

Konstruktion und Fertigung elektronischer Baugruppen

Prof. Dr. Mathias Nowotnick

Impressum

Herausgeber:
Universität Rostock
Wissenschaftliche Weiterbildung
2014

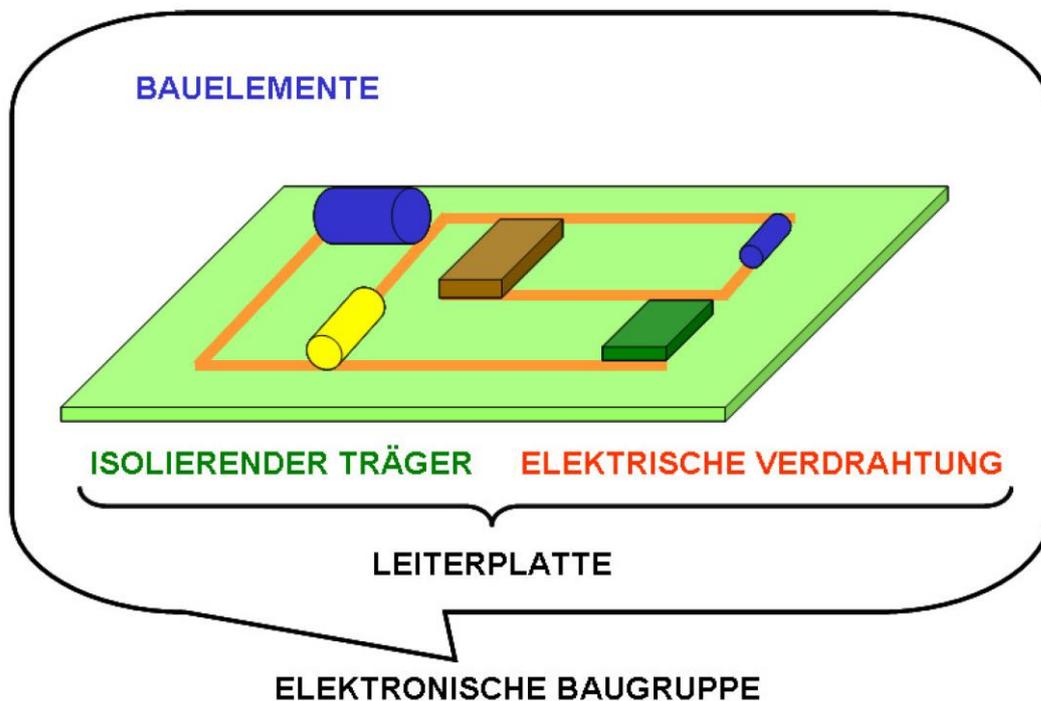
Erarbeitet von:
Prof. Dr. Mathias Nowotnick
Universität Rostock
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

Einführung

Elektronische Baugruppen – Begriffe und Geschichte

Elektronische Geräte sind in allen Bereichen des modernen Lebens anzutreffen. Dabei können diese elektronischen Geräte als eigenständige Einheiten oder als Bestandteil komplexer Systeme Verwendung finden. So befinden sich zum Beispiel in einem Kraftfahrzeug mehrere Dutzend elektronischer Geräte, vom Autoradio bis zur Motorsteuerung.

Kernstück dieser elektronischen Geräte sind die elektronischen Baugruppen. Diese Baugruppen bestehen aus den elektronischen Bauelementen, die in der Regel auf einer Leiterplatte montiert sind. Elektronische Bauelemente sind beispielsweise Widerstände, Kondensatoren, Spulen, Transistoren und integrierte Schaltungen. Die Leiterplatte dient sowohl als mechanischer Träger, auf dem die Bauelemente fixiert werden, als auch der elektrischen Verdrahtung. Das Substrat der Leiterplatte besteht deshalb aus einem elektrisch isolierenden Material. Moderne Leiterplatten werden häufig aus glasfaserverstärktem Epoxidharz hergestellt. Dieser Verbundwerkstoff besitzt hervorragende Isolationseigenschaften, eine gute thermische sowie mechanische Stabilität und ist darüber hinaus relativ preiswert herstellbar. **Leiterplatten** (LP) werden historisch bedingt häufig auch als "gedruckte Schaltungen" oder im Englischen als "Printed Wiring Board" (PWB) oder "Printed Circuit Board" (**PCB**) bezeichnet. Die Vielzahl der gebräuchlichen deutschen und englischen Begriffe gerade in der Elektroniktechnologie trägt leider nicht zur klaren Verständigung bei. Sie ist aber durch die schnelle weltweite Entwicklung bedingt und kaum vermeidbar, wobei die Standardisierung mit der technischen Entwicklung kaum Schritt halten kann. Die hierzulande gebräuchlichsten Begriffe sind im Text **fett** markiert.



Die elektrische Verdrahtung zwischen den Bauelementen erfolgt gemäß dem Schaltplan durch dünne Kupferleiterbahnen, die sich auf der Ober- und Unterseite sowie auch im Inneren des isolierenden Trägers befinden können. Die Übertragung des Schaltplans auf die reale physikalische Anordnung von Bauelementen, Verbindungen und Leiterbahnen, das sog. Layout, erfolgt heutzutage meist mittels hoch spezialisierter CAD-Software. Das manuelle Entwickeln und Zeichnen von Leiterplatten-Layouts stößt bei der Komplexität moderner Baugruppen schnell an seine Grenzen. Dagegen ist die CAD-Software in der Lage in gewissen Grenzen die

Verbindungsstrukturen zu optimieren (Auto-Routing) und gleichzeitig vorgegebene "Regeln" (Design Rules) bezüglich der Abmaße und Toleranzen zu berücksichtigen. Die durch die Software erzeugten Datensätze bilden die Basis für alle nachfolgenden technologischen Arbeitsschritte, wie Belichten, Bohren, Drucken, Bestücken etc. Ein typischer Vertreter dieser CADSoftware ist das Programm "Eagle". Diese Software steht im PC-Pool des Instituts für die Studenten zur Verfügung und ist unter <http://www.cadsoft.de/> auch als funktionsfähige Demo-Version erhältlich.

Der Vorteil des Aufbaus elektronischer Baugruppen mit "gedruckten Schaltungen" besteht darin, dass sich derartige Leiterplatten sehr gut in großen Stückzahlen und mit hoher Präzision produzieren lassen. Das ist eine wichtige Voraussetzung für die industrielle Fertigung und den massenhaften Gebrauch elektronischer Baugruppen, wie wir ihn heute antreffen können. Auch die extreme Miniaturisierung elektronischer Baugruppen und Geräte ist nur durch die industrielle Anwendung der Baugruppenteknologie auf der Basis der Leiterplattentechnik möglich.

Anwendung: Die Leiterplatte ist das am häufigsten eingesetzte Verbindungselement für elektronische Bauteile. Sie ist gekennzeichnet durch elektrisch leitende, fest haftende Verbindungen in oder auf einem Isolierstoff und dient zusätzlich als Bauelementeträger. Es können Informationen für Montage, Prüfung und Service aufgedruckt werden. (VDI/VDE-Richtlinie3710)

Funktionen: Positionierung und Fixierung der Bauelemente, Realisierung der elektrischen Verbindungen zwischen den Bauelementen, Realisierung der Isolation zwischen den Bauelementen Vorteile: reproduzierbare technologische und elektrische Verhältnisse; Herstellung in einheitlichen technologischen Schritten; hohe Komplexität unter definierten Bedingungen

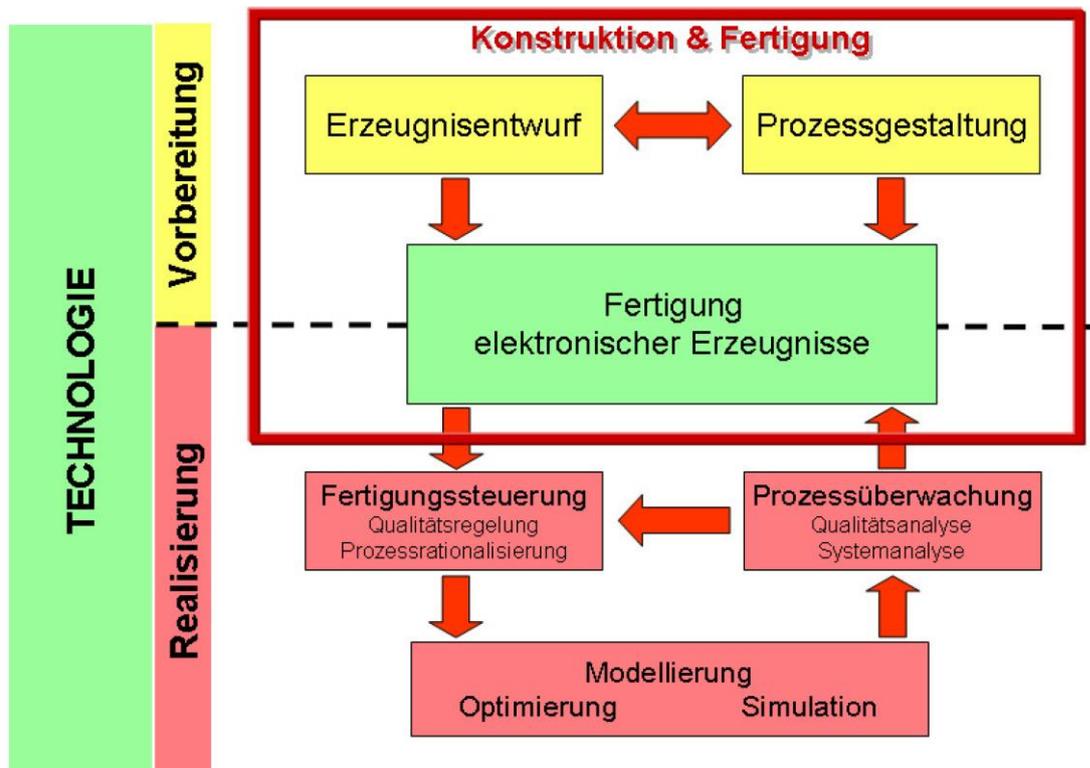
Nachteile: Änderungen in der Verdrahtung erfordern Neuerstellung des Layouts; hoher Vorbereitungsaufwand (rentiert sich mit steigender Stückzahl) i.d.R. nur zweidimensionale Anordnung der Bauelemente möglich

Die Geschichte der Leiterplattentechnik begann bereits vor über 100 Jahren. Der Durchbruch als industrielle Massentechnologie erfolgte aber vor allem in den 70 er und 80 er Jahren des vorigen Jahrhunderts.

