

# Lotpastendruck: Ein kleiner Technologie-Ratgeber zu Material und Prozess

Dr. Hans Bell, Berlin 2026

## 1. Einleitung

Der Lotpastendruck – auch bekannt unter „Schablonendruck“ (engl. screen printing) oder „Pastendruck“ (engl. paste printing) – gehört zu den zentralen Prozessen in der Elektronikfertigung. Er legt den Grundstein für die Qualität der Baugruppe, bevor das erste Bauteil bestückt oder gelötet ist.

Dabei gibt es vielfältige Einflussgrößen auf das Druckergebnis, wie das Ishikawa-Diagramm (Bild 1) deutlich macht – ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Es würde ein Buch füllen, alle Einflüsse ausführlich zu diskutieren. Dies kann das Whitepaper nicht leisten, jedoch werden wesentliche Faktoren hier beleuchtet.

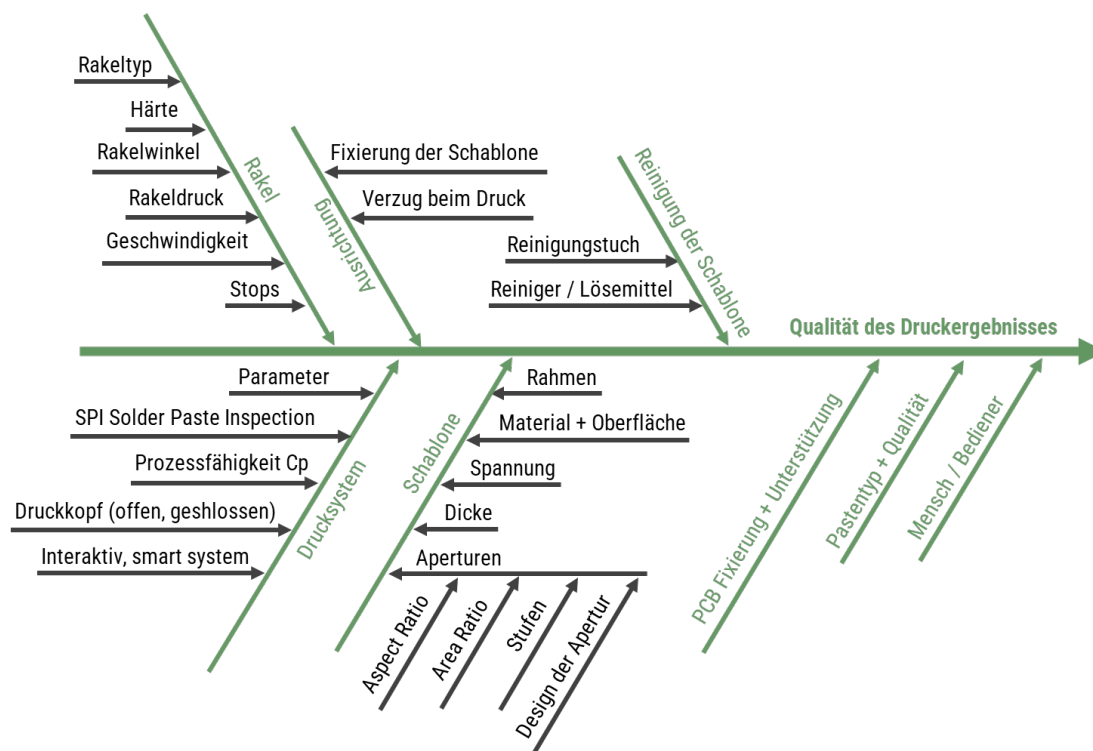


Bild 1: Ishikawa-Diagramm der Einflussgrößen auf die Qualität des Schablonendrucks

Anfang der 1980er Jahre verbreitete sich weltweit die Reflowlöttechnologie für Surface Mount Devices (SMD, oberflächenmontierbare Bauelemente). Dafür entstanden in der Folge neue Bauelemente, Materialien und Fertigungsverfahren, wobei die Lotpaste eine Art von „Schlüsselmaterial“ darstellt. Sie wird mithilfe eines Druckverfahrens – des sogenannten Lotpastendrucks – simultan auf die Leiterplatte aufgebracht. Dieser Prozessschritt reduzierte die Fertigungskosten im Vergleich zu den sequenziellen Verfahren (z.B. Handlöten) drastisch,

da sich das Lot sofort an allen richtigen Stellen befand – also dort, wo Bauelement und Leiterplatte miteinander verbunden werden. Der Siegeszug der Reflowlöttechnologie war eingeleitet. Die Bilder 2 zeigen die Fertigungsschritte der Surface Mount Technology.

