebene
- Falschfarbenscala

Interpretation von C-SAM-Bildern

- Analyse der Falschfarbenbilder mit Hilfe des Signalverlaufs im A-Scan
- Grenzen der Ultraschallinspektion hinsichtlich der Auflösung feiner Strukturen und Einschränkungen hinsichtlich des Probenaufbaus

Demonstration weiterer Betriebsarten des C-SAM-Mikroskops

- Q-BAM
- Thru-Scan
- Virtual Rescanning Mode (VRM™) Speicherung und Auswertung von Volumendaten

Vergleich der Ultraschall-Mikroskopie mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren

- Vergleich von Ultraschallbildern mit Röntgenaufnahmen gleicher Objekte

5. Voraussetzungen zur Versuchsdurchführung

Zur erfolgreichen Vorbereitung des Kolloquiums ist die Praktikumsanleitung durchzuarbeiten. Von jedem Studenten sind die beiden folgenden Fragen **schriftlich** zu beantworten. Die schriftliche Vorbereitung wird durch den Versuchsbetreuer eingesammelt.

5.1. Ermittlung von zu erwartenden Signalverläufen im A-Scan und Abschätzung der Amplitudenverhältnisse durch Bewertung der Reflexionfaktoren an Grenzflächen innerhalb einiger mikroelektronischer Aufbauten

Bitte skizzieren Sie zu den für Ihre Gruppe angegebenen Punkten (Tabelle 7) mit Hilfe der entsprechenden Daten aus Tabelle 1 (für einige Materialien ist Z vorher noch zu bestimmen) den zu erwartenden Signalverlauf im A-Scan und bewerten Sie die Amplitudenverhältnisse ausgehend von den Reflexionsfaktoren an den jeweiligen Grenzflächen innerhalb der Bauelemente (analog Tabelle 2 und Abb. 5). In welcher Ebene würden Sie den Transducer für die Untersuchung (C-Scan) jeweils fokussieren und wie sollten die Gate-Grenzen gelegt werden.

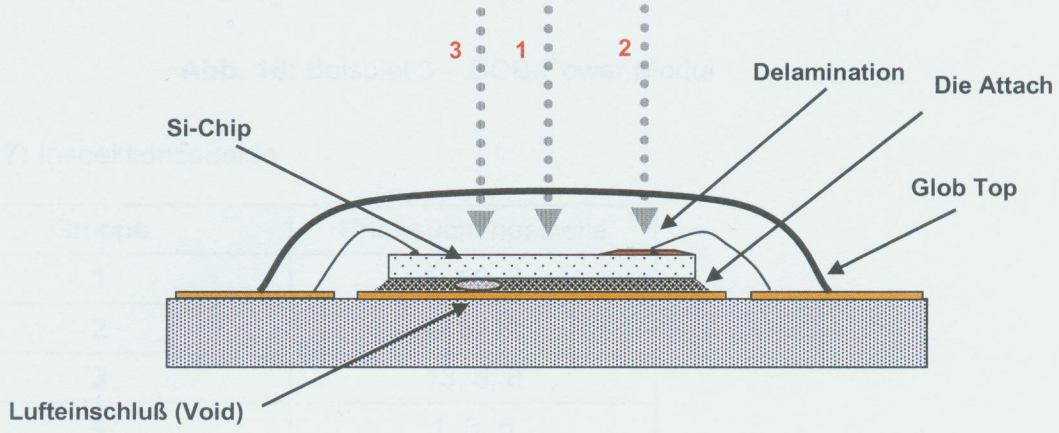


Abb. 14: Beispiel 1 - Chip on Board, Globtop

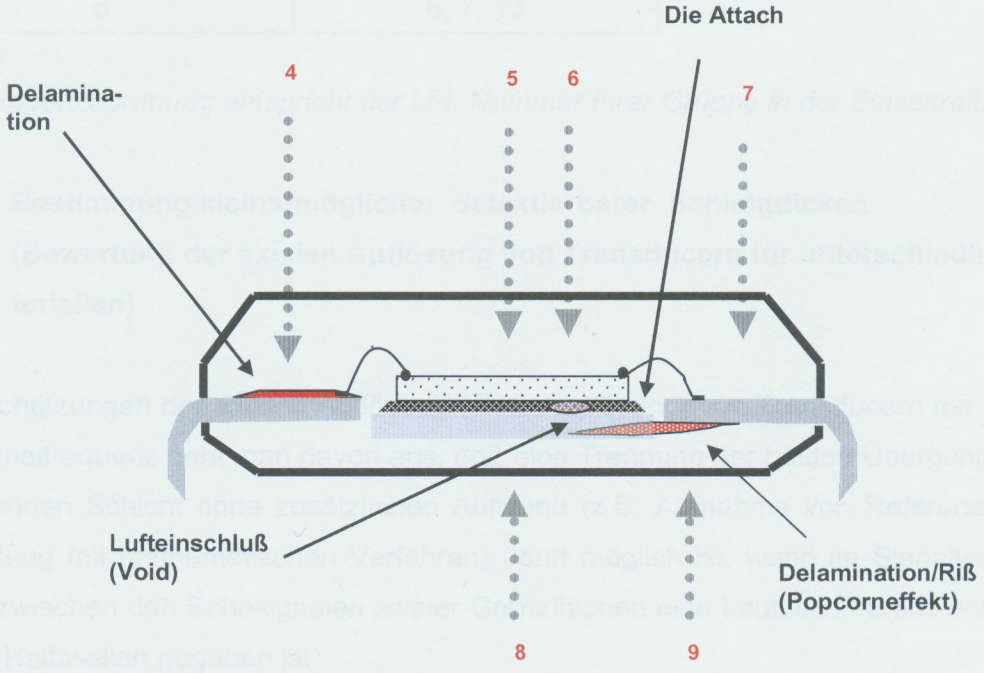


Abb. 15: Beispiel 2 - TSOP

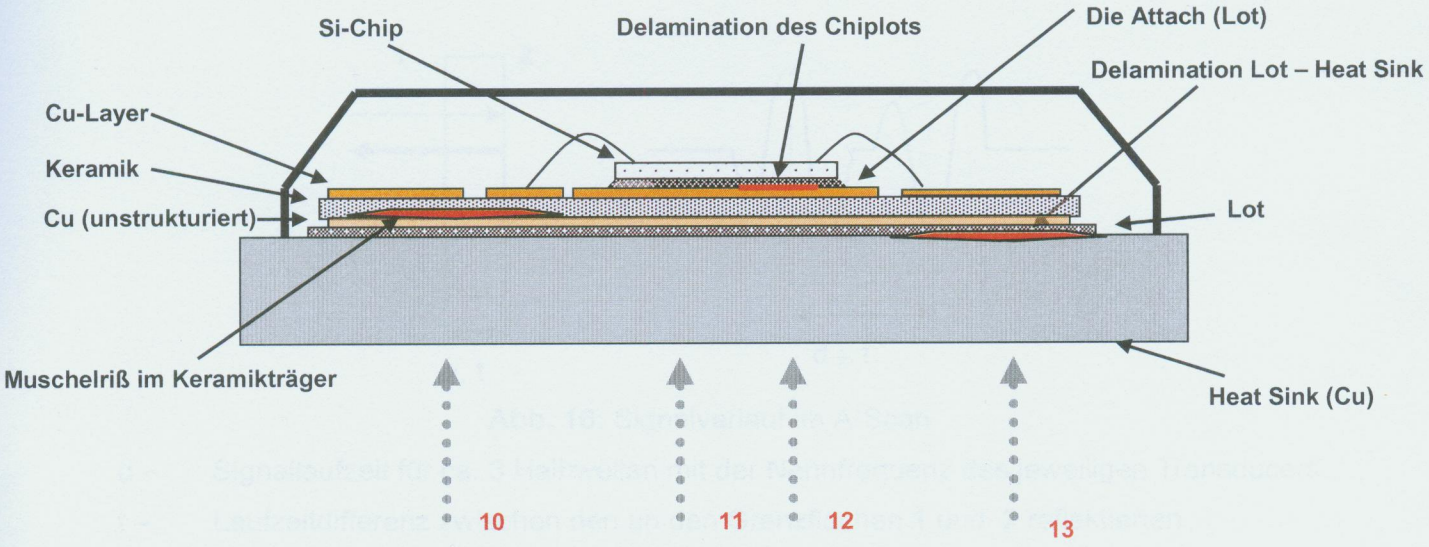


Abb. 16: Beispiel 3 - DCB-Power.Modul

Tabelle 7: Inspektionspunkte

Gruppe	Untersuchungsstelle
1	1, 10, 8
2	4, 5, 11
3	13, 6, 8
4	1, 3, 5
5	3, 5, 6
6	4, 7, 10
7	2, 5, 12
8	6, 7, 13

(Die Gruppenzuordnung entspricht der Lfd. Nummer Ihrer Gruppe in der Einschreibliste)

5.2. Bestimmung kleinstmöglicher detektierbarer Schichtdicken (Bewertung der axialen Auflösung von Transducern für unterschiedliche Materialien)

Bei Abschätzungen der axialen Auflösung (Tiefenauflösung) von Transducern mit unterschiedlicher Signalfrequenz geht man davon aus, daß eine Trennung der beiden Übergänge 1 und 2 an einer dünnen Schicht ohne zusätzlichen Aufwand (z.B. Aufnahme von Referenzsignalen und Bearbeitung mit mathematischen Verfahren) dann möglich ist, wenn im Signalverlauf des A - Scans zwischen den Echosignalen zweier Grenzflächen eine Laufzeitdifferenz von mindestens 3 Sinus-Halbwellen gegeben ist.

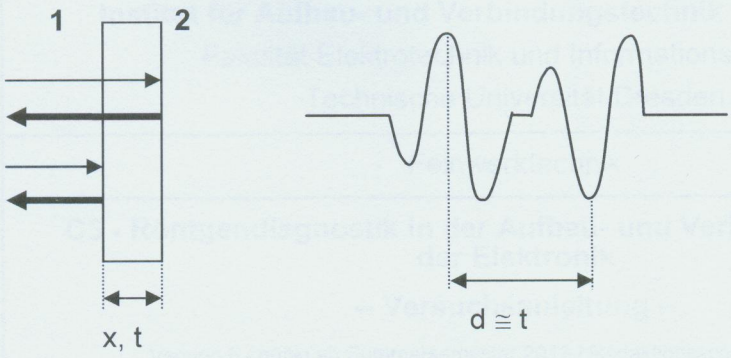


Abb. 16: Signalverlauf im A-Scan

d – Signallaufzeit für ca. 3 Halbwellen mit der Nennfrequenz des jeweiligen Transducers

t – Laufzeitdifferenz zwischen den an den Grenzflächen 1 und 2 reflektierten Echosignalen

x - Schichtdicke

Erstellen Sie ausgehend von den in der Praktikumsanleitung enthaltenen Materialdaten eine Übersicht zu minimal detektierbaren Schichtdicken für Wasser (Gruppen 1 und 2), Aluminiumoxid (Gruppen 3 und 4), Kupfer (Gruppen 5 und 6) und Silizium (Gruppen 7 und 8) bei Einsatz eines Transducers mit der Nennfrequenzen 15 MHz (Gruppe 1), 20 MHz (Gruppe 2), 30 MHz (Gruppe 3), 50 MHz (Gruppe 4), 75 MHz (Gruppe 5),100 MHz (Gruppe 6), 230 MHz (Gruppe 7) und 15 MHz (Gruppe 8).

7. Quellen und Literatur

[1] **Elfgard Kühnicke:** *Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen*
TIMUG Wissenschaftliche Vereinigung, ISBN 3-934244-01-7

[2] **Blumenauer:** *Werkstoffprüfung*
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1985

[3] European Sonoscan Workshop
TU-Berlin, 1996

[4] **L. Rebenklau:** *Realisierung von Hohlräumen und Kapillaren in Mehrlagenverdrahtungsträgern*
Diplomarbeit, TU Dresden 1996

[5] Workshop *Ultraschallmikroskopie – zerstörungsfreies Prüfverfahren in der AV*“,
Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik, TU Dresden 2004

[6] **R. Heinze, M. Speck, K.-J. Wolter:** *Praktische Erfahrungen beim Einsatz der Ultraschallmikroskopie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Aufbau und Verbindungstechnik der Elektronik*“, PLUS, 1258-1267, Juli 2005

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter
Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. R. Heinze
Laborraum: BAR S 37

Redaktionsschluss: 27.10.2008

AVT	**Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik** Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik Technische Universität Dresden
Praktikum	Feinwerktechnik
Versuch	**C3 - Röntgendiagnostik in der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik** **-- Versuchsanleitung --** Version 5 / gültig ab Sommersemester 2012 / Redaktionsschluss 16.03.2012

1. Versuchsziel

Die fortschreitende Miniaturisierung in der Aufbau- und Verbindungstechnik für elektronische und mikrosystemtechnische Bauelemente und Baugruppen fordert hochauflösende bildgebende zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Technologieentwicklung und Qualitätssicherung. Neben der lichtoptischen Mikroskopie und der Ultraschallmikroskopie spielen die Röntgenverfahren eine sehr wichtige Rolle, besonders bei der Inspektion verdeckter Strukturen (z.B. BGA-Lötstellen). Zu den röntgenmikroskopischen Verfahren zählen die Radiografie, die hochauflösende Schrägdurchstrahlung (OVHM - oblique views at highest magnification), die digitale Laminografie und die Computertomografie (CT).

In diesem Versuch sollen die Möglichkeiten und Grenzen der Röntgenradiografie vermittelt und diskutiert werden. Dazu werden Untersuchungen an Probekörpern (Al-Treppe) und an realen Bauelementen und Baugruppen durchgeführt, um die Einflussgrößen, die bei der Röntgeninspektion wirken, kennen und bewerten zu lernen.

2. Grundlagen

Wilhelm Conrad Röntgen (* 27. März 1845 in Lennep, heute Stadtteil von Remscheid; † 10. Februar 1923 in München) entdeckte am 08. November 1895 die heute nach ihm benannten X-Strahlen. Für diese Entdeckung bekam er im Jahre 1901 als erster Forscher den Nobelpreis für Physik verliehen.

Anmerkung:
Röntgen verzichtete auf eine Patentierung seines Experiments, wodurch das Verfahren eine schnelle Verbreitung besonders in der Medizin fand. Auf Anfrage sagte er der AEG, er sei der Auffassung, „dass seine Erfindungen und Entdeckungen der Allgemeinheit gehören und nicht durch Patente, Lizenzverträge und dergleichen einzelnen Unternehmungen vorbehalten bleiben dürften".
(Bild- und Zitatquelle: www.wikipedia.de)

2.1 Die Entstehung des Röntgenbildes

Bei der klassischen Röntgenmikroskopie und auch bei der Röntgen-Computertomografie (CT) werden die Informationen über innere Strukturen von Prüfobjekten durch die Schwächung der Röntgenstrahlung während der Transmission generiert. Die Ähnlichkeiten des Röntgens in der Technik zur bekannten und seit längerem etablierten Röntgentechnik und CT in der Medizin sind vorhanden, aber sehr begrenzt.

Röntgenstahlen sind elektromagnetischen Wellen, deren Wellenlängen im Bereich von 10^{-9} bis 10^{-12} m liegen. Sie werden auch als Photonenstrahlung bezeichnet (siehe Bild 1).

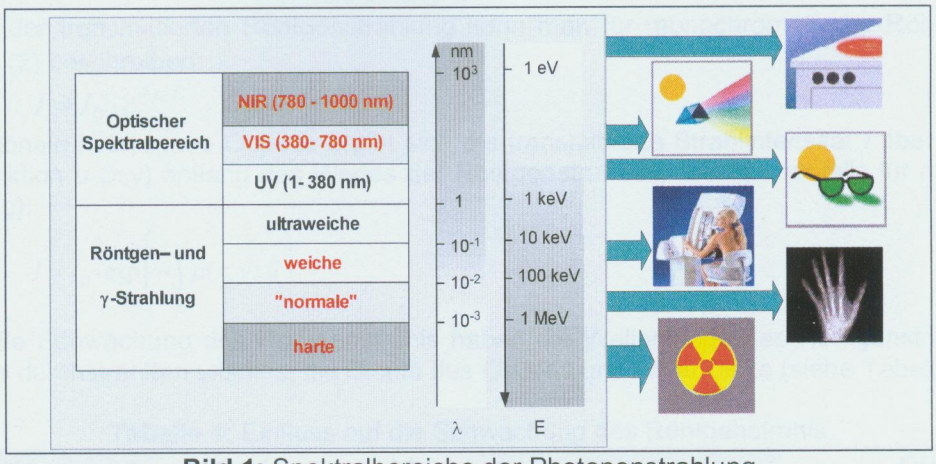


Bild 1: Spektralbereiche der Photonenstrahlung
(Quelle: TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik)

Röntgenstrahlen entstehen in Röntgenröhren, indem beschleunigte Elektronen auf einem Target abgebremst werden. Das emittierte Spektrum enthält kontinuierliche Strahlung (Röntgenbremsstrahlung: entsteht beim Eindringen eines Elektrons in das Targetmaterial und Ablenkung in der Nähe eines Atomkerns auf eine Hyperbelbahn durch das Coulombfeld – siehe auch [2] Kap. 1.2) sowie diskrete Strahlung (charakteristische Strahlung: entsteht durch direkte Wechselwirkung der beschleunigten Elektronen mit den Hüllenelektronen der Targetatome – siehe [2] Kap. 1.3) entsprechend den Eigenschaften des Targetmaterials. Die maximale Energie bzw. minimale Wellenlänge der Röntgenstrahlung ist dabei direkt vom Targetmaterial und der Beschleunigungsspannung abhängig. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_{max}} \qquad (1)$$

mit:
- λ_{min} - kürzeste emittierte Wellenlänge
- U_{max} - Beschleunigungsspannung
- h - Plancksches Wirkungsquantum
  $h = 4{,}135.667.33 \cdot 10^{-15}$ eVs
- e - Elementarladung
  $e = 1{,}602.176.487 \cdot 10^{-19}$ C
- c - Lichtgeschwindigkeit
  $c = 299.792.458$ ms^{-1}

Insgesamt wird nur ein sehr geringer Teil der eingesetzten Energie (ca. 1%) in Röntgenstrahlung umgesetzt (ca. 99% in Wärmeenergie). Das Beispiel des Röntgenspektrums eines Wolframtargets zeigt Bild 2.

