

Konstruktion und Fertigung elektronischer Baugruppen

Baugruppenmontage

Prof. Dr. Mathias Nowotnick

Impressum

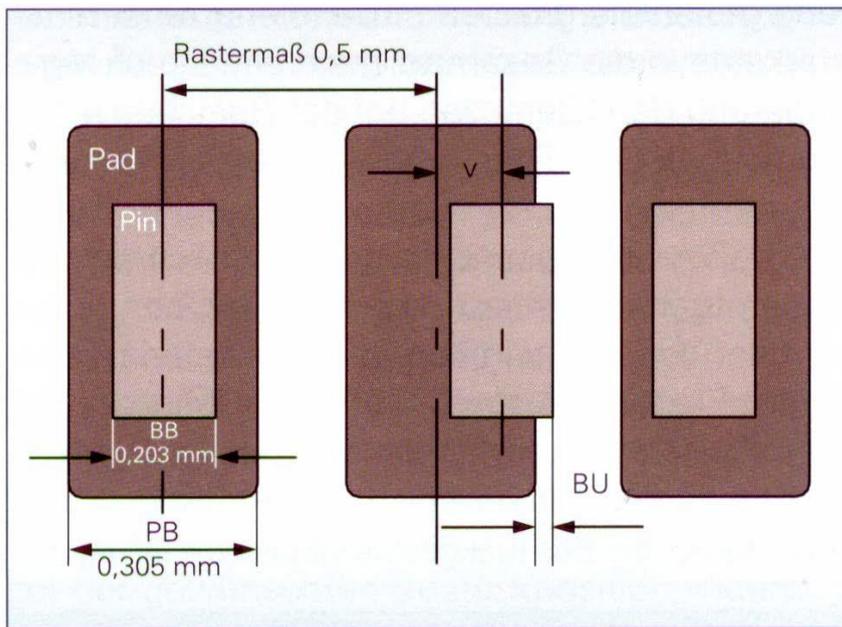
Herausgeber:
Universität Rostock
Wissenschaftliche Weiterbildung
2014

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

Baugruppenmontage

Bestücken

Damit aus der Leiterplatte eine elektronische Baugruppe werden kann, müssen die elektronischen Bauelemente auf dieser platziert und montiert werden (Verfahren: Fügen). Beim manuellen Aufbau einer elektronischen Baugruppe geht man meistens so vor, dass ein Bauelement nach dem anderen bestückt und gleichzeitig befestigt, d.h. mit Lot mittels eines LötKolbens verlötet wird (ebenfalls Fügen). Bei der industriellen Serienfertigung geht man hier systematischer vor. Die Bauelemente werden zuerst zumindest auf einer Seite der Leiterplatte komplett bestückt, um dann anschließend gemeinsam gelötet zu werden. Dadurch wird die Zahl der Erwärmungszyklen und somit auch die thermische Belastung der Baugruppe minimiert. Außerdem lassen sich die Prozesse so effektiver, d.h. zeitsparender organisieren. Dabei wird von Anfang an höchste Präzision gefordert. Das folgende Bild soll die erforderlichen Dimensionen an einem typischen Beispiel illustrieren.

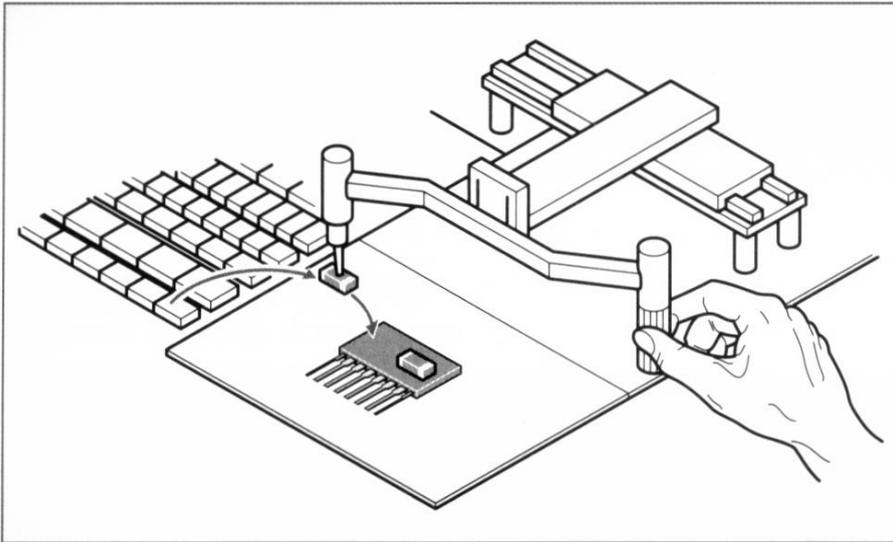


Beispiel für Maße von Leiterplattenanschlussflächen (Pad) für SMD mit Anschlussbeinchen (Pin) im Raster 0,5 mm [Siem-01]

Legende: BB – Beinchenbreite; PB – Padbreite; BU – Beinchenüberstand; V – Versatz

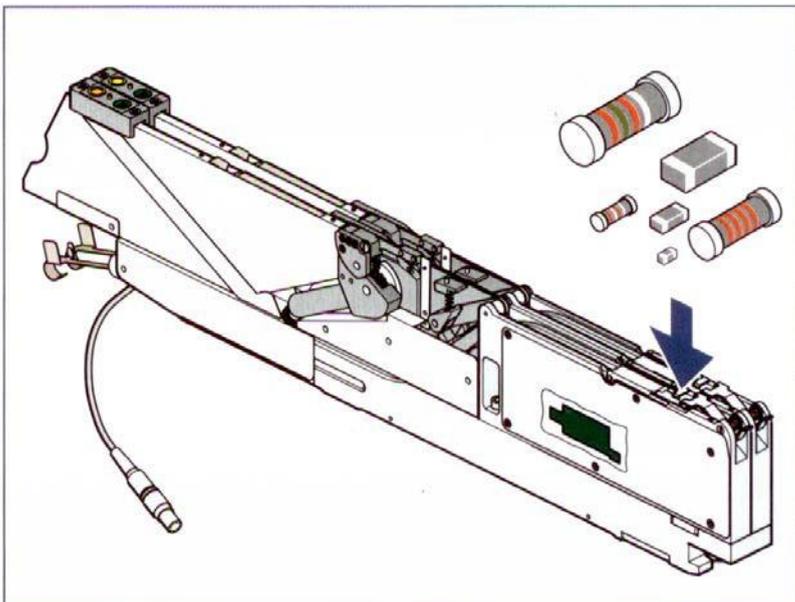
Ein integriertes oberflächenmontiertes Bauelement, z.B. ein Mikroprozessor, wird häufig mit Anschlussbeinchen, den sog. *Gull-Wings* (wegen der gewinkelten Form, ähnlich einem Möwenflügel), im Rastermaß von 0,5 mm hergestellt. Die zugehörigen Bauelementeanschlüsse (*Pin*) und Leiterplattenanschlussflächen (*Pad*) sind mit einigen wichtigen Maßen dargestellt. Um eine sichere Verbindung beim anschließenden Löten zu gewährleisten, sollten die Bauelemente möglichst deckungsgleich auf dem Leiterplattenlayout platziert werden. Durch die Fertigungs- und Bestückungstoleranzen gibt es natürlich immer Anweichungen. Dabei darf der Beinchenüberstand BU maximal $\frac{1}{3}$ der Beinchenbreite BB betragen (also $68 \mu\text{m}$). Daraus ergibt sich ein maximal erlaubter Versatz V von $119 \mu\text{m}$. Abzüglich aller Fertigungstoleranzen der Bauelemente und Leiterplatten bleibt für den "Bestücker" (Mensch oder Automat) aber nur noch eine Resttoleranz von etwa $80 \mu\text{m}$. Derartige Dimensionen sind in der aktuellen Baugruppenteknologie Standard, an vielen Stellen werden aber auch weitaus geringere Toleranzen gefordert.

Mit der Hand bzw. mit der Pinzette können solche Genauigkeiten kaum erreicht werden. Man bedient sich auch bei der manuellen Bestückung spezieller Hilfsmittel, die das Aufnehmen, Positionieren und Absetzen der Bauelemente durch dreiaxiale Führungen unterstützen. Das unten stehende Bild zeigt das Prinzip einer solchen Bestückungshilfe.



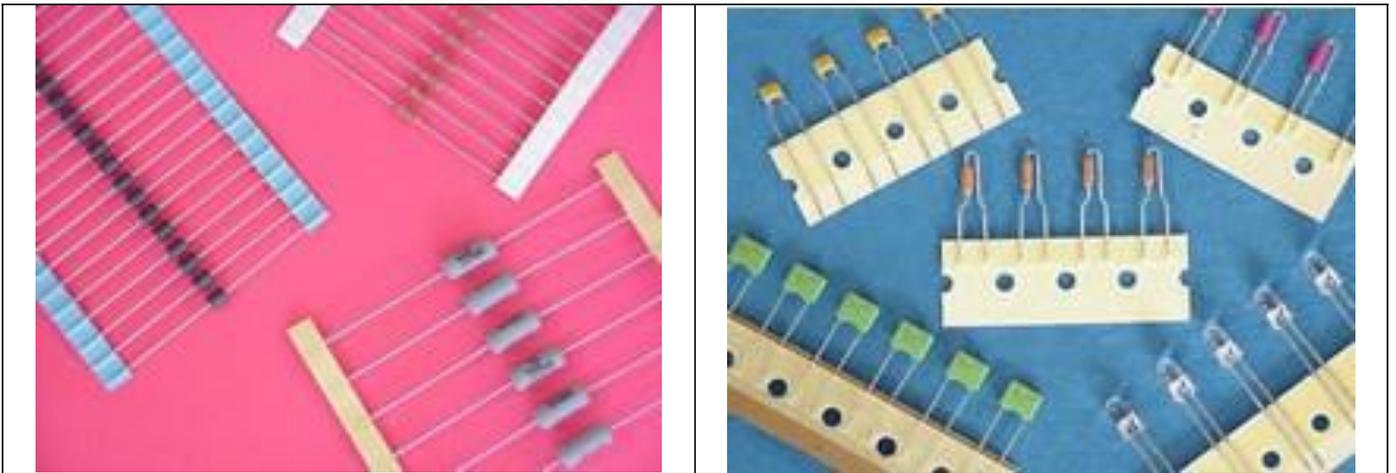
Manuelle Bestückung von Bauelementen (Pick&Place) [Siem-01]

Das Aufnehmen und Absetzen der Bauelemente verleiht dieser Technik auch ihren Namen: *Pick&Place*. Der Bestückvorgang wird bei halbautomatischen Geräten durch eine Positionserkennung und automatische Bremsvorrichtung unterstützt, so dass der Bediener schneller und sicherer die exakte Position findet. Für eine industrielle Fertigung sind allerdings sehr hohe Bestückungsgeschwindigkeiten erforderlich, die für die meisten Baugruppen manuell nicht erreicht werden können. Im Fertigungsdurchlauf sollte eine Baugruppe bei jeder Prozessstation möglichst nicht länger als eine Minute verweilen. Bei mehreren hundert Bauelementen pro Leiterplatte sollte deshalb die Bestückung eines einzelnen Bauelementes weniger als eine halbe Sekunde dauern. Dazu sind Bestückungsautomaten (kurz: Bestücker) erforderlich, die mit hoher Geschwindigkeit und Präzision arbeiten. Der Nachschub an Bauelementen wird den Bestückungsautomaten natürlich auch automatisch zugeführt. Die Vorrichtungen, die die Bauelemente aus einem Magazin herausnehmen um damit den Automaten zu "füttern", werden auch als *Feeder* bezeichnet. Dementsprechend bezeichnet man die Vielzahl der kleinen Bauelemente auch umgangssprachlich als *Chicken Feed* (Hühnerfutter).



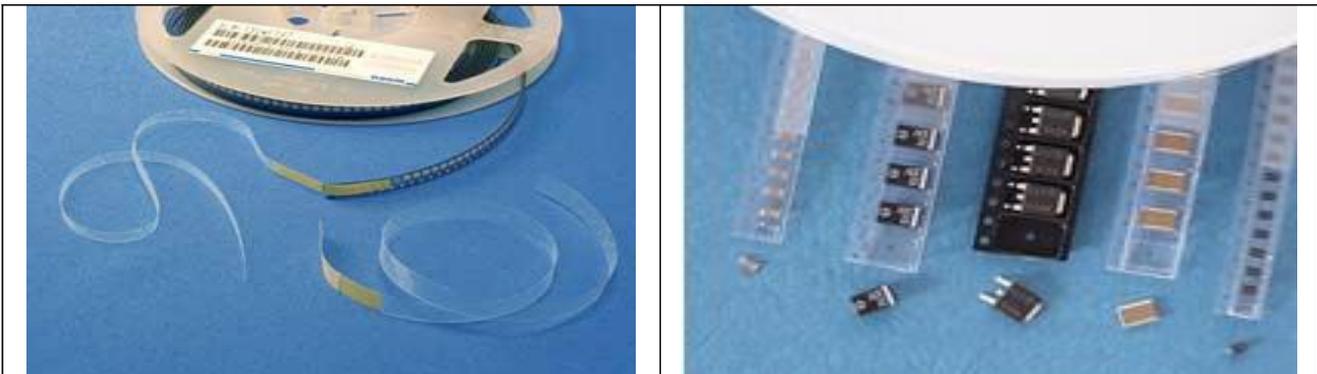
Bauelemente-Feeder für automatische Bestückung [Siem-01]

Damit die Bauelemente sicher identifiziert, gelagert und entnommen werden können, haben sich für die bedrahteten Bauelemente (THD) standardisierte Papiergurte etabliert, in denen die Drahtanschlüsse eingeklebt sind. Da für die Weiterverarbeitung die Drähte ohnehin auf die richtige Länge geschnitten und zurechtgebogen werden müssen (Verfahren: Umformen), schneidet der Automat die THD aus den Gurten (siehe Bild) einfach heraus (Verfahren: Trennen).



Bedrahtete Bauelemente für die Durchsteckmontage (THD) werden häufig in Papiergurte geklebt

Oberflächenmontierte Bauteile, die keine Drähte besitzen, können nicht in Gurte geklebt werden. Diese werden dagegen in die kleinen Kammern spezieller Kunststofffilmstreifen gelegt. Damit die SMD nicht beim Transport herausfallen, wird der Filmstreifen mit einer dünnen Folie abgedeckt. Wie im Bild unten zu sehen ist, können die SMD so auf eine Filmspule gewickelt und auch von dieser abgewickelt werden. Bei der Entnahme der SMD aus dem Filmstreifen wird die Abdeckfolie zuerst abgezogen und das Bauteil mit einer Vakuumpipette herausgesaugt. Das Herausnehmen schwerer Bauteile kann auch von unten mit einem Auswerfer unterstützt werden, weshalb die Filmstreifen kleine Löcher in den Kammern besitzen.



