

Bild 1: Vergleich von THT- und SMD-Bauteilen

Bauteiltypen

Es gibt zwei grundlegende Arten von Bauteilen, zwischen denen sich der Elektronikingenieur entscheiden muss – zum einen THT (Through-Hole technology) und zum anderen SMD (Surface-Mounted Device, Bild 1). Die Namen der beiden Technologien beschreiben bereits zielgenau deren Einsatzgebiete.

THT-Bauteile werden durch die Platine gesteckt und von unten verlötet. Diese Technologie wurde ab Ende der 1960er-Jahre vermehrt eingesetzt und ist noch häufig im Hobbybereich auf Lochrasterkarten zu finden. Im Gegensatz dazu wird im Industrieumfeld heute fast ausschließlich die SMD-Technologie eingesetzt, welche die THT-Bauteile zum Großteil verdrängt hat.

Dabei sind die Vorteile von SMD gegenüber THT hinsichtlich des Preises, der Abmessungen sowie des Gewichts eindeutig. In der Industrie können mit sogenannten Pick-and-Place-Maschinen (Bild 2) über 500.000 SMD-Bauteile pro Stunde auf Leiterplatten platziert werden. Mittlerweile gibt es eine deutlich größere Auswahl von Bauteilen auf Basis der SMD-Technologie. Beispiele hierfür sind Dioden, Transistoren, Kondensatoren, Widerstände aber auch Integrated Circuits (IC). Jedoch können auch THT-Bauteile einen Vorteil bieten: Die mechanische Belastbarkeit und die Leistungsfähigkeit (z. B. Widerstände) sind höher als bei SMD-Bauteilen. Deshalb wird THT branchenübergreifend gerne für Stecker wie USB oder HDMI genutzt.

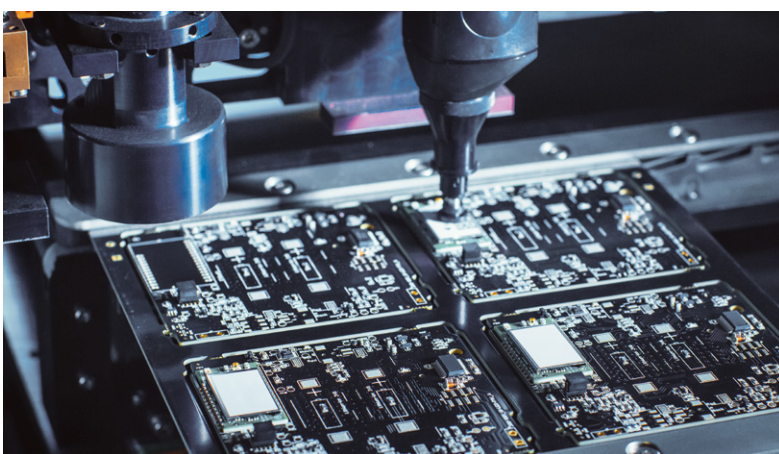


Bild 2: Pick-and-Place-Maschinen platzieren die Bauteile automatisch auf dem PCB.

Größen von SMD-Bauteilen in Zoll und Millimetern

Tabelle 1

| Zollcode | Metrisch |
|----------|--------------------|
| 008004 | 0,25 mm × 0,125 mm |
| 009005 | 0,3 mm × 0,15 mm |
| 01005 | 0,4 mm × 0,2 mm |
| 0201 | 0,6 mm × 0,3 mm |
| 0402 | 1,0 mm × 0,5 mm |
| 0603 | 1,6 mm × 0,8 mm |
| 0805 | 2,0 mm × 1,25 mm |
| 1008 | 2,5 mm × 2,0 mm |
| 1206 | 3,2 mm × 1,6 mm |

Einsatzgebiete von SMD-Bauteilen

SMD-Bauteile sind in ihrer Weiterentwicklung stetig kleiner und leichter geworden. Dabei sind die heute eingesetzten Bauteilgrößen von SMD mit einem Zollcode versehen. Die Größen sind in Bild 3 und in Tabelle 1 zu sehen.

Die kleinste Zollgröße ist 008004, diese Bauteile sind kleiner als Sandkörner. Dieses Format wird jedoch kaum eingesetzt, da gängige industrielle Bestückungsprozesse für diese Größen kaum ausgelegt sind. In der Industrie ist der Zollcode SMD 0402 momentaner Standard, da die Bearbeitung von Hand noch möglich ist und die Baugruppen trotzdem schlank gestaltet werden können. Insbesondere für Industrierechner wird oft auf den Standard 0402 zurückgegriffen, da sich Bestückungs- und Lötprozess praktikabel gestalten. Dabei kommt es sehr stark auf den Einsatzzweck und die Anforderungen der Baugruppe an. Durch diese wird definiert, welche Freiheitsgrade der Ingenieur bei der Bauteilauswahl, beim Design, aber auch beim Lötprozess hat.

Der Größenvorteil kompakter Chips wird beispielsweise in Mobilfunktelefonen genutzt, da man in diesem Umfeld gut mit dem verfügbaren Platz wirtschaften muss – hier wird häufig auf 0201er-Modelle zurückgegriffen, da viele Pick-and-Place-Automaten diesen Zollcode präzise auf der Leiterplatte platzieren können.