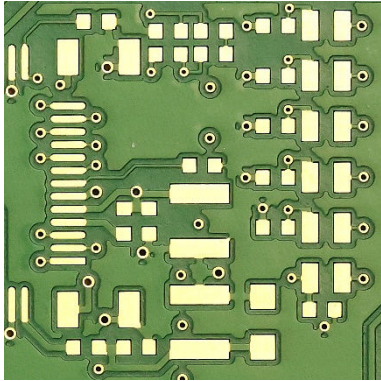
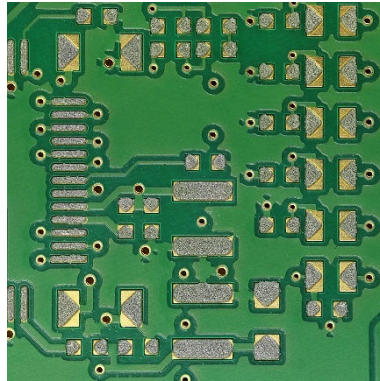
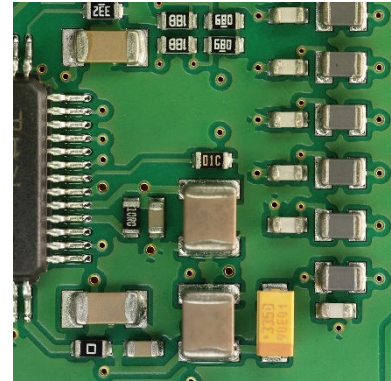


Bild 2a: Unbestückte Leiterplatte



2b: Mit Paste bedruckte Leiterplatte



2c: Bestückte + gelötete Baugruppe

## 2. Die Lotpaste und deren Eigenschaften

**Lotpasten bestehen aus Metallpulvern und einer zähflüssigen (viskosen) Phase aus organischen (z.B. Harze) und anorganischen (z.B. Aktivatoren) Stoffen. Sie bestimmen über Druckeigenschaften, rheologische Eigenschaften und Löteigenschaften der Paste.**

Die Dichte von Lot und viskoser Phase unterscheiden sich – was folglich auch für Volumen und Gewicht der Pastenbestandteile gilt [1-Bell]. Die folgenden Abschnitte beschreiben einige Eigenschaften, die für den Druckprozess und das Reflowlöten unverzichtbar sind:

### 2.1 Das Legierungsmetall

Die Legierung definiert den Schmelzpunkt (Tab. 1) und sorgt für die Zuverlässigkeit einer Lötstelle. Außerdem beeinflussen Korngröße, Geometrie und Verteilung der Metallkörner das gesamte Druckverhalten. Der Metallgehalt ist entscheidend für das spätere Lotvolumen.

Legierung	T <sub>s</sub> in °C	Anwendungsbereich (u. a.)
Sn In52	118	Teures Speziallot, z.B. Sensoren
Sn Bi58	138	Temp. empfindliche Komponenten, z.B. Sensoren
Sn91,0 Zn9,0	199	Preiswerte Applikationen, Korrosionsrisiko!
Sn Ag3,0 Cu0,5	217 - 219	Main stream Lot, sehr breite Anwendung
Sn Ag3,8 Cu0,7 Ni0,15 Sb1,5 Bi3,0	206 - 218	Automotiv, höhere Zuverlässigkeit (Innolot)
Sn Ag2,5 Cu0,5 In2	206 - 218	Powerelektronik, Hybrids, LTCC, DCB (HT1 Lot)
Sn Ag3,5	221	Reparaturlöten, hohe Kupfer-Löslichkeit
Sn Cu0,7 Ni	227	Reparaturlöten (SN100)
Sn5 Pb92.5 Ag1.5	296 - 301	Hochtemperatur-Applikationen, beachte RoHS
SnSb10	242 - 274	Hochtemperatur-Applikationen, Sensoren, FC

Tabelle 1: Schmelzpunkt und Anwendungsbereich einiger Lote

Blei (Pb) (wie auch einige andere Legierungselemente in Lotpasten) fällt unter die Restriktion der RoHS-Direktive [2-RoHS], wodurch ihre Verwendung drastisch eingeschränkt ist. Dadurch hat sich das Zinn-Silber-Kupfer-Lot SnAg3,0Cu0,5 (kurz SAC) zum meistverwendeten entwickelt. Selbstverständlich ist dabei der Schmelzpunkt ein wichtiges Auswahlkriterium, da er die Zuverlässigkeit des Lotes im Einsatzfall mitbestimmt. Die Bedeutung der sogenannten homologen Temperatur hierbei – also dem dimensionslosen Verhältnis der Realtemperatur zur Schmelztemperatur des Lotes jeweils in Kelvin (K) – für die Festigkeit der Lotverbindung haben Wittke und Scheel ausführlich diskutiert. Ab einer kritischen homologen Temperatur von 0,4 kann eine Temperaturerhöhung zum dramatischen Abfall der Festigkeit führen. Für die unterschiedlichen Lote und Betriebstemperaturen ist nur eine homologe Betriebstemperatur von maximal 0,85 bzw. 0,8 zulässig. Bei höheren Betriebstemperaturen nähert man sich schnell der Grenze der Belastbarkeit an, [3-Wittke]. SAC-Lot hat bei 110 °C Betriebstemperatur eine homologe Temperatur von:

$$^{\circ}\text{C} + 273 = (110 + 273) / (217 + 273) = 0,78.$$

Seit vielen Jahren setzt die Lotpasten-Industrie auf möglichst ideal runde Metallkörner in der Paste. Der Grund hierfür ist naheliegend: Runde Körner rollen beim Druckprozess wesentlich besser als andere Körner-Geometrien, wodurch das Füllen der Öffnungen (Aperturen) in der Schablone unterstützt wird (Bilder 3). Neben einer nahezu perfekten Kugelgestalt ist der