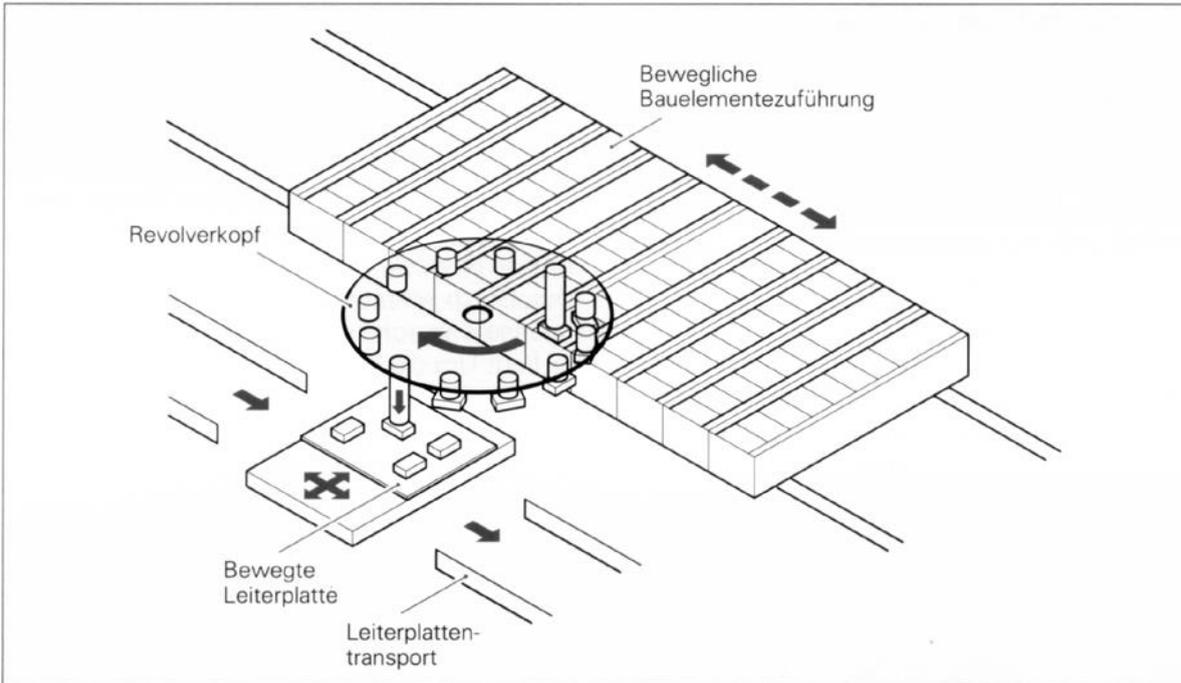
Oberflächenmontierte Bauelemente (SMD) werden in perforierten Kunststofffilmstreifen, die mit einer Schutzfolie abgedeckt sind, auf Filmspulen aufgewickelt



Hochpolige Bauelemente werden häufig im Magazin oder Tablett (*Tray*) zugeführt

Hochpolige Bauelemente mit empfindlichen Anschlüssen können auf die beschriebene Weise nicht verpackt werden. Diese werden in stabileren Magazinrängen oder auf Tablett (Tray) verpackt und geliefert. Die Bestückautomaten sollten mit möglichst unterschiedlichen Verpackungs- und Lieferformen der Bauelemente arbeiten können. Dabei ist es auch wichtig, dass die verschiedenen Magazine so schnell wie möglich gewechselt werden können. Dadurch werden die Stillstandzeiten beim Umrüsten zwischen verschiedenen Produkten oder auch beim Nachfüllen verbrauchter Magazine minimiert.

Damit die Bauelemente möglichst schnell vom Magazin auf die Leiterplatte übertragen werden können, können die Vakuumpipetten oder Greifer für die Bauelemente beispielsweise an einem Revolverkopf montiert sein (Bild unten). Der Revolverkopf kann gleichzeitig Bauelemente aus dem Magazin laden und auf die Leiterplatte "schießen", weshalb die Vorrichtung auch als *Chipshooter* bezeichnet wird. Sowohl das Bauelementemagazin als auch die Leiterplatte können unter dem rotierenden Revolverkopf in Position gebracht werden. Da die Masse der Bauelemente durch ihre Trägheit die Rotationsgeschwindigkeit der *Chipshooters* begrenzt, variiert die Bestückzeit je nach Bauelementgröße zwischen 0,09 s und 0,40 s pro Bauelement.

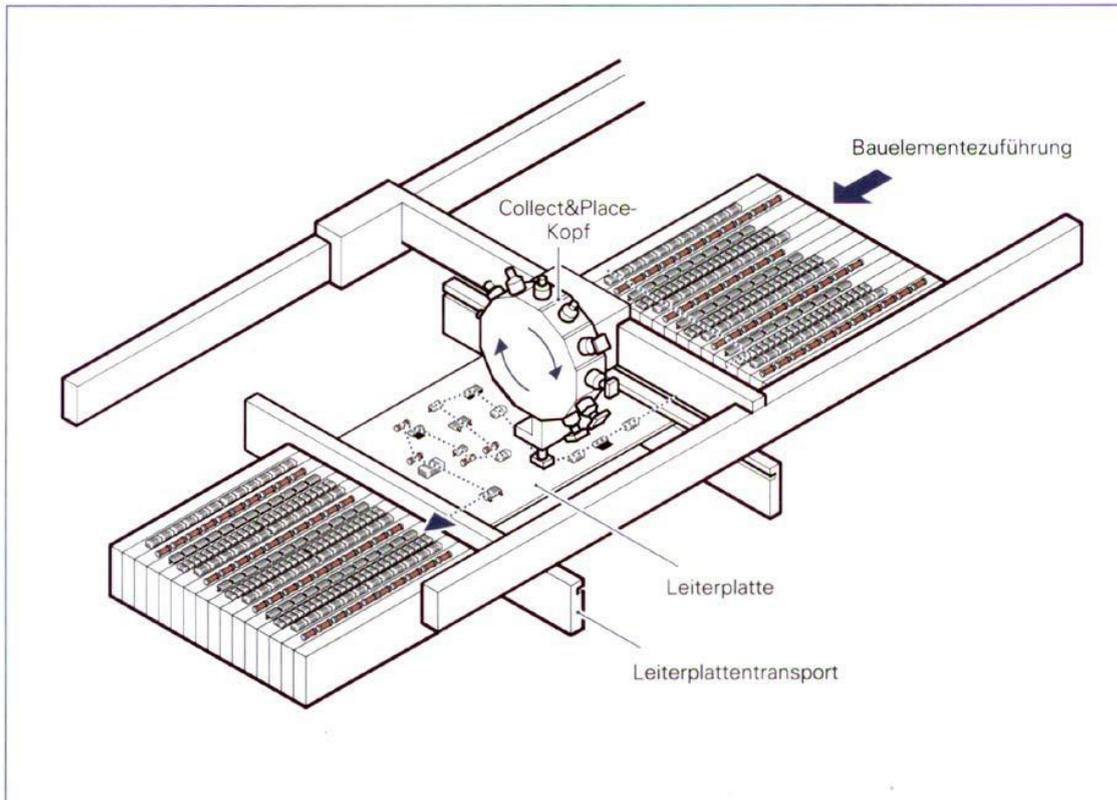


Automatische Bestückung mit Bauelementezuführung (*Feeder*), Revolverkopf und *Chipshooter* [Siem-01]

Eine durchschnittlich höhere Bestückleistung wird durch einen *Collect&Place* Bestücker erreicht, der die Bauelemente an einem vertikal rotierenden Bestückkopf zunächst im Magazin einsammelt und anschließend auf der Leiterplatte entlädt. Diese Bestücker erreichen eine konstante Bestückzeit von etwa 0,14 s, unabhängig von der Bauelementgröße. Meistens befinden sich in einem Automaten mehrere Bestückköpfe gleichzeitig, wodurch sich die Gesamtprozesszeit weiter verringert.

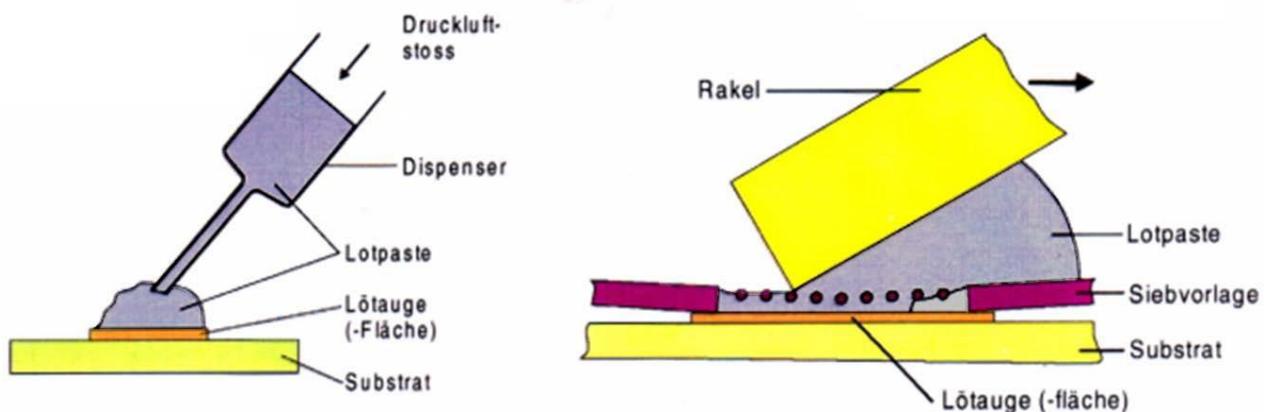
Klassifizierung von Bestückungsautomaten:

Bestücker:	Einstieg	Standard	Hochleistung	Höchstleistung
Leistung BE/h	<2000	2000 - 4000	4000 – 60.000	100.000 – 140.000
Anzahl BE-Typen	<60	60 - 120	60 - 300	100 – 200
Flexibilität	hoch	sehr hoch	sehr hoch	gering
Anwendung	Kleinserienfertigung Prototypenfertigung	mittelständische Lohnbestücker	mittelst. u. große Untern. mit hoher Fertigungsleistung	Großunternehmen der Konsumgüter- industrie



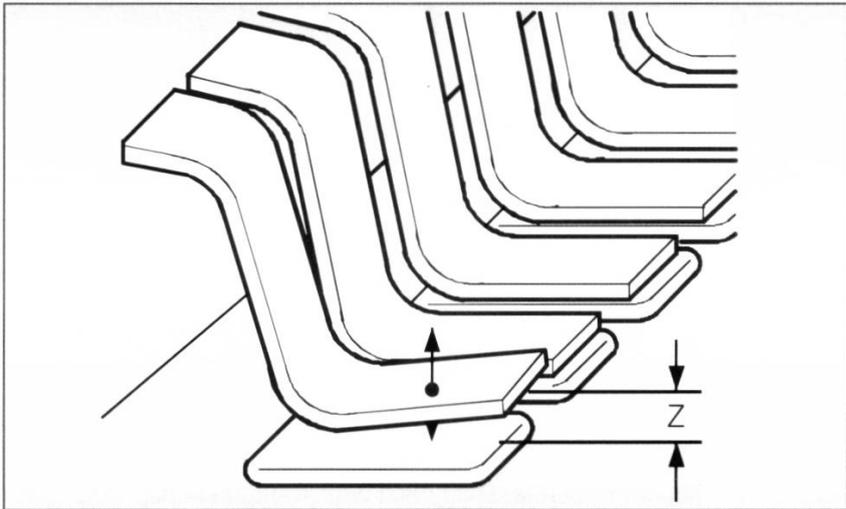
Automatische Bestückung mit Bauelementezuführung (Feeder) und Collect&Place Bestückkopf [Siem-01]

Die durch den Bestücker auf den Leiterplatten platzierten Bauelemente müssen bis zum Lötprozess fixiert werden, damit sie nicht verrutschen oder herunterfallen können. Bei den SMD übernimmt diese Aufgabe die Lotpaste, die vor dem Bestücken auf die Leiterplatte aufgetragen wird (Verfahren: Beschichten). Die Lotpaste besteht aus einem Gemisch aus Lotpulver und Flussmittel (Suspension), das wie eine zähflüssige Masse gedruckt werden kann. Das Flussmittel hat beim Bestücken die Funktion eines Klebstoffes, auf dem die bestückten Bauelemente anhaften (Verfahren: Fügen). Für einzelne Bauelemente kann die Lotpaste durch eine Kanüle direkt auf das Pad (im Bild: Lötauge) der Leiterplatte (im Bild: Substrat) durch einen Dispenser aufgetragen werden. Der Dispenser besteht aus einer Kartusche, die mit Lotpaste (oder einer anderen Paste) gefüllt ist und die mit Druckluft durch die Kanüle gepresst wird. Zur besseren Abdichtung wird in der Regel der Luftdruck über einen Kolben, der sich in der Kartusche befindet, übertragen. Für die Massenfertigung ist der Auftrag der Lotpaste mittels Schablonen- oder Siebdruck effektiver. Eine strukturierte Maske (Schablone oder Sieb) wird dazu auf die Leiterplatte gelegt und die Paste mit einem Rakel durch deren Öffnungen gedrückt. Auf diese Weise lassen sich auch große Flächen sehr schnell und gleichmäßig mit Lotpaste bedrucken.



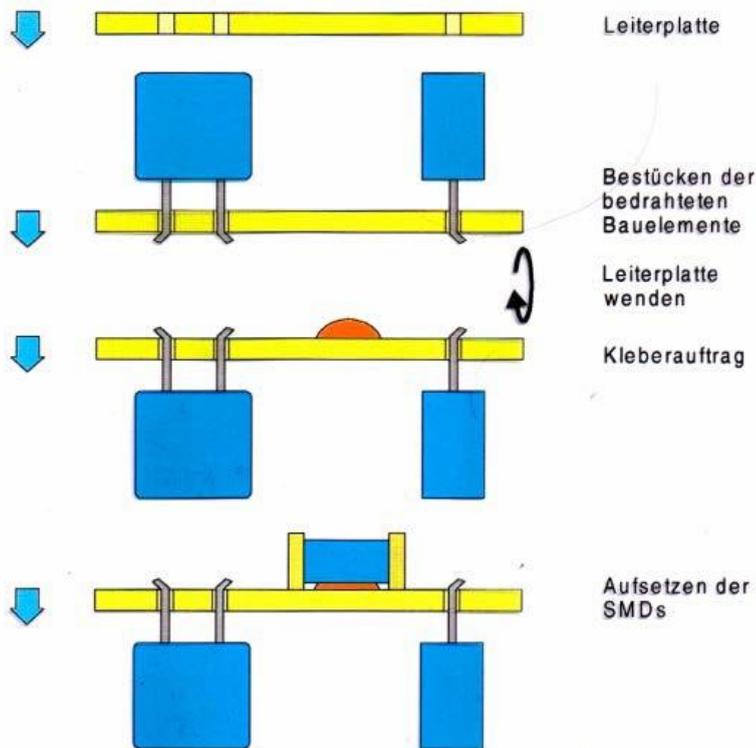
Das Beschichten der Leiterplatte mit Lotpaste erfolgt durch Dispensen oder Schablonen- bzw. Siebdruck

Die Lotpaste erfüllt bei der Montage noch einen weiteren wichtigen Zweck. Sie gleicht die Bestückungstoleranzen in der Vertikalen (z-Achse) aus, die besonders bei hochpoligen Bauelementen auftreten können. Wenn die Anschlussbeinchen (*Pin*) der Bauelemente nicht gleichmäßig auf der Leiterplattenoberfläche aufliegen, spricht man auch vom Koplanaritätsfehler. Bei dem bereits oben aufgeführten Beispielbauelement mit einem 0,5 mm Raster beträgt der zulässige z-Abstand beispielsweise 80 µm.