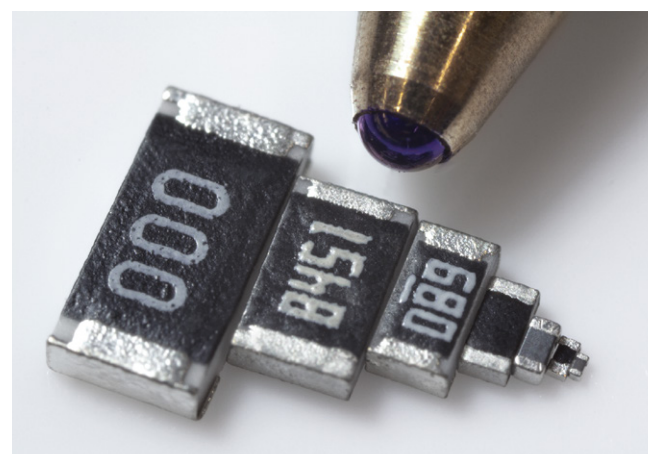


Bild 3: SMD-Größen 1206, 0805, 0603, 0402, 0201, 01005 und 008004

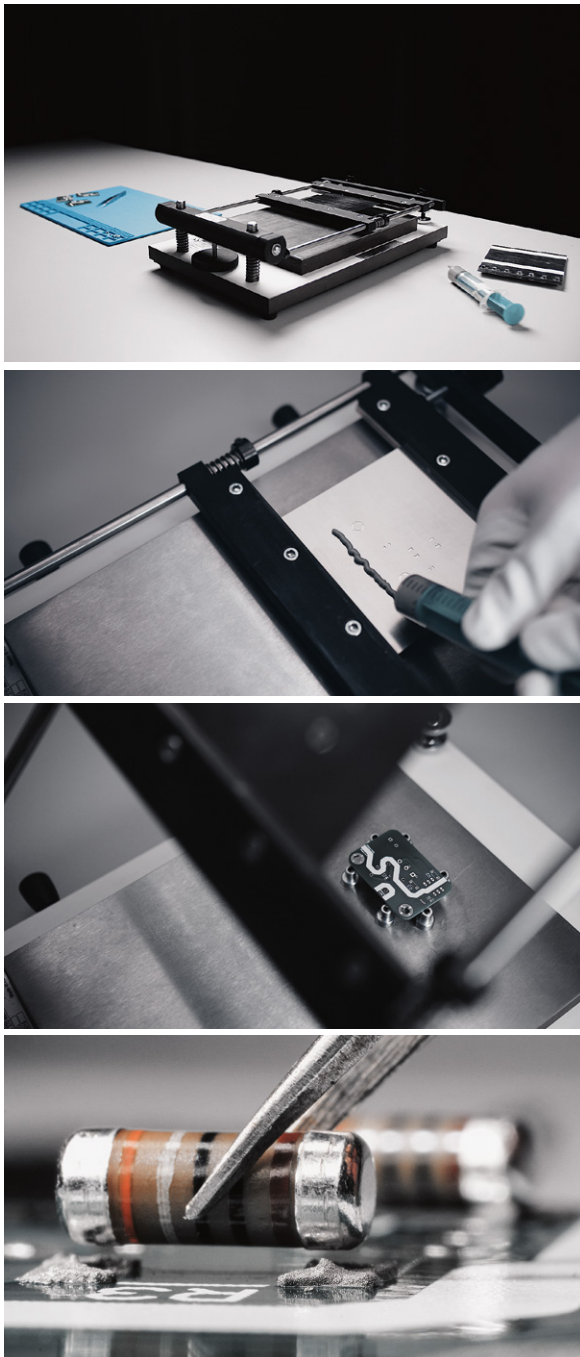


Bild 4: Beispielhafter Reflow-Lötprozess für Prototyping in vier verschiedenen Prozessschritten

Reflowlöten

Das Reflowlöten (engl. für Wiederaufschmelzlöten) wird in der Industrie hauptsächlich für die Lötung von SMD-Bauteilen genutzt. Das Hauptmerkmal des Prozesses ist, dass eine Lötpaste vor dem Bestücken von Bauteilen auf die Platine aufgetragen wird. Diese Paste besteht dabei aus kleinen Zinnkugeln und Flussmittel. Die Zinnkugeln weisen einen Durchmesser von wenigen Mikrometern (μm) bis zu Hunderten Mikrometern auf.

Nachdem die Lötpaste aufgetragen wurde, werden die SMD-Bauteile auf der Leiterplatte platziert – hier wirkt die Paste ähnlich wie ein Kleber. Anschließend wird die Baugruppe in einen Lötoven (Infrarot-, Heißluft- oder Dampfphasenlöten) auf 230–400 °C erwärmt. Dabei schmilzt die Lötpaste auf und lötet Bauteil und Leiterplatte fest zusammen (Bild 4).

Lötpasten und Besonderheiten

Die Auswahl der richtigen Lötpaste (Bild 5) ist entscheidend für die Qualität des Lötergebnisses. Der Markt bietet dabei eine Reihe von Produkten verschiedener Hersteller, welche unterschiedliche Merkmale aufweisen. Zum einen gibt es Lötpasten, die eine gewisse Lager-temperatur voraussetzen, während andere bei Zimmertemperatur gelagert werden können. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist der Durchmesser der Zinnkugeln pro mm^3 Lötpaste. Pasten mit kleinerem Lotkugeldurchmesser sind teurer in der Anschaffung, jedoch flexibler im Lötprozess einzusetzen. Feinere Lötpasten füllen Pastenschablonen im Siebdruckverfahren entsprechend feiner aus und ermöglichen so auch bei kleinen Komponenten ein zuverlässiges Löten.