- 1904 Leiterplattenkonzept von Albert Parker Hanson, erstes Patent: "Improvements in or Connected with Electric Cables and the Joining of the Same".
- 1906 Patent zur Herstellung von galvanischen Verbindungen mittels Auftragen von Metallpulver auf Isolatoren (EDISON).
- 1925 USA - Patent zur Herstellung von Leiterzügen unter Anwendung der Ätztechnik (2. März 1925, Charles Ducas); fast gleichzeitig (27.März 1925, César Pasolini) Patentanmeldung in Frankreich mit Formulierung der ersten Grundgedanken der Leiterplattentechnologie (Ätztechnik).
- 1927 Telefunken, Verdrahtung von Bauteilen mittels Messingstreifen.
- 1930 Hescho - Werke in Hermsdorf Aufdrucken von Leiterzügen auf Keramiksubstrat mittels Siebdrucktechnik (stellt heute noch die Grundlage für die Dickschichttechnik dar!) – "Gedruckte Schaltung".
- 1932 erste Leiterplatte mit genieteten Metallstreifen, Sachsenwerk Licht und Kraft AG
- 1936 Technologiepatente von Paul Eisler "Dielektrikum mit geätzten Cu-Bahnen";
- ab 1952 systematische Ablösung der konventionellen Verdrahtung durch die Leiterplattenverdrahtung
- 1956 serienmäßige Herstellung von Leiterplatten für die Metz – Radiowerke (Ing. F. Stahl)
- 1961 Patenterteilung für die Mehrlagenleiterplatte (Multilayer), Firma Hazeltyn (USA)

Konstruktion elektronischer Baugruppen

Beide Schwerpunkte, die "Konstruktion" und "Fertigung", sind wichtige Elemente der Technologie, wobei diese Begriffe nicht auf Produkte der Elektronik beschränkt sind, sich aber an diesem Beispiel gut erklären lassen. Nach Sauer stellt die Fertigung, wie im Bild unten dargestellt, das zentrale Element der Technologie dar, wobei alle anderen Abläufe das Ziel haben, die Fertigung sicherzustellen und zu optimieren.



Quelle: W. Sauer, TU Dresden

Für die Konstruktion (auch *Design* oder *Gestaltung*) eines technischen Produktes sollten folgende Grundsätze berücksichtigt werden:

- Das Produkt muss funktionieren, d.h., es muss die gewünschte Funktion in allen vorgesehenen Einsatzfällen so gut wie erforderlich erfüllen.
- Das Produkt muss herstellbar sein, d.h., es muss mit möglichst geringem Aufwand überhaupt realisierbar sein.
- Das Produkt muss ökonomisch sein, d.h. es muss servicefreundlich, energieeffektiv, recyclingfreundlich und fertigungsökonomisch sein.
- Das Produkt muss ästhetisch sein, d.h., es muss gestalterischen Ansprüchen genügen und sich in seine Umwelt gut einfügen.

Wenn auch im Produktionsprozess die Konstruktion in der Reihenfolge vor der Fertigung stattfinden muss, ist für den Konstrukteur eine genaue Kenntnis der Fertigung sehr wichtig. Aus diesem Grund wird auch in dieser Vorlesung die Konstruktion zeitlich nach der Fertigung vermittelt. In der Praxis wird diesem Aspekt, der auch mit dem Schlagwort "fertigungsgerechtes Design" beschrieben werden kann, leider nicht immer die angemessene Bedeutung beigemessen. Das führt in der Regel zu unnötigen Problemen in der Fertigung, erhöhten Ausschuss- oder Nacharbeitsquoten und damit zu zusätzlichen Kosten.

Der **Konstruktive Entwicklungsprozess (KEP)** umfasst alle zur Vorausbestimmung eines technischen Produktes notwendigen gedanklichen, manuellen, grafischen und rechentechnischen Operationen, die ausgeführt werden müssen, um von einer vorgegebenen konstruktiven Aufgabenstellung zu einer für die Produktion und für den Einsatz hinreichenden Beschreibung des technischen Produktes zu gelangen. Der KEP ist ein Teil der technischen Vorbereitung der Produktion.

Am Anfang steht in der Regel die Funktionsbeschreibung der Baugruppe, aus der sich der elektrische Schaltplan ergibt. Bereits hier werden grundsätzliche Entscheidungen getroffen, da spezielle Bauelemente zwangsläufig zu bestimmten Hardwarelösungen führen. Insbesondere komplexe Bauelemente wie Mikroprozessoren, aber auch HF- oder Leistungsbaulemente sind funktionsbedingt in sehr speziellen Gehäuseformen (*Packages*) verfügbar, die kaum Alternativen zulassen.

Weitere Randbedingungen, die dem Konstrukteur oft wenig Spielraum lassen, werden durch die Anwendung selbst vorgegeben. Bestimmte Anzeige- und Bedienelemente müssen zweckmäßig und ergonomisch sinnvoll positioniert werden. Dabei sollten auch die Umgebungsbedingungen der Baugruppen dem Konstrukteur möglichst genau bekannt sein. Dazu zählt auf jeden Fall die Umgebungstemperatur. Aber auch Feuchtigkeit, Drücke, aggressive Medien, Erschütterungen oder Beschleunigungen können je nach Anwendung von Bedeutung sein.

Bei komplexen Produkten ist dazu in der Regel die Erstellung eines Lastenheftes sowie eines Pflichtenheftes erforderlich.

Das Lastenheft

Der Auftraggeber erstellt das Lastenheft. Es enthält die Forderungen an den Auftragnehmer und dient als Grundlage beim Einholen von Angeboten.

Das Pflichtenheft

Der Auftragnehmer erstellt ein Pflichtenheft. Es beschreibt die detaillierte Umsetzung des Lastenhefts. Das Pflichtenheft bildet die Basis für die vertraglich festgehaltenen Leistungen des Auftragnehmers. Beide Partner legen sich fest und sichern sich ab. Zu diesem Zweck kann eine Verteidigung des Pflichtenheftes unter Einbeziehung von Experten und Kooperationspartnern durchgeführt werden.

Die Struktur und typische Inhalte eines Pflichtenheftes (Beispiel) stellen sich wie folgt dar:

1. Zielbestimmung

- 1.1. *Musskriterien*
- 1.2. *Wunschkriterien*
- 1.3. *Abgrenzungskriterien*

2. Produkteinsatz

- 2.1. *Anwendungsbereiche*
- 2.2. *Zielgruppen*
- 2.3. *Betriebsbedingungen*

3. Produktumgebung

- 3.1. *Software*
- 3.2. *Hardware*
- 3.3. *Orgware*
- 3.4. *Produkt – Schnittstellen*

4. Produktfunktionen

4.1. *(Produktspezifisch)*

5. Produktdaten

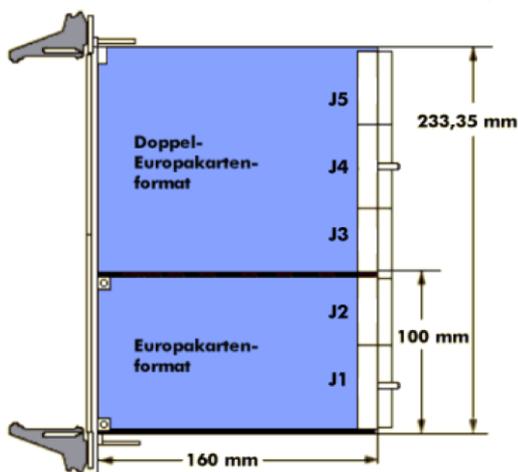
- 5.1. (Produktspezifisch)
6. Produkt – Leistungen
7. Benutzungsoberfläche
8. Qualitäts-Zielbestimmung
9. Globale Testszenarien/Testfälle
10. Entwicklungsumgebung
11. Ergänzungen
12. Glossar, Begriffslexikon

Bei der Gestaltung eines Produktes sind folgende Eigenschaften festzulegen:

1. **Geometrische Eigenschaften**, also die Form und die Abmessungen: z.B. Abmessungen und Form von Leiterplatten, Padformen, Konturabstände, Bauelementeformen u.a.
2. **Stoffliche Eigenschaften**, also die Werkstoffe mit ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften: Signallaufzeiten, Spannungsfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Kapazitätswerte, Wellenwiderstand u.a.
3. **Zustandseigenschaften**, also Materialzustände wie Temperatur, Vorspannung, Magnetisierung: Arbeitspunkt, Magnetisierbarkeit, Spannung, Strom, Temperaturempfindlichkeit, Verstärkung u.a.

Die Darstellung der Konstruktion erfolgt durch **technische Zeichnungen** (z.B. Layoutzeichnung), die durch weitere **Listen** (z.B. Stückliste) und **Pläne** (z.B. Schaltplan) ergänzt werden können. Bei einer technischen Zeichnung sind, unabhängig davon ob diese manuell am Reißbrett oder computergestützt mit einer CAD-Software erstellt werden, eindeutige Darstellungen und Informationen zu gewährleisten. Dazu gehören neben den Daten des konstruierten Objektes (Benennung, Maße, Toleranzen, Materialien, Oberfläche) auch wichtige Angaben zum Konstrukteur (Name, Firma) und zur Technischen Darstellung selbst (Datum, Zeichnungsnummer, Blatt). Typische technische Darstellungen bei der Konstruktion eines elektronischen Gerätes sind der, Schaltplan, das Leiterplattenlayout, der Bestückungsplan, der Bohrplan, Zeichnungen des Gehäuses, der Frontplatte etc.