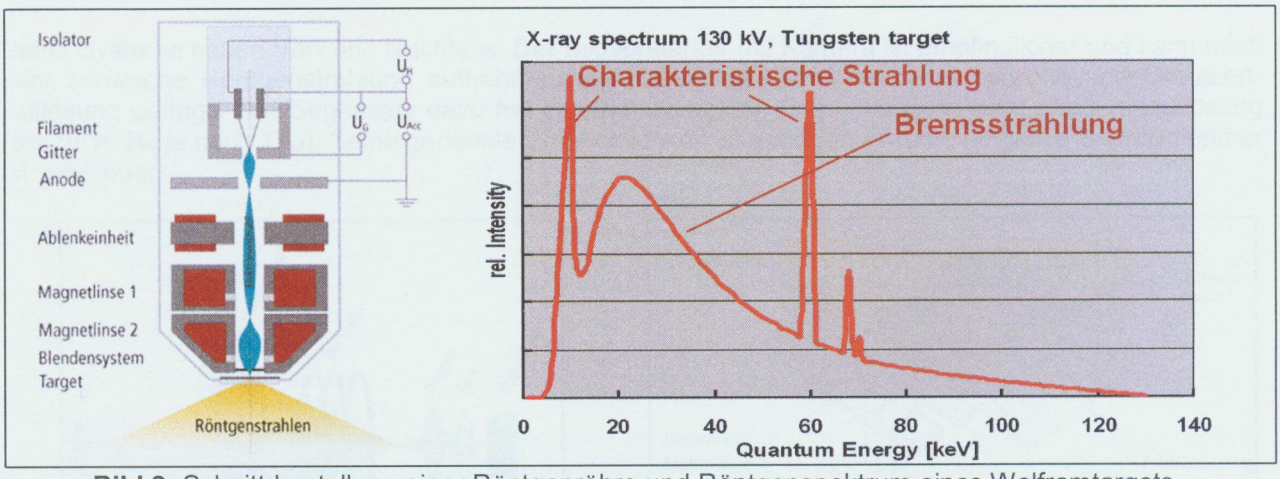


Bild 2: Schnittdarstellung einer Röntgenröhre und Röntgenspektrum eines Wolframtargets
(Bildquellen: GE Sensing & Inspection Technologies GmbH / phoenix|x-ray®)

Während der Röntgenbestrahlung eines Objektes wird die Intensität I_0 in Abhängigkeit von den Eigenschaften (μ - Schwächungskoeffizient des Materials) und von der Dicke des Materials (L – Materialdicke) geschwächt.

Die Intensität der transmittierten Röntgenstrahlung kann man für monochromatische Röntgenstrahlung mit Gleichung (2) beschreiben:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot L} \tag{2}$$

Für 2-dimensionale heterogene Objekte ergibt sich die transmittierte Strahlintensität *I* über das Linienintegral der Funktion μ (x,y) entlang des Weges der Röntgenstrahlung (gültig ebenfalls für monochromatische Strahlung):

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\int_L \mu(x,y)dl\right) \tag{3}$$

Einfluss auf die Schwächung des Röntgenstrahls haben die Wellenlänge des Röntgenstrahls, die Ordnungszahl des durchstrahlten Objekts, die Dichte des Objekts und seine Dicke (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Einfluss auf die Schwächung des Röntgenstrahls

Wellenlänge	***Ordnungszahl***	***Dichte***	***Dicke***
Röntgenstrahlung	Röntgenstrahlung	Röntgenstrahlung	Röntgenstrahlung
Die Schwächung steigt mit der 3. Potenz der Wellenlänge.	Die Schwächung steigt mit der 3. Potenz der Ordnungszahl.	Die Schwächung steigt mit der Dichte.	Die Schwächung steigt mit der Dicke.

(Quelle: Dössel, Bildgebende Verfahren in der Medizin, Springer Berlin 2000)

Der abgeschwächte Röntgenstrahl wird dann von einem Detektor aufgefangen. Aktuell werden dazu zwei verschiedene Verfahren eingesetzt:

- Bildverstärker mit Kamera (Bild 3)
- Digitaler Flächendetektor (Bild 4).

Beide Systeme haben Vor- und Nachteile. Der Bildverstärker mit Kamera ist empfindlicher und kann noch sehr schwache Röntgenstrahlung aufnehmen und darstellen. Dafür ist seine optische und Grauwert-Auflösung geringer. Im Gegensatz dazu hat der Digitaldetektor eine hohe Pixel- und Grauwertauflösung (bis zu 16 Bit je nach Typ). Seine generelle Empfindlichkeit ist geringer, er hat eine große Bauform und er ist sehr teuer.

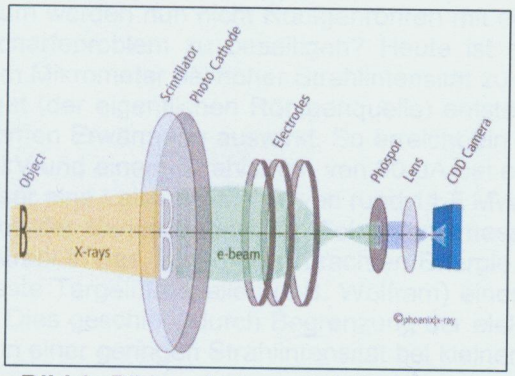


Bild 3: Bildverstärker mit CCD-Kamera
(Bildquellen: GE Sensing & Inspection Technologies GmbH / phoenix|x-ray®)

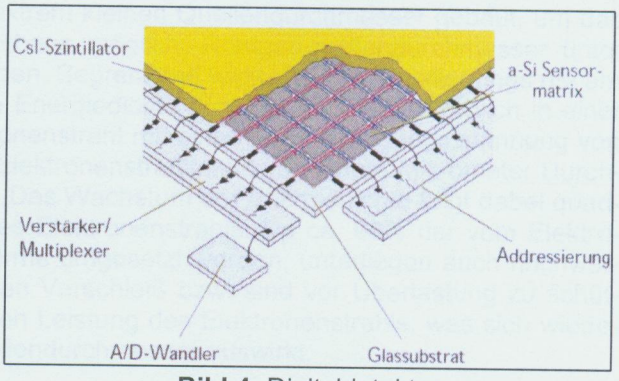


Bild 4: Digitaldetektor
(Bildquellen: GE Sensing & Inspection Technologies GmbH / phoenix|x-ray®)

Beide Systeme zur Bildaufnahme liefern ein Digitalbild, welches mit Bildverarbeitungssoftware bearbeitet und bewertet wird. Spezielle Algorithmen erlauben es, in den Röntgenbildern Strukturfehler der Proben

zu erkennen. Dabei hängt die erreichbare Auflösung A von der eingestellten Primärvergrößerung V und den Abmessungen der Pixel (Kantenlänge l_P) des Detektors ab. Es gilt folgende Formel:

$$A = \frac{l_P}{V} \tag{4}$$

Der Vergrößerungseffekt eines Röntgenmikroskops ergibt sich aus den geometrischen Verhältnissen zwischen Röntgenquelle, Probe und Detektor (siehe Bild 5). Dabei gilt für die geometrische Vergrößerung V (Primärvergrößerung) folgende Formel (Größen a und b aus Bild 5):

$$V = \frac{a}{b} \tag{5}$$

Wäre es möglich, den Brennfleck des Röntgenstrahles tatsächlich auf einen mathematischen Punkt auf dem Target zu fokussieren, so wäre jede beliebige Vergrößerung einstellbar. In der Realität lässt sich der Elektronenstrahl nicht auf einen gemeinsamen Punkt fokussieren, so dass die Röntgenquelle einen messbaren Durchmesser d_{Fokus} hat. Daraus lässt sich die geometrische Unschärfe U wie folgt berechnen:

$$U = d_{Fokus}(V - 1) \tag{6}$$

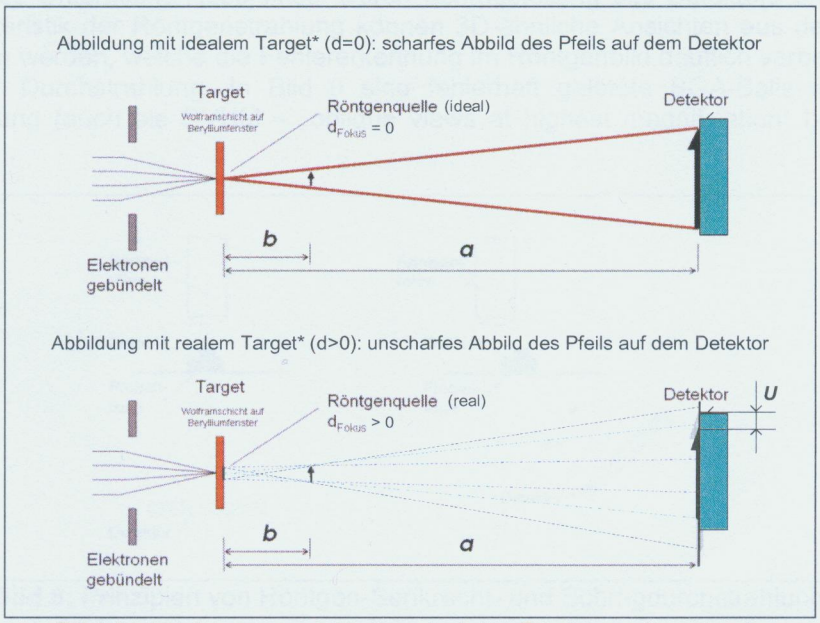


Bild 5: Abbildungsverhältnisse bei der Röntgenmikroskopie

Ist nun die Kantenlänge eines Pixels wesentlich kleiner als die Unschärfe U, so bestimmt der Röntgen-Fokusdurchmesser d_F maßgeblich die erreichbare Auflösung. Im Umkehrschluss bestimmen bei kleiner Unschärfe ($U \leq l_P$) die Pixelabmessungen die mögliche Auflösung.

Warum werden nun nicht Röntgenröhren mit einem extrem kleinen Quellendurchmesser gebaut, um das Unschärfeproblem zu beseitigen? Heute ist es durchaus möglich, Röntgenquellendurchmesser unter einem Mikrometer bei hoher Strahlintensität zu erzeugen. Begrenzend wirkt sich hierbei allerdings die am Target (der eigentlichen Röntgenquelle) entstehende Energiedichte aus, die sich hauptsächlich in einer extremen Erwärmung auswirkt. So erreicht ein Elektronenstrahl mit einer Beschleunigungsspannung von 100 kV und einem Strahlstrom von 90 µA bei einem Elektronenstrahlfokus von einem Mikrometer Durchmesser eine Leistungsdichte von rund 11,5 MW/mm². Das Wachstum der Energiedichte folgt dabei quadratisch der Verkleinerung des Fokusdurchmessers des Elektronenstrahls. Da ca. 99% der vom Elektronenstrahl in das Target eingebrachten Energie in Wärme umgesetzt werden, unterliegen auch hochwärmefeste Targetmaterialien (z.B. Wolfram) einem hohen Verschleiß bzw. sind vor Überlastung zu schützen. Dies geschieht durch Begrenzung der elektrischen Leistung des Elektronenstrahls, was sich wiederum in einer geringen Strahlintensität bei kleinem Quellendurchmesser auswirkt.

Den prinzipiellen Aufbau einer Röntgenanlage mit Röntgenröhre, Probe, Detektor, Steuerung und Bildverarbeitung zeigt Bild 6, das Praktikumsgerät Bild 7.

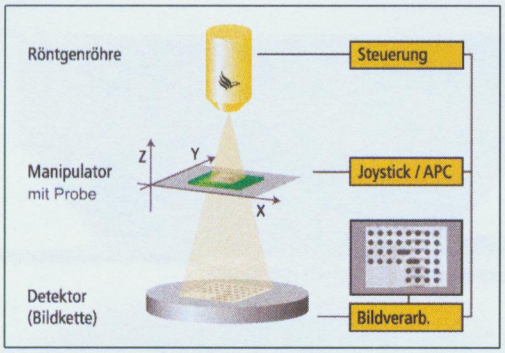


Bild 6: Prinzipaufbau Röntgemikroskop
(Bildquellen: GE Sensing & Inspection Technologies GmbH / phoenix|x-ray®)

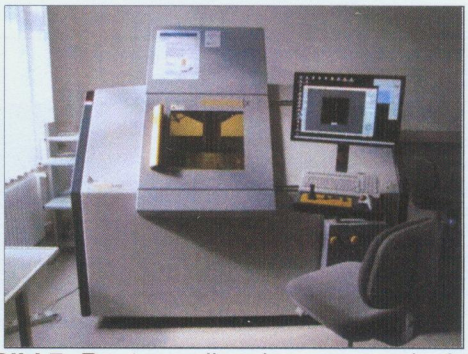


Bild 7: Röntgenmikroskop nanome|x der Fa. GE Sensing & Inspection Technologies

2.2 Röntgenradiografie

Die Röntgenradiografie liefert 2D-Grauwertbilder (Falschfarbendarstellung ist ebenfalls möglich) von der inneren Struktur des Untersuchungsobjektes. Durch Schrägstellung des Detektors und Ausnutzung der Kegelstrahlcharakteristik der Röntgenstrahlung können 3D-ähnliche Ansichten aus den Untersuchungsobjekten gewonnen werden, welche die Fehlererkennung im Röntgenbild deutlich verbessern. Bild 8 zeigt die Prinzipien der Durchstrahlung. In Bild 9 sind fehlerhaft gelötete BGA-Balls in Senkrecht- und Schrägdurchstrahlung (auch als OVHM – „oblique views at highest magnification" bezeichnet), dargestellt.

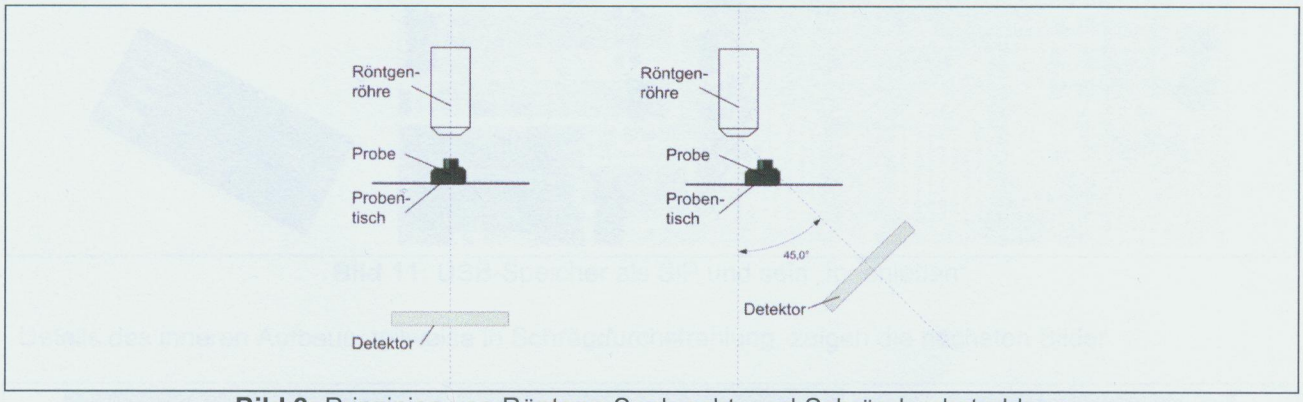


Bild 8: Prinzipien von Röntgen-Senkrecht- und Schrägdurchstrahlung

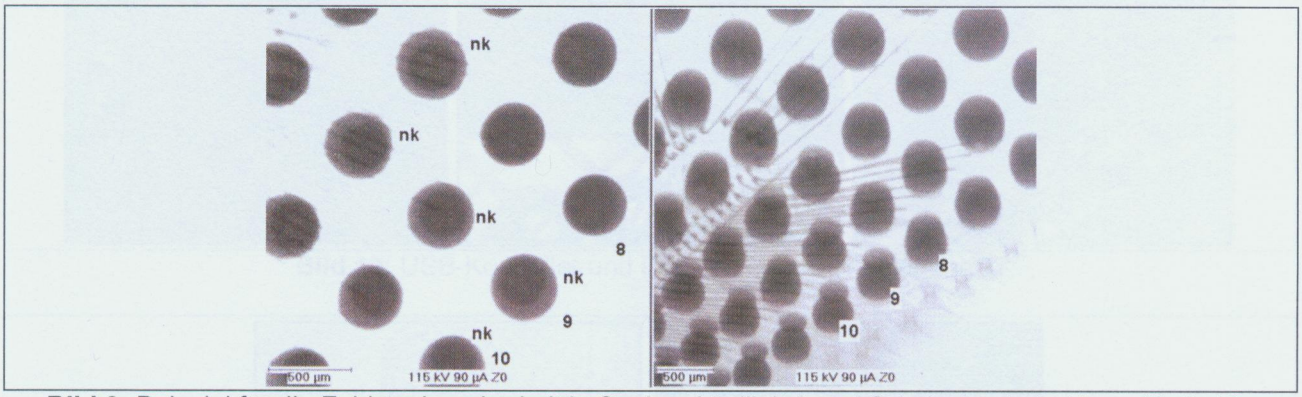


Bild 9: Beispiel für die Fehlererkennbarkeit in Senkrecht- (links) und Schrägdurchstrahlung (*8, 9, 10* - Reihennummerierung zur Orientierung; *nk* – nicht kontaktierte Lötstellen)

Mit der Röntgenradiografie sind sehr hohe Primärvergrößerungen möglich, wenn das Untersuchungsobjekt klein bzw. flach genug ist. Als Beispiel sei hier eine Röntgenaufnahme eines Widerstandes der Bauform 01005 gezeigt (Bild 10 – Kantenlänge des Bauelements: 0,4 mm x 0,2 mm), die im sogenannten Kontakt-Mode aufgenommen wurde. Dabei wurde eine abgebildete Pixelkantenlänge von 300 nm erreicht. Die Primärvergrößerung beträgt 161-fach. Das Original-Röntgenbild hat 1.126 x 1.600 Pixel bei 12 Bit Grauwertauflösung. Aufgrund der hohen möglichen Primärvergrößerung werden solche Röntgenradiografieanlagen (wie die in Bild 7 gezeigte) oft als Röntgenmikroskop bezeichnet.