In der Industrie werden vollautomatische Pastendrucker für das Auftragen von Lötpaste verwendet. Hierbei wird beispielsweise das Siebdruckverfahren oder ein vollautomatischer Dispenser eingesetzt. Bei beiden Verfahren ist die Wiederholgenauigkeit ausschlaggebend. Ist diese unzureichend, ist der Prozess für die industrielle Massenproduktion in der Regel nicht anwendbar.

Anschließend wird die Platine mit aufgetragener Lötpaste in einen Bestückungsautomaten gefahren, dort werden die Bauteile automatisch auf der Platine platziert. Hierbei kann der Automat eine beliebige X- und Y-Achsenposition mit hoher Genauigkeit anfahren und Bauteile mit einem Zollcode von mindestens 0201 verarbeiten. Jede kleinere Bauteilgröße kann nur mit spezialisierten und in der Regel sehr teuren Bestückungsautomaten bearbeitet werden. Anschließend wird die bestückte Baugruppe in einen Lötoven gefahren. Je nach Art der Bauteile auf der Baugruppe und dem Einsatzort ergeben sich hier nun verschiedene Möglichkeiten des Lötverfahrens, welche im Folgenden betrachtet werden.

Heißluft- und Infrarotlöten

Bei dem Prozess des Heißluftlötens wird mittels heißer Luft die Platine erhitzt, sodass das aufgetragene Lot aufschmilzt und anschließend erstarrt. Für das eigene Labor wird hier zunächst eine kleine Heißluftstation empfohlen (Bild 6, [1]), bei der die Austrittstemperatur der Luft einstellbar ist. Beim Heißluftlöten werden die Bauteile jedoch nur lokal erwärmt. Dementsprechend muss gut mit dem Heißluftgerät umgegangen werden, damit die Baugruppe nicht beschädigt wird.

Für Reworkapplikationen ist eine Heißluftstation sehr gut geeignet, da hierbei den SMD-Pads punktuell die gleiche Temperatur zugeführt wird. Oft werden Heißluftstationen auch als „Rework-Station“ verkauft.

Vollkonvektionslötanlage

In der Industrie wird häufig der Prozess des Vollkonvektionslötens eingesetzt, da die Anschaffungskosten einer solchen Anlage sich erst bei einem hohen Durchsatz, dann aber zügig amortisieren.

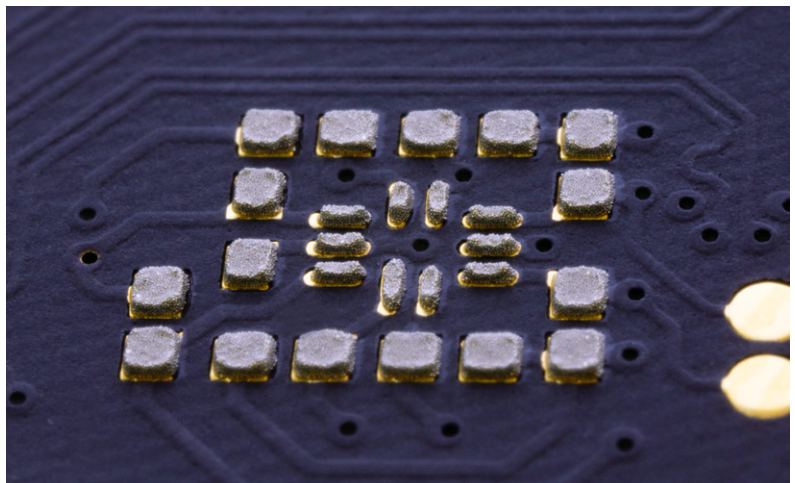


Bild 5: Aufgetragene Lötpaste vom Typ T4

Auf einem Fließband werden die Baugruppen durch eine Maschine mit einer Länge von ca. 8 m gefahren. Auf dieser Strecke befinden sich verschiedene Zonen, in der die Maschine eine gewisse Temperatur hält. Beispielsweise gibt es Heiz- und Abkühlzonen, die dem Prozess entsprechend auf der Lötstrecke verteilt sind.

Vor dem Betrieb muss ein Ingenieur ein Temperaturprofil einstellen, um das Zusammenspiel von Bauteilen und Lötpaste abzustimmen. So können die Baugruppen geschont und eine hohe Wiederholgenauigkeit garantiert werden. Das Lötprofil gibt an, zu welcher Zeit welche Temperatur vorherrschen muss – ein Beispiel dafür zeigt Bild 7.

Dampfphasenlöten

Beim Dampfphasenlöten handelt es sich um eines der schonendsten Lötverfahren in der Elektronikherstellung. Hierbei wird eine Flüssigkeit (auf dem Markt als Galden[®] bekannt) erhitzt, welche bei einer definierten Temperatur siedet.