Die Erstellung eines **Leiterplattenlayouts** anhand des Schaltplanes und der Bauelementevorgaben ist ein erster Schritt bei der Konstruktion elektronischer Baugruppen. Das entwickelte Layout, wie es z.B. mit dem CAD-Programm Eagle erstellt wird, erfordert die anschließende Überprüfung und Korrektur durch den Konstrukteur, wobei die Angaben zu den Leiterplattenmaterialien und deren physikalische Eigenschaften ergänzt werden müssen. In einfachen Fällen kann man natürlich auf kostengünstige Standardlösungen zurückgreifen. Eine solche Standardlösung stellt z.B. das zweiseitig mit Kupfer beschichtete Leiterplattenmaterial FR4 dar, mit einer Dicke von ca. 1,5 mm und Kupferfolien mit 35 µm oder 18 µm Stärke. Selbst für die Kantenmaße der Leiterkarten gibt es Standardvorgaben, so sind das "Europakarten-Format" mit 100x160 mm² oder das "Doppel-Europakarten-Format" mit 160x233 mm² sehr weit verbreitet [entsprechend Standard IEC 60297].



Neben den geometrischen Abmaßen spielen bei einer elektronischen Baugruppe natürlich die elektrischen Eigenschaften eine wichtige Rolle. Die elektrischen Ströme erfordern einen minimalen Leitungsquerschnitt, der durch die Dicke des Kupfers und die Leiterbreite auf der Leiterplatte eingestellt werden kann. Aber auch die Durchkontaktierungen, Stecker, Kabel und Verbindungen müssen entsprechend der Stromstärke dimensioniert werden. Bei Wechselspannungen über 25 V und Gleichspannungen über 60 V (Schutzkleinspannung, *SELV = Safety Extra Low Voltage*) müssen Maßnahmen zum Schutz vor Berührungen getroffen werden. Für Hochspannungen (über 1 kV) müssen besondere Maßnahmen zur Isolation getroffen werden, da auch die Luft bei geringen Abständen kein hinreichendes Dielektrikum darstellt. Für hohe Frequenzen müssen neben dem ohmschen Widerstand auch die Impedanzen der elektrischen Strukturen, die Stromverdrängung aus dem elektrischen Leiter (*Skin-Effekt*) sowie mögliche induktive und kapazitive Kopplungen berücksichtigt werden.

Die elektrische Verlustleistung hat auch eine Erwärmung der Baugruppen zur Folge, deshalb müssen auch die thermischen Eigenschaften der Baugruppen angepasst werden. Dazu zählen Maßnahmen zur Begrenzung und Verteilung der Wärme sowie zur Kühlung, wie z.B. Kühlkörper oder Lüfter.

Der Aspekt der Zuverlässigkeit spielt bei der Konstruktion ebenfalls eine wesentliche Rolle. Gerade Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Sicherheit der Baugruppen, wie die Medizintechnik, die Luft- und Raumfahrt oder die Automobiltechnik haben deshalb eigene Normen und Vorgaben entwickelt, die zu beachten sind. So müssen unter Umständen Systeme redundant oder erstfehlersicher aufgebaut sein. Bestimmte Materialien und Technologien können auch generell verboten werden. So dürfen in der Militärtechnik z.B. keine Bauelemente mit vergoldeten Anschlüssen verlötet werden (da die Sn-Au-Phase zum Verspröden der Lötstellen führen kann und bei hohen mechanischen Belastungen Ausfälle befürchtet werden) oder in der Luft- und Raumfahrt sind reine Zinnschichten verboten (da bei sehr tiefen Temperaturen die gefürchtete "Zinnpest" auftreten kann, die zum Zerfall der Lötverbindungen führt).

Fertigung elektronischer Baugruppen

Voraussetzung für die Fertigung ist sowohl der Entwurf des Erzeugnisses (oder Produktes) sowie die Gestaltung des Fertigungsprozesses. Dazu gehören technische, logistische und ökonomische Aufgaben. Der Erzeugnisentwurf wird auch als Konstruktion bzw. Design bezeichnet. Sind das Erzeugnis und dessen Fertigungsprozesse gut vorbereitet, kann die Realisierung (Produktion) erfolgen. Je nach Komplexität des Produktes und der Fertigungsprozesse sind zur Sicherung der Qualität Überwachungs- und Steuerungsmaßnahmen notwendig. Das Qualitätsmanagement für die Fertigung hochwertiger Produkte, wie das in der Elektronik der Fall ist, wird in den Europäischen Normen ISO9000/9001 geregelt.

Der Begriff "Technologie" stammt aus den Anfängen der organisierten Fertigung und wurde erstmalig 1780 durch Johann Beckmann geprägt. *"Technologie ist die Wissenschaft, welche die Verarbeitung der Naturalien, oder die Kenntniß der Handwerke, lehrt. Anstat daß in den Werkstellen nur gewiesen wird, wie man zur Verfertigung der Waaren, die Vorschriften und Gewohnheiten des Meisters befolgen soll, giebt die Technologie, in systematischer Ordnung, gründliche Anleitung, wie man zu eben diesem Endzwecke, aus wahren Grundsätzen und zuverlässigen Erfahrungen, die Mittel finden, und die bey der Verarbeitung vorkommenden Erscheinungen erklären und nutzen soll."*

Mit der steigenden Produktivität und dem verstärkten internationalen Austausch von Waren, aber auch durch die Mobilität der Handwerker und Fachleute, wurde schon im 18. Jahrhundert eine genaue Beschreibung und Systematisierung der Fertigungsabläufe notwendig. Dieser wissenschaftliche Ansatz war damit auch Wegbereiter für die beginnende Industrialisierung des folgenden Jahrhunderts.

Heute unterteilt man (Deutsches Institut für Normung - DIN) die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen, entsprechend DIN 8580.

Hauptgruppen	Beispiele aus der Elektronik
Urformen (DIN 8583 – 8587)	Vergießen (Chips, Trafos)
Umformen (DIN 8582)	Biegen von Anschlussdrähten (Sicken)
Trennen (DIN 8588 - 8592)	Leiterplatten aus dem Nutzen (Brechen)
Fügen (DIN 8593)	(Weich-) Löten (LötKolben)
Beschichten	Drucken von Lotpaste (Schablone)
Stoffeigenschaften ändern	Härten von Klebstoff (SMD-Kleben)

Bei der Systematisierung der Fertigungsverfahren betrachtet man den Einfluss des Verfahrens auf den zu bearbeitenden (Werk-) Stoff, dessen äußere Form und innerer Zusammenhalt verändert werden können. Entsprechend dem Bild (unten) kann die Form "geschaffen", nämlich aus einem formlosen Stoff, und anschließend "verändert" werden. Der Stoffzusammenhalt, d.h. die Kohäsion, kann "geschaffen", "beibehalten", "vermehrt" oder "vermindert" werden. Dabei hat eine Veränderung des Stoffzusammenhaltes auch immer eine Änderung der Form zur Folge. Eine Sonderstellung nimmt hier das Ändern der Stoffeigenschaften ein, bei der weder die Form noch der Zusammenhalt verändert werden. So kann z.B. beim Bleichen die Farbe eines Stoffes "entfernt" werden (in Wirklichkeit sind nach dem Bleichen mehr Farben vorhanden als vorher), ohne dass das Produkt seine Form oder den Zusammenhalt verändert.

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		Stoffeigenschaftsändern
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	

Diese Unterscheidung der Fertigungsverfahren ist aber nur eine grobe Systematisierung, denn jede dieser Hauptgruppen kann in eine Vielzahl weiterer Untergruppen eingeteilt werden. Bei der weiteren Zuordnung am praktischen Einzelfall stellt man schnell fest, dass die Einteilung oft nicht eindeutig anzuwenden ist. So kann z.B. ein Niet umgeformt werden (Umformen) und dadurch ein Zusammenhalt zwischen zwei Teilen (Fügen) entstehen. Eine Verknüpfung der Hauptgruppen in der Form "Fügen durch Umformen" ist deshalb oft sinnvoll, wobei sogar scheinbar paradoxe Kombinationen wie "Fügen durch Trennen" (*Fällt Ihnen ein Beispiel ein?*) möglich sind. Oft ist die Frage, wie Form und Zusammenhalt verändert werden nur graduell zu beantworten. Gerade beim Stoffeigenschaftsändern ist diese Wechselwirkung nicht immer gleich offensichtlich. Bei dem oben genannten Beispiel des Bleichens, z.B. von Textilien, kann der so gebleichte Stoff "morsch" werden. Das bedeutet, dass der Stoffzusammenhalt geringfügig vermindert wurde, so dass es am Ende sogar zum "Trennen" (d.h. Reißen) des Stoffes kommen kann. Umgekehrt verändert jedes der fünf erstgenannten Fertigungsverfahren fast immer auch die Stoffeigenschaften. Wenn ein Metallteil geschweißt wird, kann es sich verfärben und seine Festigkeit verlieren (ausglühen).

In der Praxis ist die Zuordnung der einzelnen Fertigungsverfahren zu den Haupt- und Untergruppen nicht immer eindeutig möglich. Das ist aber auch für die technologische Praxis nicht erforderlich, da es nicht darum geht, einen bestehenden Fertigungsprozess in ein theoretisches Schema zu zwingen. Wichtig ist hingegen, bei der Entwicklung eines neuen Produktes und der Realisierung seiner Fertigung systematisch nach geeigneten Verfahren zu suchen. Wenn z.B. zwei Teile, ein Stecker mit einem Kabel, verbunden werden sollen, sucht man folgerichtig nach "Fügeverfahren". Im zweiten Schritt stellt sich meistens die Frage, ob die Verbindung "nicht lösbar" oder "lösbar" sein soll, d.h. ob das Fügeverfahren zu einer dauerhaften Verbindung (stoffschlüssig) oder zu einer lösbaren Verbindung (form- oder kraftschlüssig) führen soll. Weitere Kriterien sind dann die an die Verbindung gestellten Anforderungen bzgl. Festigkeit, Leitfähigkeit etc. So werden die bekannten Verfahren systematisch eingegrenzt, bis am Ende die Entscheidung getroffen werden kann: "Der Stecker wird an das Kabel geschweißt!". Die Technologie mit ihrer Systematik erleichtert und verbessert also die Umsetzung von der Entwicklung eines Produktes bis zu dessen (industrieller) Fertigung, d.h. bis zur Produktion.