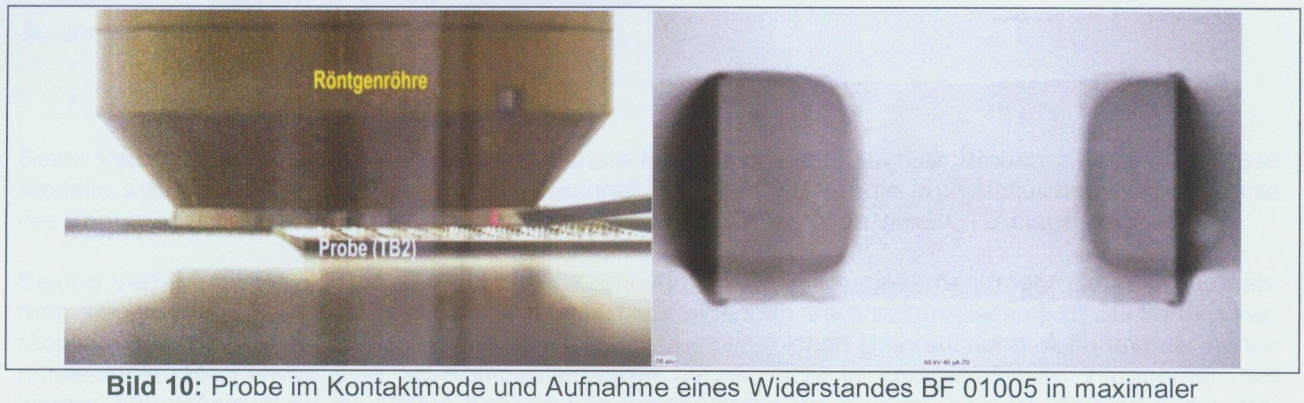


Bild 10: Probe im Kontaktmode und Aufnahme eines Widerstandes BF 01005 in maximaler Vergrößerung

Andererseits sind mit solchen Geräten auch Übersichtsaufnahmen kompletter Systeme möglich. Bild 11 zeigt den Aufbau eines Miniatur-USB-Sticks, der als System-in-Package (SiP) ausgeführt ist. Die Gesamtlänge des SiP beträgt 25 mm.

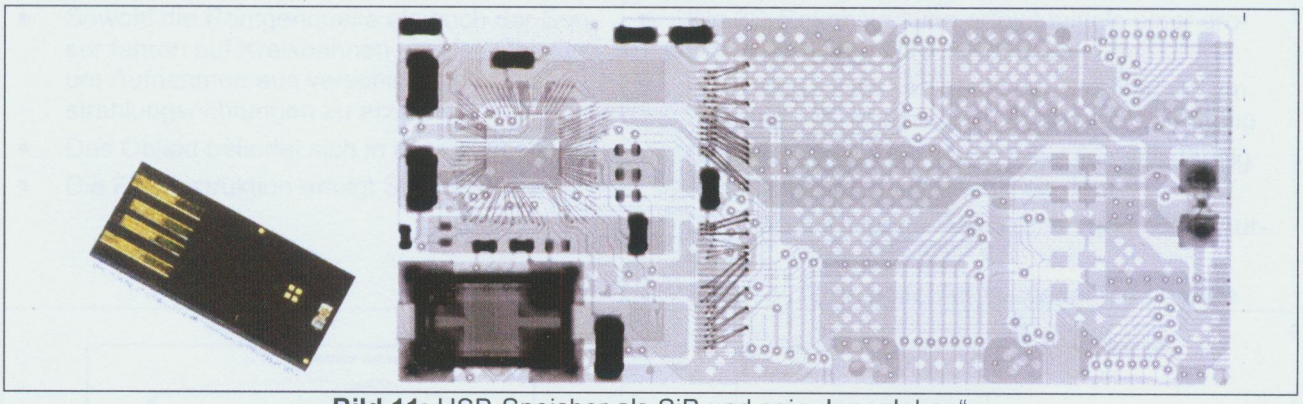


Bild 11: USB-Speicher als SiP und sein „Innenleben"

Details des inneren Aufbaus, teilweise in Schrägdurchstrahlung, zeigen die nächsten Bilder.

Bild 12: USB-Kontroller und Details der Bondverbindungen

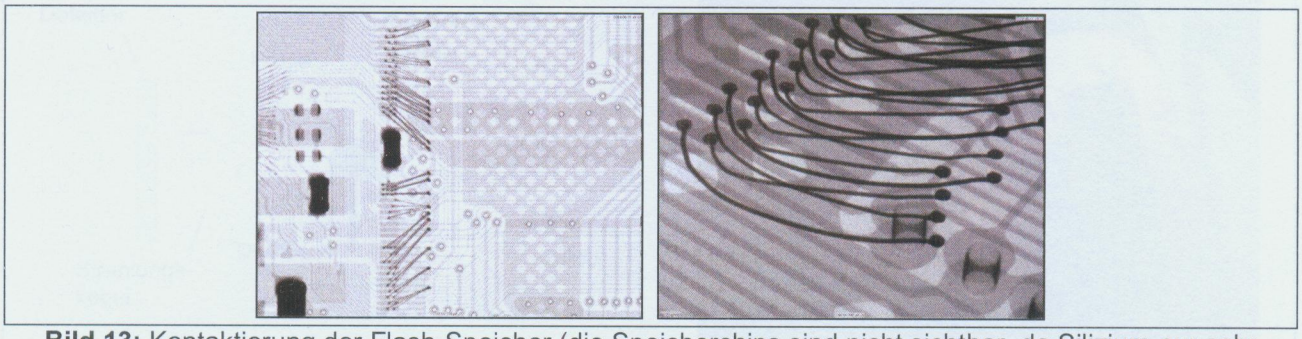


Bild 13: Kontaktierung der Flash-Speicher (die Speicherchips sind nicht sichtbar, da Silizium nur sehr wenig Röntgenstrahlung absorbiert - siehe auch Tabelle 1)

2.3 3D-Röntgenverfahren

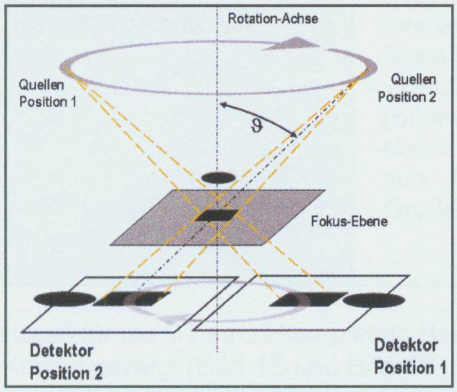
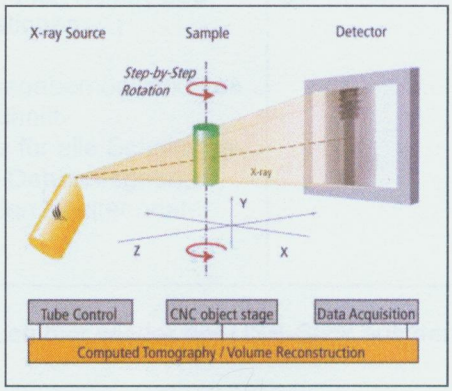
Zu den 3D-Röntgenverfahren zählt man die:

- Digitale Laminografie
- Computertomografie (CT).

Beide Verfahren ermöglichen es, dreidimensionale Modelle der untersuchten Proben zu erstellen. Diese Modelle werden aus Einzelbildern im PC errechnet. Tabelle 2 erklärt die grundsätzliche Funktionsweise der Verfahren. Den prinzipiellen Aufbau und das Foto der Messkammer einer CT-Anlage zeigt Bild 14.

Beiden Verfahren liegt die Aufnahme einer Vielzahl von 2D-Röntgenaufnahmen (mehr als 1.000 Aufnahmen sind möglich) zugrunde, die dann in einem nachfolgenden Verarbeitungsschritt zu 3D-Bildern verrechnet werden. Tabelle 3 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer solchen Untersuchung. Aufgrund der hohen notwendigen Rechenzeit sind 3D-Röntgenverfahren derzeit nicht in Fertigungslinien integrierbar. Sie werden hauptsächlich für die Offline-Analyse von geschädigten Baugruppen genutzt, da hierbei die interessierende Stelle (vermutete Schadstelle) nicht präpariert werden muss und somit keine weiteren Schädigungen eingebracht werden (im Gegensatz zur Schlifferstellung).

Tabelle 2: 3D-Röntgenverfahren

Digitale Laminografie	**Computertomografie (CT)**
• Sowohl die Röntgenquelle als auch der Sensor fahren auf Kreisbahnen um das Objekt, um Aufnahmen aus verschiedenen Durchstrahlungsrichtungen zu erzielen • Das Objekt befindet sich in der Fokusebene • Die Rekonstruktion erfolgt Schichtweise	• Die 3D-Rekonstruktion erfolgt mittels einer großen Anzahl von 2D-Projektionen • Die Probe rotiert senkrecht zur Strahlachse um 360° mit z.B. je einer Aufnahme pro 1° Drehung • Die Probe muss bei jeder Projektion vollständig abgebildet und durchstrahlt werden! • Die CT bedarf langer Messzeiten und hoher Auflösung • Sie ist nicht geeignet für ausgedehnte Objekte
 Prinzip der Laminografie (Bildquelle: GE Sensing & Inspection Technologies GmbH / phoenix|x-ray®)	 Prinzip der CT (Bildquelle: GE Sensing & Inspection Technologies GmbH / phoenix|x-ray®)

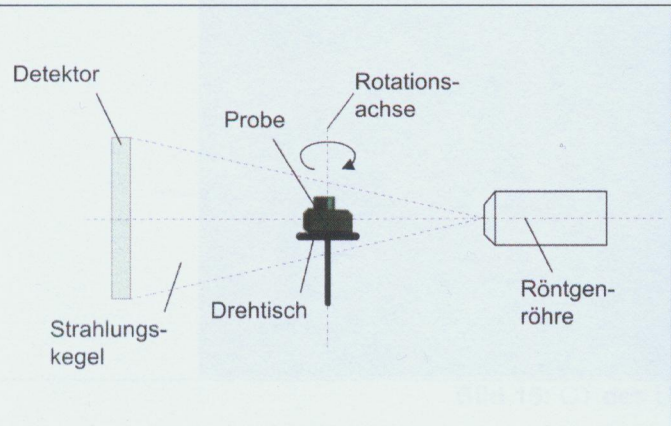


Bild 14: CT-Prinzip und gerätetechnische Realisierung

Tabelle 3: Vorgehen für eine Tomografie und ungefährer Zeitbedarf

Arbeitsschritt	Inhalt	Ungefähre Dauer
Warmlauf der Anlage	- Vakuumerzeugung - Warm-Up der Röhre - Target-Check - Zentrierung des Elektronenstrahls	30' ... 1h (je nach Röhrenzustand)
Probenpräparation und Setup für diese Probe	- Präparation der Probe / achstreue Montage auf Glasstab - Finden der optimalen Geometrieparameter - Finden der optimalen Strahlparameter => ausgeglichenes Histogramm (Beschleunigungsspannung, Strahlstrom, Belichtungszeit, Filtereinsatz) - Aufnahme der Korrekturbilder (Offset- und Gainkorrektur) - Festlegen der Belichtungszeit, des Binning, der Anzahl notwendiger Einzelbilder - für höchstauflösende Tomografie: ca. 30' Warmlauf mit eingeschalteter Strahlung	30' ... 1,5h (je nach Probe)
Aufnahme der Bilder	- Start der CT (automatischer Ablauf)	15' ... 8h (je nach Probe)
Rekonstruktionsrechnung	- Auswahl der ROI - Einstellen der Rekonstruktionsparameter - Rekonstruktionsrechnung / Erstellen der Volumendatei; übliche Größe der resultierenden Volumendatei: 2...14 GByte	30' ... 8h
Visualisierung (z.B. mit VGStudio MAX)	- Bildverarbeitungsfunktionen (Filter, Segmentierung, Farboperationen,...) - Messfunktionen - verschiedene Datenausgabemöglichkeiten (Bilderstapel für alle Schnittebenen, Videoausgabe für alle Schnittebenen, „Durchflug", CAD-Datenausgabe,...) - Größe der resultierenden Volumendatei:	30' ... xxh

Als Beispiel für die CT eines kompletten Bauelements sei auch hier wieder der USB-Stick aus dem vorherigen Kapitel gezeigt (Bild 15 und Bild 16).

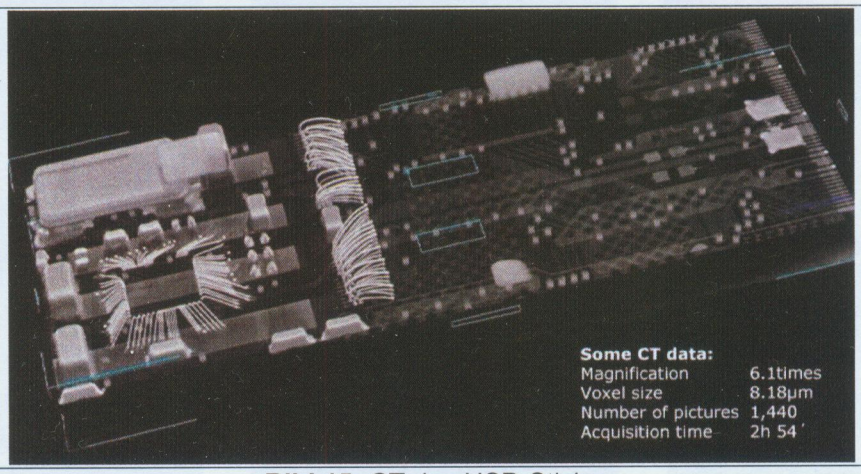


Bild 15: CT des USB-Sticks

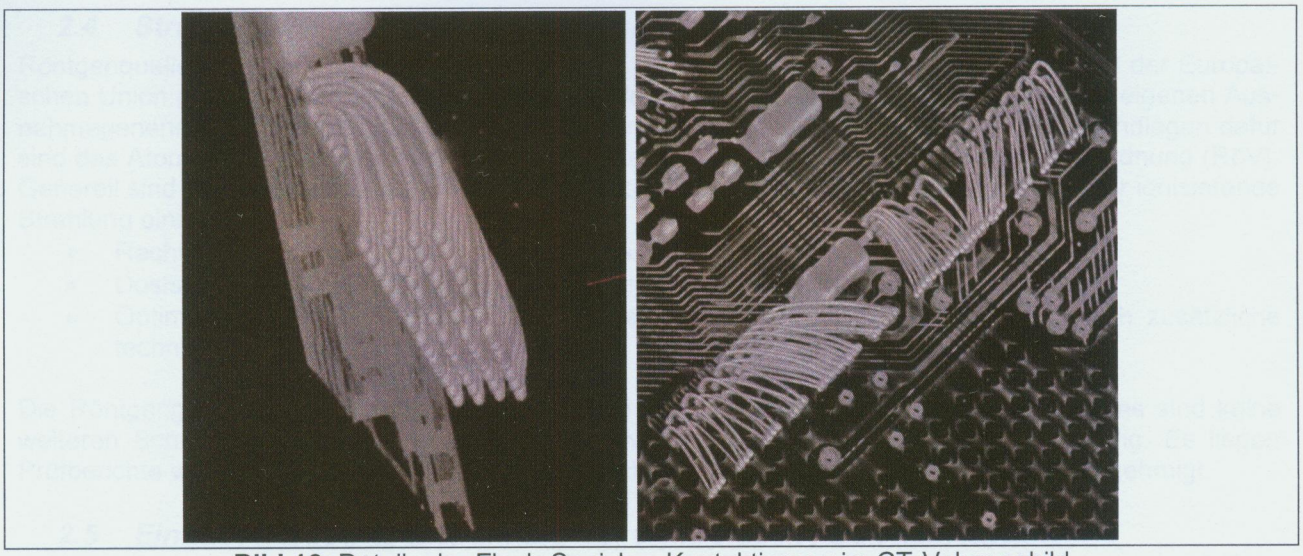


Bild 16: Details der Flash-Speicher-Kontaktierung im CT-Volumenbild

Seine wahre Stärke zur Struktur- und Fehlercharakterisierung entwickelt das Verfahren aber erst bei der Rekonstruktion von Teilvolumina eines Prüflings. Tabelle 4 zeigt drei virtuelle Schliffebenen durch eine geschädigte Lötstelle eines Widerstandes der Bauform 1206 (siehe Bild 17) und spiegelt diese an den metallografischen Schliffen. Die Proben wurden im Rahmen des Projektes nanoPAL [6] von Kollegen der Robert Bosch GmbH aufgebaut und zykliert. Die CT mit einer Voxel-Größe von 840 nm wurde am IAVT der TU Dresden durchgeführt. Anschließend wurden die Schliffe bei der Robert Bosch GmbH erstellt.