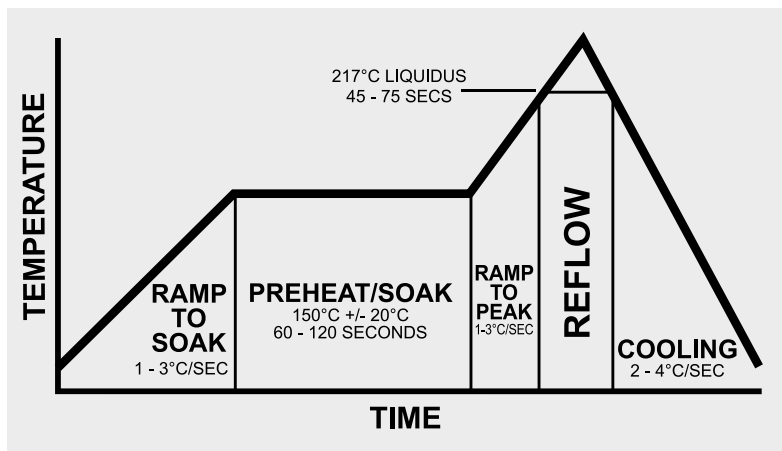


Bild 7: Beispielhaftes Temperaturprofil. Quelle: Wikimedia Commons (Zithan)

So kann beispielsweise Galden LS230 genutzt werden, welches einen Siedepunkt von exakt 230 °C ausweist. Dabei entsteht ein Dampf, welcher schwerer als Luft ist. Die Baugruppe kann in diesen Dampf transportiert werden, anschließend kondensiert das Wärmeträgermedium an der Baugruppe und überträgt die thermische Energie homogen in die Baugruppe.

Zusätzlich verdrängt der Galdendampf fast den kompletten Sauerstoff an der Baugruppe. Durch diese Effekte können fast alle Bauteile ohne Probleme gelötet werden. Allerdings ist es in diesem Prozess nicht möglich, die Bauteile über 230 °C zu erhitzen. Dementsprechend wird das Dampfphasenlöten eingesetzt, wenn sichergestellt werden muss, dass der Lötprozess die Baugruppe nicht beschädigt. Den maximalen Nutzen spielt dieser Prozess bei PCBs mit hohen thermischen Massen aus, da das Dampfphasenlöten den höchsten Wärmeübertragungskoeffizienten bietet.

Dampfphasenlöten im Prototyping: Vapor Phase One

Für den Prototypingbereich gibt es verschiedene Dampfphasenlötanlagen, die hinsichtlich der Präzision Heißluftstationen klar überlegen sind. Bezüglich ihrer Abmessungen bieten sie meist einen Vorteil gegenüber Industrieanlagen.

Diese Anlagen unterscheiden sich in Dampfphasenlötanlagen mit und ohne höhenverstellbaren Lift, der eine optimale Regulierung der Lötprofile ermöglicht. Zusätzlich gibt es Maschinen mit Luftkühlung, die einen geschlossenen oder offenen Wasserkühlkreislauf haben, um so eine große Bandbreite an Lötprofilen zu unterstützen.

In Bild 8 sieht man die Open-Source-Dampfphasenlötanlage Vapor Phase One, die sich laut Hersteller PCBArts [2] durch einen geringen



Bild 6: ELV Heißluftlötstation HLS-1300 mit 1300 W

Galdenverbrauch und hochdynamische Temperaturprofile auszeichnet. Im Folgenden werden gängige, aber auch eine Reihe einzigartiger Features der Vapor Phase One beschrieben. Da es sich bei der Vapor Phase One um eine Open-Source-Dampfphasenlötanlage handelt, kann der Benutzer den aktuellen Softwarecode oder den Hardwarestand einsehen, um sich so ein (digitales) Bild von dieser Anlage zu machen.

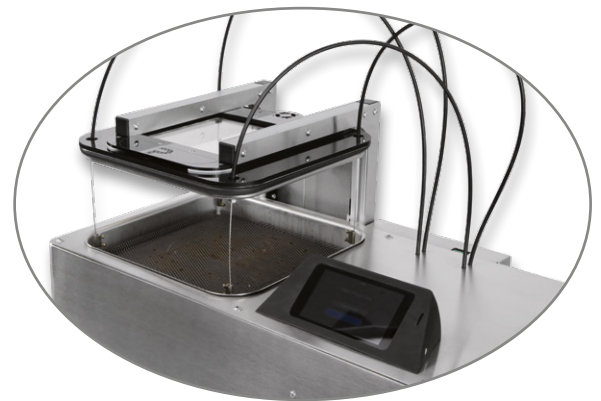


Bild 8: Prototyping-Dampfphasenlöten mit der Vapor Phase One

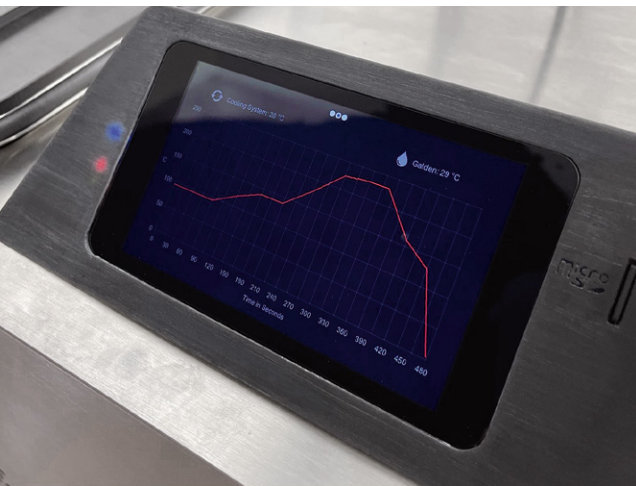


Bild 9: Touchscreen der Vapor Phase One

Bedienung der Vapor Phase One

Die Bedienung der Anlage wird über einen Touchscreen (Bild 9) gesteuert. Dazu lädt der Anwender ein vorgefertigtes oder selbst gestaltetes Lötprofil via SD-Karte in die Dampfphasenlötanlage hoch. Durch dieses Profil wird der Maschine kommuniziert, zu welcher Zeit welche Temperatur vorherrschen soll. Dieses Lötprofil wird anhand der verwendeten Lötpasten und Bauteile definiert, so können qualitativ hochwertige Lötresultate mit besonders hoher Langlebigkeit erzielt werden. Die Vapor Phase One regelt die Temperatur in den Lötphasen mit höchster Präzision auf 2–3 °C genau, dies wird durch die exakte Ansteuerung des internen Lifts sichergestellt.

