Dampfphasenlöten:

Technische Daten und Infos

Das Dampfphasenlöten (auch Vapourphase-, Kondensations- oder Phasenwechsellöten genannt) basiert auf dem Prinzip des Phasenwechsels eines Dampfes (physikalisch: die gasförmige Phase eines Mediums) in den flüssigen Zustand.

Dafür wird zunächst eine geeignete Flüssigkeit (meist Galden®)[1] zum Sieden gebracht. Das entstehende Gas trifft anschließend auf eine kalte Baugruppe und setzt beim ausgelösten Phasenübergang in den flüssigen Aggregatzustand latente Wärme – also Energie – frei. Die Wirksamkeit der Wärmeübertragung auf die Baugruppe ist beim Dampfphasenlöten um einen Faktor 4 bis 10 besser als beim Konvektionslötverfahren, das nach wie vor die größte Verbreitung im Weltmarkt besitzt.

Der Dampf erreicht jeden Ort auf der Baugruppe, was eine homogene Wärmeübertragung sicherstellt. Als Resultat werden nur kleine Temperaturunterschiede auf der Baugruppe gemessen. Ein weiterer Vorteil besteht in der natürlichen Begrenzung der maximalen Prozesstemperatur während des Reflow-Lötens durch die konstante Kondensationstemperatur (= Siedetemperatur)[2] des gewählten Prozessmediums.

Zwei unterschiedliche Prinzipien im Fokus

Bei der Technik kann man grundsätzlich zwischen zwei Prinzipien unterscheiden:

1) **Tauchverfahren:** Kontinuierliches Sieden (Verdampfen) des Mediums in einem Behälter
2) **Injektionsverfahren:** Injizieren des Mediums in eine thermisch abgeriegelte Prozesskammer mit anschließender Verdampfung

Die Erfindung des **Tauchverfahrens** geht auf Pfahl und Ammann zurück *(Robert C. Pfahl, Hans H. Ammann, Method for soldering, fusing or brazing, Western Electric Company, Bell Laboratories, US Patent 3,866,307, 1975, eingereicht 1973 von Bell Telephone Labaratories)*, die 1973 nach einer Lösung für das Problem einer gleichmäßigen Wärmeübertragung beim Löten suchten. Hierbei wird eine geeignete Flüssigkeit in einem Topf zum Sieden gebracht, wodurch eine Gasschicht (Dampfschicht) über der siedenden Flüssigkeit entsteht. Die zu lötenden Baugruppen werden in diese Dampfschicht vertikal eingetaucht.

---

[1] Galden ist der geschützte Markenname der Firma SOLVAY SPECIALTY POLYMERS ITALY S.p.A.
[2] Wir kennen diese Eigenschaft aus unserer täglichen Erfahrung. Solange sich siedendes Wasser in einem Topf befindet, bleibt die Temperatur des Wassers bei 100 °C konstant.

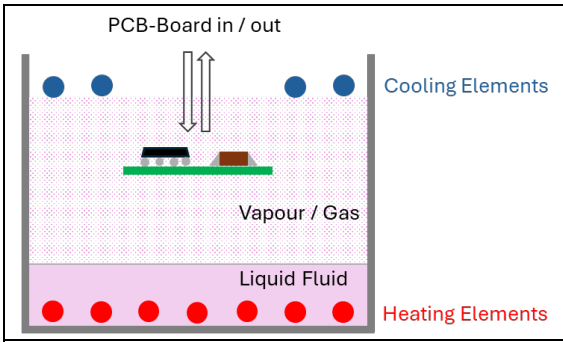
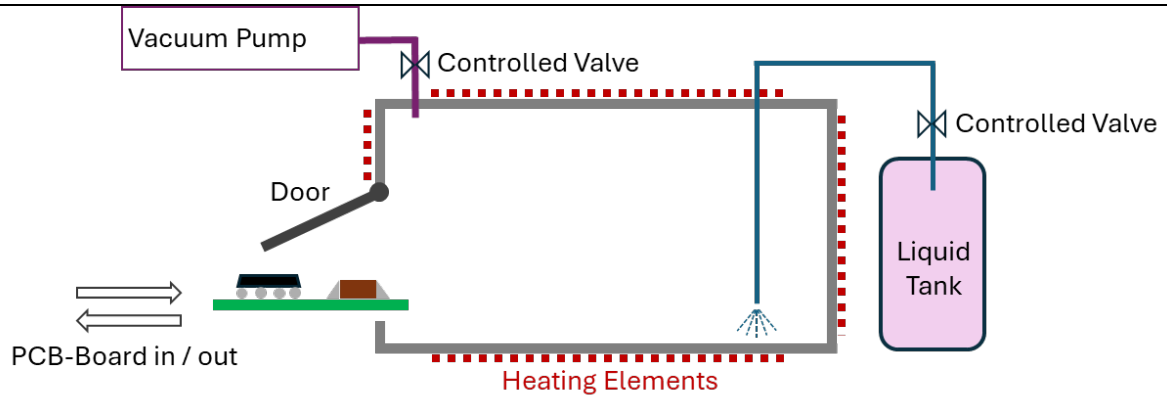
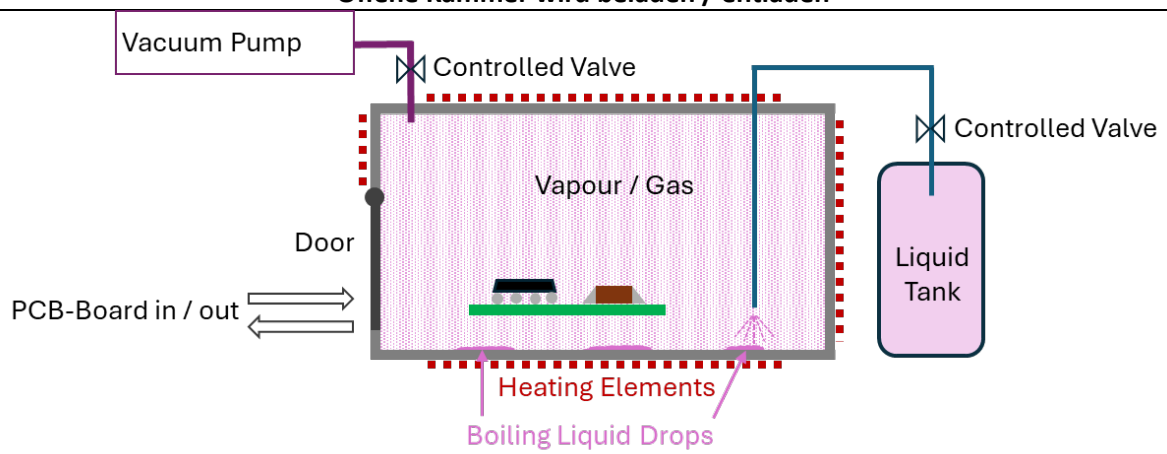