Koplanaritätsfehler von mehrpoligen SMD mit Anschlussbeinchen [Siem-01]

Damit trotz dieser unvermeidbaren Koplanaritätsfehler eine sichere Verbindung entstehen kann, muss die Lotpaste den verbleibenden Abstand ausgleichen können. Deshalb muss die Paste mindestens mit einer Dicke > 80 µm gedruckt werden, üblich sind heute Pastendicken zwischen 120 µm und 150 µm. Die Anschlussbeinchen können beim Aufsetzen der Bauelemente in der Paste teilweise einsinken.



Bestückung von SMD und THD bei gemischt bestückten Baugruppen

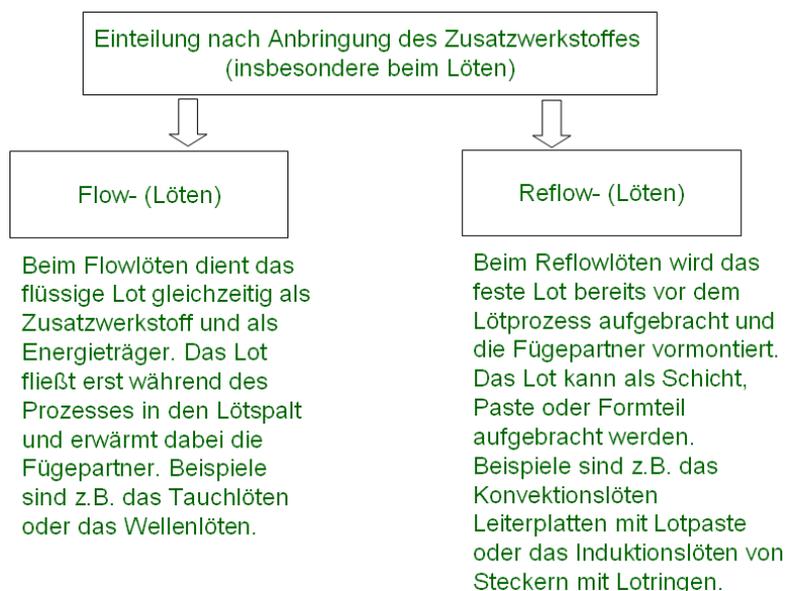
Bei gemischt bestückten Baugruppen erfordert der Bestückungsprozess unter Umständen zusätzliche Arbeitsschritte. Da die durchgesteckten THD in der Regel nicht mit Lotpaste sondern durch geschmolzenes Lot aus einem Lotbad gelötet werden, müssen auch die gleichzeitig verarbeiteten SMD speziell fixiert werden. Während die Drähte der THD durch Umbiegen oder das Formen von sogenannten Sicken (definierte Knicke im Draht, Verfahren: Umformen) in den Löchern der Leiterplatten festsitzen, müssen die SMD ohne Lotpaste zusätzlich geklebt werden (Verfahren: Fügen). Der Klebstoff (in der Regel ein Epoxidharz) wird dabei nicht auf die Kontakte sondern auf den Bauteilkörper, meist in dessen Mitte, aufgetragen. Das Härten des Klebstoffs erfolgt bei niedrigen Temperaturen zwischen 80°C und 150°C innerhalb weniger Minuten. Ähnlich wie die Lotpaste kann der Klebstoff auch disperst oder gedruckt werden.

Reflowlöten

Das Lötten ist für die Elektronik eine der wichtigsten Fügeverfahren und wird vor allem bei der Herstellung elektronischer Baugruppen auf Leiterplatten benutzt. Dabei handelt es sich fast immer um das Weichlöten, also das Lötten mit Loten die einen Schmelzpunkt unter 450°C haben. Tatsächlich besitzen die in der Elektronik üblichen Lote sogar eher einen Schmelzpunkt um die 200°C auf der Basis von Zinnlegierungen. Die Komponenten und Materialien die für elektronische Baugruppen verwendet werden sind meistens äußerst temperaturempfindlich und überstehen die Löttemperaturen von ca.

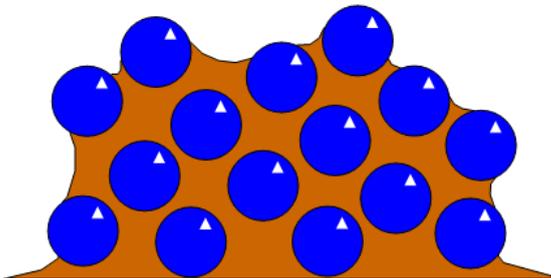
250°C nur für einige 10 Sekunden. Besonders empfindlich sind Kunststoffteile, die beim Lötten erweichen können oder auch Keramik-Schichtkondensatoren, die beim schnellen Erhitzen Risse bekommen.

Beim Weichlöten in der Elektronik bestehen die Grundwerkstoffe aus den metallischen Kontakten der Leiterplatte auf der einen Seite (Kupfer) und der Bauelemente auf der anderen Seite (häufig Nickel). Der Zusatzwerkstoff ist das Weichlot, das mit dem Flussmittel als Hilfsstoff gemeinsam an der Fügestelle appliziert wird. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie der Zusatzwerkstoff, also das Lot, an die Fügestelle gebracht werden kann. Entweder wird das flüssige Lot als Schmelze an die bereits vormontierten Bauelemente gegeben, wo es in den Fügespalt fließen kann, dann spricht man vom *Flowlöten*. Oder das Lot wird im festen Zustand auf die Leiterplatte gebracht (als Paste gedruckt) und danach werden erst die Bauelemente bestückt, anschließend wird das Lot durch Erwärmung verflüssigt, dann spricht man vom *Reflowlöten*. Obwohl das Reflowlöten das modernere Verfahren ist und vor allem für sehr kleine oberflächenmontierte Bauelemente verwendet wird, hat auch das Flowlöten heute noch seine Berechtigung.



Damit das feste Lot beim Reflowlöten leichter auf die Leiterplatte aufgetragen werden kann, wird es in der Regel mit dem Flussmittel zusammen zu einer Paste verarbeitet. In dieser Paste ist das Lot in Form von Pulver als Suspension fein verteilt. Die Lotpaste lässt sich auf diese Weise leicht durch ein Sieb oder eine Schablone auf die Leiterplatte drucken. Sie besteht etwa zu 50 Vol.% aus dem Lotpulver

(Kugeln mit einem Durchmesser zwischen 10 µm und 50 µm, typisch 25 µm) und zu 50 Vol.% aus dem Flussmittel, dass sich wiederum aus dem Lösemittel, den Aktivatoren, Bindemitteln und weiteren Additiven zusammensetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte von Lotpulver und Flussmittel beträgt der Masseanteil des Lotes in der Lotpaste zwischen 80..90 Mass.%.

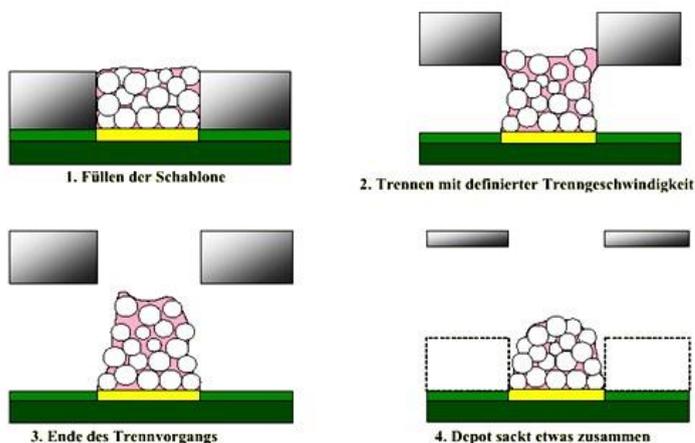


Zusammensetzung der Lotpaste aus 50% Lotpulver und 50% Flussmittel



Gedruckte Lotpaste auf Leiterplat

Beim Drucken wird die Lotpaste in die Öffnungen einer Metallschablone gefüllt, die auf einer Leiterplatte aufliegt. Dazu wird die Paste mit einem Rakel (eine Art Stahllineal) über die Oberfläche der Schablone geschoben (Verfahren: Beschichten). Nachdem Abheben der Schablone verbleibt die gedruckte Paste auf dem Grundwerkstoff, nämlich den Kupferanschlüssen der Leiterplatte.



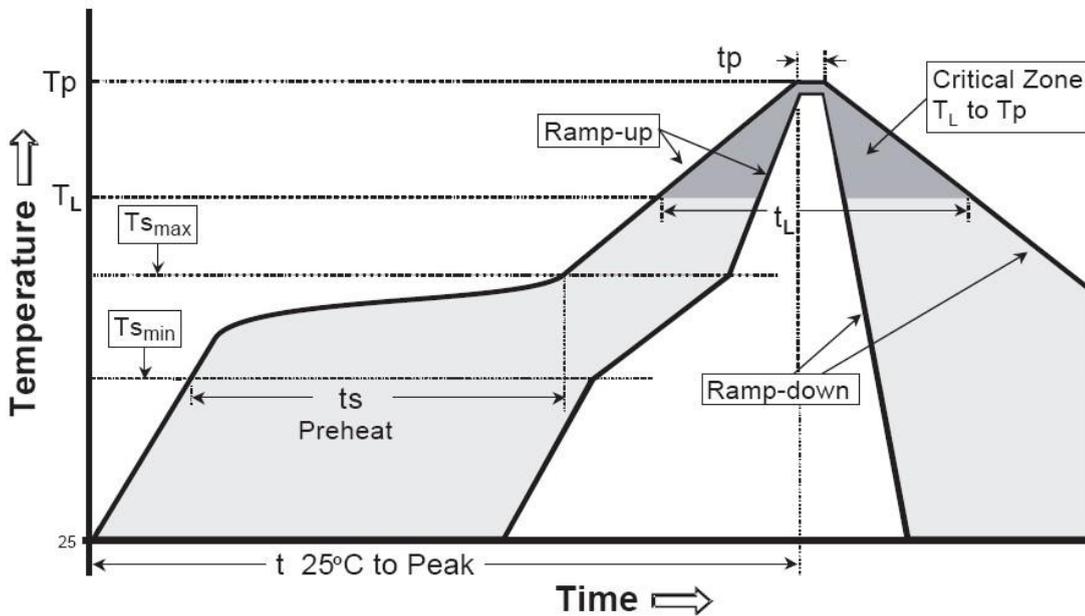
Nach dem Drucken des Zusatzwerkstoffes erfolgt das Bestücken der Bauelemente (Verfahren: Fügen), so dass die Vormontage komplett ist. Nun muss beim Reflowlöten das Lotpulver in der Paste zum Schmelzen gebracht werden. Die dafür notwendige Wärme kann prinzipiell auf beliebige Weise erzeugt werden. Einige typische Beispiele sind die folgenden Wärmequellen:

- IR-Strahlung (Laser, Licht)
- Konvektion (Luft, Stickstoff)
- Konduktion (Heizplatte, LötKolben)
- Kondensation (Dampfphasenlöt)
- Ultraschall (US-Bonden)
- elektrisches Feld (Widerstandsschweißen)
- magnetisches Feld (Induktionslöt)
- Druck (Pressschweißen)
- Oxidation (Flammlöt)

Noch vor einigen Jahren wurden elektronische Baugruppen überwiegend in großen Öfen durch Strahlung reflowgelötet. Der Nachteil dieser Methode ist, dass sich Bauteile mit unterschiedlicher Farbe und Oberfläche auch unterschiedlich stark erwärmen.

Das ist für einen kontrollierten Lötprozess sehr ungünstig, so dass man in jüngster Vergangenheit mehr und mehr zum Reflowlöten durch Konvektion übergegangen ist.

Ein industrieller Reflowlöten besteht aus einem Transportband auf dem die vormontierten Baugruppen kontinuierlich durch den Ofen bewegt werden und dem eigentlichen Ofen, der aus mehreren Heizzonen besteht und eine Länge von über 10 m besitzen kann. Da die Anforderungen an die Lötprozess sehr hoch sind, werden die Temperaturen, Zeiten und Anstiege sehr genau vorgegeben, wie die Darstellung aus einer aktuellen Norm im folgenden Bild zeigt.



IPC-020c-5-1

Lötprofil nach Norm: IPC/JEDEC J-STD 020C Tabelle: Profildaten für bleihaltige und bleifreie Lote

Profile Feature	Sn-Pb Eutectic Assembly	Pb-Free Assembly
Average Ramp-Up Rate ($T_{s_{max}}$ to T_p)	3 °C/second max.	3° C/second max.
Preheat		
- Temperature Min ($T_{s_{min}}$)	100 °C	150 °C
- Temperature Max ($T_{s_{max}}$)	150 °C	200 °C
- Time ($t_{s_{min}}$ to $t_{s_{max}}$)	60-120 seconds	60-180 seconds
Time maintained above:		
- Temperature (T_L)	183 °C	217 °C
- Time (t_L)	60-150 seconds	60-150 seconds
Peak/Classification Temperature (T_p)	See Table 4.1	See Table 4.2
Time within 5 °C of actual Peak Temperature (t_p)	10-30 seconds	20-40 seconds
Ramp-Down Rate	6 °C/second max.	6 °C/second max.
Time 25 °C to Peak Temperature	6 minutes max.	8 minutes max.

Table 4-1 SnPb Eutectic Process – Package Peak Reflow Temperatures

Package Thickness	Volume mm ³ <350	Volume mm ³ ≥ 350
<2.5 mm	240 +0/-5 °C	225 +0/-5°C
≥ 2.5 mm	225 +0/-5°C	225 +0/-5°C

Table 4-2 Pb-free Process – Package Classification Reflow Temperatures

Package Thickness	Volume mm ³ <350	Volume mm ³ 350 - 2000	Volume mm ³ >2000
<1.6 mm	260 +0 °C *	260 +0 °C *	260 +0 °C *
1.6 mm - 2.5 mm	260 +0 °C *	250 +0 °C *	245 +0 °C *
≥2.5 mm	250 +0 °C *	245 +0 °C *	245 +0 °C *

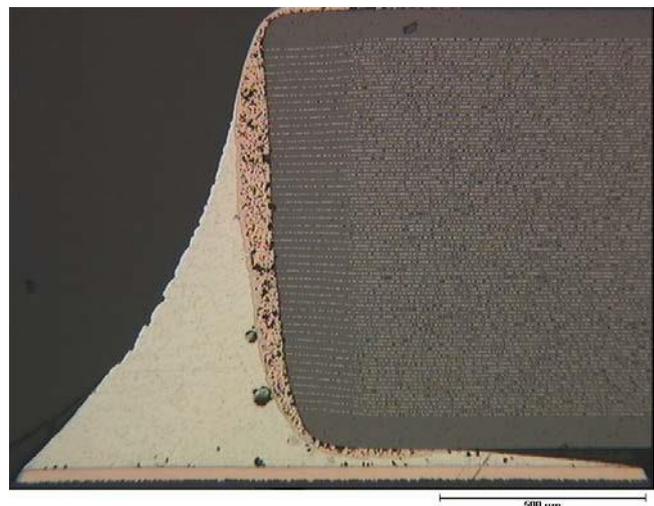
* Tolerance: The device manufacturer/supplier **shall** assure process compatibility up to and including the stated classification temperature (this means Peak reflow temperature +0 °C. For example 260 °C+0°C) at the rated MSL level.