Da die industrielle Herstellung von Produkten immer eng mit deren Vermarktung verknüpft ist, liegt in der Technologie ein wesentlicher Schlüssel für den wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes und damit auch des produzierenden Unternehmens. Gerade in der Elektronik sind die Ansprüche oft sehr hoch, mit Fehlerraten von wenigen fpm (failures per million / fehlerhafte Teile pro eine Million Stück) und gleichzeitig sinkenden

Gewinnspannen von Massenprodukten. Die Entscheidung für eine "falsche" Technologie bedeutet damit häufig auch das "Aus" für ein Produkt.

Fügen, Löten

Dem Fügen kommt im Fertigungsprozess eine besondere Bedeutung zu, da auf diese Weise aus einzelnen Komponenten und Materialien ein Gesamtsystem bzw. ein Produkt entsteht. Deshalb soll das Fügen und insbesondere das Löten hier explizit behandelt werden. Die Norm beschreibt das Fügen als Verfahren, das eine Erhöhung des Stoffzusammenhalts und eine Veränderung der Form bewirkt. Das Fügen wird außerhalb der Norm auch als Verbinden oder Verbindungstechnik bezeichnet. Das Ergebnis des Fügeprozesses ist die Verbindung oder genauer gesagt die Fügeverbindung. Der Teilbegriff Füge in der Wortzusammensetzung kann durch die jeweilig zur Anwendung kommenden Fügeverfahren präzisiert werden, also: Schweißverbindung, Schraubverbindung, Klebverbindung etc.

Für die Konstruktion sind allerdings die Eigenschaften der erzeugten Fügeverbindung von größerer Bedeutung als das Verfahren, durch das diese realisiert wurden. Aus diesem Grund erfolgt die Systematisierung zweckmäßigerweise entsprechend dem Verbindungstyp. Die Kenntnis der charakteristischen Merkmale der verschiedenen Arten von Fügeverbindungen ist eine wichtige Voraussetzung für die Betrachtung ihrer Zuverlässigkeit unter Betriebsbedingungen. Grundsätzlich wird zwischen:

- formschlüssigen,
- kraftschlüssigen und
- stoffschlüssigen

Fügeverbindungen unterschieden. Die genannten Klassen werden durch die im unten stehenden Bild dargestellten Merkmale charakterisiert, wobei sichtbar wird, dass die stoffschlüssigen Fügeverbindungen die Merkmale aller übrigen Klassen einschließen.

Fügeverbindungsklasse	Realisierung des Merkmales		
	Vereinigung der Stoffe	Wechselwirkung von Kräften	Anpassung von Oberflächen
stoffschlüssige Fügeverbindungen	<i>erfüllt</i>	<i>erfüllt</i>	<i>erfüllt</i>
kraftschlüssige Fügeverbindungen	--	<i>erfüllt</i>	<i>erfüllt</i>
formschlüssige Fügeverbindungen	--	--	<i>erfüllt</i>

Erfüllung der Klassenmerkmale in Fügeverbindungen [Wit-85]

Typische Beispiele aus den Bereichen der Elektrotechnik und Elektronik für die drei genannten Klassen sind:

- formschlüssig gesteckte Drahtbauelemente auf der Leiterplatte vor dem Löten
- Kabelbinder mit Widerhaken und Ösen
- Knoten beim Binden von Kabelbäumen

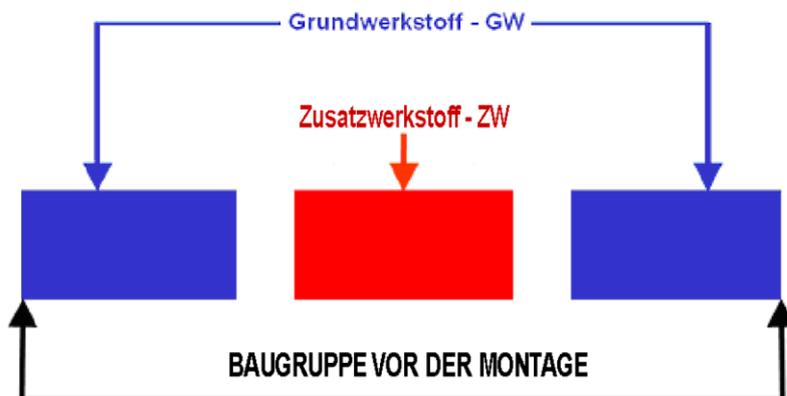
kraftschlüssig Steckverbinder (aufgrund der Federkräfte der Kontakte)
 Schrauben, Federringe
 Einpressverbindungen (engl. *press fit*), z.B. Leistungsdioden in Kühlblech
 stoffschlüssig Klebverbindungen, z.B. SMD vor dem Wellenlöten
 Lötverbindungen, z.B. Weichlötverbindungen auf Leiterplatten
 Schweißverbindungen, z.B. Golddrähte an Si-Chips

Formschlüssige und kraftschlüssige Fügeverbindungen werden hauptsächlich als lösbare Verbindungen eingesetzt. In der Elektronik sind vor allem stoffschlüssige Verbindungen dominant, da die Lösbarkeit nur selten gefordert wird und die stoffschlüssigen in der Regel sicherer und stabiler sind. Darüber hinaus zeigt sich in der Praxis, dass in vielen Fällen eine genaue Trennung der genannten Varianten nicht möglich ist, bzw. eine Kombination aus mehreren Schlussarten vorliegen kann. Auch für die Anwendungseigenschaften und damit die Qualität der stoffschlüssigen Fügeverbindungen ist weniger das angewendete Fügeverfahren als der erzielte Charakter der Bindung von Bedeutung. Dieser Charakter der Bindung stoffschlüssiger Fügeverbindungen wird maßgeblich durch die chemischen Wechselwirkungen der verwendeten Werkstoffe (Grundwerkstoffe, Zusatzwerkstoffe) bestimmt. Deshalb werden die drei Arten der stoffschlüssigen Fügeverbindungen wie folgt definiert [Wit-92]:

- *Schweißverbindungen* sind Stoffschlussverbindungen, in denen nach dem Fügen der entsprechenden Werkstoffe alle Bereiche dieser Fügeverbindung die gleiche chemische Bindung und die gleiche chemische Zusammensetzung haben.
- *Lötverbindungen* sind Stoffschlussverbindungen, in denen nach dem Fügen der entsprechenden Werkstoffe alle Bereiche dieser Fügeverbindung die gleiche chemische Bindung haben, jedoch einzelne Bereiche sich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden.
- *Klebverbindungen* sind Stoffschlussverbindungen, in denen nach dem Fügen der entsprechenden Werkstoffe einzelne Bereiche dieser Fügeverbindung sich in ihrer chemischen Bindung und ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden.

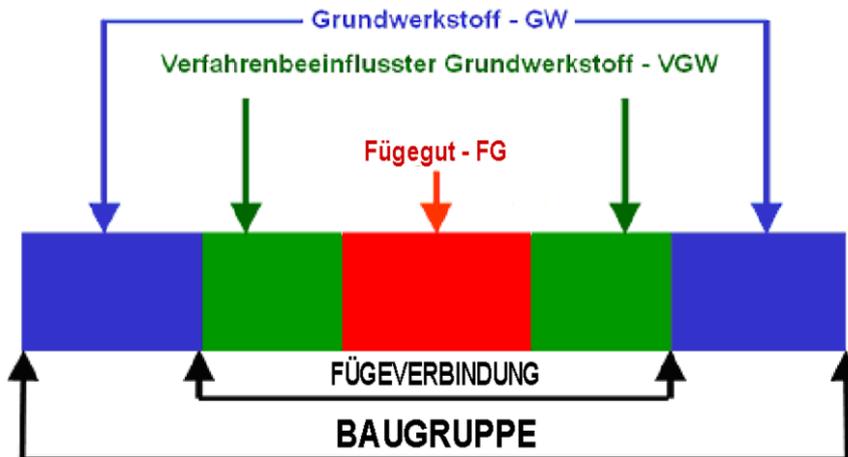
ACHTUNG: Diese Definitionen sind unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten aufgestellt worden, stehen aber bisweilen im Widerspruch zu der im alltäglichen Sprachgebrauch Verwendung der Begriffe "Schweißverbindung", "Lötverbindung" und "Klebverbindung".

Die stoffschlüssige Fügeverbindung besteht aus materialwissenschaftlicher Sicht aus den Grundwerkstoffen (GW) die unmittelbar oder mit Hilfe eines Zusatzwerkstoffes (ZW) miteinander verbunden werden.



Beim Fügeprozess treten die Werkstoffe an den Grenzflächen in Wechselwirkung zueinander, wobei diese Wechselwirkung im einfachsten Fall nur auf der Adhäsion beruht, aber auch durch Diffusion zur Entstehung chemischer Bindungen bis hin zur völligen stofflichen Vereinigung führen kann. Dadurch kommt es zur

strukturellen und/oder chemischen Veränderung der Werkstoffe, so dass die Fügeverbindung nicht einfach nur die Summe der einzelnen Werkstoffe ist. Die entstandene Fügeverbindung besteht aus dem beim Fügen entstandenen Fügegut und dem verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff. Das Fügegut kann aus dem Grundwerkstoff und dem Zusatzwerkstoff durch chemische Reaktionen oder auch direkt aus der Reaktion beider Grundwerkstoffe entstehen. Dabei wird auch der Grundwerkstoff in der Nähe der Fügeverbindung in seinen Eigenschaften verändert, man spricht deshalb vom verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff.