Quick Cool

Nach Abschluss der Lötphase befindet sich noch heißes Galden im Prozessbottich. Durch Sicherheitsfeatures wird verhindert, dass die Dampfphasenlötanlage geöffnet wird. Neben der Galdenflüssigkeit befindet sich im Prozessbottich ebenfalls viel Galdendampf, welcher im Kühlprozess kondensiert und zurück ins Galdenreservoir fließt. Zur Beschleunigung dieses Prozesses sind unter dem Prozessbottich vier leistungsstarke Lüfter angebracht, welche die thermische Energie des Bottichs in der sogenannten Quick-Cool-Phase aus dem System abführen. Durch dieses Feature wird die Wartezeit nach dem Lötprozess um rund 50 Prozent gesenkt, was eine Reduktion der Zykluszeit zwischen einzelnen Lötvorgängen ermöglicht.

Anti-Condensation-Modus

Während der Quick-Cool-Modus abläuft und der Prozessbottich sowie das darin enthaltene Galden kontinuierlich abkühlt, kondensiert das Galden auch auf der Baugruppe. Dadurch entsteht die Gefahr, dass eine hohe Menge des hochpreisigen Lötmediums die Prozesskammer verlässt. Als Gegenmaßnahme regelt die Vapor Phase One auch nach Abschluss des Lötprozesses die Platinentemperatur konstant auf 120 °C (Bild 10). Dadurch wird die Kondensation von Galden auf der Baugruppe verhindert und diese kann trocken aus der Dampfphasenlötanlage entnommen

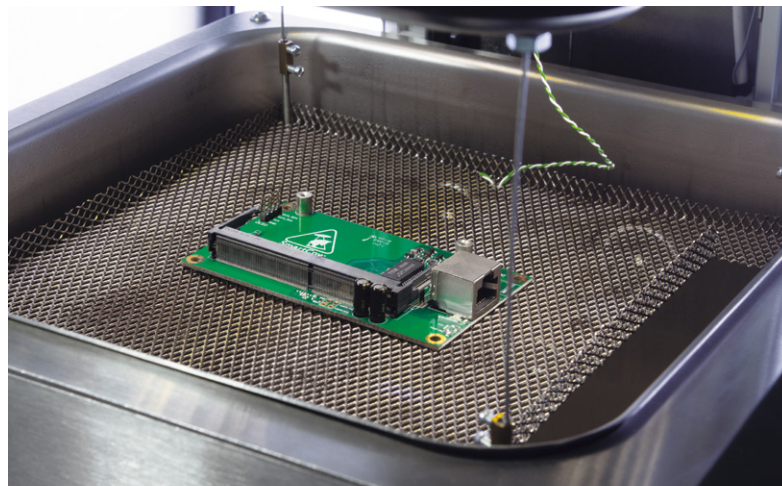


Bild 10: Durch den Anti-Condensation-Modus wird Kondensation auf der Platine verhindert.

werden. Durch diese Technologie kann ein sehr geringer Galdenverbrauch von 0,5 ml pro Lötung realisiert werden, der andere Dampfphasenlötanlagen in Sachen Effizienz schlägt.

Komfort und Sicherheit

Die Vapor Phase One verfügt über ein großes Sichtfenster, durch das die Lötung direkt mitverfolgt werden kann. Besonders prägnant ist die Phase, in der die Baugruppe in den Galdennebel einfährt. Das Lot schmilzt auf, die Trägerplatine, und die Bauteile werden elektrisch miteinander verbunden. Zeitgleich kondensiert Galden an der Baugruppe und regnet in den Prozessbottich nieder. Darüber hinaus besitzt die Vapor Phase One eine Reihe von Sicherheitssensoren und Mechanismen. Diese überwachen permanent alle Temperaturdaten in der Hardware und können im Gefahrenfall das System abschalten. Mehr Infos zu dem Open-Source-Projekt gibt es unter [2].

Dampfphasenlöten in der Industrie

Neben dem Prototyping wird der Prozess des Dampfphasenlötens auch in der Industrie bevorzugt eingesetzt, da die Lötresultate eine sehr hohe Qualität aufweisen. Der Betrieb einer Inline-Dampfphasenlötanlage verbraucht durchschnittlich ein Zehntel weniger Energie gegenüber einer Vollkonvektionslötanlage. Jedoch kann die Baugruppe nicht einfach durch den Lötoven fahren, sondern es kann nur batchweise produziert werden. Dementsprechend gibt es für die Industrie optimierte Anlagen mit mehreren abgekapselten Kammern, um so einen erhöhten Galdenverbrauch bei hohen Stückzahlen zu vermeiden.