Die einzuhaltenden Werte und Toleranzen der so genannten Lötprofile (Temperatur über Zeit) werden maßgeblich durch die verwendeten Lotlegierungen und deren Schmelzpunkte bestimmt. Die Schmelztemperatur der Legierung muss an allen Lötstellen der Leiterplatte sicher überschritten werden. Andererseits darf die Temperatur auch nicht zu hoch gewählt werden, damit die Baugruppe keinen Schaden nimmt. Das Flussmittel aus der Lotpaste, dass beim Löten die Oberflächen der Grundwerkstoffe von Oxiden und anderen Verunreinigungen befreit, zersetzt sich oder verdampft beim Löten, so dass von diesem nur wenige kaum sichtbare Rückstände auf der Baugruppe verbleiben. Das Lotpulver der Paste sollte aber komplett schmelzen und die Grundwerkstoffe am Bauelemente und der Leiterplatte möglichst gut benetzen. Besonders gut ist das an einem Querschnitt der Verbindungen zu erkennen, so in den zwei typischen Beispielen für reflowgelötete Bauelementeanschlüsse aus der SMT:

Lötverbindungen im Querschnitt (metallographische Schliff)

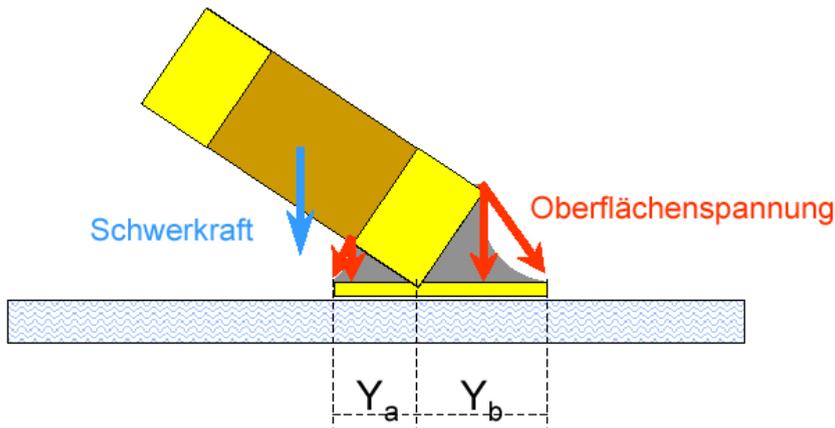


Reflow-gelötete Verbindung eines integrierten Schaltkreises (Bauform QFP32)



Reflow-gelötete Verbindung eines Chipkondensators (Bauform CC1206)

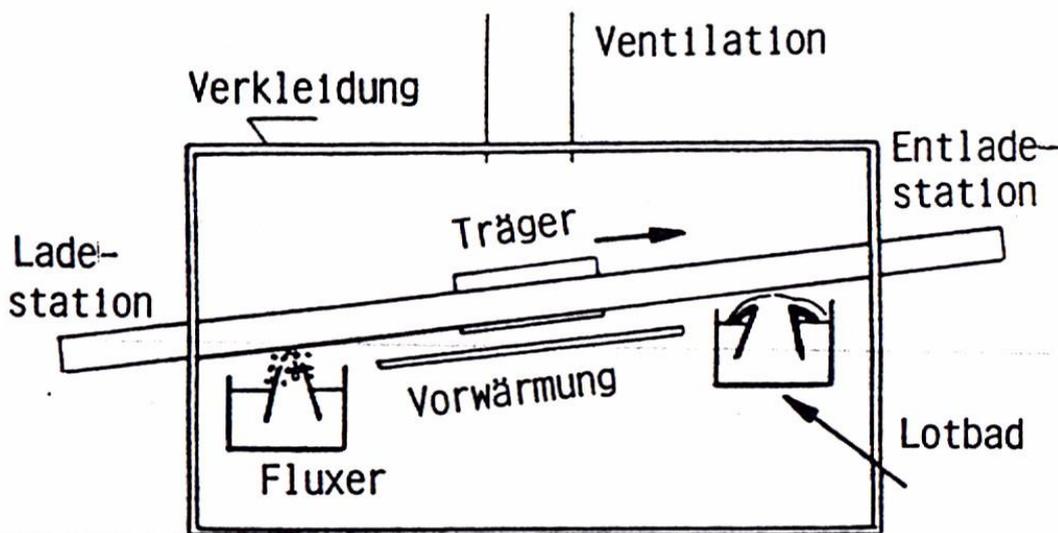
Die Kräfte die beim Benetzen der Bauteile wirken können so groß sein, dass diese durch die Oberflächenspannung in ihrer Position ausgerichtet bzw. zentriert werden. Dadurch ist es möglich dass kleinere Ungenauigkeiten beim Bestücken der Bauelemente nachträglich beim Löten korrigiert werden. Dieses selbstständige Ausrichten der Bauelemente beim Löten durch die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes nennt man auch *Self-Alignment*. Die wirkenden Oberflächenkräfte können aber auch nachteilige Wirkung haben. Besonders leichte zweipolige Bauteile, wie z.B. Chipkondensatoren, können beim Löten kippen oder sich aufrichten, wenn das Lot auf einer der beiden Seiten schneller schmilzt als auf der anderen. Das folgende Bild soll diesen Effekt veranschaulichen.



Überwindet die Oberflächenspannung, die an der Bauteilekante wirkt, die Gewichtskraft des Bauelementes, richtet sich dieses auf und kann senkrecht auf der Leiterplatte wie ein Grabstein stehen. Deshalb wird dieses Fehlerbild auch Grabsteineffekt oder *Tombstone Effect* genannt.

Flowlöten

beim Fügen durch Flowlöten wird der Zusatzwerkstoff, das Weichlot, in flüssiger Form den zu verbindenden Grundwerkstoffen zugeführt, so dass es in den Lotspalt der vormontierten Bauteile fließen kann (daher der Begriff Flowlöten). Im einfachsten Fall wird zu diesem Zweck das Lot in einem Tiegel geschmolzen, so dass ein flüssiges Lotbad entsteht. Einfache Lötbaugruppen können in ein solches Lotbad eingetaucht werden, man spricht in diesem Fall vom Tauchlöten. Für moderne Leiterplatten, die sehr empfindlich sind, ist das Tauchlöten aber nicht geeignet. Häufig werden aber Drähte und Bauteilanschlüsse durch Tauchen verzinkt (Verfahren: Beschichten). Aus dem Tauchlöten hat sich das Wellenlöten entwickelt, das auch als Schwalllöten bezeichnet wird. Beim Wellenlöten wird das flüssige Lot aus einem großen Lotbad (500 kg Lotschmelze und mehr) mit einer Pumpe durch eine Düse gepumpt, so dass die Baugruppe nicht komplett in das Bad getaucht werden muss sondern mit dem flüssigen Lot an der Düse in Kontakt gebracht werden kann. Dadurch benetzt das Lot nur die Unterseite der Baugruppe, wo die Bauteilanschlüsse mit der Leiterplatte verlötet werden. Das Wellenlöten ist das älteste Massenlötverfahren für elektronische Baugruppen und wird bereits seit den sechziger Jahren benutzt. Der prinzipielle Aufbau einer Wellenlötanlage ist im folgenden Bild zu erkennen.



[Quelle: Klein-Wassink, Weichlöten in der Elektronik, Leuze Verlag, 1991]

Die Baugruppen können auf einfache Weise mit einem Transportband automatisch über das Lotbad mit der Düse und über das fließende Lot geführt werden. Wie im Bild zu sehen ist besitzt das Transportsystem eine leichte Steigung, in der Praxis hat sich ein Winkel von 11° bewährt. Durch diese Steigung kann das überschüssige Lot von der Baugruppe leichter abfließen. Weiterhin gehören auch der Fluxer und die Vorwärmung zur Wellenlötanlage. Der Fluxer dient dazu, das Flussmittel auf die Baugruppe aufzutragen (Verfahren: Beschichten). Üblich sind Schaumfluxer oder auch Sprühfluxer. Beim Schaumfluxer wird das Flussmittel in einem Bad mit einem Luftsprudler aufgeschäumt, so dass die Leiterplatte mit dem Schaum benetzt werden kann. Moderner sind so genannte Sprühfluxer, mit denen das Flussmittel durch eine bewegliche Düse auf die Baugruppe gesprüht wird. Der Vorteil des Sprühfluxers besteht darin, dass nur dort Flussmittel aufgesprüht werden kann, wo es benötigt wird. Außerdem lässt sich die Menge wesentlich genauer dosieren. Während beim Schaumfluxer das Flussmittel immer wieder in den Vorratsbehälter zurückfließt und dadurch allmählich verunreinigt und verbraucht wird, kann mit dem Sprühfluxer immer frisches Flussmittel aus einem Vorratstank angeboten werden.

Nach dem Fluxer fährt die Baugruppe über eine Vorwärmeinrichtung, die in der Regel nur aus Infrarotstrahlern bzw. Heizplatten besteht. Die Vorwärmung ist sehr wichtig, damit das Flussmittel getrocknet (Verfahren: Stoffeigenschaftsändern) wird und die Baugruppe bei der Berührung mit dem flüssigen Lot keinen Temperaturschock erleidet. Während das flüssige Lot, je nach verwendeter Legierung, eine Temperatur zwischen 245°C und 270°C besitzt, wird die Baugruppe bei der Vorwärmung auf 120°C bis 200°C erwärmt. Es ist auch sehr wichtig, dass keine Feuchtigkeit an der Baugruppe haftet oder im Material enthalten ist. Bei der Berührung mit dem heißen Lot würde das Wasser schlagartig verdampfen, Lotspritzer verursachen und auch die Bauelemente oder die Leiterplatte zerstören.

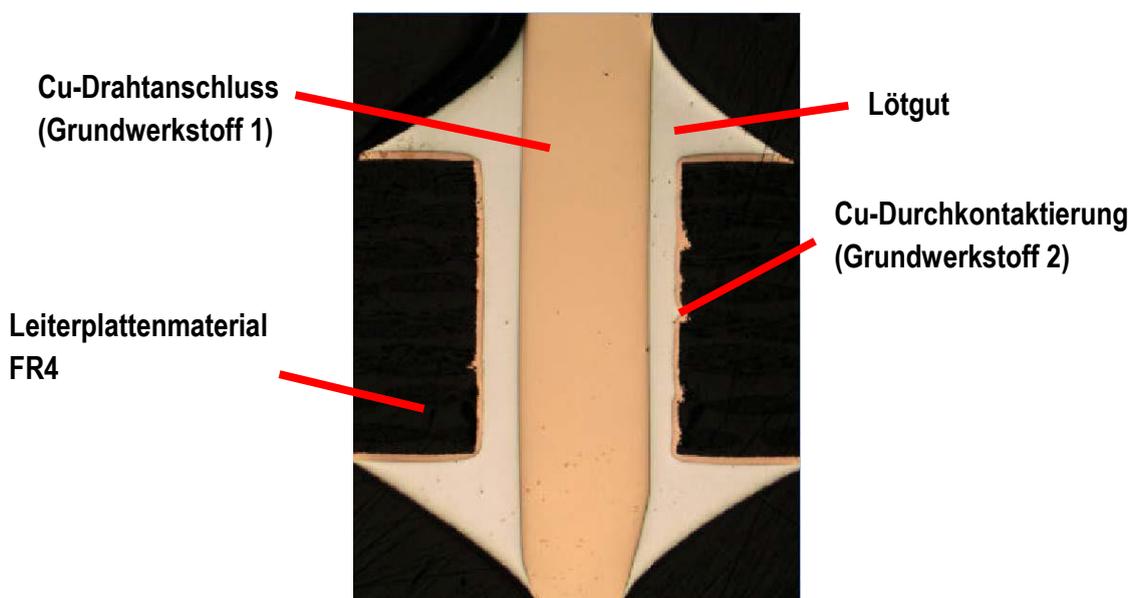
Die meisten Lotwellen werden mit mechanischen Pumpen betrieben, bei denen ein Flügelrad in das Lotbad getaucht wird und das flüssige Lot in den Pumpenschacht der Lötdüse presst. Der eigentliche Antrieb (Elektromotor) befindet sich außerhalb des Lotbades. Die Düse ragt nur wenige Zentimeter über die Lotbadhöhe hinaus, so dass die Pumphöhe minimal ist und das Lot auf kurzem Weg in das Bad zurückfließen kann. Eine besonders innovative aber bisher wenig verbreitete Pumpenart bedient sich des Linearmotor-Prinzips. Bei der sog. elektrodynamischen oder Jet-Welle wird das flüssige Lot als elektrischer Leiter durch Induktion in einem wandernden Magnetfeld beschleunigt. Diese Pumpe besitzt keine mechanischen Verschleißteile und kann das Lot mit hoher Geschwindigkeit beschleunigen, so dass es im Bogen aus dem Lotbad gedrückt wird und wieder zurückströmt. Die so entstehende Hohlwelle benetzt die Leiterplatten durch die Strömungsgeschwindigkeit und den Lotdruck sehr gut. Der unter der Welle entstehende Unterdruck saugt zusätzlich den Lotüberschuss ab, was zu einer Reduzierung von Fehlern durch Lotbrücken führt. Dass das beschriebene Pumpenprinzip kaum Verbreitung gefunden hat liegt in erster Linie an der patentrechtlichen Situation und den traditionellen Strukturen innerhalb der Branche.

Moderne Wellenlötanlage besitzen zwei Lötdüsen, die das Lot aus einem gemeinsamen Lotbad pumpen. Die erste Lötdüse, die auch als Chipwelle bezeichnet wird, hat die Aufgabe mit hohem Druck und starker Turbulenz die Lotschmelze in alle Winkel und Zwischenräume der Baugruppe zu pressen, damit auch kleinste Teile und schmale Lotspalte benetzt werden. Dabei kann aber leicht ein Lotüberschuss entstehen der zu Brücken und Kurzschlüssen führt. Deshalb wird mit der zweiten Lotdüse, die auch als Laminarwelle bezeichnet wird, das überschüssige Lot wieder abgezogen. Ein Problem des Wellenlötens besteht darin, dass das Lot vor allem an den Düsen mit hoher Geschwindigkeit fließt und sehr schnell oxidiert. Das Oxid bildet allmählich eine feste Kruste auf der Oberfläche des Lotbades, wo es sich mit Flussmittelresten und anderen Verunreinigungen vermischt. Dieses Gemisch wird auch als Lotkrätze bezeichnet. Diese muss mehrmals am Tag beseitigt werden, damit die Düse nicht verstopfen. Dabei wird leider sehr viel Lot verbraucht, das aber später wieder recycelt werden kann.