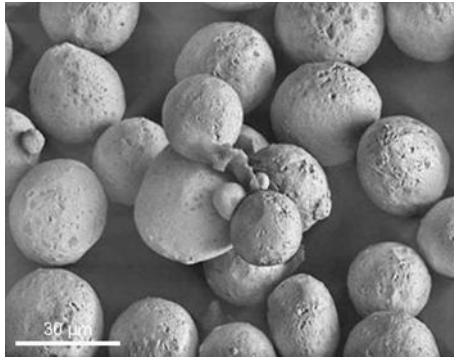


Bild 3a: Nicht optimales Pulver [4-Müller]

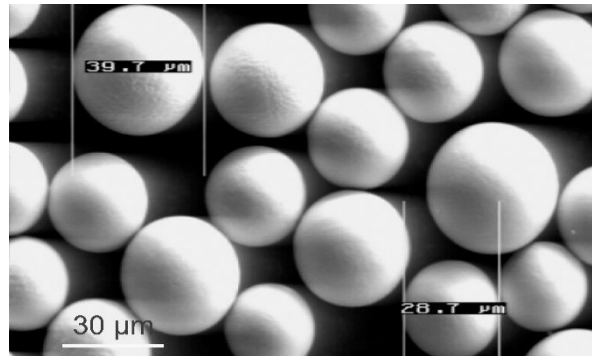


Bild 3b: Optimal runde Kugeln [5-Westerlaken]

Korndurchmesser sowie die Verteilung unterschiedlich großer Körner in der Paste (bekannt als Pastentyp) mitentscheidend für das spätere Volumen einer Lötstelle.

Am Beispiel der Apertur für einen 03015m-Chip (das m steht hier für metrisch) soll kurz demonstriert werden, welche Auswirkung die Auswahl eines Pastentyps hat. Die Beispiel-Apertur hat folgende Abmessungen: 100x130x45 µm. Die nachfolgenden Bilder 4a bis 4c demonstrieren die Füllung der Apertur (in grün) – jeweils mit Kugeln mit maximalem und minimalem Durchmesser. Die schraffierten Kugeln sollen andeuten, dass diese keinen Platz mehr in dem Aperturvolumen finden. Und das bedeutet:

- Mit Typ 4 wird maximal ein Füllgrad von 43 % erreicht – unabhängig davon, ob große oder kleine Kugeln die Apertur füllen.
- Typ 5 erreicht einen Füllgrad von 47 % massives Lot, was sich positiv auf die zu realisierende Lötstelle auswirkt und daher die erste Wahl für den 03001m-Chip sein sollte.
- Es ist nicht möglich, die Apertur zu 100 % mit massivem Lot zu füllen, da das Stapeln von Kugeln stets Hohlräume hinterlässt. Übrigens werden diese gebraucht, um Raum für die notwendige Flussmittelchemie zu haben.
- Global sollte eine Apertur so bemessen werden, dass sie von vielen Lotkugeln gefüllt werden kann und beim Drucken möglichst wenige Kugeln über die Oberfläche der Schablone herausragen, da diese beim Druckprozess vom Rakel abgetragen werden. Aperturdesign und Schablonendicke harmonisieren idealerweise mit dem Pastentyp.

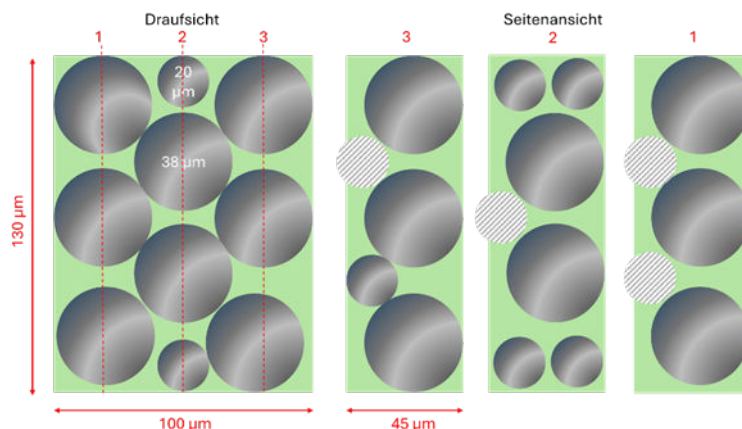


Bild 4 a: Aperturfüllung - Szenario mit großen Körnern  
 Typ 4, Korndurchmesser: MAX 40 µm, 80 % = 38 bis 20 µm, 10 % < 10 µm  
 Erreichter Apertur-Füllgrad mit massivem Lot: 43 %