Wellenlöten

Beim Wellenlöten handelt es sich nicht um einen Reflowprozess, da keine Lötpaste vor dem Lötvorgang auf die Baugruppe aufgetragen wird. Der Name des Prozesses beschreibt die Funktionsweise bereits sehr zutreffend, da eine Welle aus flüssigem Zinn erzeugt wird (Bild 11). Über diese Zinnwelle wird dann eine Platine gefahren, wobei die Bauteilbeine durch die Platine ragen. Die Zinnwelle benetzt diese THT-Beine – es entsteht ein Lötspot auf der Unterseite. Dieser Lötprozess ist insbesondere für den Einsatz bei THT-Bauteilen beliebt. Das Wellenlöten wurde allerdings bereits in vielen Fällen vom Reflowlöten abgelöst, da der Reflowprozess bei SMD-Bauteilen wirtschaftlicher ist.

Probleme bei Lötprozessen

Verschiedene Reflow-Lötprozesse haben Limitierungen durch eine Reihe physikalischer Effekte, welche vom Ingenieur berücksichtigt werden müssen. Dabei werden unterschiedliche Fehlerquellen analysiert und präventiv behoben. Folgende Effekte sind bekannt und können die Auslöser für Probleme während des Reflowlötens sein:

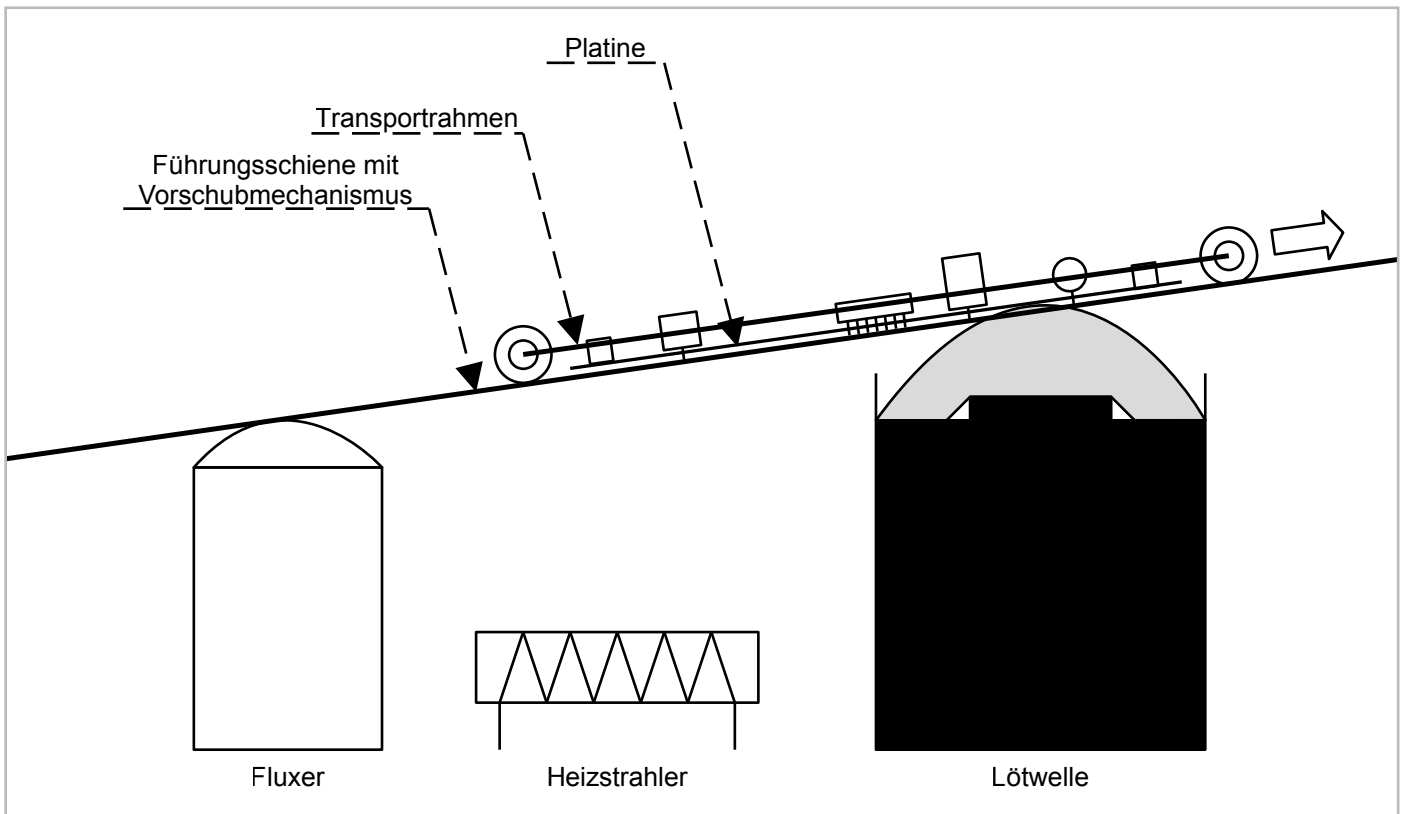


Bild 11: Prinzip einer Wellenlötanlage. Quelle: Original: Mprinke, Derivative: SLUB Dresden/Carsten Pietzsch (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wellenlöten.svg>), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

Tombstone-Effekt

Unter dem Tombstone-Effekt (auch Grabsteineffekt genannt, Bild 12) versteht man, dass sich kleine zweipolige Bauelemente (SMD-Kondensatoren und -Widerstände) unter bestimmten Umständen beim ungleichmäßigen Aufschmelzen der Lötpaste und der nun einseitig wirkenden Oberflächenspannung des Lots aufrichten.