Bild: Tauchverfahren, Prinzip nach Pfahl + Ammann

Beim **Injektionsverfahren** gibt es zwei parallele Entwicklungen. Jean-Paul Garidel schlägt in seinem Patent *(EP 0 931 618 B1, Workpiece thermal treatment process using a thermal transfer liquid and condensing furnace using this process, 14.05.2003)* eine hermetisch abgeschlossene, beheizte Prozesskammer vor, in die eine vorgegebene Menge Flüssigkeit auf den Prozesskammerboden gespritzt wird und dort verdampft. Zum Löten fährt die Baugruppe in die zunächst leere Prozesskammer horizontal ein. Nach dem Schließen der Kammer beginnt der Injektionsprozess. Das Patent von Johannes Rehm und Hans Bell *(EP 1 157 771 B1, Apparatus for vapour phase soldering with superheated vapour, 02.06.2004)* beschreibt, dass bereits außerhalb einer Prozesskammer der Dampf erzeugt wird, der zum Löten in die Prozesskammer injiziert wird.



Offene Kammer wird beladen / entladen



Geschlossene Kammer während des Reflow-Lötens

Bilder: Injektionsverfahren, Prinzip nach Garidel

Der Vapourphase-Prozess im Detail

Bei Kraus Hardware kommt das Injektionsverfahren nach Garidel zum Einsatz. Die Anlage verfügt über eine gasdichte Prozesskammer mit beheizten Wänden. Das Prozessmedium Galden HS240 befindet sich in einem Vorratstank, der per Dosierpumpe mit der Prozesskammer verbunden ist. In der Kammer lässt sich zusätzlich ein Vakuum (Unterdruck) erzeugen. Die zu lötenden Baugruppen (BG) werden auf einem Warenträger (WT) positioniert, der nach Beladung in die noch leere Prozesskammer eingefahren wird (Bild 1).

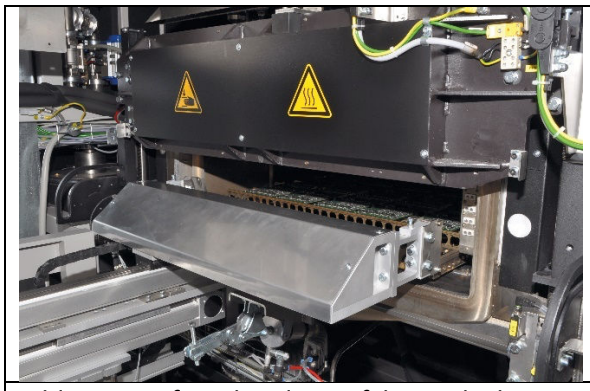


Bild 1: BG auf WT bei der Einfahrt in die leere Prozesskammer

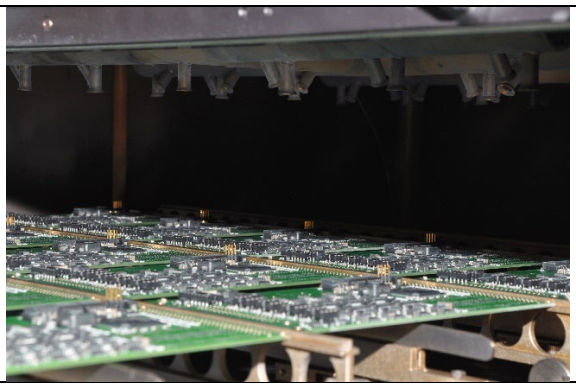


Bild 2: BG in der geschlossenen Prozesskammer

Nach dem Schließen der Prozesskammer (Bild 2) beginnt der Injektionsprozess. In definierten Prozessschritten werden bestimmte Mengen von Galden injiziert, die auf dem Kammerboden sofort verdampfen. Auf Bild 3 sind insgesamt drei aktivierte Injektionen mit 600, 350 und 500 ml zu sehen. Das entstandene Gas kondensiert wiederum auf der kalten Baugruppe, überträgt bei seinem Phasenwechsel Wärme und leitet so den Reflow-Prozess ein.