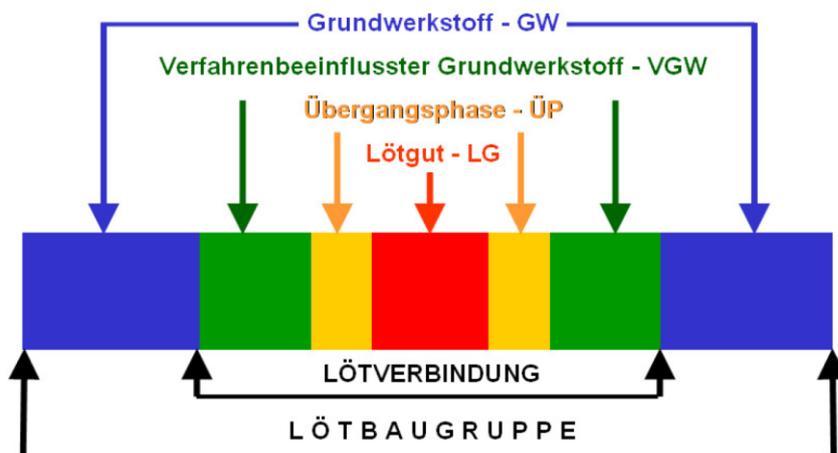
Am Beispiel von Fügeverbindungen zwischen zwei Goldoberflächen mit unterschiedlichen Zusatzwerkstoffen, wie sie in der Elektronik häufig Verwendung finden, lassen sich diese spezifischen konstruktiven Merkmale wie im Bild unten darstellen. Bei der Betrachtung dieser spezifischen Merkmale wird weiterhin deutlich, dass die jeweilige Art einer Fügeverbindung auch durch ein artfremdes Fügeverfahren hergestellt werden kann. Beim Schweißen (Drahtbonden) kann z.B. durch die Verwendung beschichteter Bonddrähte eine Fügeverbindung entstehen, die den Charakter einer Lötverbindung und damit auch deren Qualitätsmerkmale besitzt. Ebenso können durch den thermischen Prozess beim Ofenlöten elektronischer Baugruppen gleichzeitig Klebverbindungen hergestellt werden. Auch die simultane Herstellung kombinierter Fügeverbindungen ist denkbar, wie z.B. beim Löten und Kleben von Flip-Chip Bauelementen. Es sind auch spezielle Leitklebstoffe bekannt, die mit lotbeschichteten Metallpartikeln gefüllt sind, wodurch beim Aushärten der Klebverbindung gleichzeitig eine Lötverbindung hergestellt wird.

Schema der Fügeverbindung			
chemische Zusammensetzung	Gold Gold Gold	Gold Zinn Gold	Gold Epoxydharz Gold
	gleich	ungleich	ungleich
Typ der chemischen Bindung	gleich	gleich	ungleich
	Metall- Metall- Metall-	Metall- Metall- Metall-	Metall- Restvalenz- Metall-
Art der Fügeverbindung	Schweiß- verbin- dung	Lötverbin- dung	Kleb- verbin- dung

Konstruktive Merkmale der Arten von stoffschlüssigen Fügeverbindungen, nach [Wit-92]

Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Bindung und/oder chemischen Zusammensetzung kommt es beim Prozess der Verbindungsbildung zu Wechselwirkungen an den Grenzflächen. Deshalb wird wissenschaftlich korrekt zwischen dem Zusatzwerkstoff (Klebstoff, Lot, Schweißdraht etc.) und dem Fügegut unterschieden. Aus dem Klebstoff wird das "Klebgut", aus dem Lot das "Lötgut" und aus dem Schweißdraht bzw. dem geschmolzenen Grundwerkstoff das "Schweißgut". Die chemischen und strukturellen Unterschiede sind oft vernachlässigbar klein, so dass im alltäglichen Sprachgebrauch häufig auch die Begriffe Lot, Klebstoff etc. für die Materialien in der Verbindung nach dem Fügeprozess verwendet werden. Diese Vereinfachung ist aber nicht immer zulässig und sollte in wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit großer Vorsicht oder überhaupt nicht verwendet werden.

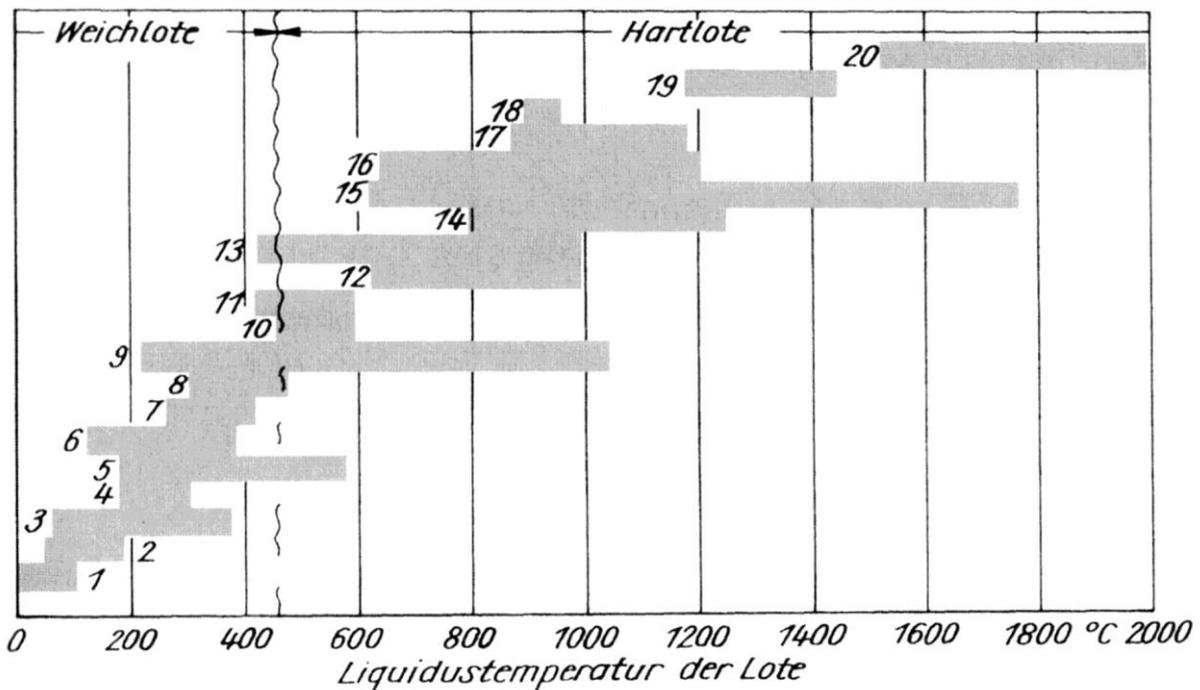
Den schematischen Aufbau einer Fügeverbindung mit allen unterscheidbaren Werkstoffzonen zeigt das folgende Bild am Beispiel einer Lötverbindung. Insbesondere bei der Verwendung von Loten und Grundwerkstoffen mit begrenzter Löslichkeit kann es auch noch zur Bildung von Übergangsphasen zwischen dem Lötgut und dem verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff kommen. Gerade diese Übergangsphasen weisen oftmals Eigenschaften auf, die sehr stark von den Ausgangsmaterialien abweichen und damit die Qualität und Zuverlässigkeit der gesamten Verbindung beeinträchtigen können.



Wie bereits erwähnt, haben die Lötverbindungen eine besonders große Bedeutung für die Anwendung in der Elektronik. Eine weitere Unterscheidung der Lötverbindungen in Hart- und Weichlötverbindungen hat sich in der Praxis weitestgehend durchgesetzt. Hauptunterscheidungsmerkmal ist dabei der Schmelzpunkt des verwendeten Lotes, von dem die beobachteten mechanischen Eigenschaften dieser Lote und damit der Lötverbindungen empirisch abgeleitet wurden. Bereits im Jahr 1760 wurde diese Beobachtung zur Einteilung der Lote von J.G.F. Klein benutzt und dokumentiert [Kle-60]:

"Das Silberschlagloth ... Man nennt es daher auch Hartloth, weil es langsam und gleichsam hart, schwer schmelzet und fließet: so wie im Gegenteil das andere Weich- oder Schnellloth heisset, weil es weicheit- oder schnellflüssiger, aber dabey auch spröder ist, als das Schlagloth."

Diese beobachteten Eigenschaften werden in der heute gebräuchliche Einteilung für Weichlote entsprechend DIN 8505 mit einer Liquidustemperatur unter 450°C und Hartlote mit einer Liquidustemperatur über 450°C genauer quantifiziert. Beispiele für Lotlegierungen entsprechend dieser Klassifizierung sind im Bild unten dargestellt [Mül-95]. Die bereits 1760 erwähnten Silberlote finden sich auch in dieser neuzeitlichen Klassifizierung sowohl unter den Weich- als auch unter den Hartloten wieder. Die Klassifizierung der Lote nach der Liquidustemperatur belegt, dass diese Einteilung sich an der notwendigen Löttemperatur des Lötprozesses orientiert, da in der Regel beim Schmelzlöten die Liquidustemperatur überschritten werden muss.



Klassifizierung der metallischen Lote nach der Hauptkomponente bzw. nach dem die Eigenschaften wesentlich bestimmenden Legierungselement [Mül-95]

- 1 – Galliumhaltige Lote, 2 – Wismuthaltige Lote, 3 – Indiumhaltige Weichlote, 4 – Blei-Zinn-Lote (Zinnlote),
- 5 – Silber- und antimonhaltige Sonderweichlote auf Basis von Blei und/oder Zinn,
- 6 – Silber- und antimonfreie Sonderweichlote auf Basis von Blei und/oder Zinn, 7 – Kadmiumbasislote, 8 – Zinkbasislote,
- 9 – Goldhaltige Lote für die Mikroelektronik, 10 – Aluminiumbasislote,
- 11 – Magnesiumbasislote, 12 – Silberlote, 13 – Sondersilberlote, 14 – Palladiumlote,
- 15 – Gold- und Platinlote, 16 – Kupferbasislote, 17 – Nickellote, 18 – Titan- und Zirkonbasislote,
- 19 – Eisenbasislote, 20 – Hafnium-, Niob- und Tantalote

Eine Klassifizierung, die charakteristische Eigenschaften für die Betriebseigenschaften und damit für die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen berücksichtigt, muss sich im Gegensatz dazu an der Solidustemperatur des Lötgutes orientieren, bei der das Schmelzen beginnt. Die Differenz zwischen Solidus- und Liquidustemperatur kann bei Lotwerkstoffen beträchtlich sein, wie z.B. beim Hartlot Ag80In20 mit einer Solidustemperatur von 705°C und einer Liquidustemperatur von 810°C (Schmelzbereich 105 K), oder beim Weichlot Pb75Sn25 mit einer Solidustemperatur von 183°C und einer Liquidustemperatur von 260°C (Schmelzbereich 77 K). Die Umwandlung des Lotes zum Lötgut während des Lötprozesses kann diese Temperaturgrenzen weiter verändern. Die in Deutschland gültigen Standards nehmen eine solche Klassifizierung allerdings nicht vor.