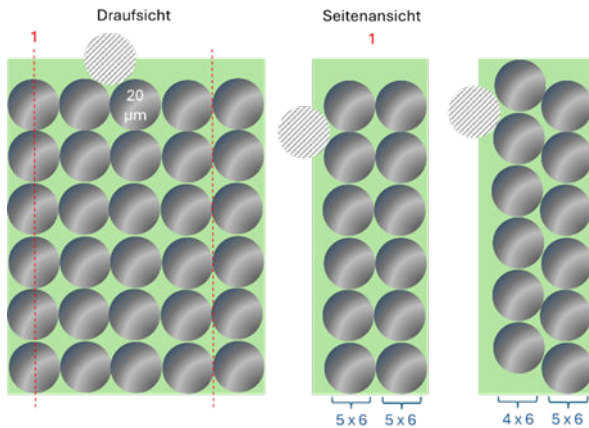


Bild 4b: Aperturfüllung - Szenario mit kleinen Körnern  
 Typ 4, Korndurchmesser: MAX 40 µm, 80 % = 38 bis 20 µm, 10 % < 10 µm  
 Erreichter Apertur-Füllgrad mit massivem Lot: 43 %

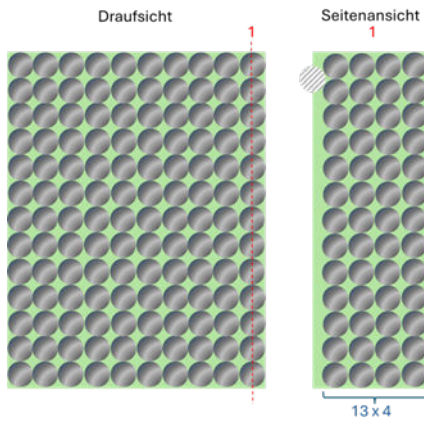


Bild 4c: Aperturfüllung - Szenario mit kleinen Körnern  
 Typ 5, Korndurchmesser: MAX 30 µm, 90 % = 25 bis 10 µm, 10 % < 10 µm  
 Erreichter Apertur-Füllgrad mit massivem Lot: 47 %

Um die optimale Schablonendicke  $t$  zu finden, kann man einer Empfehlung von C. Koenen folgen, wonach in die Formel die maximale Korn/Kugelgröße einzusetzen ist, [6-Koenen]:

$$t \gg \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{8}{3}}\right)$$

Setzen wir für  $d = 38 \mu\text{m}$  ein ergibt sich eine empfohlene Schablonendicke von  $50 \mu\text{m}$ , bei  $d = 30 \mu\text{m}$  ca.  $40 \mu\text{m}$ . Für unser Apertur-Beispiel 03015m-Chip stellt die Schablonendicke von  $45 \mu\text{m}$  einen guten Kompromiss dar. Die nachfolgenden Bilder 5a und 5b zeigen Testdrucke von Kraus Hardware. Die Feinkörnigkeit des Pastentyps 5 unterscheidet sich.

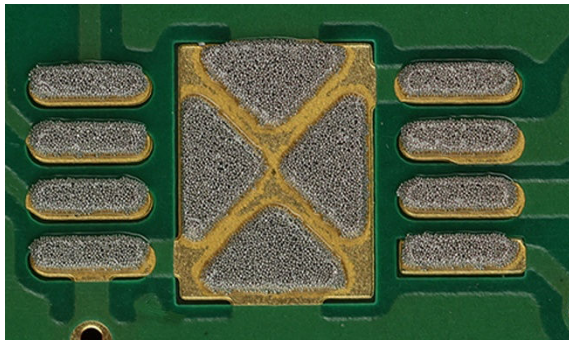
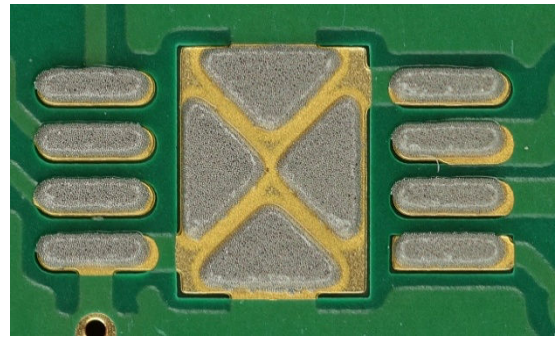


Bild 5a: Typ 4 Lotpaste



5b: Typ 5 Lotpaste

Towell schreibt: „Dünnere Schablonen, typischerweise im Bereich 3 - 4 mil (ca. 76 - 100  $\mu\text{m}$ ) werden für den Typ 5 bevorzugt, Schablonen bis 1 mil (ca. 25  $\mu\text{m}$ ) für den Typ 6“, [7-Towell]. In der Tabelle 2 sind die international standardisierten Pulvertypen aufgelistet. Die Lotkugeln (Partikel) werden mittels eines Siebverfahrens aufbereitet, woraus die Durchmesser-Verteilung resultiert. Mehr dazu kann in der Norm DIN EN 61189-5-3:2015-11 „Lotpaste für bestückte Leiterplatten“ nachgelesen werden, [8-Beuth].