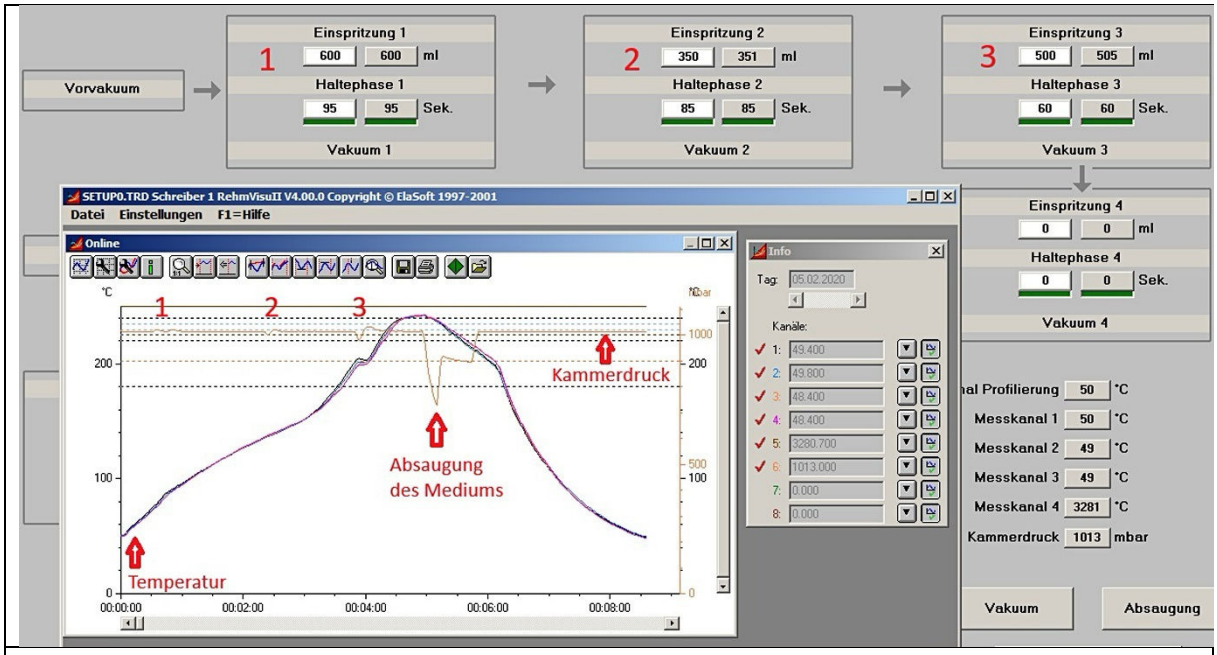


Bild 3: Sreenshot der Prozessschritte

Während des Phasenwechsels (Flüssig – Gas – Flüssig) bleibt die Temperatur der Umgebung konstant – im Fall von Galden HS240 bei 240 ± 3 °C. Für die Baugruppe ergibt sich hieraus der Vorteil, dass sie keine höhere Temperatur erreicht; eine Überhitzung wird auf natürliche Weise vermieden.

Die Temperaturerhöhung der Baugruppe – von Raumtemperatur auf Löttemperatur – wird durch das Volumen des jeweils in die Kammer injizierten Galdens gesteuert, siehe Bild 4. Geringere Galden-Volumen übertragen weniger Wärme/Energie. Hierdurch ist es möglich, die Temperaturgradienten beim Aufheizen der Baugruppe zu beeinflussen und ggf. ein Plateau (soak / dwell time) in den Reflow-Profil-Verlauf einzufügen. Die Steuerung der Injektion ist notwendig, da Galden einen großen Wärmeübergangskoeffizienten besitzt (bis 300 W/m²K) und Grenzgradienten für die Baugruppe sonst ggf. verletzt werden können. Auf dem Bild 5 ist ein typischer Gradientenverlauf zu sehen.