Ebenfalls hat sich in modernen Wellenlötanlagen das Lötens unter Schutzgasatmosphäre durchgesetzt. Dazu wird die gesamte Maschine mit Stickstoff geflutet, der mit leichtem Überdruck die Luft und damit den Sauerstoff aus dem Inneren verdrängt. Der Vorteil des Schutzgases besteht darin, dass die Oxidation des Lotbades verhindert werden kann, so dass fast keine Lotkrätze entsteht. Außerdem benötigt man auch weniger Flussmittel bzw. es können auch Flussmittel mit schwächeren Aktivatoren benutzt werden, deren Rückstände weniger aggressive Wirkung haben. Dazu ist es aber notwendig, dass der Restsauerstoff in der Anlage auf unter 200 ppm (0,02 %) abgesenkt wird. Da Wellenlötanlagen praktisch immer in einer Linie betrieben werden, müssen die Enden dieser Anlagen offen sein. Nur durch einen permanenten Überdruck der Stickstoffatmosphäre, der mit einem hohen Gasdurchfluss und möglichst kleinen Ein- und Auslauföffnungen erreicht wird, kann der geringe Restsauerstoffanteil gewährleistet Konstruktion und Fertigung elektronischer Baugruppen - Baugruppenmontage

werden. Dafür werden üblicherweise über 20 m³ Stickstoff pro Stunde verbraucht, d.h. ein durchschnittlicher Wohnraum mit 100 m³ würde innerhalb von 5 Stunden komplett mit Stickstoff gefüllt werden. Neben einem großen Stickstofftank ist auch eine gute Be- und Entlüftung der Arbeitsräume erforderlich.

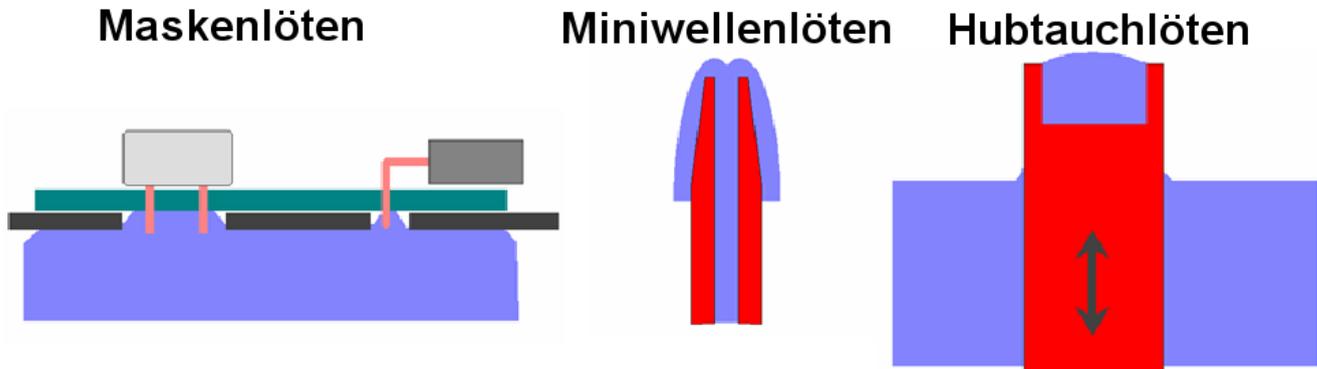
Durch das Zusammenwirken von Flussmittel und flüssigem Lot der Lotwellen sollen die durchgesteckten Drähte der Bauelemente (THD) möglichst vollständig in der Durchkontaktierung der Leiterplatte verlötet werden. Dazu ist es notwendig, dass das Lot mindestens 2 mm am Draht nach oben steigt, bis zur Oberseite der Leiterplatte. Eine solche Verbindung ist im folgenden Querschnittsbild (metallographischer Querschliff) zu sehen. Neben dem Druck der Lotwelle und der Oberflächenaktivierung der Flussmittel ist vor allem die richtige Temperatur entscheidend, um eine derartig gute Benetzung zu erreichen. Das flüssige Lot muss ausreichend erwärmt sein (*bleihaltige Lote mit 183°C Schmelztemperatur werden auf 245°C..255°C erwärmt, bleifreie Lote mit 227°C Schmelztemperatur werden auf 260°C..270°C erwärmt*), damit es beim Berühren der kälteren Leiterplatte nicht erstarrt. Dem kann man entgegenwirken, indem die Leiterplatte ausreichend vorgewärmt wird (*Vorwärmung für bleihaltiges Löten: 120°C..170°C, Vorwärmen für bleifreies Löten: 160°C..200°C*).



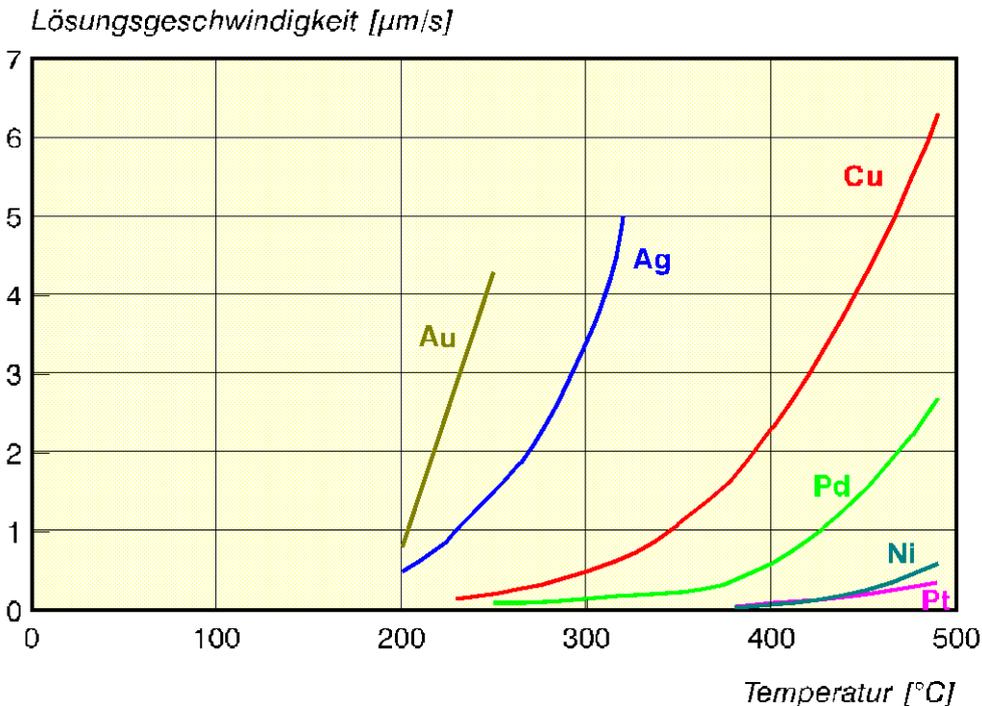
Neben dem simultanen Wellenlöten für die Massenfertigung elektronischer Baugruppen findet das Flowlöten aber auch beim selektiven Löten häufig Anwendung. Das Selektivlöten, d.h. einzelne Komponenten der Baugruppen werden nacheinander gelötet, ist für die Reparatur und das sog. Nachbestücken einzelner Elemente notwendig. Auf Grund der Entwicklungstendenzen in der Baugruppentechologie kommt es immer häufiger vor, dass die Anzahl der durchgesteckten Bauelemente (THD) wesentlich geringer ist als die Anzahl der oberflächenmontierten Bauelemente (SMD). Deshalb zieht man es oftmals vor, die SMD auf beiden Seiten reflowzulöten, während die wenigen verbliebenen THD zwischen die SMD durch selektives Flowlöten gesetzt werden. Im einfachsten Fall werden die bereits reflowgelöteten SMD an der Unterseite mit einer Maske abgedeckt, bevor die mit den THD nachbestückte Baugruppe über eine gewöhnliche Lotwelle geführt werden. Das flüssige Lot gelangt durch die Öffnungen der Maske zu den THD-Lötstellen der Baugruppe. Es lassen sich unter der Maske aber nur sehr flache SMD verbergen, außerdem muss der Abstand zu den THD ausreichend groß sein. Beides schränkt die Möglichkeiten des Maskenlötens stark ein.

Einen anderen Weg geht man beim Miniwellenlöten (auch Minischalllöten), bei dem die Lotwelle durch eine Punktdüse so klein gestaltet wird, dass sie Punkt für Punkt an die Lötstellen der THD geführt werden kann. Dazu muss entweder die Leiterplatte oder die Lötdüse in allen drei Achsen (x, y, z) beweglich sein. Für sehr wenige Lötstellen pro Leiterplatte und hohe Flexibilität ist diese Methode zu bevorzugen. Es gibt auch Anwendungen für das Selektivlöten, bei denen z.B. Steckerleisten mit einigen 10 Anschlüssen in größeren Serien gelötet werden müssen. Dafür kann das Miniwellenlöten unter Umständen zu langsam sein, so dass ein Kompromiss zwischen Selektiv- und Simultanlöten benötigt wird. Diesen Kompromiss finden man im Hubtauchlöten (auch Stempel-, Lotpin- oder Matrizenlöten). An den Stellen, an denen die THD-Anschlüsse gelötet werden sollen, befinden sich

Stahlstempel, die auf einer Matrize entsprechend dem Layout der Leiterplatte angeordnet sind. Die Stempel werden gemeinsam aus einem Lotbad gehoben, so dass sich in einer Öffnung an der Spitze des Stempels jeweils eine kleine Lotmenge befindet. Diese kleinen Lotbäder werden von unten gegen die Leiterplatte gedrückt, so dass das Lot die Kontakte benetzen kann. Da die Herstellung der Matrizen mit den Stempeln teuer und der Wechsel der Matrizen im Lotbad aufwändig ist, lohnt sich diese Technik nur bei großen Stückzahlen.



Eines der speziellen Probleme beim Flowlöten ergibt sich aus der Löslichkeit der Metalle im Lotbad. Da eine große Menge an Lotschmelze einem verhältnismäßig kleinen Baugruppenvolumen gegenübersteht, kann dieser Effekt für die Baugruppe spürbare Folgen haben. Die Löslichkeit ist für die Metalle unterschiedlich und hängt unter anderem von der Temperatur ab. Am schnellsten lösen sich Gold und Silber auf, aber auch das Kupfer der Leiterplatte kann innerhalb der Lötzeit von 20...50 s um einige Mikrometer abnehmen. Da die Leiterplatten nur mit 35 µm Kupfer beschichtet sind, hat die Auflösung im Lotbad einen messbaren Einfluss und kann bei ungünstigen Parametern zur Schädigung der Baugruppe führen. Außerdem machen sich die gelösten Metalle als Verunreinigungen im Lotbad bemerkbar. Die chemische Zusammensetzung des Bades sollte deshalb wöchentlich kontrolliert werden, so dass beim Überschreiten von genomten Grenzwerten das Bad (500 kg!) getauscht wird.



[Quelle: Klein-Wassink, Weichlöten in der Elektronik, Leuze Verlag, 1991]

Aber nicht nur die Metalle der Baugruppe sondern auch alle Metalle der Lötanlage sind von diesem Auflösungsprozess betroffen. Auch wenn die Lösegeschwindigkeit von Eisen wesentlich geringer ist, als die des Kupfers (im Diagramm nicht enthalten, Fe liegt zwischen Ni und Pt), kann im Laufe der Zeit eine Schädigung an den Eisen- und Stahlteilen auftreten. Gerade bewegte Teile, wie die Pumpenräder, müssen nach einigen Monaten gewechselt werden. Auch die Dicke der Tiegelwände des Lotbadbehälters nimmt mit der Zeit ab, so dass das Bad undicht werden kann. Moderne Anlagen werden deshalb heute mit Keramik, Email oder speziellen Schutzfarben beschichtet (Verfahren: Beschichten).

Weitere Verbindungstechniken für elektronische Baugruppen

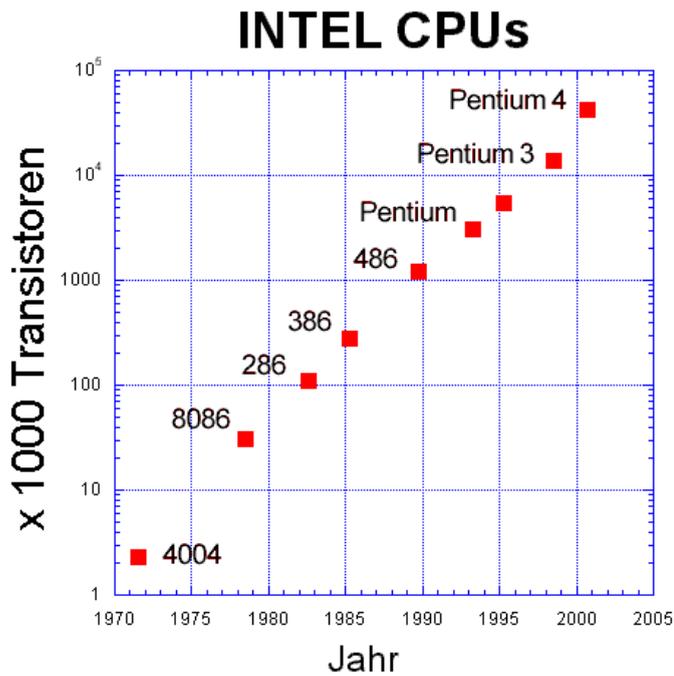
Neben den beschriebenen Massenverfahren des Flow- und Reflowlötens bei der Montage elektronischer Baugruppen, gibt es in Einzelfällen auch einen Bedarf für spezielle Verbindungstechniken, der durch die behandelten Massenverfahren nicht abgedeckt werden kann. Dabei muss bedacht werden, dass jedes zusätzliche Verfahren bei der Baugruppenmontage auch zusätzlichen Aufwand, d.h. zusätzliche Kosten verursacht und darüber hinaus auch eine Quelle für zusätzliche Fehler darstellt. Aus diesem Grund werden solche Verfahren nur eingesetzt, wenn wichtige technische Gründe dies erforderlich machen, oder wenn andere Folgekosten z.B. für teure Bauelemente vermieden werden können. Typische Gründe für die Anwendung ergänzender Verbindungstechniken können sein:

Miniaturisierung: Die Miniaturisierung elektronischer Bauelemente geht der Entwicklung der Baugruppenteknologie stets voran. So kann es sein, dass neueste Bauformen mit sehr kleinen Abständen (*Pitch*) oder extrem hoher Anschlusszahl (*I/O-Number*; *Pin-Count*) mit den Standardverfahren des Flow- und Reflowlötens nicht verarbeitet werden können. Insbesondere die direkte Montage von Halbleiterchips (*Bare Dies*) ohne Gehäuse auf der Leiterplatte, die sog. Nacktchipmontage, kann dies erforderlich machen.