Pulver-Typ	Partikeldurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				
	< 3 % kleiner	< 10 %	> 85 %	< 10 %	alle kleiner
1	50	50 ... 75	75 ... 150	150 ... 200	200
2	32	32 ... 45	45 ... 75	75 ... 100	100
3	15	15 ... 20	20 ... 45	45 ... 60	60
4	15	15 ... 20	20 ... 38	38 ... 50	50
5	10	10 ... 15	15 ... 25	25 ... 30	30
6	5		5 ... 15	15	20
7	2		2 ... 11	11	15
8	2		2 ... 8	8	10
9			1 ... 5		8

Tabelle 2: Die Pulvertypen der Lotpasten

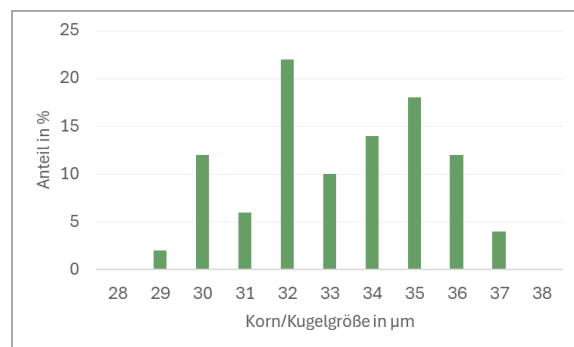


Bild 6: Reale Korngrößen-Verteilung einer Lotpaste Grafik nach Messungen von [9-Wistron]

Es ist hilfreich, die konkrete Kornverteilung einer Paste zu kennen. Sie ermöglicht Rückschlüsse auf die Optimierung der Schablonenaperturen und ist mitentscheidend bei der Festlegung der Anwendungsfelder – siehe hierzu Bild 6, [9-Wistron]. Einen kleinen Wermutstropfen bringt die Verkleinerung der Korndurchmesser mit sich. Die absolute Gesamtoberfläche der Körner vergrößert sich und verändert das Verhältnis von Oberfläche zu Kornvolumen. Eine vergrößerte Oberfläche birgt die Gefahr eines höheren Oxidations- und Korrosionspotentials für das Lotpulver, dem die chemische Formulierung in der Paste entgegenwirken muss, Bild 7a+b.

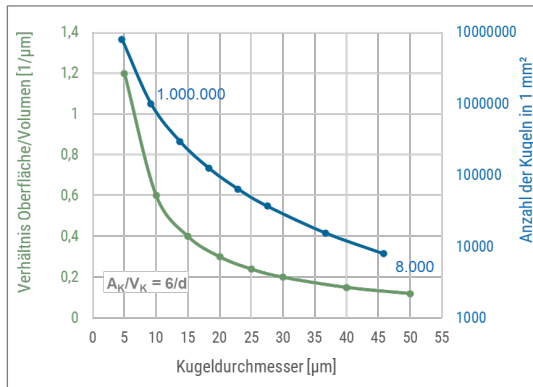
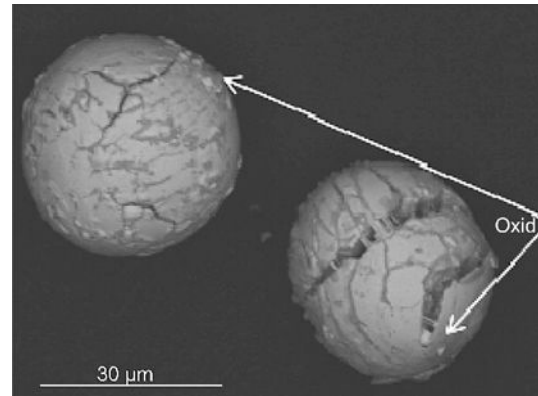


Bild 7a: Verhältnis Oberfläche/Volumen



7b: Oxidiertes SnZn8Bi3-Lotpulver, [10-Kaloudis]