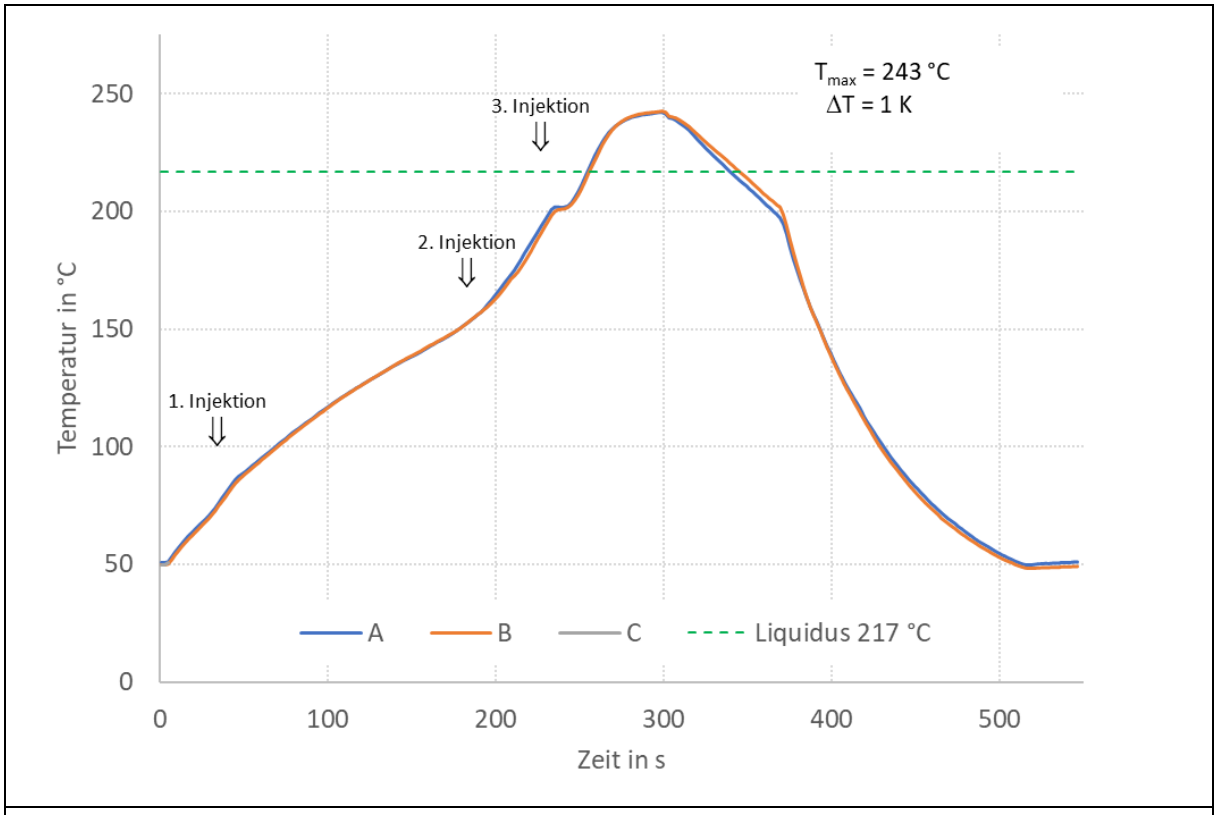


Bild 4: Typisches Vapourphase-Reflow-Profil einer Baugruppe

Bild 5: Gradientenverlauf eines typischen Vapourphase-Reflow-Profil

Da Galden eine inerte Flüssigkeit ist, gibt es bis auf den Wärmeaustausch keine Wechselwirkungen zwischen Galden und den Materialien der zu lötenden Baugruppe. Die Galdengas-Atmosphäre ist mit einer inerten Stickstoffumgebung vergleichbar, so dass Oxidation vermieden wird.

Nach dem Löten wird das Prozessmedium komplett aus der Kammer abgesaugt und der Kühlprozess eingeleitet. Das Kühlen erfolgt per Konvektion. Die Prozesskammer öffnet sich und der beladene Warenträger wird herausgefahren. Außerhalb der Prozesskammer wird der Kühlprozess unter einem Konvektionsgebläse fortgesetzt. Danach ist der Prozess beendet.

Der Vakuumprozess

Die hermetisch dichte Prozesskammer der Injektions-Anlagen kann man für einen (optionalen) Vakuumprozess nutzen. Technisch entsteht in den Anlagen ein Unterdruck (Grobvakuum bis 1 mbar = 100 Pa). Der Normaldruck der umgebenden Atmosphäre beträgt 1013,25 mbar = 101,3 kPa.

Minimierung von Poren / Voids

Ein Vakuum-Prozessschritt gewährleistet porenfreie/void-freie Lötstellen. Dafür wird das Vakuum erzeugt, sobald die Baugruppe ihre Löttemperatur erreicht hat und sich das Lot in der schmelzflüssigen Phase befindet (Bild 7).

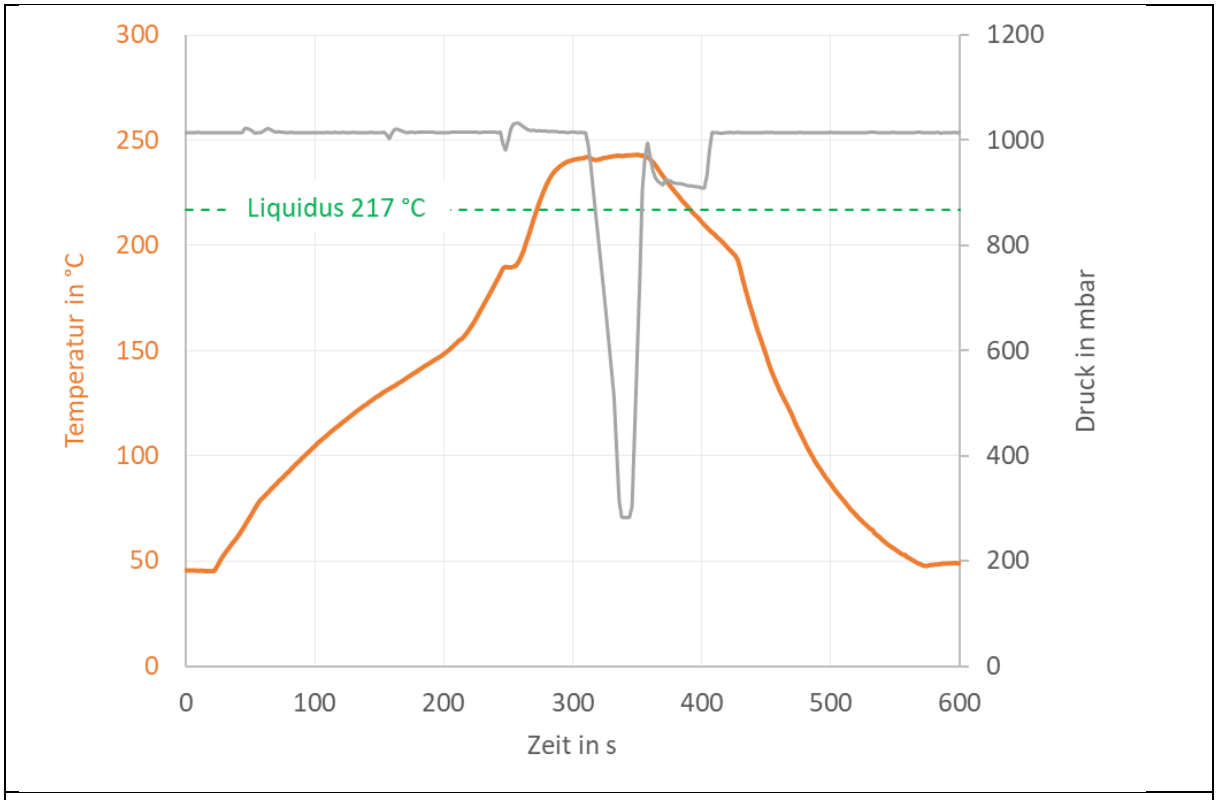


Bild 7: Vakuumprozess zur Minimierung der Voids

Der Unterdruck in der Kammerumgebung erleichtert es den Gasen (Poren), einfacher aus dem schmelzflüssigen Lot auszugasen. Kraus Hardware steht für sehr gute Resultate mit Druckwerten im Bereich 5 bis 300 mbar. Röntgeninspektionen (X-Ray) der gelöteten BG sichern eine gleichbleibende void-freie Qualität.