Sensible Komponenten: Bestimmte Bauelemente sind mechanisch, thermisch oder auch elektrisch besonders empfindlich, so dass die Prozessbedingungen bei der Montage speziell auf dieses Bauelement angepasst werden müssen und der Massenlötprozess ungeeignet ist.

Verarbeitung von „Low Cost“ Materialien: Gerade bei den in größeren Mengen eingesetzten Kunststoffen, z.B. als Substrat, Gehäuse oder Steckermaterial, lohnt es sich unter Umständen, preiswertere Materialien zu verwenden und stattdessen einen zusätzlichen Prozess in Kauf zu nehmen. Hier sind vor allem "kalte" Verbindungstechniken wie das Kleben oder Einpressen interessant, weil die preiswerten ("Low Cost") Materialien in der Regel nicht besonders stabil sind.

Montage nichtelektrischer Komponenten: Immer häufiger müssen auf elektronischen Baugruppen heute auch nicht elektrische Komponenten montiert werden, z.B. Linsen für Handycameras oder Koppler für Lichtwellenleiter. Hier würde das Löten mit metallischen Lotlegierungen nicht die gewünschten Verbindungseigenschaften ermöglichen, so dass derartige Komponenten häufig geklebt werden.



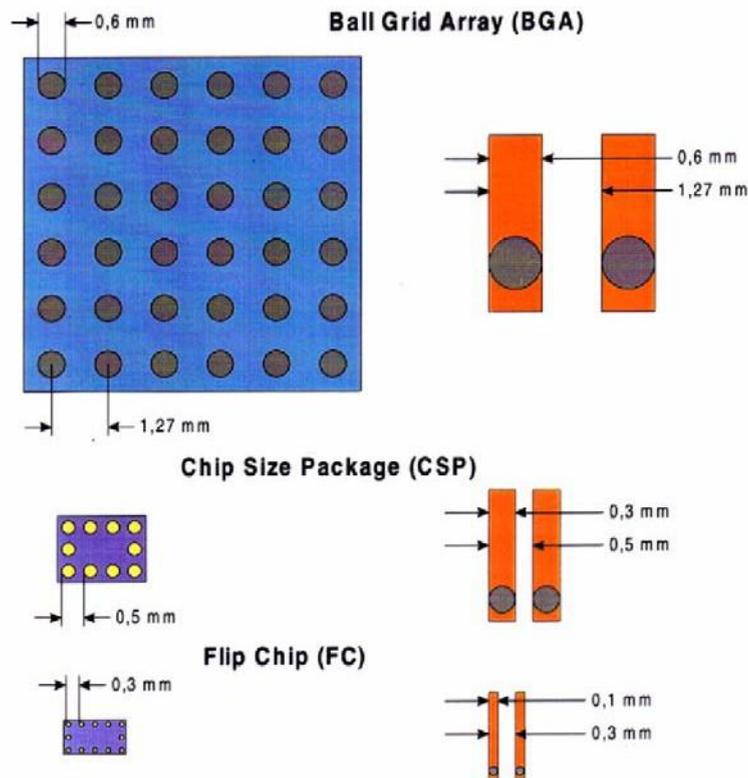
Das Mooresche Gesetz der Chipentwicklung [Intel]

Chipmontage

Die treibende Kraft in der Entwicklung der Elektroniktechnologie ist nach wie vor die Miniaturisierung der Halbleiterstrukturen auf dem Chip. Nach dem *Mooreschen Gesetz* verdoppelt sich alle 2 Jahre die Anzahl der Funktionen pro Fläche auf dem Halbleiter. Auch wenn diese Entwicklung prinzipiell an physikalische Grenzen stoßen muss, ist der von Gordon Earl Moore (Begründer der Fa. Intel) empirisch festgestellte Trend bis heute ungebrochen. Daraus ergibt sich notwendigerweise der Bedarf, die steigende Funktionsdichte auch durch eine steigende Verbindungsdichte auf die nächste technologische Ebene, die elektronische Baugruppe, zu übertragen. Der heute noch übliche Umweg, den Chip zunächst in einem Gehäuse (*Package*) zu montieren und anschließend mit einem wesentlich größeren Toleranz- und Rastermaß auf der Leiterplatte zu kontaktieren, wird immer häufiger in Frage gestellt. Moderne Halbleiterbauelemente (z.B. Speicher oder Prozessoren) benötigen in einem Gehäuse ein Vielfaches des Platzes, der für deren Funktion eigentlich erforderlich wäre. Die direkte Montage der Halbleiterchips auf der Leiterplatte ist deshalb ein nahe liegender Lösungsansatz.

Die Flip-Chip-Technik

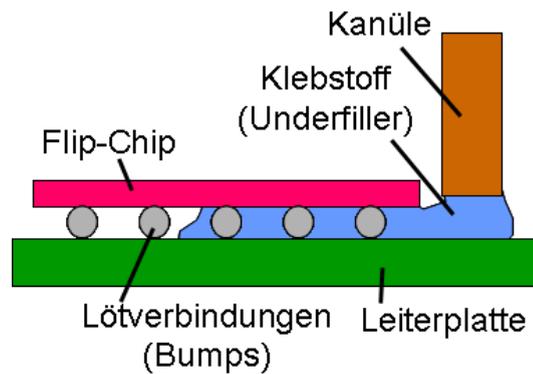
Am konsequentesten wird dieser Ansatz bei der sog. *Flip Chip Technik* technologisch umgesetzt. Der Begriff leitet sich daraus ab, dass der Chip bei der Montage mit seiner aktiven Seite nach unten gedreht werden muss (*to flip*), damit er auf der Leiterplatte montiert werden kann. An der Oberfläche des Chips werden in einem mehrstufigen Beschichtungsprozess kleine Lothügel (*Bumps*) aufgebracht (ähnliche wie die *Balls* bei einem BGA-Bauelement), deren Durchmesser aber weniger als 100 µm beträgt.



Die ursprüngliche Idee dieser Technologie bestand darin, dass die Chips genau wie die übrigen SMD im Reflowprozess auf die Leiterplatten gelötet werden können. Das hat sich aber unter heutigen Fertigungsbedingungen als nicht praktikabel erwiesen weil:

- der Standard-Lotpastendruckprozess auf der Leiterplatte nicht ausreichend genau ist;
- die Bestückungsautomaten nicht die erforderliche Genauigkeit besitzen, da sie das Bauelement von unten nicht "sehen" können;
- die Ausdehnungsunterschiede zwischen Silizium und dem Leiterplattenmaterial so groß sind (etwa Faktor 4), dass auf die kurze Distanz der kleinen Bumps die mechanischen Spannungen nicht ausgeglichen werden können.

Aus diesem Grund werden die Flip-Chips erst nach dem Löten der übrigen SMD mit einem speziellen Bestück- und Lötwerkzeug, dem sog. Flip-Chip-Bonder (*to bond = Fügen*) mit hoher Präzision bestückt und unmittelbar gelötet. Das Problem der mechanischen Spannungen lässt sich allerdings nur durch zusätzliche Maßnahmen lösen. Praktische Versuche haben gezeigt, dass die gelöteten Flip-Chips schon nach kurzer Zeit ausfallen, da die Lötstellen abgeschert werden. Deshalb ist es auf Leiterplatten unverzichtbar, die Chips zusätzlich zu kleben. Der Klebstoff muss dazu in den weniger als 100 µm dünnen Spalt zwischen Silizium und Leiterplatte fließen und die einzelnen Lötverbindungen einhüllen. Dazu ist ein besonders niedrig viskoser Klebstoff erforderlich, der *Underfiller* genannt wird. Die Kapillarkräfte helfen dabei, den schmalen Spalt vollständig zu füllen. Damit sich keine Blasen und Hohlräume bilden, lässt man den Underfiller von ein oder zwei Kanten unter den Chip fließen, so dass sich der Spalt gerichtet und gleichmäßig füllen kann. Anschließend muss der Klebstoff bei mittleren Temperaturen um 100°C ausgehärtet werden. Neben der Präzision erfordert dieser Prozess auch sehr hohe Reinheitsgrade.

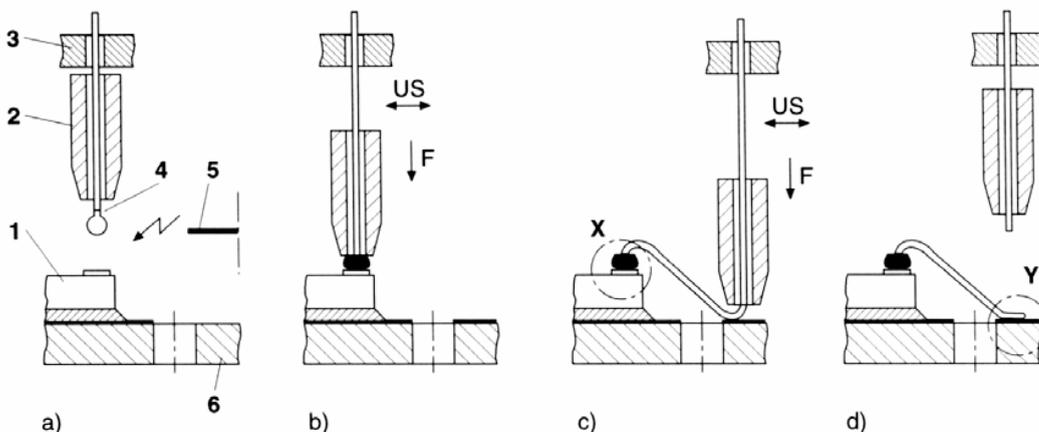


Da Halbleiterchips üblicherweise mit Aluminium beschichtet werden (erst in jüngster Zeit kommt auch Kupfer wegen der besseren Leitfähigkeit zu Einsatz) und Aluminium sehr schwer lötbar ist, muss auch das Aufbringen der Löt­hügel (das 'Bumping') durch einen komplizierten mehrstufigen Beschichtungsprozess (*UBM = Under Bump Metallization*) vorbereitet werden. Dieser Prozess muss beim Chiphersteller oder bei hochspezialisierten Dienstleistern durchgeführt werden und lohnt sich nur für sehr große Stückzahlen.

Das Drahtbenden

Die klassische Verbindungstechnik für Halbleiterchips ist dagegen das *Drahtbenden* (= deutsch-englischer Mischmasch, eigentlich: *wire bonding*), das eigentlich ein Pressschweißen ist. Deshalb gibt es für die Montage von Chips auf Leiterplatten den weit verbreiteten Ansatz, diese auf die Leiterplatte zu *bonden*. Beim Bonden werden feine Drahtbrücken aus Gold oder Aluminium zwischen dem Chip und der Umgebung (hier die Leiterplatte) gezogen und auf jeder Seite an einem Punkt verschweißt. Beim Drahtbenden werden heute zwei gebräuchliche Verfahren unterschieden.

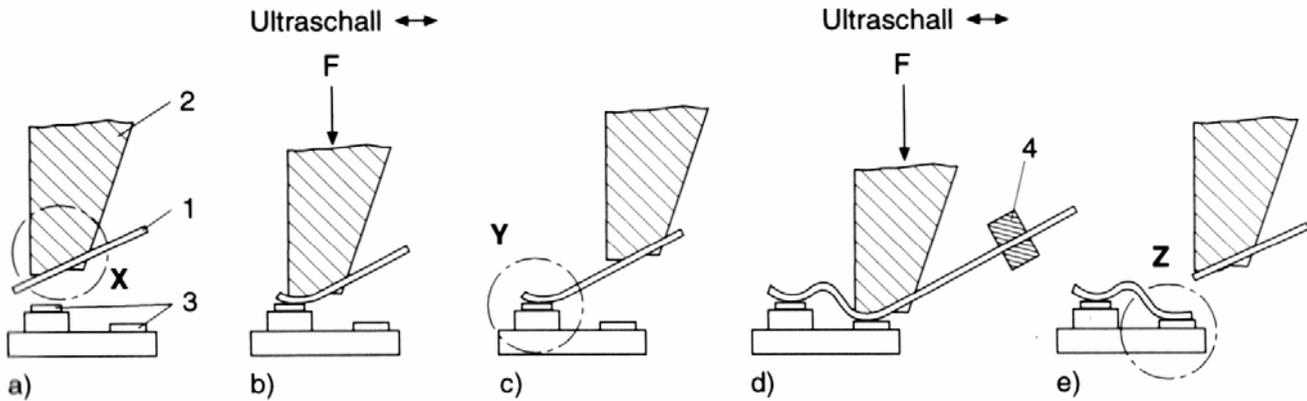
1) Das Thermokompressionsbonden (TC-Bonden)



1. Chip; 2. Bondwerkzeug; 3. Drahtführung; 4. angeschmolzenes Drahtende (Kugel); 5. Elektrode; 6. Substrat

Das Thermokompressionsbonden wird ausschließlich mit dünnen Golddrähten (25 μm) durchgeführt. Der Draht wird durch das Bondwerkzeug gefädelt, das Drahtende wird mit einer Elektrode durch eine kurze Entladung angeschmolzen, so dass sich eine Kugel bildet. Diese geschmolzene Kugel (*Ball*) wird durch das Bondwerkzeug auf den Chip gedrückt und gleichzeitig durch Ultraschallschwingungen angeregt, wodurch sich die erste Schweißverbindung bildet. Danach zieht das Werkzeug eine Drahtschlinge (*Loop*) auf das Substrat, wo mit Druckkraft und ebenfalls mit Ultraschall ein flaches, keilförmiges Drahtende angeschweißt wird (*Wedge*). Das übrige Drahtende wird einfach abgerissen. Die Ultraschallenergie wird mittels einer Sonotrode an das Bondwerkzeug gekoppelt, wodurch dieses die Schwingungen übertragen kann. Durch die schnelle Bewegung werden Passivschichten mechanisch zerstört und die Metalloberflächen des Drahtes und des Chips bzw. des Substrates in engen und intensiven Kontakt gebracht. Das Herstellen beider Verbindungen dauert nur etwa 150 ms, wodurch dieser Prozess trotz der sequentiellen Verfahrensweise relativ schnell ist. Aufgrund der Form der Schweißverbindungen wird diese Verbindungstechnik auch *Ball-Wedge-Bonden* genannt.