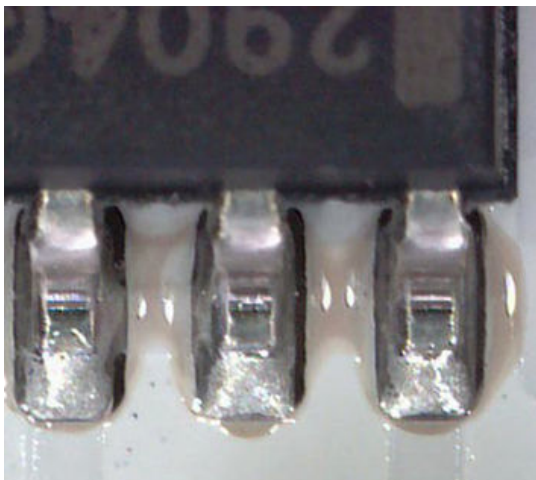


Bild 8: Flux- (Harz-) Rest um die Lötstelle herum

## 2.2 Die chemische Formulierung

Die chemische Zusammensetzung einer Lotpaste prägt das Druckverhalten sowie das Benetzungs- und Fließverhalten während des Lötens. Die nach dem Lötens verbleibenden Rückstände (Residues) sind mitverantwortlich für das spätere Korrosionsverhalten der Baugruppe. Während des Reflowlötens verändert sich die Zusammensetzung drastisch. Die einzelnen Lotkugeln (Körner) formen ein homogenes Lotvolumen, während die Lösemittel meist bereits bei den niedrigen Temperaturen im Vorheizprozess ausgasen. Harze und Aktivoren tragen zum Benetzungsprozess maßgeblich bei, wobei die Aktivoren (oft Säuren) chemisch umgesetzt werden. Nach dem Prozess befindet sich an der Lötstelle ein Harzrückstand, der das Lot umhüllt. Dieser Effekt (Bild) ist teilweise gewollt, da er die Lötstelle vor Umwelteinflüssen schützen kann. In jedem Fall muss stets geprüft werden:

- Geht ein Korrosionsrisiko von dem Rückstand aus?
- Ist der Rückstand kompatibel mit eventuellen Wasch-/Reinigungsprozessen, die z.B. vor Beschichtungsprozessen notwendig sind?
- Sind sogenannte No-Clean-Lotpasten für die Baugruppe / Applikation geeignet?

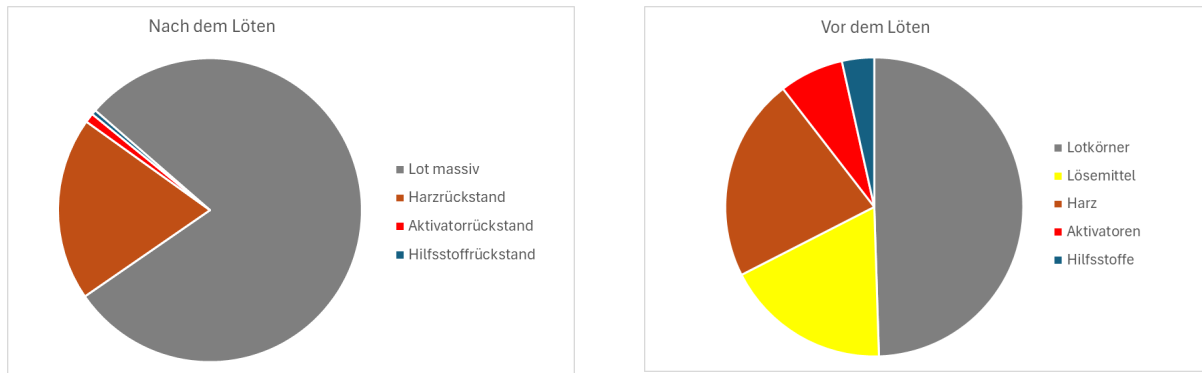


Bild 9a + b: Pasten-Zusammensetzung vor und nach dem Reflowlöten, Grafik nach [11-Trodler]

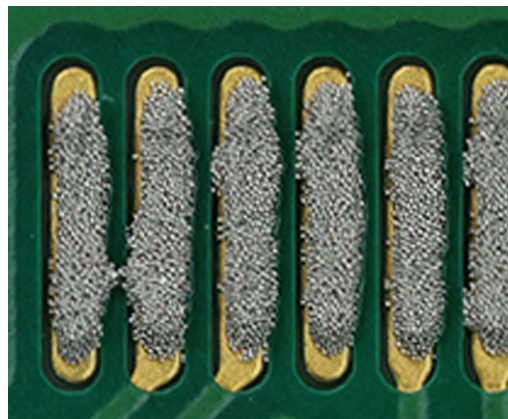
No-Clean Lotpasten verwenden eine Kombination aus Lösungsmittel, Aktivatoren und rheologische Additive, die ein niedriges Level von nicht-ionischen Rückständen auf der Baugruppe hinterlassen. Die Aktivatoren im Flussmittel werden während des Reflowprozesses aktiviert und oxidieren bei optimalem Temperatureinfluss. Der verbleibende „gutartige“ Rückstand wird in der Harz- (Kolophonium-) Matrix eingekapselt.