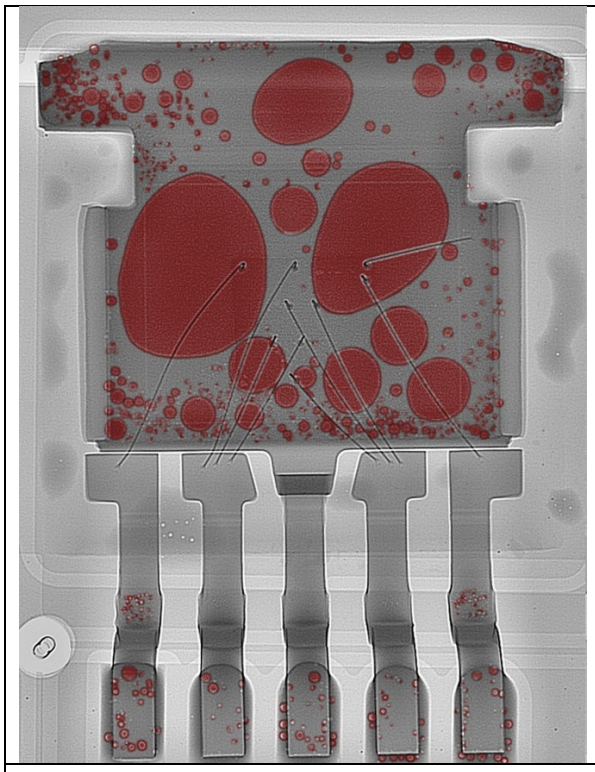


Bild 7a: Flächenlötung ohne Vakuum
X-Ray-Bild, Voids sind rot markiert

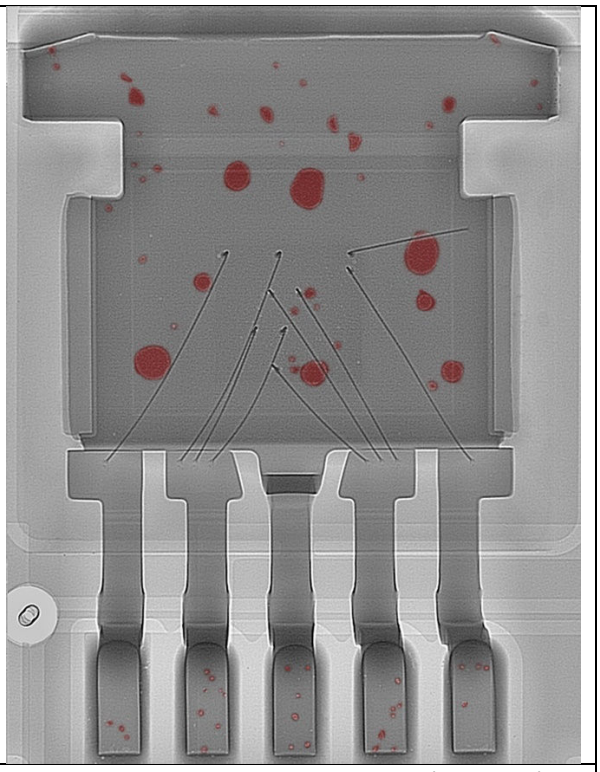


Bild 7b: Flächenlötung mit Vakuum (50 mbar)
X-Ray-Bild, Voids sind rot markiert

Schaffung einer luftleeren (Sauerstoff freien) Prozessumgebung

Neben der Minimierung der Voids eröffnet das Vakuum weitere Möglichkeiten für die Prozessgestaltung:

- Nach Schließung der Prozesskammer ist die Kammer sofort luftleer. Das stellt eine oxidationsfreie Lötumgebung für die Baugruppen sicher.
- In einer luftleeren Prozesskammer breitet sich das Prozessmedium sehr homogen im gesamten Kammerraum aus und muss keine Luft verdrängen (Bild 8). Dies erleichtert z.B. das optimale Löten von sehr hohen Baugruppen mit unterschiedlichen thermischen Massen.