2) Das Ultraschallbenden (US-Bonden)

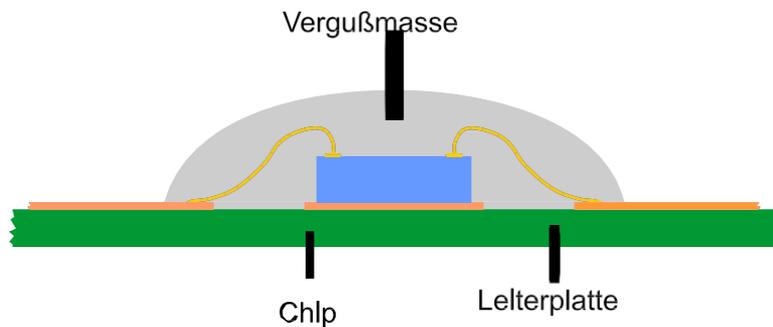


1. Draht; 2. Bondwerkzeug; 3. Chip- und Substratoberflächen; 4. Drahtführung

Wie der Name schon sagt, wird auch beim Ultraschallbenden der Draht mit Ultraschallschwingungen mit dem Untergrund verbunden, allerdings kommt hier keine zusätzliche Wärmequelle zum Einsatz. Das US-Bonden kann auch mit Aluminiumdrähten durchgeführt werden, die etwas dicker sind ($50\ \mu\text{m}$) oder für hohe Ströme sogar bis zu $0,5\ \text{mm}$ dick sein können, was bei dem geringen Preis für Al keine Kostenfrage ist (im Gegensatz zu Golddrähten). Allerdings können Aluminiumdrähte nicht TC-gebondet werden, da geschmolzenes Aluminium aufgrund seiner Oxidation keine Kugeln bildet. Die beim US-Bonden hergestellten Verbindungen sind auf beiden Seiten identisch und haben eine Keilform (Wedge), weshalb das Verfahren auch als *Wedge-Wedge-Bonden* bezeichnet wird. Da das kalte Pressschweißen mehr Zeit benötigt, dauert der Gesamtprozess etwa $500\ \text{ms}$, was im Vergleich zum TC-Bonden schon einen erheblichen Zeitverlust ausmacht. Da der Wedge auf dem Chip mehr Platz benötigt als der Ball, ist diese Bondtechnik allerdings ohnehin nur für Chips mit kleinen und mittleren Anschlusszahlen geeignet.

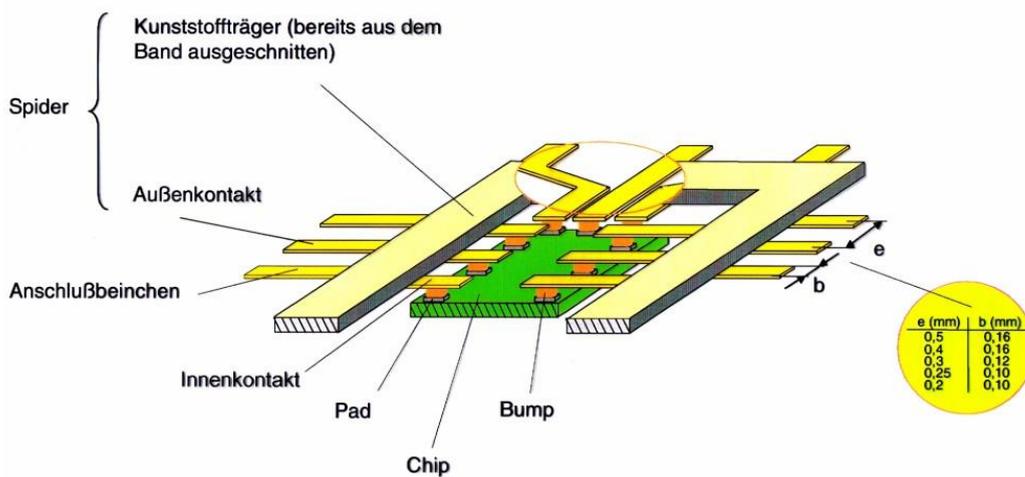
Beide Bondverfahren lassen sich prinzipiell auch auf Leiterplatten anwenden, wobei Leiterplattenoberflächen üblicherweise zwar für das Lötens aber nicht für das Schweißen (Bonden) optimiert sind. Von den heute gängigen Metallschichten auf Leiterplatten eignet sich vor allem die Nickel-Gold Beschichtung für das Bonden und das Lötens selbstverständlich auch. Beim TC-Bonden muss die Goldschicht auf der Leiterplatte allerdings eine Mindestdicke von einigen Mikrometern haben (zum Lötens und US-Bonden genügt bereits $0,1\ \mu\text{m}$), damit die Haftung der Drähte ausreichend ist. Auf Leiterplatten angewandt wird diese Technologie als *COB-Technik*, d.h. *Chip-on-Board*, bezeichnet. Die empfindlichen Chips und vor allem die Drähte müssen allerdings auch bei der COB-Technik durch einen zusätzlichen Klebstoff geschützt werden. Dieser wird, im Gegensatz zur Flip-Chip-Montage, von oben über den Chip gegossen, was wesentlich einfacher zu bewerkstelligen ist. Der verwendete Klebstoff oder die Vergussmasse wird auch als *Glob-Top* bezeichnet.

Die COB-Technologie ist im Vergleich zur Flip-Chip-Technik robuster und auch seit wesentlich längerer Zeit in der Anwendung. Ein Vorteil des Drahtbondens besteht darin, dass die Verbindungen räumlich und auch mechanisch sehr flexibel sind. Der gleiche Chip kann an verschiedene Layouts angepasst werden und umgekehrt. Selbst fehlerhafte Verbindungen lassen sich durch eine zweite Drahtbrücke korrigieren. Der Draht selbst ist sehr elastisch und so entstehen zwischen Chip und Leiterplatte kaum mechanische Spannungen. Mit seiner Unterseite wird der Chip auf der Leiterplatte festgeklebt, wobei diese Verbindung in der Regel keine elektrische Funktion hat. Ein Nachteil der COB-Technik besteht aber wiederum in dem erhöhten Platzbedarf im Vergleich zum Flip-Chip. Gemeinsam sind beiden Technologien die hohen Anforderungen an die Sauberkeit und Homogenität der Oberflächen.



Die TAB-Technik

Eine Sonderform der Bondtechnik ist das Tape-Automated-Bonding (TAB-Technik), bei der die Drähte durch vorgestanzte Folienbahnen ersetzt werden. Die Idee dieses Verfahren besteht darin, dass auf diese Weise alle Verbindungen gleichzeitig mit einem Werkzeug durch Pressschweißen hergestellt werden können. Außerdem lassen sich in den vorstrukturierten Folienbahnen (*Spider*) beliebig viele Chips in ein Band (*Tape*) vormontieren. So können die bereits eingeschweißten Chips aus dem Band geschnitten und in einem Arbeitgang auf das Substrate gebondet werden. Eine Massenfertigung von der Rolle ist auf diese Weise möglich. Da durch die Geometrie der Anschlüsse aber beide Verbindungsstellen (innen und außen) in einer Ebene liegen müssen, ist es erforderlich im Substrat eine Aussparung vorzusehen. Für die Leiterplattentechnik hat sich diese Technologie nicht durchgesetzt, wohl aber in der Herstellung von Chipkarten u.ä.

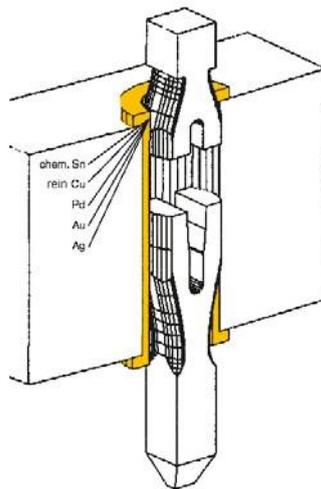


Die TAB-Technik

Die Einpresstechnik

Neben der Miniaturisierung spielen bei der Auswahl der Verbindungstechniken auch die Kosten eine wichtige Rolle. Einerseits verursacht jeder zusätzliche Arbeitsschritt Kosten, andererseits sind vor allem sequentielle und anlagentechnisch aufwändige Verfahren entscheidende Kostenverursacher. Auch die Temperaturbelastungen spielen hier eine wichtige Rolle, weil bei "kalten" Verbindungstechniken wesentlich preiswertere Materialien verwendet werden können (Thermoplaste, Papier) als bei hohen Prozesstemperaturen, zumal diese Temperaturbeständigkeit nur kurzzeitig bei der Herstellung und selten beim Gebrauch der Baugruppen benötigt wird.

Eine weit verbreitete "kalte" Verbindungstechnik ist die Einpresstechnik, die gerne als Ersatz für das Flowlöten bei der Durchsteckmontage verwendet wird. Wie schon erwähnt, werden die durchgesteckten Bauelemente immer mehr durch die SMD verdrängt, die sich vorteilhafter durch Reflowlöten verarbeiten lassen. Oft sind nur noch wenige oder sogar nur ein einziges Bauteil auf der Baugruppe übrig, die gesteckt werden, dabei handelt es sich meistens um Steckerleisten u.ä. Bei geschickter Auswahl der Materialien und Geometrien lassen sich gerade diese Bauteile sehr zuverlässig durch kaltes Einpressen der Stifte in die Bohrungen der Leiterplatte verbinden. Am einfachsten und sichersten funktioniert diese Verbindungstechnik, wenn die Stifte der Steckerleiste als Federn ausgeführt werden, die beim Einpressen in die Durchkontaktierungen zusammengedrückt werden. In diesem Fall entsteht eine Kraftschlussverbindung, die auch wieder gelöst werden kann (siehe Bild).

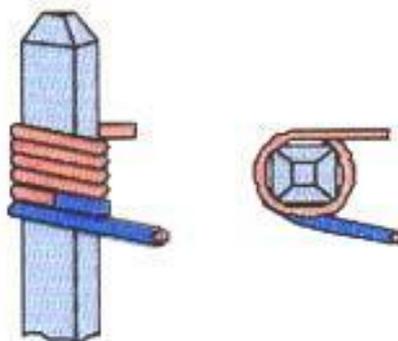


Diese Technik wird vor allem in der Telekommunikationselektronik eingesetzt, wo in den Schaltzentralen gleichartige Baugruppen in großer Zahl miteinander durch sog. *Backplanes* (Rückverdrahtungs- Leiterplatte) verbunden werden. Diese Backplanes sind Leiterplatten, die als Verteiler für andere Leiterplatten dienen, die durch Steckerleisten auf diesen kontaktiert werden.

Es finden in der Einpresstechnik aber auch federlose Stifte Anwendung, die einfacher herzustellen sind. In diesem Fall wird mit deutlich höherer Kraft das Kupfer der Durchkontaktierung derartig verformt, dass ebenfalls ein sicherer elektrischer Kontakt entsteht. Punktuell kann es aufgrund des hohen Druckes sogar zur Kaltverschweißung zwischen Stift und Durchkontaktierung kommen. Je nach Materialauswahl können auch Presslötverbindungen (z.B. Nickelstift in verzinneter Kupferhülse) entstehen. Diese Einpressverbindungen sind dann stoffschlüssige Verbindungen und lassen sich naturgemäß nicht mehr lösen.

Die Wickelverbindung

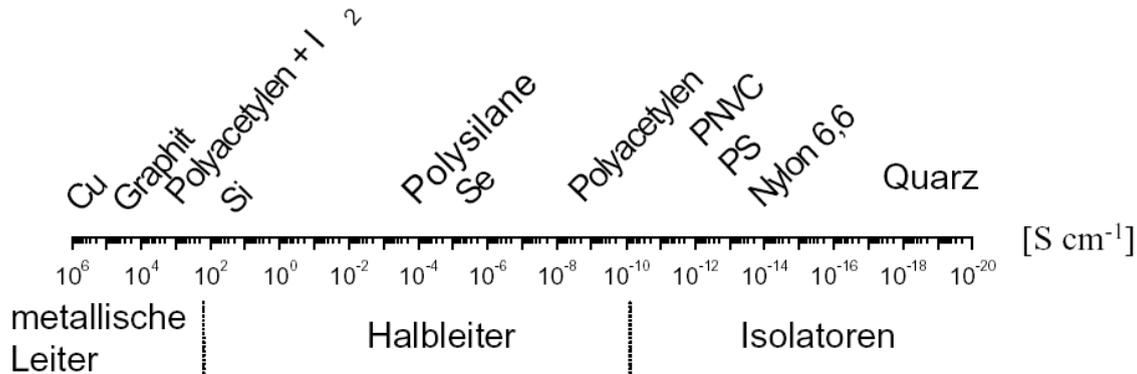
Ebenfalls zur Verbindung von Steckerleisten, allerdings mit konventionellen Drähten, dient die Wickelverbindungstechnik. Zu diesem Zweck werden die blanken Drahtenden mit hoher Zugspannung um einen scharfkantigen Anschlussstift gewickelt.



Zwischen den Kanten des Stiftes und dem Draht entstehen sehr hohe Drücke, die einen Kraftschluss und punktuell sogar einen Stoffschluss bewirken können. Je nach Materialkombination entsprechen die lokalen stoffschlüssigen Verbindungen einer Pressschweiß- oder Presslötverbindung. Es ist wichtig, dass das Stiftmaterial eine hohe Härte und Elastizität besitzt, damit sich die Verbindungen nicht mit der Zeit lockern können. Allerdings wird die Verdrahtung mit Kabeln oder Kabelbäumen heute nach Möglichkeit auch durch Leiterplatten (Backplanes) ersetzt.

Das Leitkleben

Das Kleben erfreut sich in der Technik wachsender Beliebtheit, da die Vielfalt der Varianten und Verbindungsmöglichkeiten praktisch unbegrenzt ist. Auch in der Elektronik werden Klebverbindungen eingesetzt, insbesondere weil diese sehr sauber und ohne Wärme (bzw. bei niedrigen Temperaturen herstellbar sind). Während bei den vorgenannten Beispielen (Vormontage SMD, Underfiller, Gob-Top) die Aufgabe der Klebverbindung in der mechanischen Fixierung besteht, geht es bei der Baugruppenmontage natürlich vor allem um die elektrische Verbindung. Elektrisch leitfähige Polymer- Klebstoffe sind auch bekannt, wobei die Leitfähigkeit im Vergleich zu anderen Materialien wie folgt einzuordnen ist.



Sog. intrinsisch leitfähige Polymere besitzen ein ungepaartes Elektron pro Kohlenstoffatom, das im Molekül verschoben werden kann. Die Lücke zwischen Valenzband und Leitungsband kann zusätzlich durch die Dotierung der Polymere mit Ionen verringert werden. Beim Anlegen einer Spannung entstehen Ladungspaare aus Elektronen und Löchern, wie bei Halbleitern. Für intrinsisch leitfähige Polymere, wie z.B. Polyanilin und Polyacetylen, kann eine spezifische Leitfähigkeit im Bereich von 10^{-9} Scm^{-1} bis zu 5 Scm^{-1} erreicht werden. Die beachtlichen Leitfähigkeiten solcher Polymere sind allerdings im Allgemeinen für elektrische Verbindungen der Baugruppenteknologie immer noch ein bis zwei Größenordnungen zu gering. Anwendungsgebiete sind dagegen Widerstandsschichten oder antistatische Verpackungen.

Um eine ausreichende Leitfähigkeit zu erreichen werden Leitklebstoffe für die Elektronik mit Metallen gefüllt. Befinden sich die Metallpartikel in ausreichender Dichte im Polymer, bilden sich elektrische Pfade durch die Verbindung aus. Dazu sind mindestens 60 Vol % Metall notwendig, wobei vorzugsweise Silberpartikel (*Flakes*) verwendet werden. Silber hat eine sehr gute Leitfähigkeit und bildet an der Oberfläche keine isolierenden Passivschichten. Der Leitklebstoff lässt sich ähnlich wie eine Lotpaste mit dem Dispenser oder durch Schablonendruck auftragen. Die Bauelemente werden auf den Klebstoff bestückt, anschließend härtet der Klebstoff aus. Zwei-Komponenten-Klebstoffe härtet häufig selbständig bei Raumtemperatur, andere werden bei niedrigen Temperaturen oder durch UV-Strahlung ausgehärtet.