### 2.2.1 Viskosität und Thixotropie

Allgemein versteht man unter „Thixotropie“ die Änderung der Viskosität (Zähflüssigkeit) eines Fluids (in unserem Fall der Lotpaste) unter äußerer Krafteinwirkung. Beide rheologischen Parameter bestimmen über das Verhältnis zwischen Druckverhalten und Stehvermögen der



Bild 10: Lotpaste im Anliefergebinde nach dem Auf-rühren von Hand



Paste – und damit über das Risiko des Slumping: dem Auseinanderfließen des gedruckten Depots. Um die optimalen Eigenschaften einer Paste zu erreichen, sollte sie vor ihrer Verwendung gut durchgerührt werden, um eine homogene Verteilung von Lotkörnern und Chemie zu gewährleisten. Bei kleineren Losen ist also Handarbeit gefragt, für größere Chargen

stehen auf dem Markt auch Rührgeräte zur Verfügung. Wichtig ist es, die Paste rechtzeitig aus dem Lager-Kühlschrank zu nehmen, damit sie Raumtemperatur erreichen kann. Vernachlässigt man diese Empfehlung, kann durch Kondensation Luftfeuchte (Wasser) in die Paste gelangen. Beim Reflowlöten würde dieses Wasser „explosiv“ ausgasen und zum Spattering / zur Lotperlenbildung beitragen. Lotpaste sollte nicht verdünnt werden, denn die Formulierung ist vom Hersteller optimal eingestellt. Auf Bild 11 sind gedruckte Pastendepots zu sehen, die über ein mangelhaftes Stehvermögen verfügen und durch ihr Slumping (das Depot fließt in die Breite) eine Brückenbildung provozieren. Meist ist das Slumping darauf zurückzuführen, dass das Verhältnis zwischen Lösemitteln und den übrigen Bestandteilen der Paste nicht optimal ist. Außerdem gilt: Wasser ist ein Lösemittel, das die Pastenformulierung

verändern kann. In der Folge entstehen Lotperlen, die auf das explosionsartige Ausgasen des Wassers zurückzuführen sind.

Einerseits muss die Paste geschmeidig genug sein, um sich gut drucken zu lassen. Andererseits sollte sie nach ihrem Auslösen die Form der Schablonenapertur beibehalten. Die auf die Paste einwirkenden Kräfte gehen im Wesentlichen von den Druckparametern aus. Nicht zu vernachlässigen ist die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Viskosität. Die Grafik 12 zeigt Ergebnisse von Viskositätsmessungen einer Lotpaste nach Fischer [12]. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität und die Paste wird geschmeidiger. Der Anstieg nach ca. 70 °C ist wahrscheinlich auf den Verlust von Lösemitteln zurückzuführen, die bei höheren Temperaturen aus der Paste verdampfen. Die vom Pastenlieferanten angegebene Verarbeitungstemperatur sollte in jedem Fall eingehalten werden; ggf. ist der Schablonendrucker zu klimatisieren (z.B. in wärmeren Weltregionen). Die Raketelbewegung des Schablonendruckers beeinflusst ebenfalls die Viskosität.

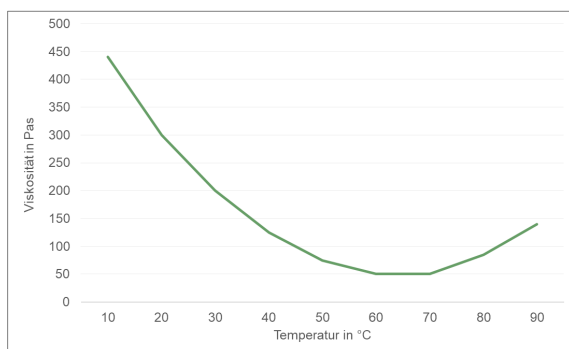


Bild 12: Viskosität der Lotpaste in Abhängigkeit von der Temperatur, nach [12-Fischer]

### 2.2.2 Die Klebkraft (Tackiness)

Die Klebkraft sorgt dafür, dass Bauelemente sicher auf den Pastendepots haften – eine Grundvoraussetzung für die SMD-Bestückung. Insbesondere die Harze und Lösemittel sind für die

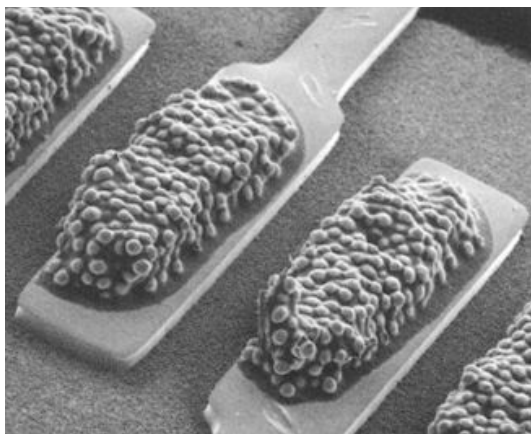
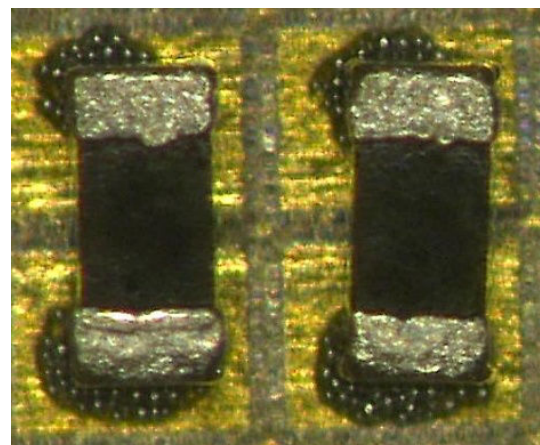