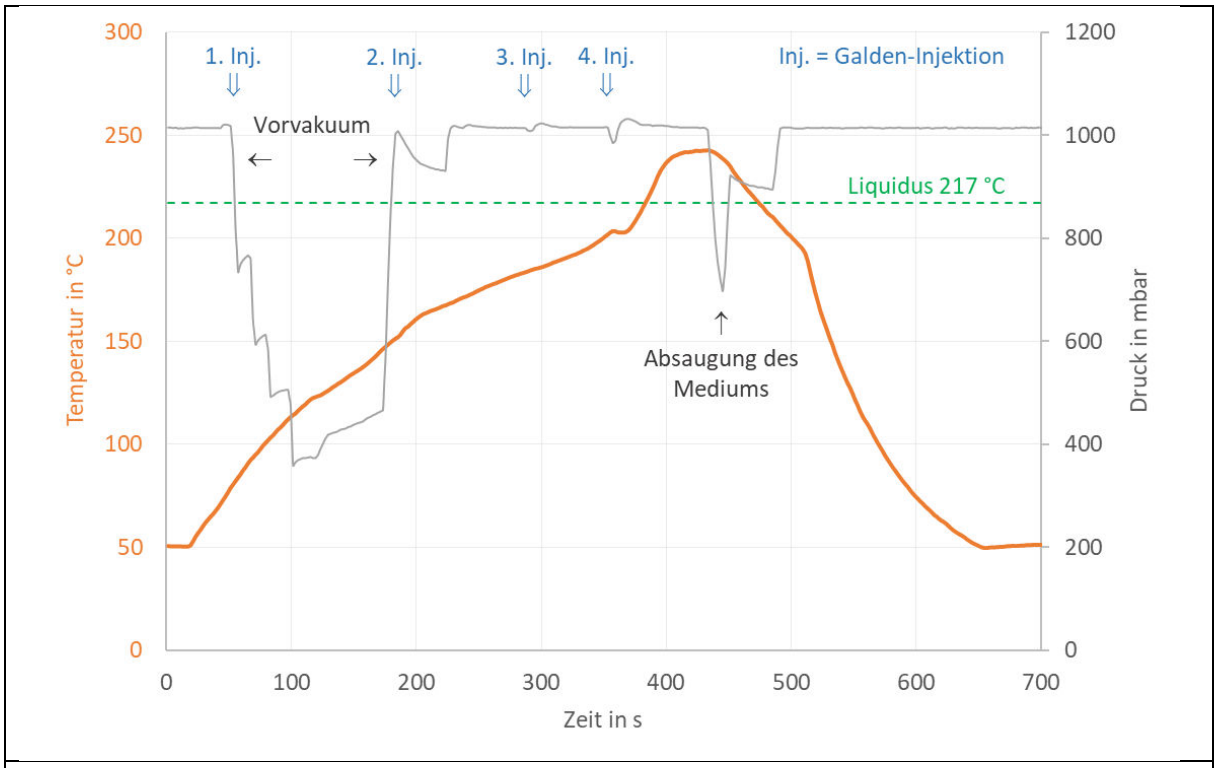


Bild 8: Vapourphase-Prozess mit Vorvakuum

Realisierung eines Prozesses mit niedrig schmelzendem Lot

Niedrig schmelzende Lote – vorwiegend Zinn-Wismut-Lote – werden heute für verschiedene Applikationen eingesetzt. So kommt bei Kraus Hardware für Luft/Raumfahrt-Applikationen noch SnPb-Lot mit einem Schmelzpunkt von 183 °C zum Einsatz. Die Vakuum-Dampfphaseanlage bietet die Möglichkeit, einen niedrigschmelzenden Reflow-Prozess zu gestalten, ohne das (bei 240 °C siedende) Medium HS 240 auszutauschen. Dazu wird die physikalische Eigenschaft ausgenutzt, dass bei sinkendem Umgebungsdruck auch die Siedetemperatur einer Flüssigkeit entsprechend ihrer Partialdruckkurve sinkt[3]. Auf Bild 9 ist ein entsprechender Reflow-Prozess zu sehen, der mit Galden HS240 für einen Zinn-Wismut-Prozess gestaltet wurde. Das Lot SnBi mit der Zusammensetzung 58 % Zinn und 42 % Bismut hat einen Schmelzpunkt von 139 °C. Der Prozess beginnt zunächst mit einem Vakuum-Prozessschritt. In das Vakuum wird anschließend eine kleine definierte Menge Galden injiziert, die den Druck in der Prozesskammer in unserem Prozess nicht über 140 mbar steigen lässt.

Bleibt der Kammerdruck während des Prozesses niedrig, siedet das Galden deutlich unter 240 °C, so dass ein Niedrig-Temperatur-Prozess möglich wird.

[3] Wasser siedet bei 100 °C, wenn der Druck in der Umgebung 1000 mbar beträgt. Klettert man auf die nicht ganz 3000 Meter hohe Zugspitze, herrscht dort ein Umgebungsdruck von ca. 700 mbar und das Wasser siedet dann bereits bei ca. 90 °C.

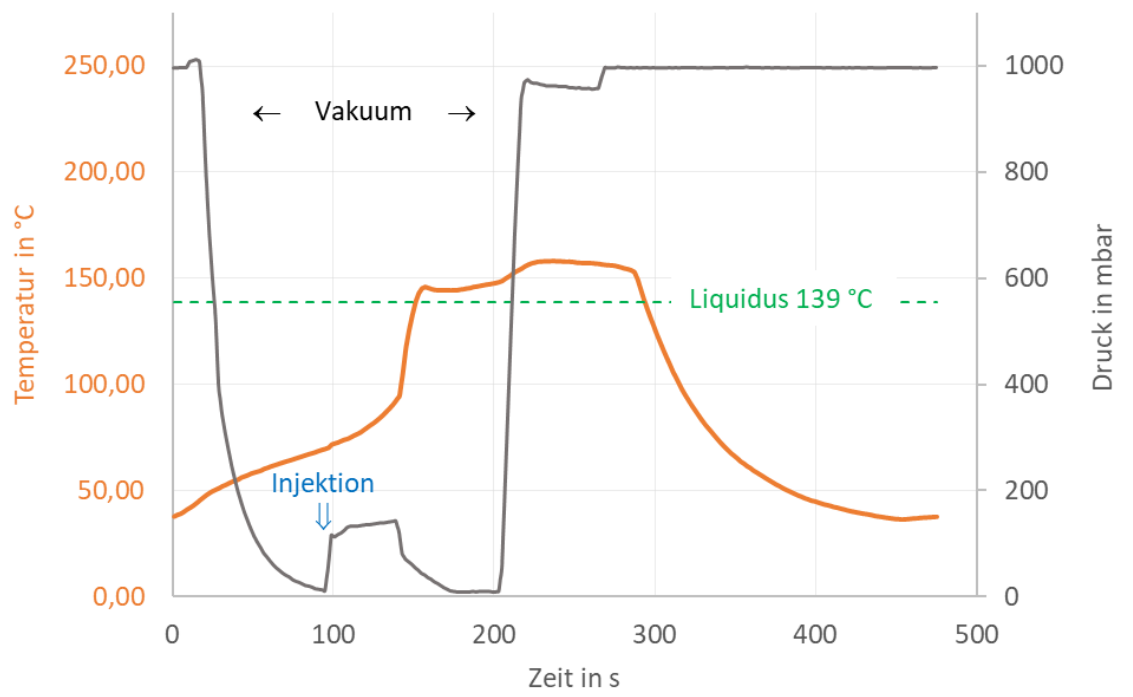


Bild 9: Injektion des Galden HS 240 in das Vakuum, mit dem Ziel, einen SnBi-Reflow-Prozess (Schmelzpunkt 139 °C) zu realisieren.