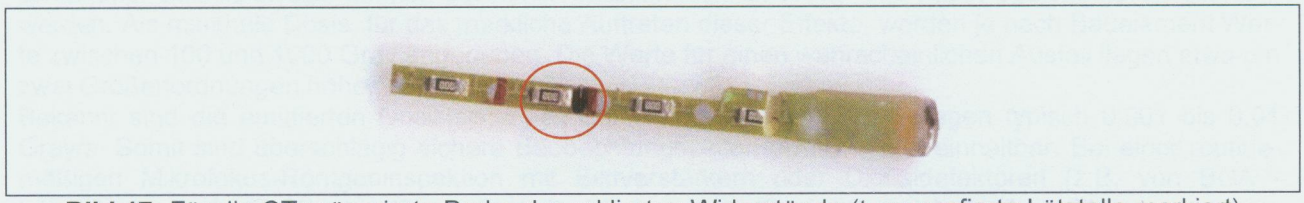
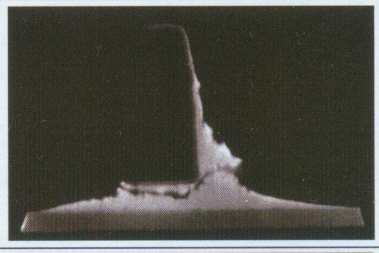
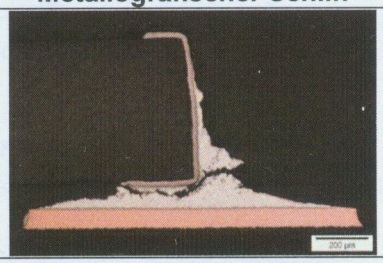
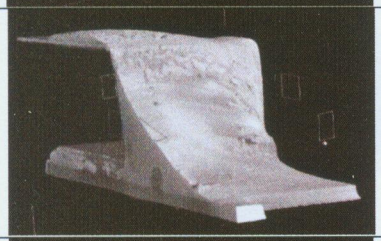
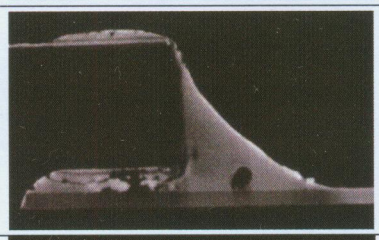
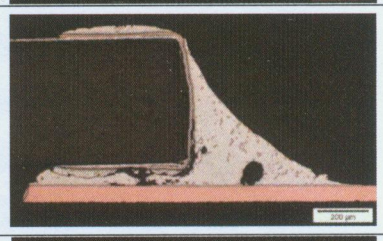
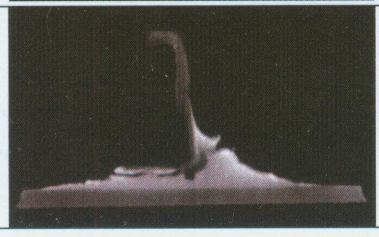
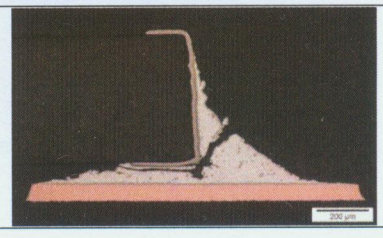


Bild 17: Für die CT präparierte Probe der zyklierten Widerstände (tomografierte Lötstelle markiert)

Tabelle 4: Geschädigter Lotkontakt im virtuellen und metallografischen Schliff

Schlifflage im 3D-Bild	Virtueller Schliff	Metallografischer Schliff
		
		
		

2.4 Strahlenschutz

Röntgenquellen emittieren ionisierende Strahlung. Damit ist ihr Betrieb in Deutschland und der Europäischen Union prinzipiell per Gesetz verboten. Der Betrieb einer Röntgenanlage bedarf einer eigenen Ausnahmegenehmigung, die nur nach strengen Richtlinien und Überprüfungen erteilt wird. Grundlagen dafür sind das Atomgesetz (AtG), die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und die Röntgenverordnung (RöV). Generell sind folgende Grundsätze (Strahlenschutzgrundsätze) beim Betrieb von Quellen für ionisierende Strahlung einzuhalten:

- Rechtfertigung: Der Betrieb der Quelle muss gerechtfertigt sein.
- Dosisbegrenzung: Die Strahlendosis darf nicht höher als nötig sein.
- Optimale zusätzliche Reduzierung: Vermeidung jeder unnötigen Exposition durch zusätzliche technische Maßnahmen.

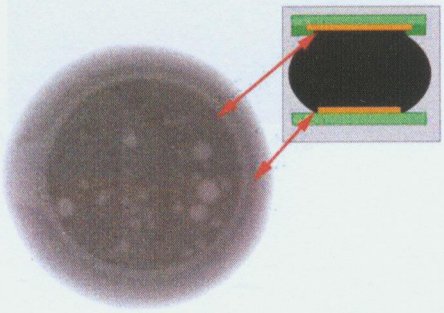
Die Röntgengeräte am IAVT entsprechen in ihren Eigenschaften Vollschutzgeräten, d.h. es sind keine weiteren Schutzmaßnahmen der Bediener oder weiterer anwesender Personen notwendig. Es liegen Prüfberichte vor und der Betrieb der Geräte ist durch das Regierungspräsidium Dresden genehmigt.

2.5 Einfluss der Röntgenstrahlung auf elektronische Bauelemente

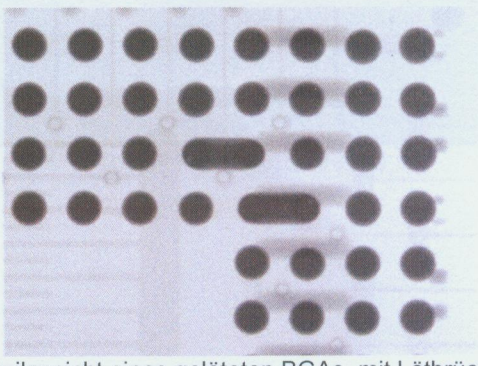
Bei Röntgenstrahlung handelt es sich um energiereiche ionisierende Strahlung, die auch elektronische Bauelemente und Schaltungen negativ beeinflussen oder zerstören kann. Bei der Absorption der Röntgenstrahlung im untersuchten Objekt findet physikalisch bedingt ein Energieumwandlungsprozess mit dem Ergebnis der Ionisation der Materie statt, d.h. die Strahlung wirkt direkt auf die molekulare und elektronische Struktur der Materie ein. Insbesondere kommt es in Halbleiter-Bauelementen im Gefolge der primären Ionisation zur Elektron-Loch-Paarbildung und zu Bindungsbrüchen, die über komplexe Transportvorgänge zu Haftstellen und Ladungen im Halbleiter sowie an den Oxid- und Grenzschichten führen. Diese Defekte treten äußerlich als dosisabhängige Veränderungen der Bauelementcharakteristik in Erscheinung. Beispielsweise können bei hoher Strahlendosis EPROM- und Flash-Speicherzellen gelöscht werden. Als minimale Dosis, für das merkliche Auftreten dieser Effekte, werden je nach Bauelement Werte zwischen 100 und 1000 Gray angegeben. Die Werte für einen wahrscheinlichen Ausfall liegen etwa um zwei Größenordnungen höher.
Bekannt sind die emittierten Dosisleistungen der Röntgenröhren. Sie betragen typisch 0,001 bis 0,01 Gray/s. Somit sind überschlägig sichere Beobachtungszeiten ermittel- und einhaltbar. Bei einer routinemäßigen Mikrofokus-Röntgeninspektion mit Bildverstärkern oder Digitaldetektoren (z.B. von BGA - Lötstellen) von 1- 10 Minuten Dauer liegt die Siliziumdosis (Spektralbereich, in dem Silizium vor allem absorbierend für Röntgenstrahlung wirkt) maximal bei etwa 3 bis 10 Gray, also weit unterhalb der Schwelle für messbare Veränderungen an Bauelementen. In der Tat sind bei den gängigen Bauelementetypen Schädigungen in der Praxis nicht beobachtet worden. Bei langwierigen oder hoch vergrößernden Röntgenuntersuchungen können sich jedoch durchaus kritische Dosen akkumulieren, da die Dosisrate linear mit der Zeit und quadratisch mit der Vergrößerung wächst (Abstands-Quadrat-Gesetz, Abstand zur Röntgenquelle). Weitere Informationen finden Sie in [7].

2.6 Weitere Beispiele für 2D- und 3D-Röntgenaufnahmen

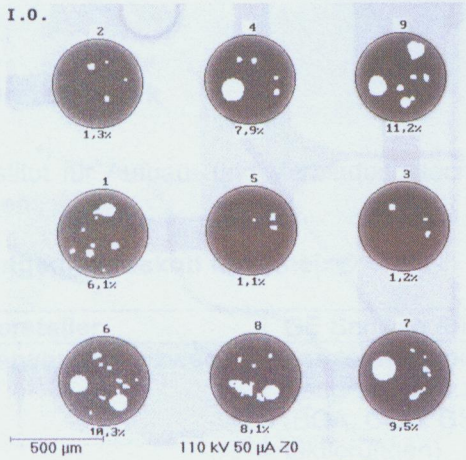
Folgende Bilder zeigen 2D-Röntgenaufnahmen mit Fertigungsfehlern und 3D-Rekonstruktionen (Quelle: IAVT).



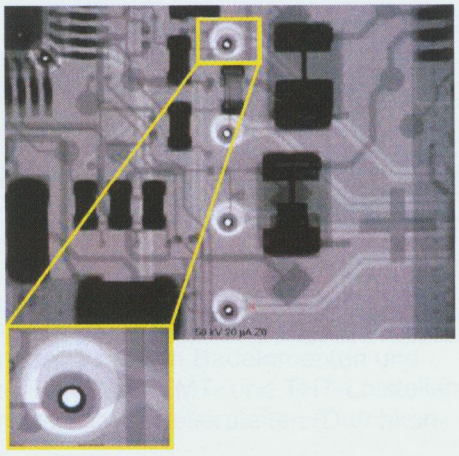
Analyse der Pad-Benetzung von BGA-Lötstellen

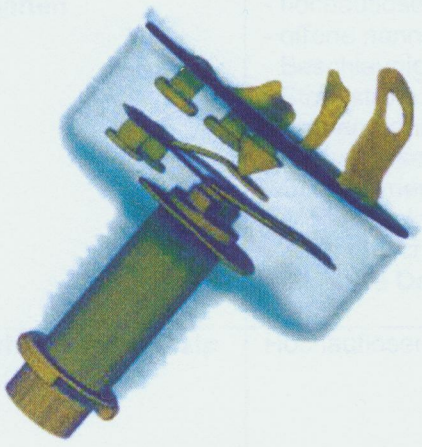


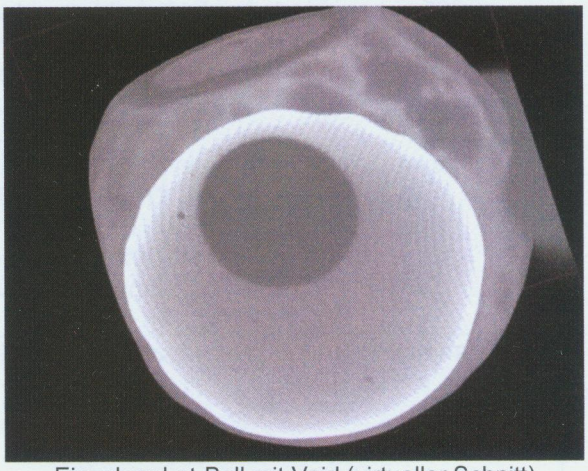
Detailansicht eines gelöteten BGAs mit Lötbrücken

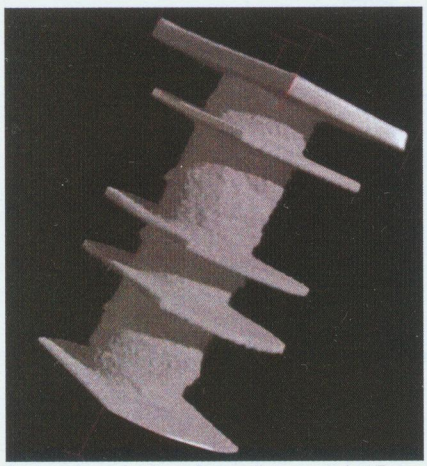


Voidanalyse an einem BGA


Cu-Lagenversatz auf einer Leiterplatte


Potentiometer


Einzelner Lot-Ball mit Void (virtueller Schnitt)

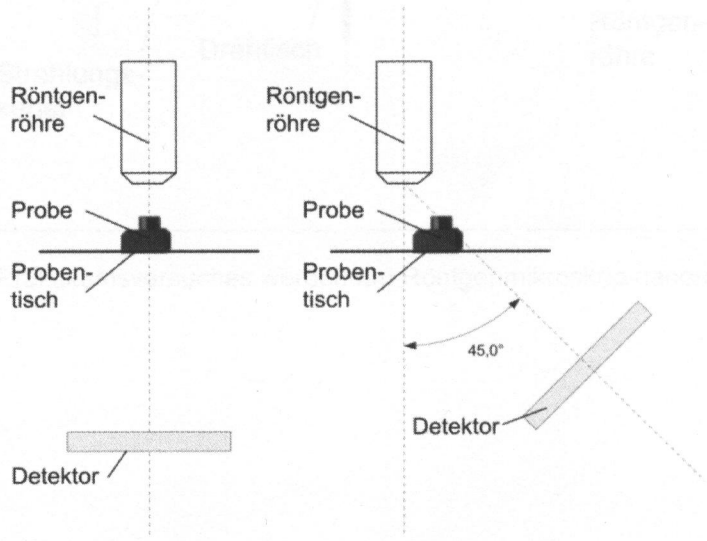

Via in einer Leiterplatte (Länge: 1,45mm)

Trilobit (479 Mio. Jahre alt)

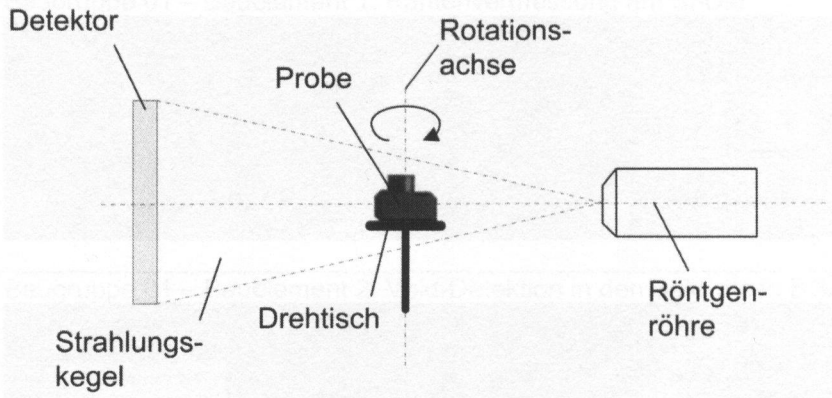
3. Gerätetechnik

Am Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik werden folgende zwei Röntgenanlagen betrieben:

Röntgenmikroskop nanome|x®

Hersteller	GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Deutschland
Verwendungszweck	Zerstörungsfreie Inspektion an elektronischen Bauelementen und Baugruppen, z.B. an Standard-, Fine-Pitch-SMT- und THT-Lötstellen (BGA, COB, CSP, FlipChip) und Multilayer-Leiterplatten (Durchkontaktierungen)
Parameter / Eigenschaften	- Vollschutz-Röntgengerät nach RöV - hochauflösende Senkrecht- und Schrägdurchstrahlung bis 70° - offene nanofocus™-Röhre mit Wolframtarget - Beschleunigungsspannung: 10 – 160 kV / 15W - Strahlstrom: 5 – 880 µA - Probenmanipulation: 5 Achsen - hochauflösende Echtzeitbildkette und alternativ Digitaldetektor - CCD-Kamera: 1.126 x 1.600 Pixel, 12 Bit - Digitaldetektor: 1.920 x 1.536 Pixel, 14 Bit - geometrische Vergrößerung: > 1.000-fach - minimale Detailerkennbarkeit: 400nm
Technisches Prinzip	Hochauflösende Radiografie in Senkrecht- und Schrägdurchstrahlung 