Die wichtigsten Gründe für das Aufstehen der Bauelemente sind:

- Das Layout der Leiterplatte ist nicht oder nur schlecht an die Bauteilgeometrie angepasst.
- Es wird eine ungeeignete Lötpaste verwendet.
- Der Lötpastendruck ist ungleichmäßig und/oder schlecht positioniert.
- Die Lotpastendicke ist nicht optimal.
- Die Kupferbalance zwischen den beiden Pads ist nicht gegeben, weshalb das Zinn auf einer Seite zuerst aufschmilzt.
- Die Pastenschablonengröße ist nicht reduziert (optimal 10–20 % Reduktion).

Es kann auch vorkommen, dass das Flussmittel der Lötpaste aufgrund ungenügender Trocknung oder inkorrekt Lagerung schlagartig verdampft. Daraus resultierend können Bauelemente hochgeschleudert werden.

Wicking-Effekt

Der Wicking-Effekt (auch Dochteffekt genannt, Bild 13) beschreibt das Aufsteigen des geschmolzenen Lotes an den Bauelementbeinchen. Als Resultat dessen entsteht keine richtige Lötverbindung mit dem darunter liegenden Anschlusspad, da an der Lötstelle selbst nicht genügend Zinn für eine Verbindung übrigbleibt. Die Auftrittswahrscheinlichkeit dieses Effekts lässt sich durch die Menge der Lötpaste und das Anpassen des Temperaturprofils minimieren.

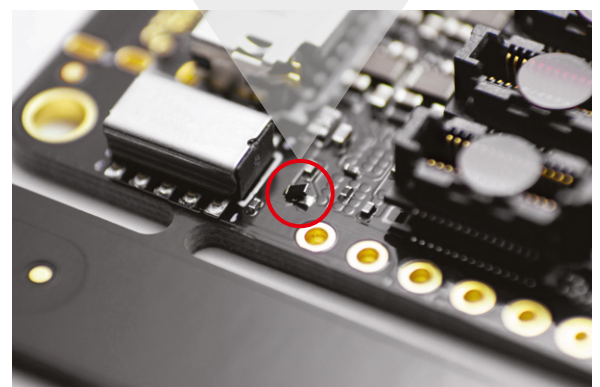
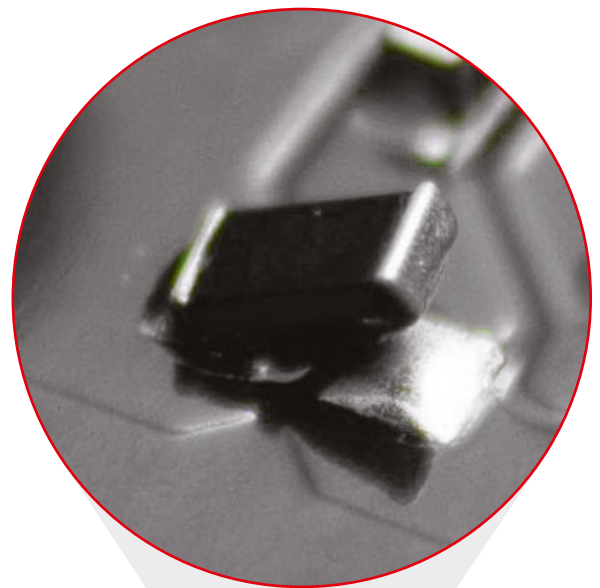


Bild 12: Tombstone-Effekt bei SMD-Bauteilen

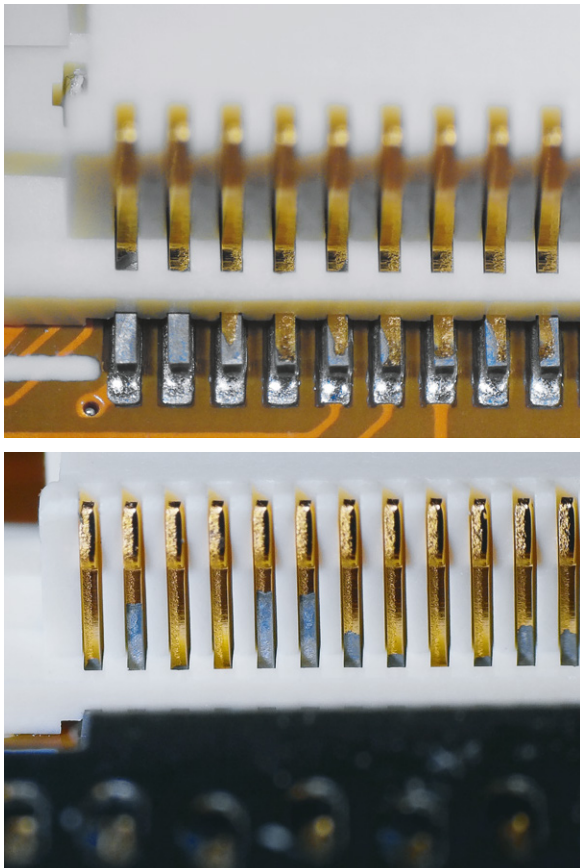


Bild 13: Wicking-Effekt

Lotperlen

Lotperlen sind kleine Kugeln aus Zinn, die sich losgelöst auf der Baugruppe bewegen und dadurch Kurzschlüsse auf ihr verursachen können. Es können mehrere Ursachen für diesen Effekt vorliegen:

- Der Temperaturgradient ist zu hoch, sodass das Flussmittel in der Paste schlagartig verdampft und Lotkugeln aus der Paste herausreißt.
- Der Pastendruck ist zu groß und befindet sich auf dem Lötstopplack – gute Ergebnisse sind bei um ca. 10–15 % reduziertem Pastendruck zu erwarten.
- Der Einpressdruck der Bauelemente in die Paste ist zu hoch.
- Die Lötpastenschablone ist nicht sauber, sodass Pastenreste auf die Baugruppe gelangen.
- Die Lötpaste ist alt oder von schlechter Qualität.
- Durch die schlechte Benetzbarkeit von Pad oder Bauelement erfolgt keine vollständige Benetzung.