Das Prozessmedium Galden®

Galden wird von SOLVAY SPECIALTY POLYMERS ITALY S.p.A. produziert. Das Medium ist ein PerFluorPolyEther (PFPE) und wird durch Photo-Polymerisation und Fraktionierte-Destillation hergestellt. Die Tabelle 1 listet einige Eigenschaften auf:

Besitzt einen fixen Siedepunkt Z.B. HS240 = 240 °C	Medien im Bereich 55 – 270 °C verfügbar Durch die Destillation ist eine Toleranz des Siedepunktes von ± 3 K gegeben
Verdampft ohne Rückstand	Das Galden-Molekül ist sehr stabil, wodurch die ständigen Phasenwechsel flüssig – gasförmig – flüssig keine Minderung der Qualtät zur Folge haben
Inert, nicht reaktiv	Keine Wechselwirkung mit der Baugruppe (keine Oxidation) und keine Auswirkungen auf Physiologie und Umwelt
Dielektrisch	Elektrisch nicht leitfähig, flüssiger Isolator Geringe thermische Leitfähigkeit λ =0,07 W/mK (HS 240)
Kleine spezifische Verdampfungsenthalpie	dHi = 68 kJ/kg (HS 240)
Große Dichte	Molekulargewicht bis max. ca. 1500 g/mol
Kein akut toxisches Wirkungspotential Siehe EU-Chemikalienverordnung (EG Nr. 1272/2008)	Biologisch nicht abbaubar Wassergefährdungsklasse 1 Kein Anhalt für chronisch-toxische Schädigung, keine mutagene oder karzinogene Wirksamkeit
Global Warming Potential	GWP = 10.000

Tabelle 1: Eigenschaften von Galden

Für das bleifreie Löten mit SAC-Lot gibt es auf dem Weltmarkt derzeit keine Alternative zu Galden.

Alternativen zum Dampfphasenlöten

Konvektionslötverfahren sind der weltweite Favorit für das Reflow-Löten. Hier kommt heißes Gas (Luft oder Stickstoff N_2) zum Einsatz, um Wärme auf die Baugruppe zu übertragen. Mehr als 80 % aller elektronischen Baugruppen werden mit diesem Verfahren gefertigt.

Kontaktlötverfahren werden nur für einseitige Baugruppen verwendet, erreichen aber vergleichbar größere Endtemperaturen (bis 450 °C), wodurch sie für höher schmelzende Lote attraktiv sind, die beispielsweise in der Powerelektronik Anwendung finden.

Infrarot-Strahlungssysteme kommen gegenwärtig sehr selten für das Reflow-Löten zum Einsatz, da sie aufgrund der Strahlungsphysik für eine schlechte Temperaturverteilungen auf der elektronischen Baugruppe sorgen.

Die folgende Tabelle 2 stellt einige Merkmale der Reflowlötverfahren gegenüber.

	Konvektion Durchlaufanlage	**Kondensation** (oft Batchsystem)	**Strahlung** Durchlaufanlage	**Kontakt** (oft Batchsystem)
Lötgut / Baugruppen	Ein- und zweiseitig bestückte BG	Ein- und zweiseitig bestückte BG mit großen Massen	Ein- und zweiseitig bestückte BG	Einseitig bestückte BG mit planarer Rückseite, Frontend-Applikationen
Maximale Prozesstemperatur	300 °C	240 °C	> 300 °C, abhängig vom Strahlertyp	450 °C
Temperaturunterschied der Baugruppe (ΔT)	Abhängig von der Heizzonenanzahl	Relativ klein	Abhängig von der Heizzonenanzahl	Relativ groß
Prozessatmosphäre	Luft, Stickstoff N_2	Galden (PFPE), evtl. Ameisen-säure	Meist Luft	Gase: Luft, N_2, Ar, N_2H_2 5 %, Plasma, Ameisensäure
Vakuumprozess	Nach der Löt/Peakzone	Flexibel über den gesamten Lötprozess	Nicht bekannt	Flexibel über den gesamten Lötprozess
Flexibilität der Profilierung	Sehr gut	Gut - eingeschränkt	Gut	Gut - eingeschränkt
Produktivität	Große Losgrößen	Mittlere - kleine Losgrößen	Große Losgrößen	Kleine Losgößen

Tabelle 2: Vergleich der Lötverfahren

Einsatzbereiche für das Vapourphase-Löten

Gegenwärtig kann man keine Applikationsbereiche nennen, die bei der Anwendung des Vapourphase-Lötens besonders hervorstechen. In früheren Jahren waren es insbesondere die Luft- und Raumfahrt, militärische Applikationen und insbesondere Medizinprodukte.

Aufgrund der guten Lötergebnisse sowie der Option, den Vakuumprozess beliebig nutzen zu können, sind die Vapourphase-Batchanlagen in Fertigungen von kleinen und mittleren Losgrößen derzeit beliebt – sozusagen als Allround-Reflowlötverfahren.

Die Vorteile im Überblick

Die genannten Vorteile sind stets im Vergleich mit den anderen Reflowlötverfahren zu sehen.