Durch den hohen Silberanteil sind Leitklebstoffe allerdings auch sehr teuer. Weitere Nachteile ergeben sich aus den Eigenschaften der Polymere (meistens Epoxidharze). Diese nehmen relativ viel Feuchtigkeit auf, was zu einer Schwächung der Verbindung und zur Verschlechterung der Adhäsion und Leitfähigkeit führt. Außerdem können die ausgehärteten Klebverbindungen nicht ohne weiteres repariert werden. Aus diesen Gründen hat das Leitkleben trotz einiger Vorteile nur für sehr spezielle Anwendungen, z.B. in der Chipmontage, eine Bedeutung.

Reinigung, Konservierung, Lagerung, Alterung

Nachdem die elektronischen Baugruppen geprüft und ggf. repariert wurden, können diese prinzipiell an den Kunden ausgeliefert werden. In einigen Fällen, gerade wenn es auf eine hohe Zuverlässigkeit ankommt, folgen aber noch weitere Maßnahmen. Die Zuverlässigkeit wird mathematisch durch die Funktions- oder Überlebenswahrscheinlichkeit beschrieben:

Die Funktions- oder Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der eine Betrachtungseinheit nach einem Zeitpunkt $t_0 + \Delta t$ ausfällt. Sie lässt sich aus dem Verhältnis des noch funktionsfähigen Bestandes $n(t_0 + \Delta t)$ zum Zeitpunkt $t_0 + \Delta t$ zum Anfangsbestand $n(t_0)$ ermitteln:

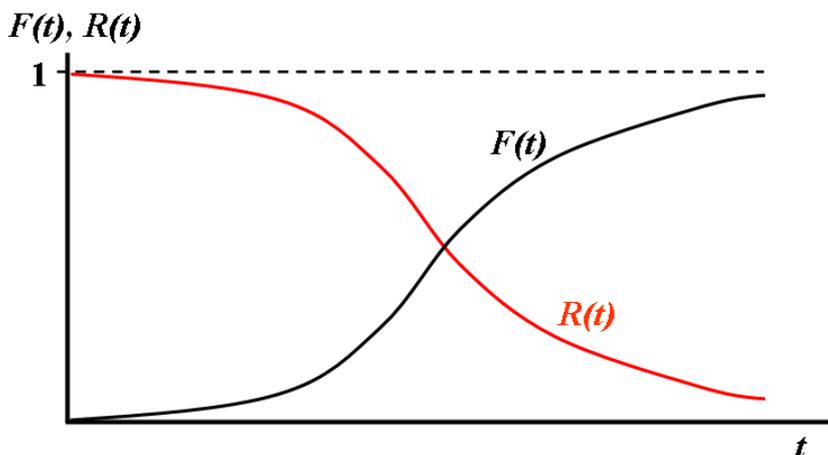
$$R(t) = \frac{n(t_0 + \Delta t)}{n(t_0)} = \frac{n_0 - n_A}{n_0}$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass eine Betrachtungseinheit, die zu Beginn der Beanspruchung arbeitsfähig war, bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt ausfällt. Sie wird aus dem Verhältnis der nach einem Zeitintervall $t_0 + \Delta t$ ausgefallener Betrachtungseinheiten n_A zu dem Bestand vor der Beanspruchung n_0 zum Zeitpunkt t_0 ermittelt:

$$F(t) = \frac{n(t_0) - n(t_0 + \Delta t)}{n(t_0)} = \frac{n_A}{n_0}$$

Die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls ist in jedem infinitesimalen Zeitabschnitt dt unterschiedlich. Ausfall- und Funktionswahrscheinlichkeit sind komplementäre Größen, denn es gilt:

$$F(t) + R(t) = \frac{n_A}{n_0} + \frac{n_0 - n_A}{n_0} = \frac{n_0}{n_0} = 1$$



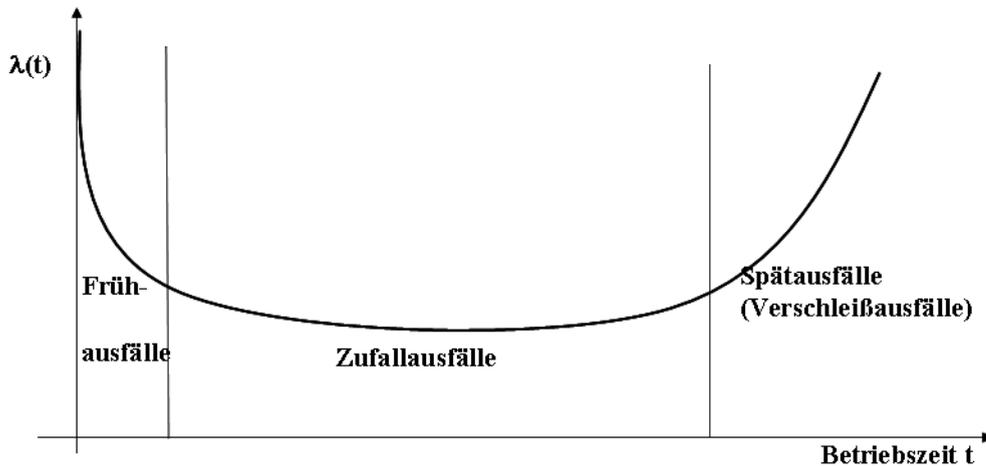
Die Ausfallrate (*failure rate*) ist die Anzahl von gleichen Produkten mit dem Alter t , die im Zeitintervall dt ausfällt, bezogen auf die zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgefallenen Produkte. Damit ist die Ausfallrate die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt, das bis zum Zeitpunkt t noch nicht ausgefallen ist, zum Zeitpunkt $t+dt$ ausfallen wird.

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{1}{n_0 - n_A} \cdot \frac{dn_A}{d(t)} \\ &= \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt} \end{aligned}$$

Der reziproke Wert der Ausfallrate ist die mittlere Zeit zwischen zwei Fehlern (*MTBF – Mean Time Between Failure*), d.h., gleich dem Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Die Ausfallrate $\lambda(t)$ eines Systems (Gerät, elektronische Baugruppe) ist nicht gleich bleibend, sondern ändert sich während der Lebensdauer. Ein typischer Verlauf wird durch die sog. *Badewannenkurve* beschrieben, die durch eine *Frühausfallphase*, eine *Phase konstanter Ausfälle* und eine *Spätausfallphase* charakterisiert ist:



Da dieser Zusammenhang bekannt ist, macht man sich die zeitabhängige Ausfallrate zunutze und altert in einigen Fällen die elektronischen Baugruppen, bevor Sie an den Kunden ausgeliefert werden. Bei dieser Alterung ist entscheidend, dass gerade der relativ kurze Bereich der Frühausfälle absolviert und gleichzeitig die verbleibende Betriebszeit so wenig wie möglich verkürzt wird. Typische Frühausfälle werden durch mangelhafte Bauelemente verursacht, während die Spätausfälle am Ende der Lebensdauer oft auf das Ermüdungsverhalten der Verbindungen zurückzuführen sind. Eine solche Voralterung beim Hersteller wird auch als "*Burn-in*" ("Einbrennen") bezeichnet. Danach besitzen die Baugruppen für eine lange Zeit eine konstant niedrige Ausfallrate und es kommt nur selten zu Ausfällen beim Kunden.

Ein solches "*Burn-in*" Verfahren kann z.B. durch einen mehrtägigen Funktionstest, unter Umständen unter erhöhten Temperaturen oder bei Belastungen im Grenzbereich (Strom, Spannung, Frequenz) erfolgen. Eine derartige Beanspruchung verändert kritische Eigenschaften der Materialien (*Stoffeigenschaftsändern*), was im späteren Betrieb beim Anwender ohnehin erfolgen würde.

Eine weitere Maßnahme zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der ausgelieferten Produkte kann in einer Nachreinigung der Baugruppen bestehen. In der Technologie elektronischer Baugruppen versucht man allerdings seit den 90er Jahren nach Möglichkeit ohne Reinigungsprozesse (*Verfahren: Trennen*) auszukommen. Dafür gibt es verschiedene Gründe:

1. Zusätzliche Prozessschritte benötigen Zeit und Kosten Geld. Gerade in der Elektronik versucht man deshalb vermeidbare Prozesse zu eliminieren. Oft ist eine "sauberere" Fertigung günstiger als eine nachträgliche Reinigung.
2. Die meisten Reinigungsverfahren sind nasschemische Prozesse und erfordern den Zu- und Ablauf von Wasser. Zum Schutz des Trinkwassers ist dabei ein erheblicher Aufwand bei der Aufbereitung des Abwassers erforderlich, ständige Kontrollen und Messungen eingeschlossen.
3. Die Erfahrung zeigt, dass mit einem unqualifizierten Reinigungsprozess mehr Schaden angerichtet wird als beim völligen Verzicht auf eine Reinigung. In ungünstigsten Fall werden lokale Verunreinigungen beim Lösen und Spülen im Reinigungsprozess über die gesamte Baugruppe und vielleicht sogar noch auf andere Baugruppen übertragen.

Aus diesem Grund reinigt man nur, wenn es zwingend erforderlich ist (nicht prophylaktisch!), dann allerdings sehr gründlich. So können z.B. Salze aus Flussmittelresten abgewaschen werden, die zur Korrosion führen könnten, oder auch Öl- und Fettschichten, die die Adhäsion beim späteren Kleben und Beschichten negativ beeinflussen.

In einigen Fällen werden die Baugruppen auch mit einer Schutzbeschichtung versehen, indem eine Lackschicht durch Tauchen oder Sprühen aufgetragen wird (*Verfahren: Beschichten*). Diese Beschichtung, die auch als *Conformal Coating* bezeichnet wird, schützt vor allem Baugruppen, die im Freien oder bei sehr rauem Klima arbeiten müssen. Das Conformal Coating hält die elektrischen Strukturen trocken und schützt so vor Kriechströmen oder elektrischen Überschlügen. Auch hier gilt ähnlich wie beim Reinigen: Eine mangelhafte Beschichtung ist ungünstiger als gar keine. Bilden sich Blasen und Hohlräume unter der Schicht, so wird die Feuchtigkeit hier u.U. für lange Zeit eingeschlossen und kann sich besonders verheerend auswirken. Auch dürfen beim Beschichten keine offenen elektrischen Kontakte verklebt werden, z.B. an Steckverbindern.

Das Lagern fertiger und halbfertiger Baugruppen wie auch von Bauelementen und Halbzeugen muss in unterschiedlichen Produktionen auch verschieden organisiert werden. Während bei einer Serienfertigung mit großer Stückzahl die Lagerbestände sehr klein gehalten werden können, vorausgesetzt die Zulieferer sind in der Lage termintreu zu liefern, sind gerade Kleinserienfertigungen mit hoher Variabilität sehr anspruchsvoll. Die Bauelemente und Halbzeuge müssen u.U. auch noch nach Jahren ähnlich verarbeitbar sein wie zu Beginn und auch die Baugruppen werden ggf. "auf Halde" produziert, weil eine bestimmte Mindeststückzahl für eine rentable Fertigung erforderlich ist. So kann es auch vorkommen, dass teilweise bestückte und gelötete Baugruppen im Lager liegen, bis der Kunde eine bestimmte Stückzahl bestellt, die dann zu Ende montiert wird.

Damit die Lagerung die Qualität der Bauelemente und Baugruppen so wenig wie möglich und vor allem vorhersehbar beeinflusst, ist eine klimatisierte Aufbewahrung mit konstanter (niedriger) Temperatur und Luftfeuchte vorteilhaft. In einigen Fällen werden Magazinschränke auch mit Stickstoff gespült, um die Oxidation durch den Luftsauerstoff zu verhindern. Einige Materialien, wie z.B. Klebstoffe, können auch vorteilhaft eingefroren werden, um sie länger haltbar zu machen.

Bevor die Baugruppen an den Kunden geliefert werden können, muss häufig noch eine Kennzeichnung erfolgen. Es hat sich heute durchgesetzt, dass die meisten Baugruppen eine Chargen- und/oder Seriennummer besitzen, die auf ein Etikett (*Label*) gedruckt oder direkt mit dem Laser auf die Baugruppe geschrieben wird (Laserbeschriftungen sind deutlich haltbarer). So ist eine Rückverfolgung möglich, von der bei größeren Schadensfällen auch Gebrauch gemacht wird. Darüber hinaus können regional bestimmte Kennzeichnungen verlangt werden, die bestimmte Sicherheitsstandards oder enthaltene (bzw. nicht enthaltene) Schadstoffe markieren. Gerade seit der Jahrtausendwende sind giftige Schwermetalle wie Blei oder auch ozonschädigende Halogene vielfach auf den Index gesetzt worden. Da diese Vorschriften national bzw. regional unterschiedlich sind, muss auch die Kennzeichnung dementsprechend angepasst werden. Vorreiter ist hier die Europäische Union mit der RoHS (Restriction of Hazardous Substances) und der WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) gewesen, wobei diese Gesetze durch zahlreiche Ausnahmen wieder "aufgeweicht" wurden.



Verschiedene Etiketten zur Kennzeichnung elektronischer Baugruppen, von oben links beginnend: "bleifreie Baugruppe", "EU-RoHS-konform", "China-RoHS-konform" und "China – Schadstoffe werden erst nach 10 Jahren abgebaut"

Einen etwas anderen Weg geht man in China, hier wird die Liste der Produkte, die ohne Blei und andere Giftstoffe produziert werden müssen permanent erweitert, d.h. es sind nur die Produkte betroffen, die auf der Liste erfasst sind. Allerdings müssen auch die Produkte, die giftige Stoffe enthalten ein Label besitzen dem zu entnehmen ist, nach wie vielen Jahren die Schadstoffe (auf der Halde) abgebaut werden. Es ist die Pflicht des Herstellers bzw. des Exporteurs, sich über die geltenden Gesetze und Kennzeichnungspflichten des Vermarktungslandes kundig zu machen.

Auch die Verpackung der Produkte spielt eine wichtige Rolle. Diese müssen sicher, leicht, effektiv und möglichst umweltfreundlich (wiederverwertbar) sein. Es ist zweckmäßig, wenn die Transportwege (LKW, Bahn, Flugzeug, Schiff) möglichst genau bekannt sind, da es auch hier unterschiedliche Lösungen geben kann. Nur für besonders hochwertige Produkte ist es sinnvoll, den Transport mit eigenen Speditionen bis zum Kunden durchzuführen.

Literatur

[Siem-01] Dirk Wormuth, Jörg Zapf: Grundlagen der Surface Mount Technology, Siemens DEMATIC, München 2001

[Klei-89] R.J. Klein Wassink, Soldering in Electronics; Electrochemical Publications Ltd., 2nd Edition; Ayr 1989