Computertomografiesystem nanotom®

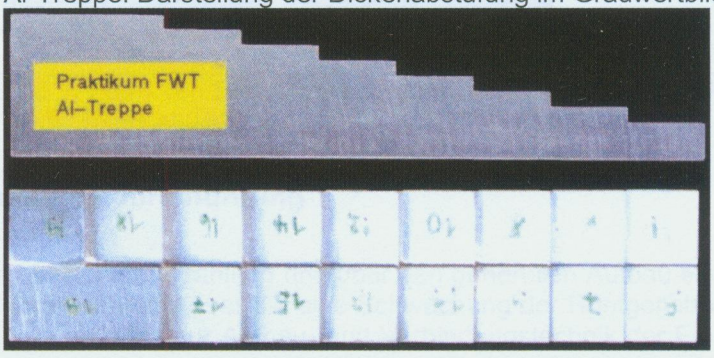
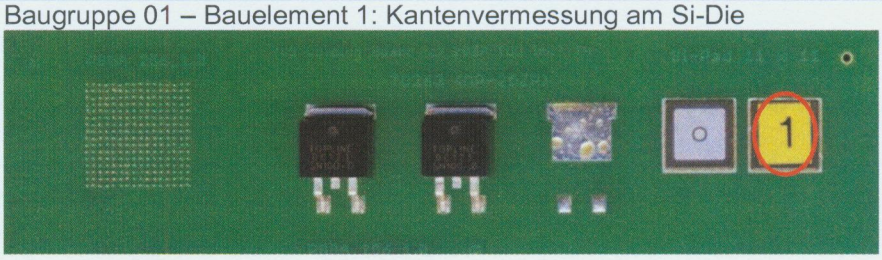
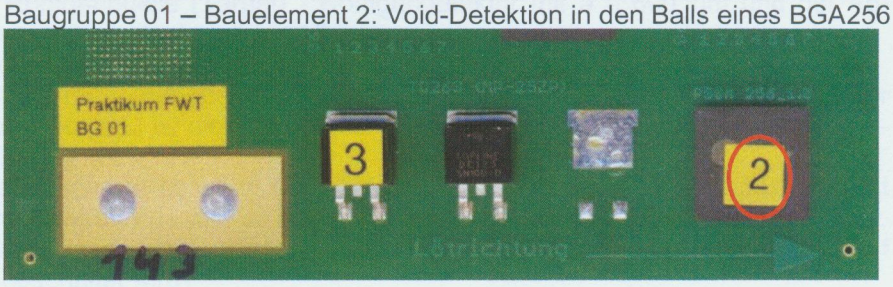
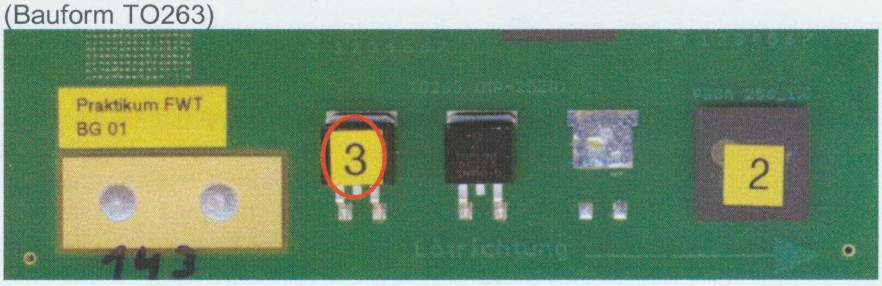
Hersteller	GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Deutschland
Verwendungszweck	Zerstörungsfreie hochauflösende Inspektion an elektronischen Baugruppen, z.B. an Fine-Pitch-SMT-Lötstellen (BGA, COB, CSP, Flip-Chip) und Multilayer-Leiterplatten (Mikro-Durchkontaktierungen)
Parameter / Eigenschaften	- Vollschutz-Röntgengerät nach RöV - offene nanofocus™-Röhre mit Wolframtarget - Beschleunigungsspannung: 10 – 180 kV / 15W - Strahlstrom: 5 – 1.000 µA - Präzisionsmanipulator auf Granitbasis - hochauflösender Digitaldetektor mit 2.400 x 2.400 Pixel, 12 Bit - Pixelgröße: 50 µm x 50 µm - minimale Voxelgröße: < (500 nm x 500 nm x 500 nm) - geometrische Vergrößerung: 1,7-fach...1.000-fach - max. Probengröße / -masse: h = 150 mm, d = 120 mm, m = 1 kg
Technisches Prinzip	Hochauflösende Computertomografie (CT) 

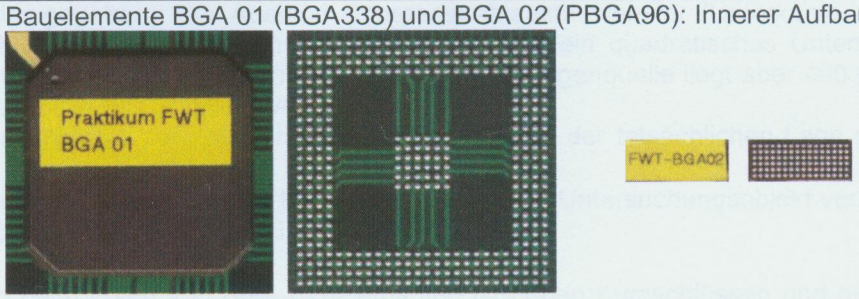
Die Arbeiten im Rahmen dieses Praktikumsversuches werden am Röntgenmikroskop nanome|x durchgeführt.

4. Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch sollen mit Hilfe der Röntgentechnik verschiedene Objekte untersucht werden. Es wird die Bedienung der Röntgenanlage erklärt und die Wirkung der Änderung von Röntgenparametern auf das Röntgenbild erprobt. Folgende Experimente sind durchzuführen (Tabelle 5):

Tabelle 5: Untersuchungsobjekte

Untersuchungsgegenstand	Untersuchungsobjekt
Abbildung verschiedener Materialdicken • Einfluss von Beschleunigungsspannung und Strahlstrom • Möglichkeiten der Bildbeeinflussung mittels Grauwerthistogramm	Al-Treppe: Darstellung der Dickenabstufung im Grauwertbild 
Geometrische Vermessung im Röntgenbild • Vermessung mittels Pixelmaß • Vermessung mittels CNC-System • Vergleich der Ergebnisse	Baugruppe 01 – Bauelement 1: Kantenvermessung am Si-Die 
Void-Detektion und -vermessung • Detektion von Voids (Einschlüssen) in Ball-Lötstellen eines BGAs • Bestimmung der Ball-Fläche und der Void-Fläche durch Messung der Durchmesser • Bewertung des Ergebnisses in Hinblick auf die Lötqualität	Baugruppe 01 – Bauelement 2: Void-Detektion in den Balls eines BGA256 
Bond-Drahtdetektion • Ermittlung der Lage von Bonddrähten in einem Leistungsbauelement • Abschätzung des Drahtmaterials und des Drahtdurchmessers	Baugruppe 01 – Bauelement 3: Bonddrähte in einem Leistungshalbleiter (Bauform TO263) 

Untersuchungsgegenstand	Untersuchungsobjekt
Ermittlung der inneren Struktur von Bauelementen • Dokumentation des inneren Aufbaus (Vorhandensein von z.B. Die, Interposer, Bonddrähten)	Bauelemente BGA 01 (BGA338) und BGA 02 (PBGA96): Innerer Aufbau 

Die Untersuchungsergebnisse sind in Form von Bilddateien zu speichern und im Protokoll zu dokumentieren und zu diskutieren.

5. Voraussetzungen zur Versuchsdurchführung

Sie sollten über die Entstehung von Röntgenstrahlung und über den generellen Aufbau einer Röntgenanlage informiert sein. Weiterhin ist die Kenntnis über die eine Schwächung der Röntgenstrahlung verursachenden Phänomene notwendig. Kenntnisse zur Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik werden vorausgesetzt.

Für das dem Versuch vorangestellte Kolloquium ist die Beantwortung der folgenden Fragen notwendig:

1. Erläutern Sie die Entstehung eines Röntgenbildes und nennen Sie Einflussgrößen auf die Schwächung des Röntgenstrahls.

2. Bild 2 (rechte Seite) zeigt das Spektrum einer Röntgenröhre mit Wolframtarget und einem Austrittsfenster aus Beryllium. Erklären Sie die verschiedenen Strahlungsanteile und deren Entstehung.

3. Gegeben sei der Abstand Röntgenquelle (Target) - Röntgendetektor mit a = 600 mm und der Abstand Röntgenquelle - Untersuchungsobjekt mit b = 12 mm.
   i. Wie groß ist die geometrische Vergrößerung V.
   ii. Da wir mit einer realen Röntgenquelle arbeiten, soll diese einen Brennfleckdurchmesser d_{Fokus} = 2 µm haben. Wie groß ist die geometrische Unschärfe U für die oben gegebene geometrische Vergrößerung V?
   iii. Wie ändert sich die Unschärfe U, wenn der Abstand Röntgenquelle - Untersuchungsobjekt auf b = 3 mm verringert wird? Wie wird sich dies auf das Ergebnisbild auswirken?
   iv. Wie ändert sich die Unschärfe, wenn bei obigen Werten der Fokusdurchmesser auf d_{Fokus} = 600 nm umgeschaltet wird?
   v. Bei einem Röntgenquellendurchmesser von 600 nm beträgt der Durchmesser des fokussierten Elektronenstrahls auf dem Target ca. 300 nm. Wie hoch ist die Leistungsdichte im Elektronenstrahlfokus bei einer Beschleunigungsspannung von U_B = 100 kV und einem Strahlstrom I_{Strahl} = 90 µA?

4. Gegeben sei der Abstand Röntgenquelle - Röntgendetektor mit a = 600 mm, der Abstand Röntgenquelle - Untersuchungsobjekt mit b = 12 mm und ein quadratisches Untersuchungsobjekt mit einer Kantenlänge von s = 2 mm.
   i. Wie groß ist die abgebildete Kantenlänge des Untersuchungsobjekts auf dem Detektor?
   ii. Der eingesetzte Digitaldetektor besitzt quadratische Pixel mit einer Kantenlänge l_P von 127 µm. Wie viele Pixel werden pro Kante vom Bild des Untersuchungsobjekts bedeckt?
   iii. Wie macht sich bei diesen Verhältnissen die Unschärfe U bei einem Brennfleckdurchmesser d_{Fokus} = 2 µm bemerkbar?
   iv. Wir verändern den Abstand Röntgenquelle - Untersuchungsobjekt auf b = 3 mm. Kann das gegebene Untersuchungsobjekt bei einem Detektor mit 1.920 x 1.536 Pixel (Kantenlänge je Pixel l_P = 127 µm) noch insgesamt abgebildet werden? Wie groß wird ein Detail (z.B. ein Void) mit einem Originaldurchmesser von d = 10 µm abgebildet (theoretischer Bilddurchmesser und Pixelzahl)? Wie macht sich für dieses Objekt die Unschärfe U bei d_{Fokus} = 2 µm bemerkbar?

5. Gegeben sei der Abstand Röntgenquelle - Röntgendetektor mit genau a = 600 mm (konstruktive Größe, durch den Hersteller gegeben), der Abstand Röntgenstrahlaustrittsfenster (Unterkante der Röntgenröhre) - Untersuchungsobjekt gemessen mit b = 12 mm und ein quadratisches Untersuchungsobjekt mit einer Kantenlänge von s = 2 mm. Die tatsächliche Röntgenquelle liegt aber 400 µm innerhalb der Röntgenröhre (Dicke des Beryllium-Austrittsfensters).
   i. Wie groß ist die tatsächliche Vergrößerung V bei Einbeziehung der tatsächlichen Lage der Röntgenquelle?
   ii. Wie groß ist der Abbildungsfehler Δs der Kantenlänge für unser Untersuchungsobjekt verglichen mit den Ergebnissen aus Aufgabe 4.i und 4.ii?

6. Für die Qualitätsbewertung beim Löten von BGA-Bauelementen ist neben Kurzschlüssen und nicht gelöteten Kontakten ein entscheidendes Kriterium der Void-Gehalt in den Lötstellen. Das folgende Bild zeigt vier BGA-Lötstellen mit Voids.

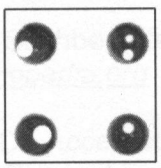


Bild 18: BGA-Lötstellen mit Voids (Quelle: TU Dresden, IAVT)

Für die Gut-Schlecht-Bewertung wird oft die IPC-Empfehlung IPC-A610D (siehe [5] und Anlage 1) herangezogen, die besagt, dass eine Lötstelle als qualitätsgerecht bezeichnet wird, wenn die Void-Fläche 25% oder weniger der Fläche des abgebildeten Lötballs entspricht.

   i. Berechnen Sie den maximal erlaubten Void-Durchmesser für eine Gut-Lötstelle (Annahme: es existiert nur ein Void in der betrachteten Lötstelle) bei einem Balldurchmesser von 0,6mm.
   ii. Wie groß ist der Volumenanteil dieses Voids (in %) bezogen auf den Gesamtball (Annahme: Ball und Void haben ideale Kugelgestalt)?

6. Aufgabenstellungen für das Praktikum

1. Bilden Sie durch Variation von Strahlstrom, Beschleunigungsspannung, Belichtungszeit und des Grauwerthistogramms alle Stufen der Aluminiumtreppe ab und speichern Sie die Röntgenbilder mit den Strahlparametern zur Dokumentation ab.
   Hinweis: Für Elemente mit einer niedrigen Ordnungszahl im Periodensystem arbeitet man mit niedriger Beschleunigungsspannung und hohem Strahlstrom.

2. Vermessen Sie die Kantenlängen eines Si-Dies (Baugruppe 01 – Bauelement 1) einmal mittels Zweipunkt-Pixelmessung und einmal mittels Zweipunkt-CNC-Messung. Speichern Sie die Ergebnisbilder mit den Messwerten. Interpretieren Sie die Ergebnisse. Nutzen Sie dazu Ihre Erkenntnisse aus der Beantwortung der Vorbereitungsfrage 5.
   Ermitteln Sie im Nachgang die Kantenlängen des Si-Dies mit einem Messschieber. Welches Ergebnis erhalten Sie?

3. Beurteilen Sie die Qualität der Lötung des Bauelements 2 auf der Baugruppe 01 (CABGA256). Nehmen Sie dazu ein Übersichtsbild des BGA so auf, dass die Voids in den Lötstellen sichtbar sind (Dokumentation der Strahlparameter!). Bestimmen Sie die Ball- und die Void-Fläche einer selbst ausgewählten Lötstelle und beurteilen Sie das Ergebnis hinsichtlich der Empfehlung der IPC-A-610D (siehe auch Vorbereitungsfrage 6 und Anlage 1).

4. Ermitteln und dokumentieren Sie für das Bauelement 3 auf der Baugruppe 01 den Verlauf der Bondverbindungen. Aus welchem Material könnte der Bonddraht bestehen und welchen Bonddrahtdurchmesser schätzen Sie ab?

5. Gegeben sind die Bauelemente BGA 01 (BGA338) und BGA 02 (PBGA96). Ermitteln Sie mittels Röntgendiagnostik den inneren Aufbau und dokumentieren Sie ihn. Achten Sie dabei auf das Vorhandensein eines Dies, des Interposers und der Bondverbindungen.

7. Quellen und Literatur

[1] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung – RöV), Röntgenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2003 (BGBl. I S. 604).

[2] Fischer, Th.; Freyer, R.: *Röntgentechnik,* Schriftenreihe Biomedizinische Technik, Ausgabe Wintersemester 2002/2003

[3] Vogt, H.-G.; Schultz, H.: *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes,* 4. Auflage, Carl Hanser Verlag – München Wien, 2004.
ISBN 3-446-40978-5

[4] Wikipedia: Suchbegriffe *„Röntgen", „Wilhelm Conrad Röntgen", „Absorption"*
http://de.wikipedia.org

[5] IPC-A-610D: *Acceptability of Electronic Assemblies*, Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn, Illinois, 2005.
www.ipc.org

[6] Autorenkollektiv: *Fehlermechanismen und Prüfverfahren miniaturisierter Lötverbindungen – Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes nanoPAL; Buchserie „Systemintegration in Electronic Packaging",* Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2009.

[7] Wolter, K.-J.; Daniel, D.; Danczak, M.; Roth, H.: *Röntgen-Computertomografie zur Qualitätssicherung in der AVT;* Paper & Vortrag, 2. DVS-Fachtagung „Elektronische Baugruppe und Leiterplatte", Fellbach, 04.-05.02.2003.

Versuchsbetreuer:	Dr.-Ing. Martin Oppermann
Redaktionsschluss:	16.03.2011

Anlagen

- Anlage 1: Auszug aus IPC-A-610D
- Anlage 2: Footprint CABGA256 (BG01, BE 2)
- Anlage 3: Footprint TO263 (BG01, BE 3)
- Anlage 4: Footprint BGA388T1.27 (BGA 01)
- Anlage 5: Footprint PBGA96 (BGA 02)

Anlage 1: Auszug aus IPC-A-610D

8 Surface Mount Assemblies

8.2.12.4 Surface Mount Area Array – Voids

Design induced voids, e.g., microvia in land, are excluded from this criteria. In such cases acceptance criteria will need to be established between the manufacturer and user.

Manufacturers may use test or analysis to develop alternate acceptance criteria for voiding that consider the end-use environment.

Acceptable - Class 1,2,3

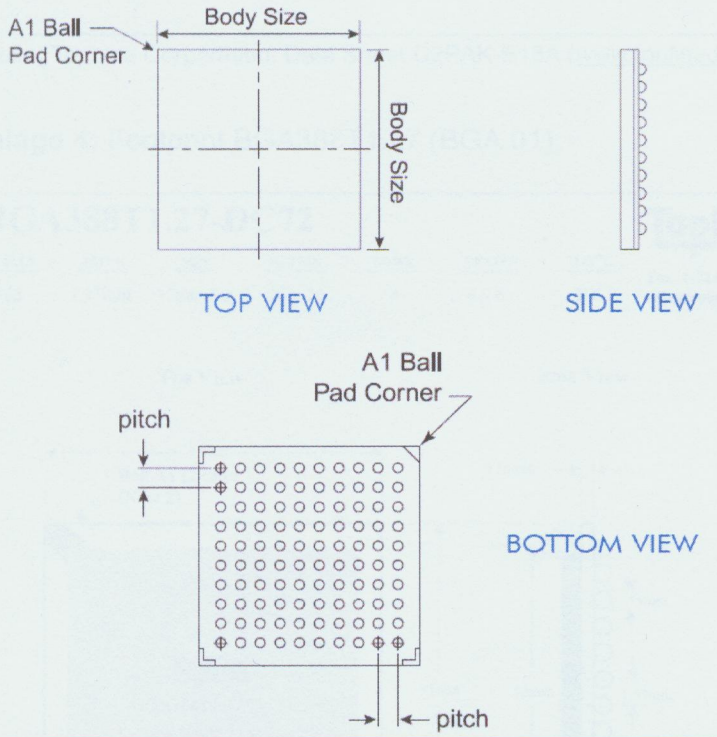
- 25% or less voiding of the ball x-ray image area.