Vorteil	Bemerkung
Begrenzung der maximal erreichbaren Temperatur	Der Siedepunkt des Galden-Mediums ist definiert Z.B. HS240 $T_S = 240 \pm 3$ °C
Inerte Prozessumgebung Keine Oxidation oder Korrosion	Galden-Medium (PFPE) ist von Natur aus ein inertes Medium
Saubere Baugruppe nach dem Löten	Galden-Medium verdampft ohne Rückstand und nimmt einen Teil der Flux-Rückstände der Lotpaste mit
Sehr gute Wärmeübertragung Es können Baugruppen mit großen Massen und verschiedenen Designs (z.B. große Bauhöhe) gelötet werden	Der Wärmeübergangskoeffizient (h in W/m^2K) ist um einen Faktor 4 – 10 größer als bei der Konvektion
Kleine Temperaturunterschiede auf der Baugruppe	Die sogenannte Filmkondensation des Mediums erreicht sehr homogen jeden Ort der auf der Baugruppe
Vakuumprozess ist einfach zu integrieren Poren/Voidfreies Löten Einfacher Gasaustausch möglich, z.B. Luft gegen N_2	Voraussetzung ist eine vakuumgerechte Prozesskammer (Injektionsprinzip)
Flexibles Beladesystem	Z.B. Warenträger
Geringer Platzbedarf	Wenn Batchsystem

Die Nachteile im Überblick

Im Vergleich zu den anderen Reflow-Lötverfahren gibt es beim Dampfphasenlöten folgende Nachteile und Grenzen:

1. Insbesondere für das bleifreie Löten existiert gegenwärtig nur ein funktionstüchtiges Medium: Galden®.
2. Das Galden-Medium ist teuer und ein geringer Verbrauch pro Prozess lässt sich nicht vermeiden (abhängig von der Anzahl und dem Typ der Baugruppen; z.B. 1,6 g/Zyklus).
3. Der Prozess findet in einer geschlossenen Kammer statt (Batch-Prinzip), was zu einer kleineren Produktivität führt.
4. Das Reflow-Lötprofil gestaltet man durch Nutzung des gewählten Mediums (hat einen definierten Siedepunkt) – und das schränkt die Flexibilität ein. Höhere maximale Temperaturen sind nicht erreichbar.
5. Da Galden einen großen Wärmeübergangskoeffizienten besitzt, werden Grenzgradienten für die Baugruppe verletzt, wenn der Prozess nicht gesteuert wird.
6. Das Galden-Medium ist nach der EU-Chemikalienverordnung (EG Nr. 1272/2008) als nicht gefährlich eingestuft, hat jedoch ein sehr hohes GWP (Global Warming Potential); das USA Federal Register Vol. 78, No. 66 vom 5.4.2013 stuft Galden HS240 mit einem GWP von 10.000 ein.

Prozesssicherheit garantiert – 3 weitere Vorteile

1. Insbesondere die natürlichen Eigenschaften des verwendeten Prozessmediums (definierter Siedepunkt begrenzt die maximale Temperatur – das Medium ist zudem inert) sorgen für Prozesssicherheit.
2. Zudem werden alle relevanten Parameter der Lötanlage überwacht. Ein von der Anlage unabhängiges Temperaturmesssystem zeichnet jeden Temperaturverlauf pro Zyklus auf.
3. Bei Vakuum-Anlagen wird neben der Temperatur auch der Kammerdruck permanent überwacht. Die Druckkurve registriert – sozusagen nebenbei – den Medium-Injektionsschritt. Jede Injektion verändert den Kammerdruck (Bild 9).

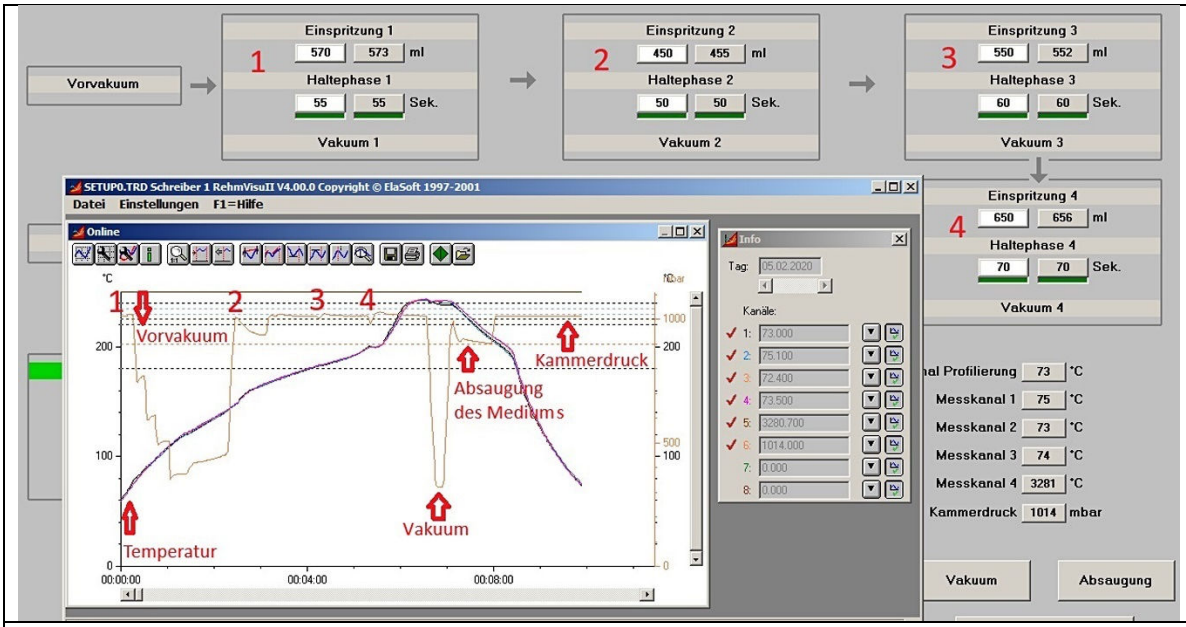


Bild 9: Screenshot der überwachten Parameter