Do it yourself

Vor der Anschaffung eines kleinen Pastendruckers für mehrere hundert Euro können Sie auch das Reflowlöten ausprobieren und diese neuere Variante des Lötens erproben.

Dabei hilft ein selbst gebauter Pastendruker: Bei der Bestellung unbestückter Platinen können Sie bei den meisten Herstellern eine SMD-Schablone mitbestellen. Dabei handelt es sich um ein gelasertes Edelstahlblatt mit einer Dicke von standardmäßig 120 µm. Die ausgeschnittenen Flächen sind die Aussparungen für die SMD-Pads des PCB.

Diese Schablone kann auf der Oberseite einfach mit einem Stück Klebeband auf dem Tisch befestigt werden. Damit können Sie die Pastenschablone schon einmal auf das PCB legen. Anschließend nehmen Sie weitere unbestückte Platinen und kleben diese ebenfalls mit Klebeband auf den Tisch, sodass die zu bepastende Platine perfekt in die Mitte passt (Bild 14).

So können Sie nun mit einer Rakel und Lötpaste Ihre eigene Platine bepasten. Anschließend platzieren Sie die Bauteile auf der PCB und löten diese beispielsweise mit Heißluft oder in einem anderen beliebigen Reflowprozess.

Fazit

Jede Baugruppe wird unter eigenen Gesichtspunkten gefertigt – dementsprechend benötigt auch jede zu bestückende Platine den richtigen Lötprozess. Oftmals stehen Sie vor der Wahl einer ganzen Brandbreite hochqualitativer oder kostengünstiger Optionen. Wenn Sie beispielsweise eine einfache Baugruppe ohne sensible Bauteile verbauen und auf größere Stückzahlen abzielen, ist der Konvektionslötprozess in der Regel ausreichend. Wenn Ihre Baugruppe aber hohe thermische Massen aufweist, kann das Löten mit Heißluft zu Problemen führen. In diesem Fall ist ein Dampfphasenlötprozess die bessere Wahl.

Es gibt noch viele weitere Lötprozesse in der Industrie.

Dieser Beitrag soll Ihnen einen ersten Rundumblick liefern, um Ihnen so das Handwerkszeug und Wege für neue Projekte mitzugeben bzw. zu zeigen. **ELV**

i Weitere Infos

- [1] ELV Heißluftlötstation HLS-1300 mit 1300 W: Artikel-Nr. 250520
 [2] Prototyping-Dampfphasenlöten mit der Vapor Phase One:
https://pcb-arts.com/de/vapor_phase_one

Alle Links finden Sie auch online unter: de.elv.com/elvjournallinks

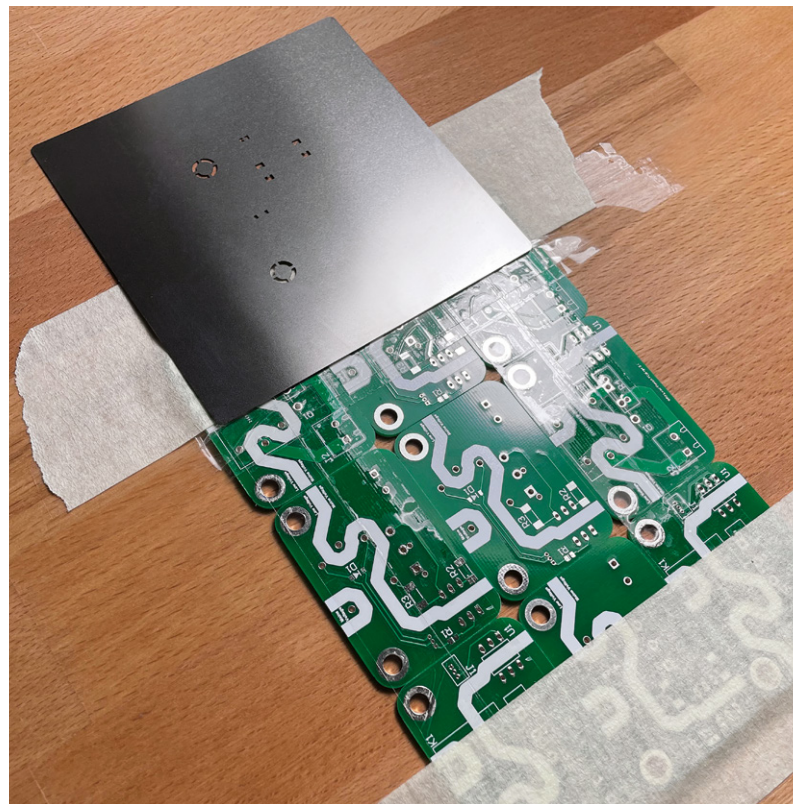


Bild 14: DIY-Version zum Auftragen der Lötpaste