Neben dem Grundwerkstoff und dem Zusatzwerkstoff (dem Lot) finden beim Löten sehr oft auch noch Hilfsstoffe Verwendung. Diese Hilfsstoffe dienen der Vorbereitung der Oberflächen für den Lötprozess und gehen stofflich nicht in die Verbindung ein. Ein typischer Hilfsstoff ist das Flussmittel, das vor allem die Aufgabe hat, die Oxide und andere Passivschichten von den metallischen Oberflächen zu entfernen. Deshalb können Edelmetalle auch ohne Hilfsstoffe (Flussmittel) gelötet werden. Flussmittel können darüber hinaus auch weitere Funktionen erfüllen. Sie können durch ihre Klebrigkeit zum Fixieren der Teile bei der Vormontage dienen und beim Löten den Sauerstoff von der Oberfläche fernhalten und damit eine erneute Oxidation verhindern. Die Flussmittel müssen in ihrer Wirkung auf die verwendeten Lote und Grundwerkstoffe sowie auf die jeweilige Löttemperatur angepasst sein. In der Elektronik werden als Flussmittel oft natürliche (Kolophonium) oder synthetische Harze verwendet, die zusätzlich durch organische Säuren, wie Adipinsäure oder Bernsteinsäure aktiviert werden.

Im einfachsten Fall wird das Lot durch Erhitzen der Baugruppe geschmolzen. Deshalb ist es zweckmäßig, wenn das Lot einen niedrigeren Schmelzpunkt als die zu verbindenden Grundwerkstoffe besitzt. Theoretisch sind aber auch Verbindungen denkbar, bei denen ein höherschmelzendes Lot selektiv, z.B. mit einem Laserstrahl, geschmolzen wird. Für die Massenfertigung durch simultanes Löten der Baugruppen im Ofen sollte aber der Schmelzpunkt des Lotes deutlich unter dem des Grundwerkstoffes liegen. Neben dem beschriebenen Schmelzlöten kann aber auch durch Diffusion gelötet werden. Diffusion kann zwischen zwei verschiedenen Materialien sowohl im flüssigen, gasförmigen aber auch bereits im festen Zustand stattfinden, sobald die kritische Rekristallisationstemperatur überschritten ist. Diese Rekristallisationstemperatur liegt etwa bei 40% der Schmelztemperatur bzw. bei einer homologen Temperatur von 0,4. Die homologe Temperatur stellt eine relative Temperaturskala dar, bei der die jeweilige Betriebstemperatur mit der Schmelztemperatur normiert wird. Diese Normierung macht die Eigenschaften verschiedenster Materialien miteinander vergleichbar. Vor allem für Metalle lassen sich so viele Gemeinsamkeiten in ihren Eigenschaften feststellen.

$$\Theta = \frac{T_B}{T_S}$$

Θ - homologe Temperatur; T_B – Betriebstemperatur; T_S - Schmelztemperatur

ACHTUNG: Die Normierung kann nur für absolute Temperaturen erfolgen, also bitte in K (Kelvin) rechnen! Aus der Gleichung folgt, dass die homologe Temperatur am absoluten Nullpunkt ebenfalls Null ist und am Schmelzpunkt 1,0 beträgt. Einige Beispiele sollen diese Relationen veranschaulichen:

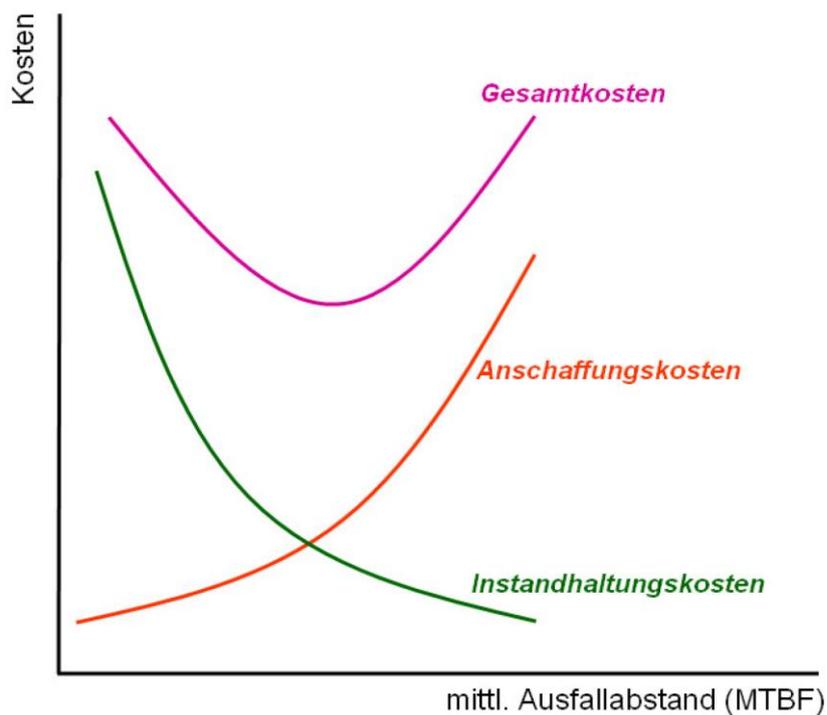
Metall/Legierung	Schmelztemperatur	kritische Rekristallisationstemperatur bei $\Theta=0,4$ / °C	maximale Arbeitstemperatur bei $\Theta=0,8$ / °C	Löttemperatur bei $\Theta=1,1$ / °C
Sn63Pb37	183°C	-91°C	92°C	229°C
SnAgCu	217°C	-77°C	119°C	266°C
Sn	232°C	-71°C	131°C	283°C
Pb	327°C	-33°C	207°C	387°C
Al	660°C	100°C	473°C	753°C
Cu	1084°C	270°C	813°C	1220°C

Qualität, Zuverlässigkeit, Nacharbeit

Die Fertigung elektronischer Baugruppen muss, wie jede andere industrielle Produktion auch, Produkte mit einer adäquaten Qualität zum Ziel haben. Der Begriff *Qualität* (lat.: Qualitas = Beschaffenheit, Merkmal, Eigenschaft, Zustand) beschreibt nach der aktuellen Norm DIN EN ISO 9000:2005 den "Grad, in dem ein Satz inhärenter (= innewohnend) Merkmale Anforderungen erfüllt", oder etwas verständlicher in der älteren DIN EN ISO 8402:1995-08 ausgedrückt: "die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen." Da es hier um die "Eignung" entsprechend den "Erfordernissen" geht, ist auch nicht eine *maximale* sondern eine *optimale Qualität* das Ziel. In der Regel bedeutet eine höhere Qualität auch erhöhten Aufwand, d.h. Kosten, so dass sich Produkte mit einer maximalen Qualität nicht verkaufen lassen

würden.

Ebenso wichtig wie die Qualität ist die Zuverlässigkeit, die "einer der zeitbezogenen Aspekte der Qualität" ist (DIN EN ISO 8402: 08.95). Oder nach DIN 40041/40042 ist die Zuverlässigkeit „die Fähigkeit einer Einheit, denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer gestellt sind.“ Es geht also darum, wie sich die Qualität im Laufe der Zeit verändert. Auch hier ist es wichtig die Zuverlässigkeit so zu optimieren, dass das Produkt in dem für den Gebrauch vorgesehenen Zeitraum eine ausreichende Qualität aufweist. Ein Maß für die Zuverlässigkeit ist der mittlere Ausfallabstand (engl. Mean Time between Failure), der grundsätzliche Zusammenhang zu den Anschaffungs- und Instandhaltungskosten wird im folgenden Bild dargestellt.



An den Gesamtkosten ist zu erkennen, dass hier ein Minimum vorhanden ist, so dass es auch eine optimale Zuverlässigkeit geben muss. Ein Produkt, wie z.B. ein Handy, das nur für wenige Jahre Gebrauch konzipiert ist, muss also nicht durch erhöhten Aufwand für eine Lebensdauer von 10 Jahren konzipiert werden. Umgekehrt wäre für die Motorsteuerung eines Automobils eine Lebensdauer von 10 Jahren zu wenig, das Produkt wäre unzuverlässig. Hier wird eine Mindestlebensdauer von 15 Jahren gefordert, teilweise sogar 20 Jahre. Die Frage ob ein Produkt "zuverlässig" ist oder nicht, kann also nur im Kontext mit der jeweiligen Anwendung beantwortet werden.

Die Begriffe Qualität und Zuverlässigkeit lassen sich nicht nur auf Produkte sondern auch auf den Fertigungsprozess anwenden. Man unterscheidet auch zwischen der Produktqualität/Produktzuverlässigkeit und der Prozessqualität/Prozesszuverlässigkeit. Grundsätzlich gilt auch hier das Ziel, ein Optimum in der Fertigung zu erreichen. Allerdings haben viele Prozesse in der Elektronik das Optimum noch nicht erreicht, so dass eine Erhöhung der Zuverlässigkeit, d.h. eine Verringerung der Fehlerrate, häufig angestrebt wird. Das ist darin begründet, dass die Erneuerungsrate in der Elektronikfertigung besonders hoch ist. Da sich Qualität und Zuverlässigkeit nur allmählich erhöhen lassen, befinden sich viele Prozesse noch in der "Anlaufphase".

In vielen Betrieben der Elektronikproduktion gehören Initiativen zur Qualitätssteigerung zum Schulungsprogramm für Mitarbeiter. Aus psychologischer Sicht wird häufig das Ziel der "Null-Fehler-Produktion" propagiert, was aus den beschriebenen Gründen weder ökonomisch sinnvoll noch technisch möglich ist.