Defect - Class 1,2,3

- More than 25% voiding in the ball x-ray image area.

Quelle: IPC-A-610D (siehe [5]), Abschnitt 8.2.12.4, Seite 8-83

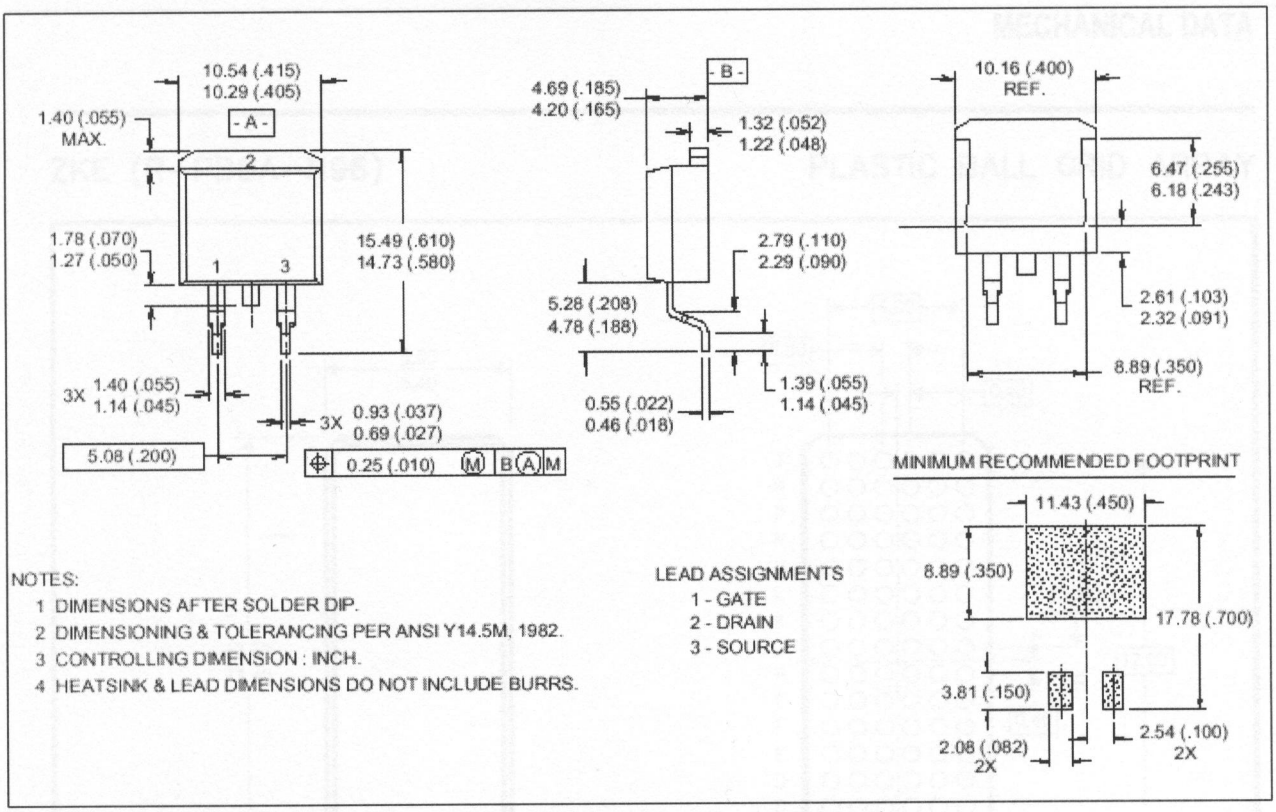
Anlage 2: Footprint CABGA256 (BG01, BE 2)



Ball Pitch	1.0	0.80	0.65	0.50
Body Size	Ball Count	Ball Count	Ball Count	Ball Count
15	160	208		256
15	176	273		
15	196	324		
15	144			
16		280	324	
16		285		
17	176	256		
17	208	272		
17	224	280		
17	228	292		
17	252	316		
17	256			
19	280	288		
19	289			
19	324			
21	256	449		
21	272			
21	316			
21	336			
21	400			

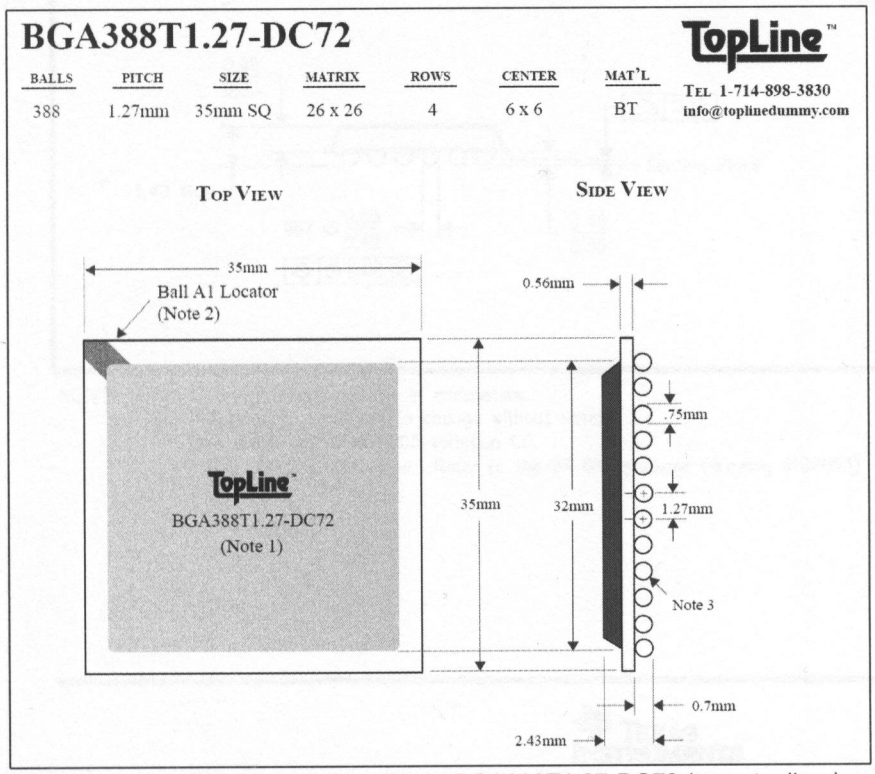
Quelle: Amkor Technology, Data Sheet DS550N, Rev Date 01/07 (www.amkor.com)

Anlage 3: Footprint TO263 (BG01, BE 3)



Quelle: TopLine Corporation, Data Sheet D2PAK-E13A (www.toplinedummy.com)

Anlage 4: Footprint BGA388T1.27 (BGA 01)

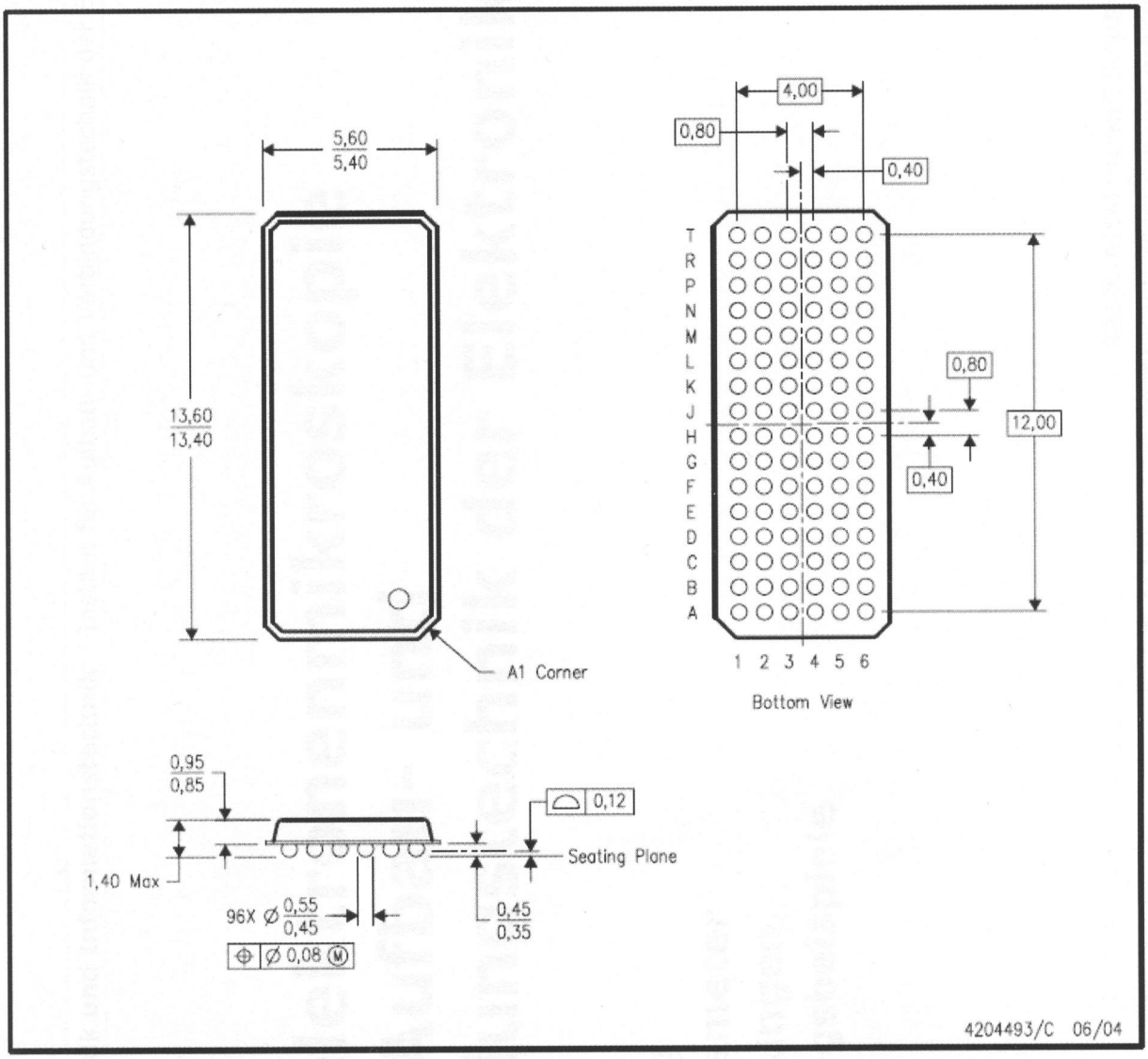


Quelle: TopLine Corporation, Data Sheet BGA388T1.27-DC72 (www.toplinedummy.com)

Anlage 5: Footprint PBGA96 (BGA 02)

MECHANICAL DATA

ZKE (R–PBGA–N96) PLASTIC BALL GRID ARRAY



NOTES:
A. All linear dimensions are in millimeters.
B. This drawing is subject to change without notice.
C. Falls within JEDEC MO–205 variation CC.
D. This package is lead–free. Refer to the 96 GKE package (drawing 4188953) for tin–lead (SnPb).

TEXAS INSTRUMENTS
www.ti.com

Quelle: Texas Instruments Incorporated (www.ti.com)

Rasterelektronenmikroskopie für die Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik

1 Einführung
2 Geräteparameter
3 Systemlösungen
4 Anwendungsbeispiele

Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop ZEISS SUPRA 40VP (Hersteller: Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen)

Anwendungen:

- **Strukturanalyse**
- **Untersuchungen der Materialentwicklung**
- **Elemente- und Schadensanalysen**

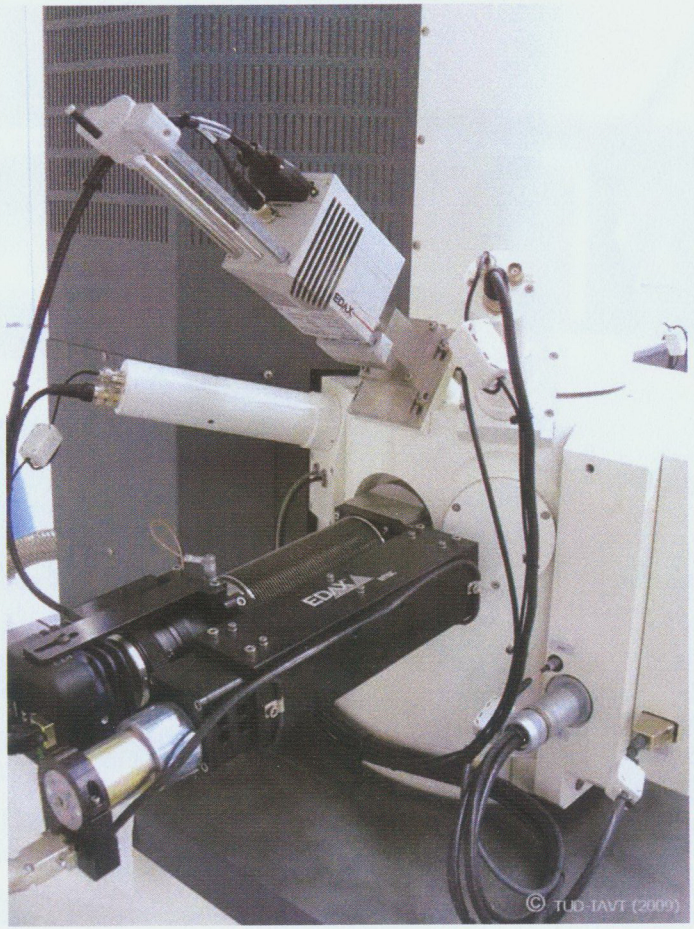
Besonderheiten:

- **GEMINI ® Säule**
- **5-achsiger Probentisch**
- **variables Vakuum 2 Pa bis 133 Pa**
- **VPSE Detektor für Abbildungen und Analysen von nichtleitenden Proben ohne vorherige Vorbereitung**

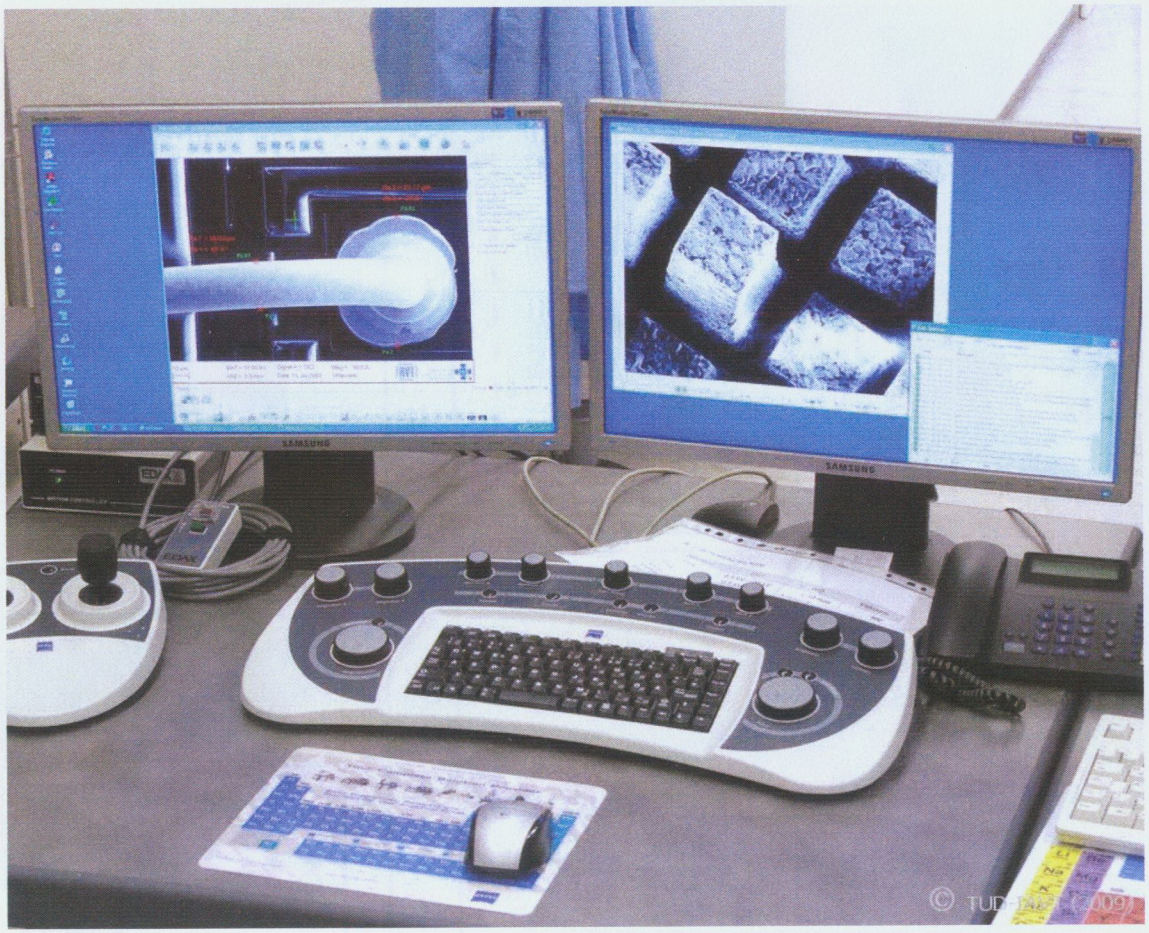
Wichtige Parameter:

1. ***Auflösung***
   1.3 nm @ 15 kV, 2.1 nm @ 1 kV, 5.0 nm @ 0.2 kV, 2.0 nm @ 30 kV (VP Mode)
2. ***Vergrößerung***
   12:1 bis 300000:1
3. ***Kathode***
   Thermischer SCHOTTKY- Feldemitter
4. ***Beschleunigungsspannung***
   0.02 kV bis 30 kV
5. ***Probenstrom***
   4 pA bis 10 nA (40 nA optional)
6. ***Standard Detektoren***

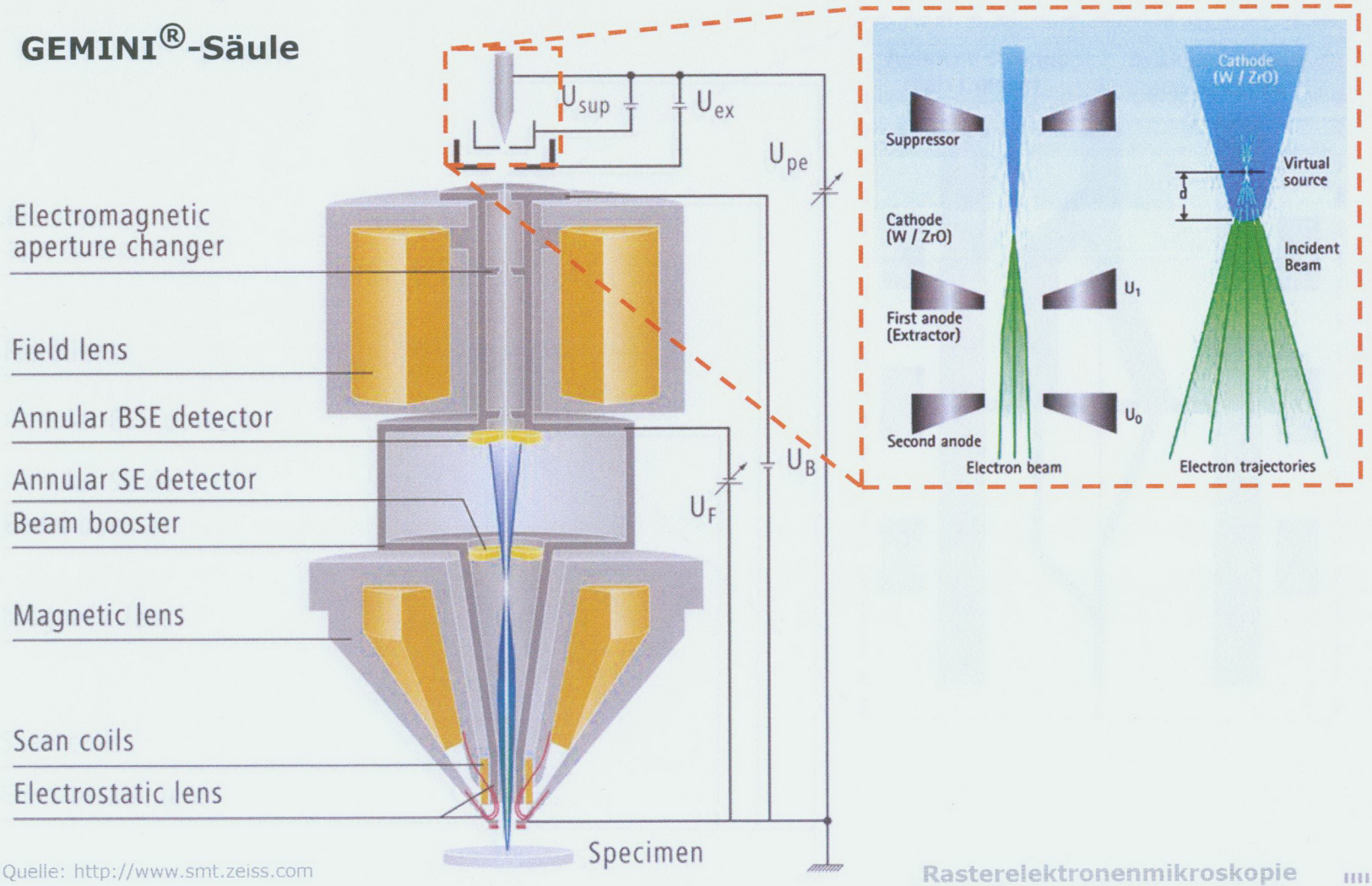
- **In-lens Detektor (WD 2 mm - 10 mm, HV)**
- **Everhart-Thornley Sekundärelektronen-(SE) Detektor (WD 4 mm - 20 mm, HV)**
- **VPSE Detektor (WD 8 mm - 20 mm, VP)**
- **EBSD Rückstreudetektor (WD 2 mm - 5 mm, HV)**



7. ***Kammerabmessungen***
   (Ø) 330 mm x (h) 270 mm
8. ***Probentisch***
   X = 130 mm, Y = 130 mm
   Z = 50 mm, T = -3° bis 70°,
   R = 360° (kontinuierlich)
9. ***Bildverarbeitung***
   bis 3072 pix x 2304 pix,
   siebenstufige Rausch-
   reduzierung
10. ***Bildausgabe***
    1024 pix x 768 pix
    Windows® Speicherung
11. ***Systemsteuerung***
    SmartSEM™-Software
    unter Windows® XP
    (Maus, Keyboard, Joystick
    und Control Panel)
12. ***Zubehör***
    Sputtercoater SC 7620 zur
    Probepräparation Au/Pd
    EDX- und EBSD-Analyse