Die Theorie der Null-Fehler-Produktion wurde von Philip B. Crosby 1961 aufgestellt. Da eine Null-Fehler-Produktion in der Praxis nie zu erreichen ist, wird auch von der Null-Fehler-Strategie oder –Vision gesprochen. Sie zielt auf eine fehlerfreie Produktion ohne Ausschuss und Nacharbeit. Schritte um der Null-Fehler-Produktion nahe zu kommen sind:

- Verpflichtung des Managements: Standpunkt zur Qualität klarstellen
- Lenkungsgruppe Qualität: Qualitätsverbesserungsprogramm einführen
- Qualitätsmessung: aktuelle und potentielle Qualitätsabweichungen darstellen Qualitätskosten: Bestandteile der Qualitätskosten/Nutzen definieren
- Qualitätsbewusstsein: Verantwortungsgefühl für die Qualität erhöhen
- Korrekturmaßnahmen: systematische Methode, um Probleme dauerhaft zu lösen
- Null-Fehler-Planung: erforderliche Vorbereitungsmaßnahmen prüfen
- Mitarbeiterschulung: spezielle Schulung für Vorgesetzte und Mitarbeiter
- Tag der Qualität: allen Beschäftigten Veränderungen veranschaulichen
- Zielsetzung: einzelnen Mitarbeiter ermutigen, eigene Verbesserungsziele zu setzen.
- Beseitigung von Fehlerursachen: Kommunikationssystem zum Management Anerkennung: Leistungen würdigen
- Expertengruppen: Qualitätsfachleute in offizieller Form zusammenbringen
- Wieder von vorne anfangen: Qualitätsverbesserung ist nie beendet!

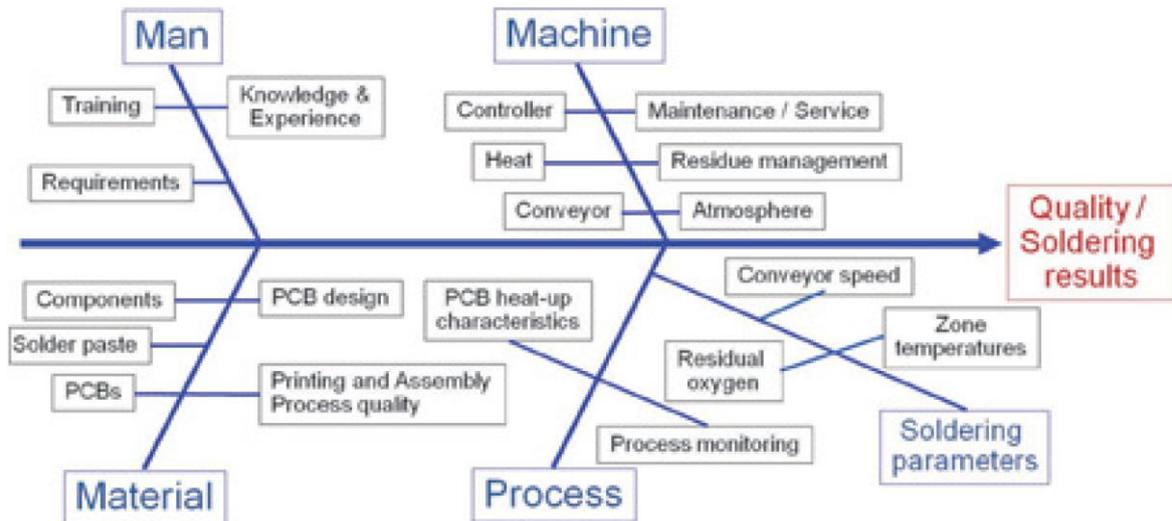
Ein zumindest theoretisch erreichbares Ziel wird dagegen in der sog. "Six Sigma" Strategie verfolgt, wobei man davon ausgeht, dass jeder Prozess mit einer unerwünschten Streuung behaftet ist Die Abweichungen vom Idealzustand werden in Beziehung zum Toleranzbereich des betreffenden Merkmals gesetzt, wobei die Standardabweichung (Sigma) als Maß benutzt wird. Je größer die Standardabweichung ist, desto wahrscheinlicher ist eine Überschreitung der Toleranzgrenzen. In der "Six Sigma" Strategie wird das Ziel verfolgt, dass die nächstgelegene Toleranzgrenze mindestens 6 Standardabweichungen vom Mittelwert entfernt liegen soll. Diese Forderung ist in der Praxis allerdings fast so unrealistisch wie eine "Null-Fehler-Produktion".

Die "Six Sigma" Strategie wurde besonders erfolgreich in den 1990er Jahren bei General Electric von Jack Welch eingeführt. Typisch sind auch spezielle Schulungsmaßnahmen, bei denen das qualifizierte Personal durch "Gürtel", ähnlich wie im Kampfsport (z.B. Six Sigma Black Belt), ausgewiesen wird. Dadurch wird der Maßnahme ein sowohl kämpferischer als auch sportlicher Anschein gegeben, was betriebspsychologisch zumindest in einigen Regionen dieser Welt erfolgreich funktioniert.

Die Hilfsmittel, mit denen die Ziele der genannten Initiativen erreicht werden sollen, sind allerdings unabhängig von der jeweiligen Umsetzung, wichtige Instrumente bei der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanalyse. Dazu gehören vor allem die Prozessfähigkeitsanalyse und die sog. Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Dieser Begriff, abgekürzt FMEA, (engl. failure mode and effects analysis) bezeichnet eine analytische Methode, um potenzielle Schwachstellen zu finden. Im Rahmen des Qualitätsmanagements wird die FMEA zur vorbeugenden Fehlervermeidung eingesetzt. Die FMEA wird insbesondere in der Design- bzw. Entwicklungsphase neuer Produkte oder Prozesse angewandt. Die FMEA kann in drei Arten unterteilt werden:

1. Die System-FMEA untersucht das Zusammenwirken von Teilsystemen in einem übergeordneten Systemverbund bzw. das Zusammenwirken mehrerer Komponenten in einem komplexen System. Sie zielt dabei auf die Identifikation potentieller Schwachstellen, insbesondere auch an den Schnittstellen, die durch das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten entstehen könnten.

- Die Konstruktions-FMEA zielt auf die Konstruktion einzelner Produkte oder Bauteile und untersucht diese auf potentielle Schwachstellen oder Ausfallmöglichkeiten.
- Die Prozess-FMEA stützt sich auf die Ergebnisse der Konstruktions-FMEA und befasst sich mit möglichen Schwachstellen im Fertigungs- oder Leistungsprozess.



Das Ergebnis einer solchen FMEA liegt häufig als "Fish-Bone"- oder "Ishikawa"- Diagramm vor (Beispiel einer Prozess-FMEA für einen Lötprozess, siehe Bild oben). In diesem Diagramm werden alle Ursachen (Cause) eines möglichen Fehlereffektes (Effect) als "Äste" aufgelistet, die sich dann in weitere Einflüsse weiter verzweigen können. Der Sinn dieser Analyse besteht darin, systematisch verschiedene Einflüsse zu erfassen, wesentliche von unwesentlichen zu unterscheiden und Wechselwirkungen zu erkennen.

Damit der Fertigungsprozess bewertet und optimiert werden kann, müssen möglichst viele Informationen über die Prozessparameter, über Fehler und Fehlerquellen vorliegen. Dazu dienen eine Vielzahl von Prüf- und Messvorgängen. Diese können stichprobenartig erfolgen, besser aber noch kontinuierlich zwischen den einzelnen Prozessschritten oder sogar während des Prozesses. Für eine elektronische Baugruppe ist es zunächst einmal nahe liegend, deren elektrische Funktion zu prüfen. Bereits die Leiterplatten können vor der Bestückung elektrisch geprüft werden, an der bestückten und gelöteten Baugruppe können Teilfunktionen und Kennlinien gemessen werden. Dazu werden die Leiterplatten mit Nadeln kontaktiert, die in einem sog. Nadeladapter (einer Matrix von federnden Kontakten die entsprechend dem Layout der Baugruppe angepasst sind) angeordnet sind. Es ist wichtig, dass für diese Nadeln entsprechende Kontaktflächen auf der Leiterplatte vorgesehen sind, auf denen diese sicher aufsetzen können. Da die Nadeln die Oberflächen zerkratzen können, sollte an diesen Stellen später nicht gefügt werden. Auch müssen störende Schichten, wie z.B. Flussmittelreste, vermieden werden, die den Kontakt verhindern würden.

Derartige Nadeladapter sind teuer und unflexibel, da sie nur für das jeweilige Layout passend sind. Alternativ können elektrische Funktionen auch mit sog. "Flying Probes" getestet werden. Dabei handelt es sich um mehrere bewegliche Nadeln, die mit hoher Geschwindigkeit auf beliebige Punkte auf der Baugruppe mit hoher Geschwindigkeit bewegt werden können. Während das Messen von Verbindungen und Widerständen verhältnismäßig einfach ist, lassen sich komplexe digitale und analoge Funktionen, insbesondere bei hohen Frequenzen, nur sehr schwierig erfassen. Prozessorgesteuerte Geräte können sinnvollerweise eigene Prüfprogramme enthalten, die in der Endkontrolle oder auch im Service abgerufen werden. Digitale (neuerdings teilweise auch analoge) Chips können intern mit einem speziellen Prüfalgorithmus, dem *Boundary Scan*, ausgestattet werden. Dieser Testalgorithmus ermöglicht es alle Ein- und Ausgänge eines integrierten

Bauelementes wahlweise auf definierte Potentiale zu legen, und so mögliche Fehler zwischen den Bausteinen systematisch einzugrenzen.

Nicht alle Fehler lassen sich elektrisch ermitteln. Durch Kamerasysteme und Laserscanner lassen sich Formen und Farben mit Referenzproben vergleichen, um z.B. die Höhe der gedruckten Lotpaste zu messen oder die Bauelemente auf Vollzähligkeit und korrekte Ausrichtung zu testen. Auch Lötfehler lassen sich detektieren, soweit die Lötstellen optisch sichtbar sind. Für eine vollständige Kontrolle werden automatische optische Inspektionssysteme (Automated Optical Inspection = AOI) eingesetzt, die mit einer Kamera die gesamte Baugruppe erfasst und auswertet. Die Anforderungen an ein solches System sind extrem hoch, da die Baugruppen Kantenmaße von einigen zehn Zentimetern haben können, die kleinsten zu erfassenden Bauelemente aber teilweise weniger als einen Millimeter Länge besitzen. Über diese Dimensionen muss das Bild verzerrungsfrei und hochauflösend sein. Auch die Beleuchtung des Objektes ist durchaus kritisch, da gerade die für die Inspektion wichtigen Lötstellen stark spiegeln. In der Regel wird mit mehreren Lichtquellen nacheinander belichtet und dann ein Summenbild erzeugt. In der Massenfertigung mit 100%-iger Kontrolle muss die Inspektion auch sehr schnell erfolgen. In der Regel ist weniger als eine Minute für eine Messung Zeit. Nach einer entsprechenden Einlernphase sollte ein solches AOI-System mehr als 95% der sichtbaren Fehler erfassen. Die sog. "Pseudofehler", d.h. scheinbare Fehler, sollten ebenfalls weniger als 5% betragen. Die erkannten fehlerhaften Baugruppen gehen dann mit einer Information über den Fehlerort und die Fehlerart (z.B. Lotbrücke zwischen Bauelement A und B) zur Nacharbeit bzw. Reparatur.