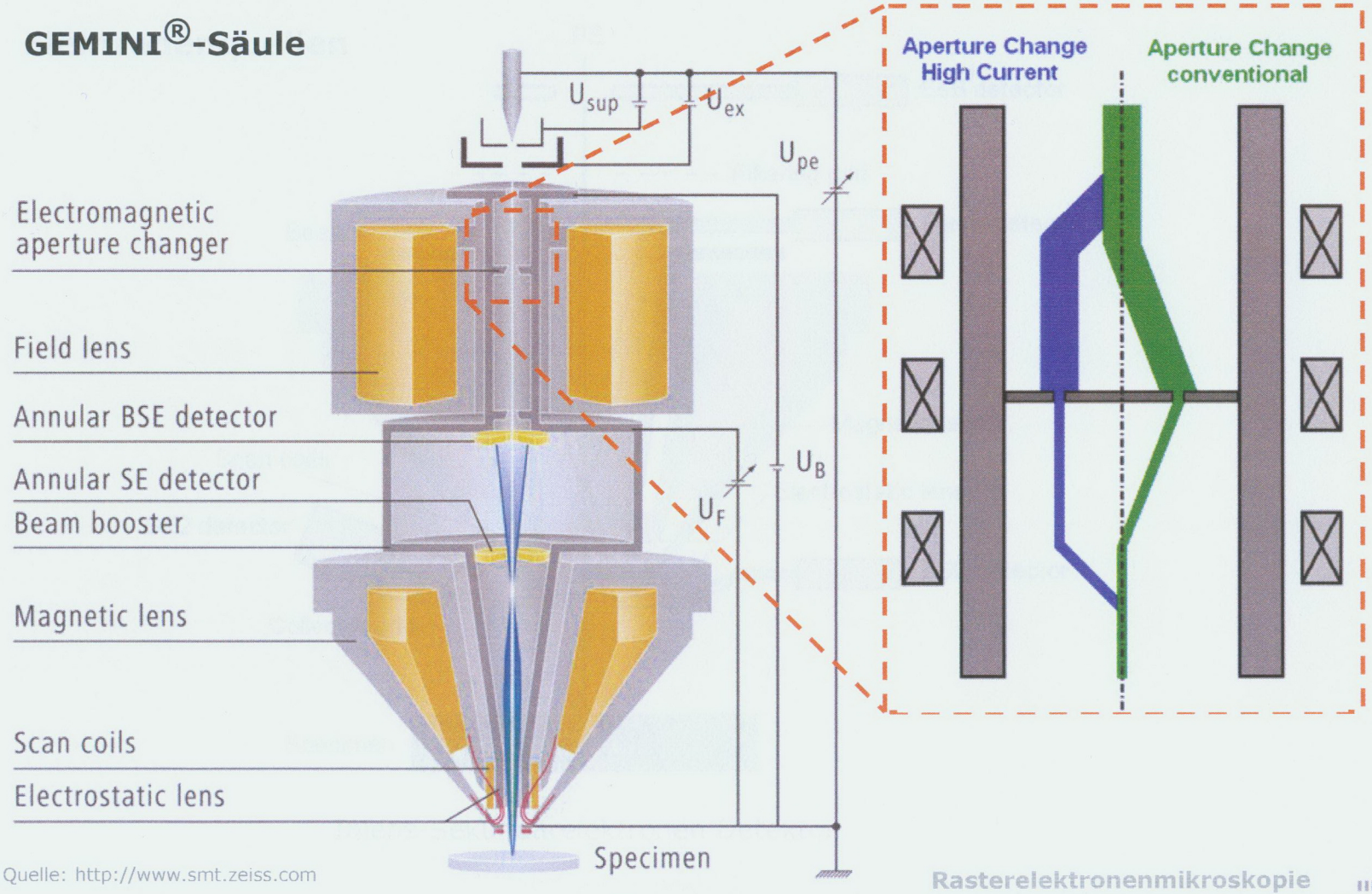


GEMINI®-Säule



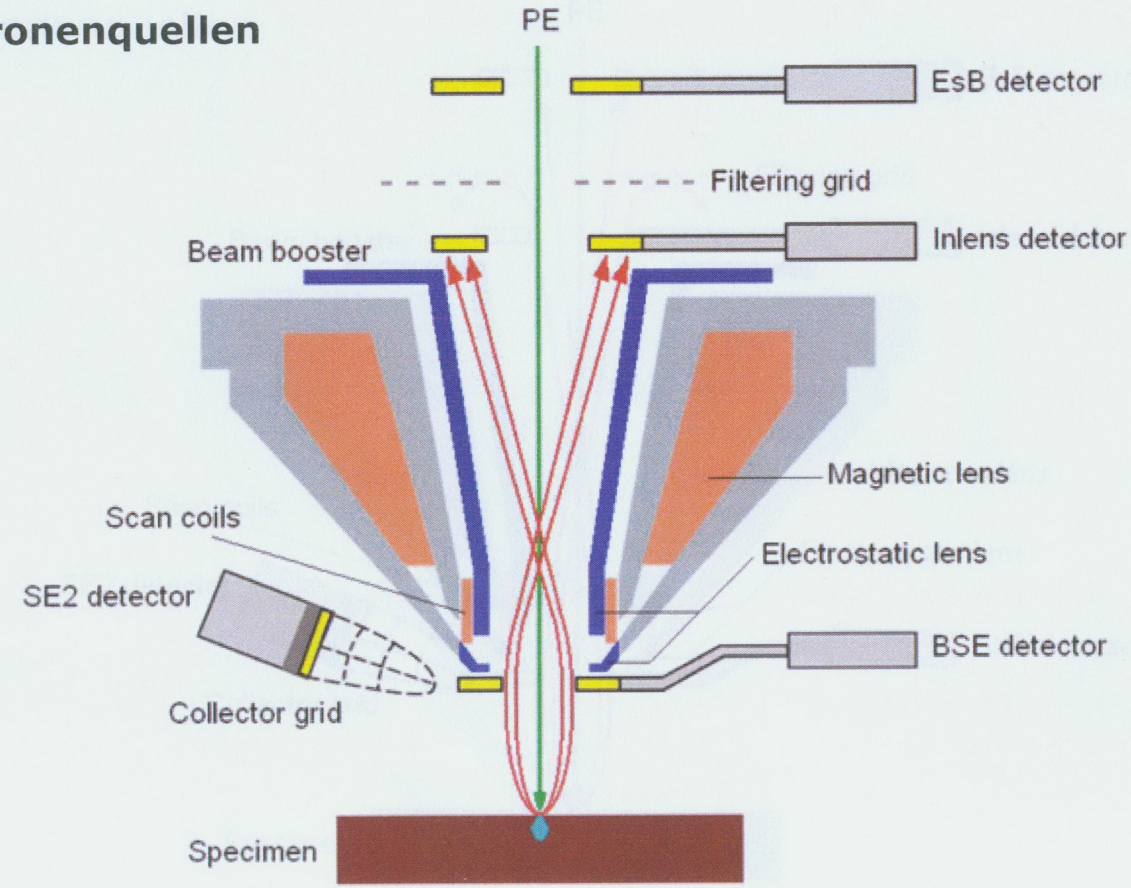
Quelle: http://www.smt.zeiss.com

GEMINI®-Säule



Quelle: http://www.smt.zeiss.com

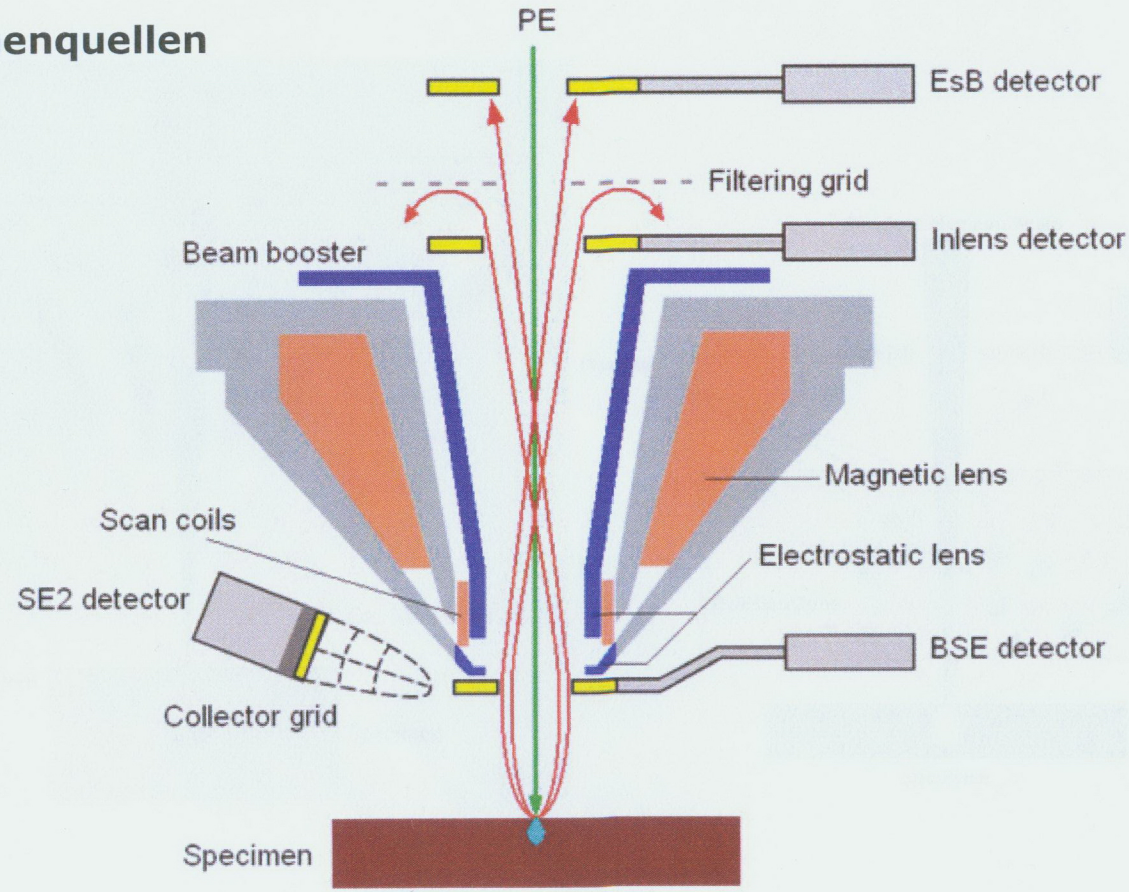
Elektronenquellen



Inlens-Sekundärelektronen Detektor

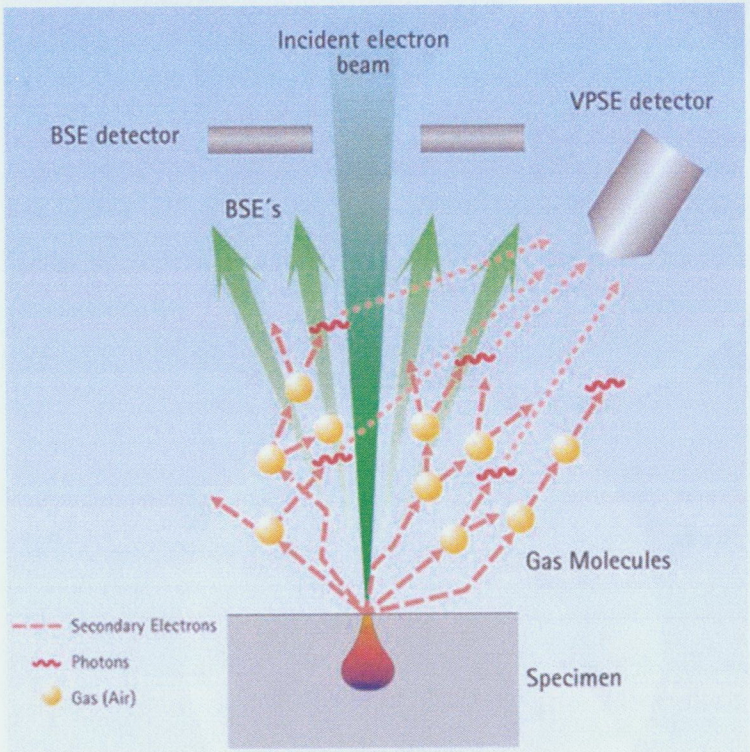
Quelle: http://www.smt.zeiss.com

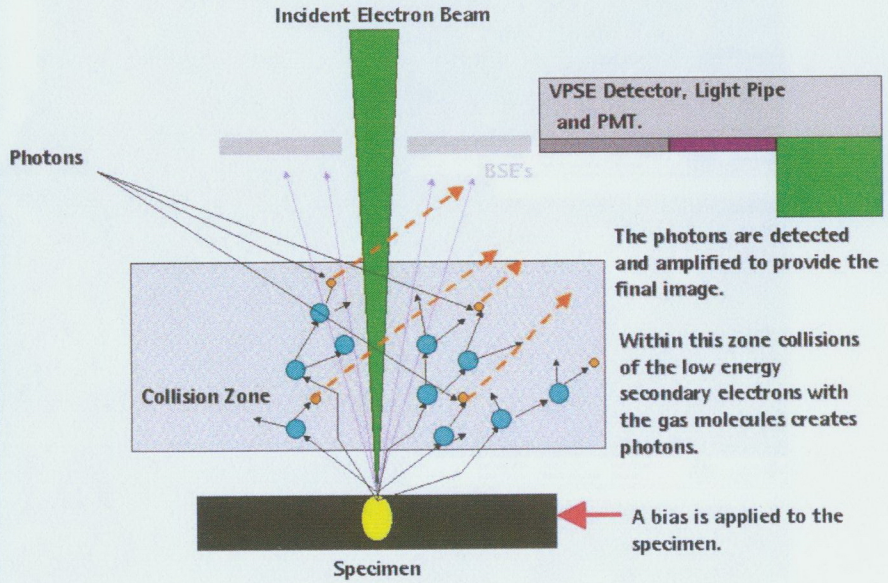
Elektronenquellen



Energie- und winkelselektiver Rückstreuelektronen-Detektor

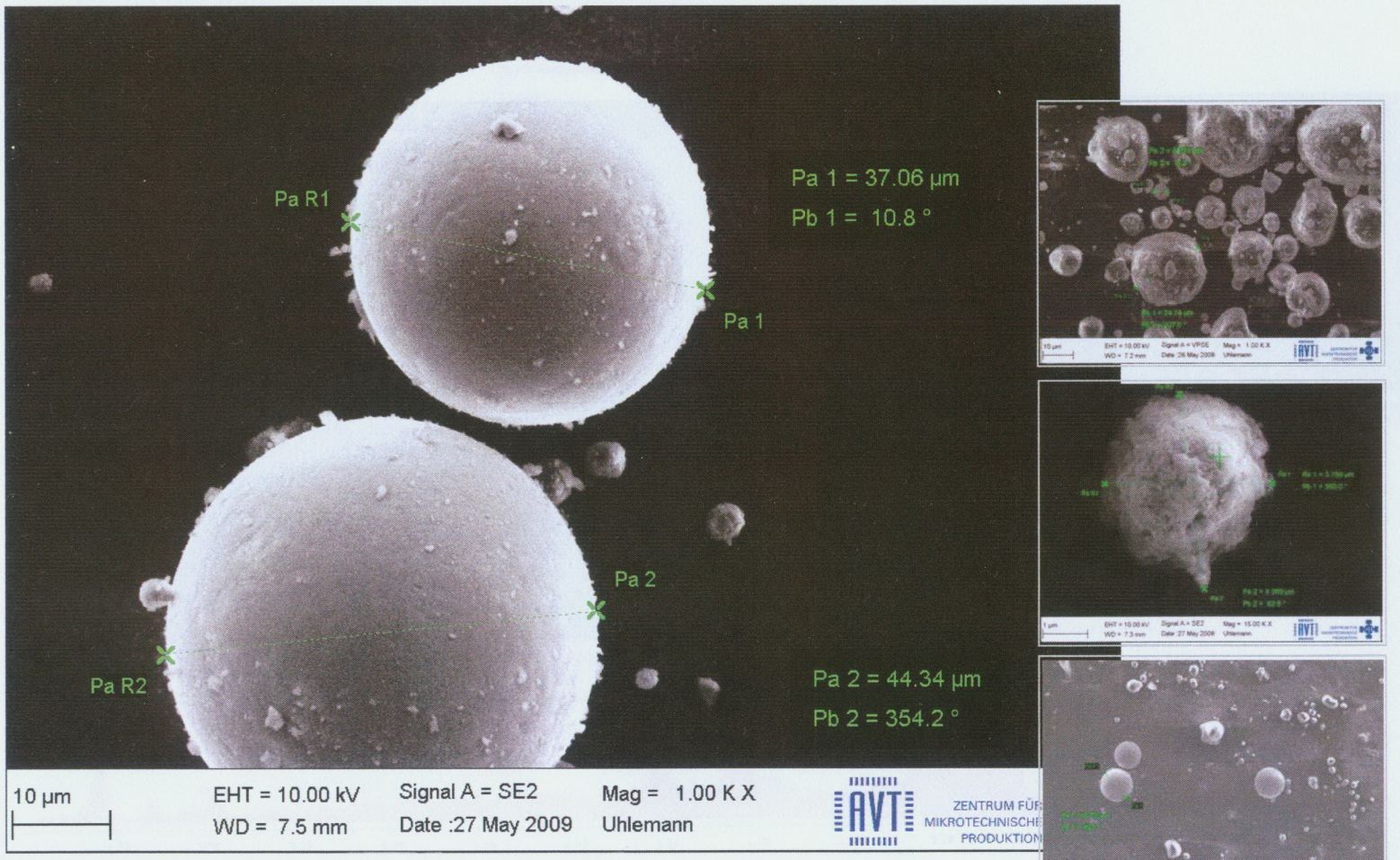
Quelle: http://www.smt.zeiss.com



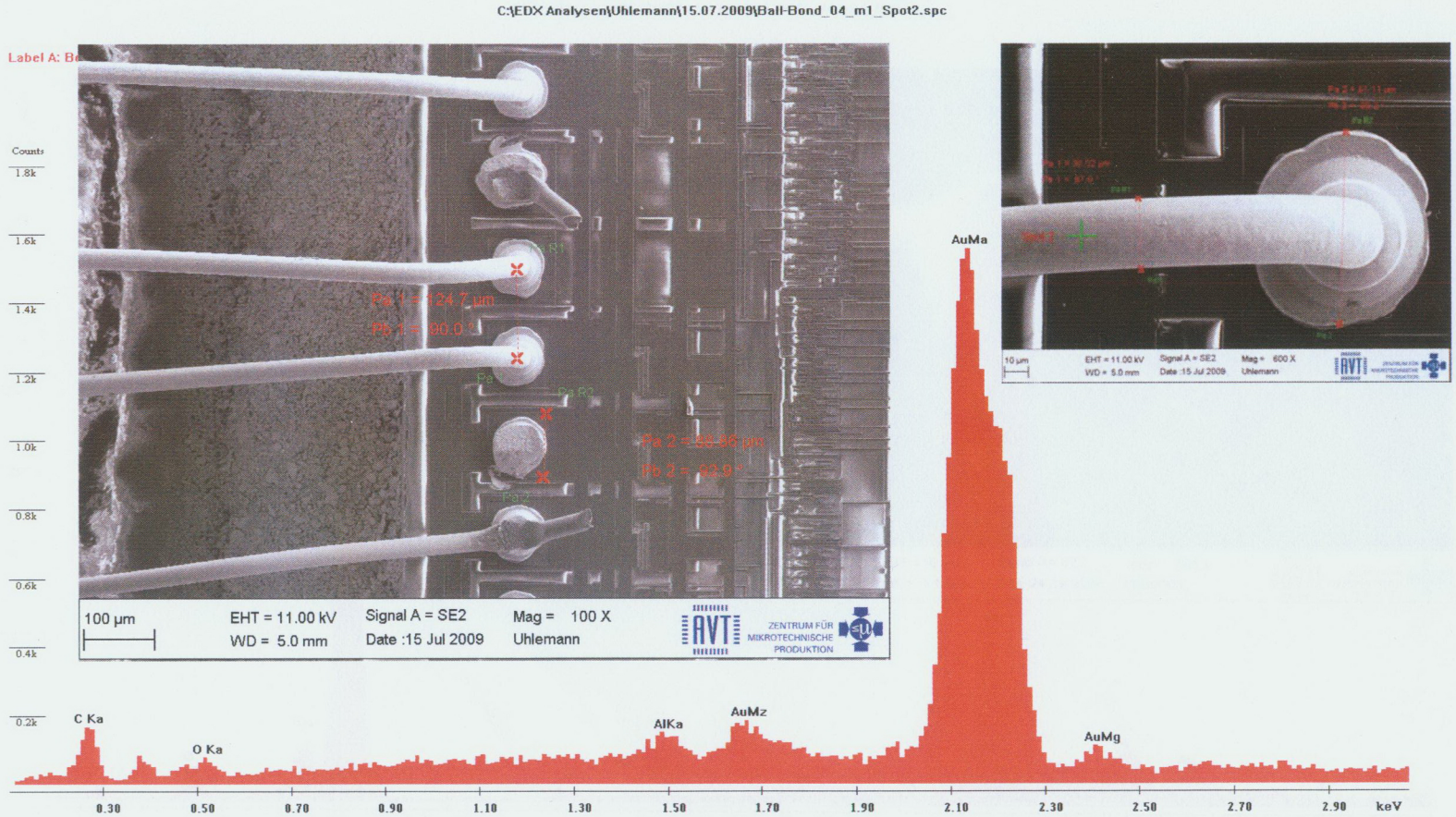


Variable Pressure Sekundär-Elektronen (VPSE) Detektor

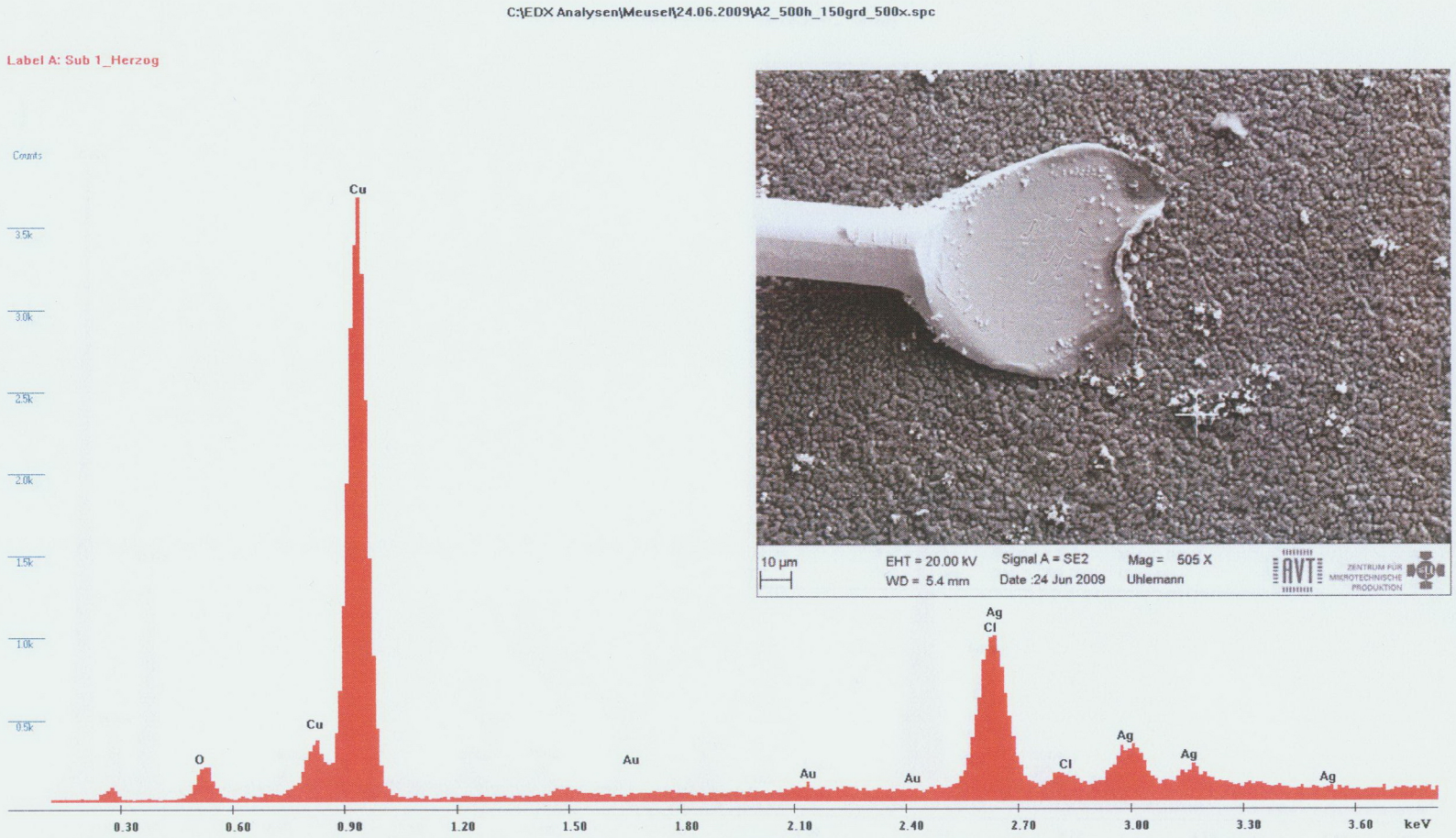
Quelle: http://www.smt.zeiss.com



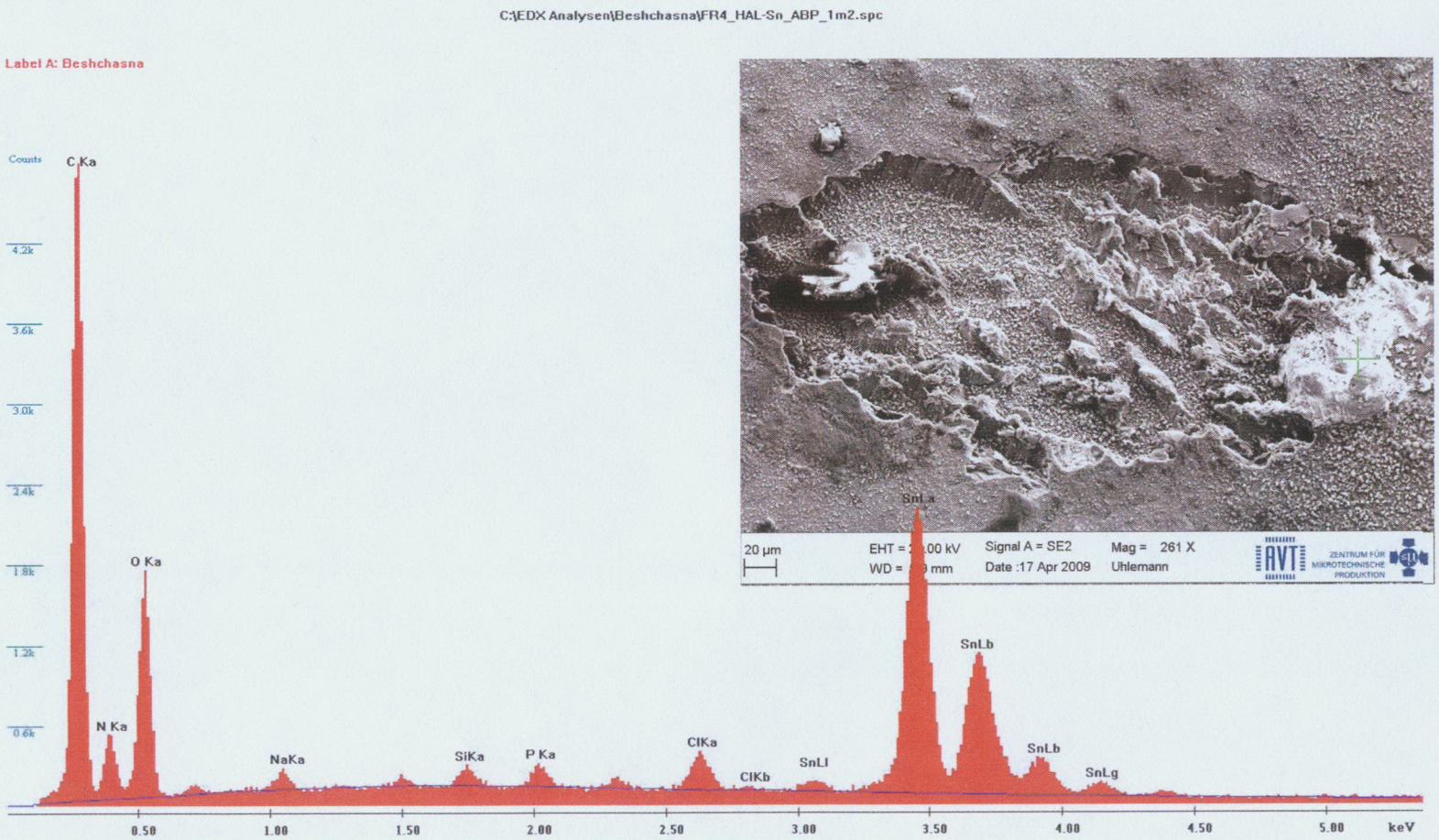
Partikelinspektion zur Herstellung von leitfähigen und dielektrischen Pasten



30 µm Golddrahtkontaktierung auf Schaltkreis (M 100:1, M 600:1, EDX)



Golddrahtkontaktierung auf chemisch Silber nach 500 Stunden Auslagerung bei 150°C



Bleifreies Lotfinish auf FR4 nach Kontakt mit künstlichem Blutplasma (t=30 d, T=60°C)