Leider sind viele Fehler von außen nicht durch eine optische Inspektion erkennbar. Gerade hochpolige Bauelemente wie BGA, CSP oder FC besitzen Lötstellen unter dem Bauelement, die auch häufig zu den Fehlerquellen gehören. Auch Fehler im Material, wie Poren und Risse, lassen sich von außen nicht erkennen. Zu diesem Zweck können automatische Röntgensysteme verwendet werden (Automated XRay Inspection = AXI), die allerdings sehr teuer und aufwändig sind, weshalb dieses Verfahren heute nur bei sehr hochwertigen Baugruppen eingesetzt wird. Die weitere Bildverarbeitung und Fehlererkennung erfolgt nach der Bilderzeugung ähnlich wie bei der AOI, weshalb es auch Inspektionssysteme gibt, die beide Verfahren miteinander kombinieren.

Da sich auf einer elektronischen Baugruppe mehrere Bauelemente und Verbindungen in verschiedenen Ebenen übereinander befinden können, ist selbst mit der Röntgeninspektion wegen der entstehenden Abschattung nicht jeder Fehler zu detektieren. In besonders schwierigen Fällen wird deshalb teilweise sogar eine 3-D Röntgenlaminographie oder eine Computertomographie eingesetzt. Diese Verfahren sind aber sehr zeitaufwändig und können deshalb nicht zur 100%-igen Kontrolle in der Serienfertigung verwendet werden.

Fehlerhafte Baugruppen werden in den meisten Fällen repariert bzw. nachgearbeitet. Diese Reparatur erfolgt prinzipiell manuell, wobei verschiedene Hilfsmittel auch zur Qualitätssicherung beitragen. Zunächst werden die aus den Test- und Inspektionssystemen ermittelten Fehler dem Bearbeiter mitgeteilt. Dieser muss kontrollieren, ob es sich tatsächlich um einen "echten" Fehler oder einen Pseudofehler handelt. Für jeden Reparaturfall gibt es genau definierte Reparaturvorschriften. Während in einfachen Fällen Bauelemente mit einem HandlötKolben ausgetauscht und Lötfehler behoben werden, können für komplizierte Fälle auch steuerbare Reparaturlötstationen oder halbautomatische Reparaturlötssysteme zum Einsatz kommen. Ein Mikroskop oder Kamerasystem sowie geführte x-y-z- Manipulatoren gewährleisten die präzise Handhabung. Diese Systeme sind in der Lage, die Bauelemente mit definierter Kraft präzise zu platzieren, die Temperaturen beim Reparaturlötprozess individuell zu regeln und zu kontrollieren und darüber hinaus das überschüssige Lot abzusaugen und neues Lot und/oder Flussmittel aufzutragen. Die Reparatur gelöteter Baugruppen ist in der Regel möglich, geklebte und/oder geschweißte Baugruppen und Komponenten lassen sich dagegen nur eingeschränkt reparieren.

Umweltaspekte

Bei den aktuellen Problemen des Klimawandels, der Energiekrise und mit vergifteten Nahrungsmitteln stehen vor allem die Hauptverursacher, wie Energiekonzerne, Automobilindustrie und Landwirtschaft im Fokus. Aber auch die Elektronikbranche kann und sollte sich dieser Diskussion nicht entziehen. Mit weniger Aufmerksamkeit aus der Öffentlichkeit haben sich hier in den letzten Jahren deutliche und tief greifende Veränderungen vollzogen. Folgende Punkte sollten bei einem umweltgerechten Design elektronischer Geräte und Baugruppen beachtet werden:

Energieeffizienz

Sowohl in der Fertigung als auch bei der Betriebsweise der Geräte selbst sollte die Energie so effizient wie möglich eingesetzt werden. So sollten nicht nur mobile Geräte, die eine lange Akkulaufzeit aufweisen müssen, sparsam im Stromverbrauch sein. Auch stationäre Geräte können und sollten dahingehend optimiert werden. In der Herstellung der Geräte ist es wichtig, auf eine Minimierung der Prozessschritte und z.B. auch auf möglichst niedrige Prozesstemperaturen zu achten. Wie im Haushalt, können auch Maschinen in der Fertigung (z.B. Lötanlagen) mit unterschiedlicher "Energieeffizienz" zum Einsatz kommen.

Ressourceneffizienz

Ebenso wie mit der Energie muss auch mit Materialien und Halbzeugen sparsam umgegangen werden. Natürlich sollte durch eine geschickte Wahl des Zuschnittes und der Nutzen-Aufteilung der Verschnitt bzw. Abfall (z.B. Leiterplattenmaterial) so gering wie möglich sein. Durch neue Technologien und die Miniaturisierung kann ebenfalls das Volumen bzw. die Masse der Baugruppen minimiert werden. Dabei sind natürlich verschiedene Materialien je nach ihrer Verfügbarkeit unterschiedlich zu werten.

Abfall-Vermeidung

Abgesehen von der oben genannten bestmöglichen Ausnutzung der materiellen Ressourcen sollten darüber hinaus Abfälle aller Art vermieden werden. Dazu trägt natürlich in erster Linie die Langlebigkeit der konstruierten und hergestellten Produkte (Zuverlässigkeit) bei. Oftmals ist allerdings der moralische Verschleiß elektronischer Erzeugnisse wesentlich höher als der technische. Deshalb sollte zusätzlich dafür gesorgt werden, dass, soweit möglich, Teile oder Komponenten geschlossenen Kreisläufen zugeführt werden können. Zumindest bei Verpackungen sollte das heute möglich sein.

Recycling

Das Recycling ist in der Elektronik heute eher die Ausnahme, da einzelne Komponenten zwar theoretisch einem Altgeräte entnommen werden können, es aber dafür praktisch keinen Markt gibt. Trotzdem ist es sinnvoll, bereits bei der Konstruktion an die Demontage zu denken. Auf diese Weise können zumindest bestimmte Wertstoffe (z.B. Golddrähte) und auch Gefahrstoffe (z.B. Akkus) die in einzelnen Komponenten zu finden sind, leichter isoliert werden.

Gift- und Gefahrstoff- Vermeidung

Gifte und Gefahrstoffe können leider bei alten Geräten heute noch nicht zuverlässig gesammelt und zurückgeführt werden, da die Abfälle (gerade aus den privaten Haushalten) unkontrolliert auf den Halden landen. Deshalb ist es besonders wichtig, derartige Stoffe (z.B. Blei, Cadmium, Halogene, FCKW) von vorn herein zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren. Dazu gibt es in Europa bereits vorbildhafte Gesetzesinitiativen (z.B. RoHS), die inzwischen auch schrittweise in den Mitgliedstaaten umgesetzt werden.

Biologische Abbaubarkeit

Da sich Abfälle leider nicht völlig vermeiden lassen, sollten diese so umweltverträglich wie möglich sein. Im Idealfall sind diese biologisch abbaubar. Da gerade Kunststoffe sehr langsam von der Natur abgebaut werden,

sind z.B. Biopolymere und sog. nachwachsende Rohstoffe besonders gut geeignet. Außerdem werden durch diese Stoffe die begrenzten Ressourcen, wie z.B. Erdöl, substituiert und damit geschont.

Die globale und universelle Sichtweise

Die oben genannten unterschiedlichen Aspekte des umweltgerechten Designs elektronischer Erzeugnisse müssen ganzheitlich betrachtet werden. So muss beispielsweise bei der Vermeidung von Giftstoffen (bleifreie Lote) der zusätzliche Energieeinsatz (höhere Löttemperaturen) in Beziehung gesetzt werden. Ein entsprechendes Wertungssystem für diesen Vergleich gibt es heute leider noch nicht. Erst recht müssen globale Beziehungen stärker berücksichtigt werden. So ist es aus ökologischer Sicht wenig sinnvoll, die Fertigung eines Produktes nach Asien oder Südamerika zu verlagern, da dort die Umweltauflagen leichter zu erfüllen sind. Aus diesem Grund bemüht sich auch die Forschung (z.B. die Universität Rostock / IEF in den Umwelt-Transferprojekten NEFEAT I+II, *Network for Environmental Friendly Electronic Assembling Technologies*) die in der EU geltenden Standards in andere Regionen zu transferieren.

Literatur

- [Sch-12] Wolf-Dieter Schmidt: Grundlagen der Leiterplatten-Baugruppen-Entwicklung und Fertigung, GRIN-Verlag 2012, ISBN 978-3-640-27779-7 (auch als eBook)
- [Sch-99] Wolfgang Scheel: Baugruppentechologie der Elektronik Verlag Technik; 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. (Juli 1999), ISBN-13: 978-3341012345
- [Kra-96] Krause, Werner: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik, Fachbuchverlag Leipzig (1996); 3. Auflage, ISBN: 3446196080
- [Wit-85] Wittke, K.; Müller, J.; Seidler, W.; Füssel, U.; Walter, K.: Fügeverbindungen – Definition, Merkmale, Systematisierung; Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt 27 (1985) H. 4; S. 635 – 642
- [Wit-92] Wittke, K.: Stoffschlüssige Fügeverbindungen – Vorschlag zur Klassifikation; Preprint Nr. 224/6. Jg./ 1992; Technische Universität Chemnitz, Fachbereich Maschinenbau II
- [Mül-95] Müller, W.; Müller, J.-U.: Löttechnik – Leitfaden für die Praxis, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 127, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1995
- [Kle-60] Klein, J.G.F.: Ausführliche Beschreibung der Metallloth und Löthungen, Verlag der Realschule, Berlin 1760