Bild 13a: Pastendeposite vor und



13b: nach der Bestückung

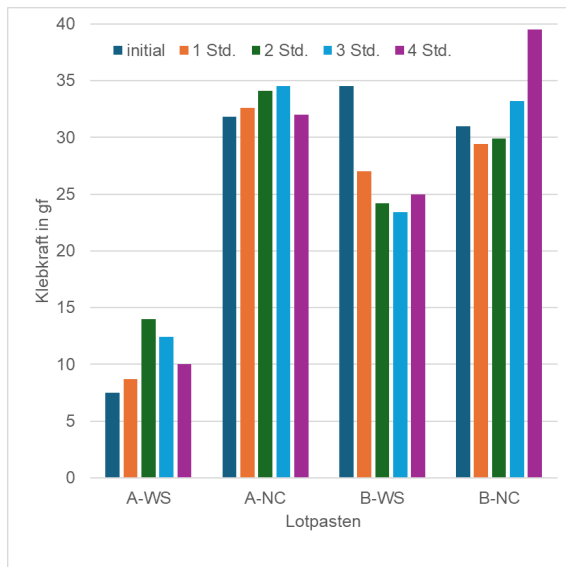


Bild 14: Zeitabhängige Klebkraft von Lotpasten, nach Daten von [13-Venkatesh]

die Klebkraft verantwortlich. Wird die Harzmatrix zu sehr „verdünnt“, sinkt die Klebkraft und umgekehrt. Da in einer realen Fertigung durchaus Standzeiten der Baugruppen sowohl vor dem Bestücken als auch danach vorkommen, wird erwartet, dass die Klebkraft einer Lotpaste über eine längere Zeit erhalten bleibt. Venkatesh [13] hat die Klebkraft verschiedener Pasten vergleichend über vier Stunden nach der IPC J-STD-005 untersucht. Auf der Grafik 14 sind die Klebkräfte von SAC-Pasten des Korntyps 3 gezeigt. WS bezeichnet wasser-basierende Pasten, „NC“ steht hingegen für No-Clean-Pasten. Sehr prägnant ist der Einfluss der Chemie. Wie sich die Klebkraft einer Paste über die Standzeit verändert, kann nur gemessen werden. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen für die Lotpasten gegensätzliche Entwicklungen der Klebkraft über die Zeit hinweg.

### 3. Die Druckschablone

Grundsätzlich kommen Schablonen (Bild 15) oder Siebe zum Einsatz (Bild 16). Ersteres besteht aus einem dünnen Metallblech (zumeist Edelstahl) mit einer Vielzahl von Öffnungen (Aperturen), durch die Lotpaste hindurchgedrückt wird. Im Unterschied dazu besteht das Sieb aus einem Draht- oder Polymergeflecht – inklusive einer Kunststoffmaske mit Aperturen. In der Reflow-Löttechnologie haben sich Metallschablonen durchgesetzt, da sie für höchste Präzision etwa im Fine-Pitch-Bereich sorgen. Siebe finden vor allem dort Anwendung, wo große Pastenmengen übertragen werden wie etwa bei Solarzellen. Für die Metallschablonen gibt es verschiedene Herstellungsverfahren – darunter das chemische Ätzen, die galvanische (elektroformte) Herstellung sowie das meistangewandte Laserschneiden.

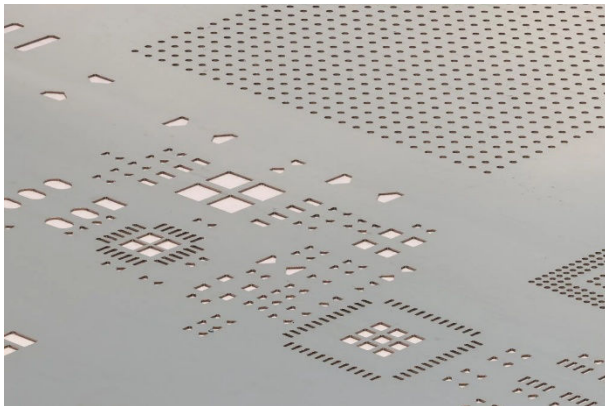


Bild 15: Metallschablone

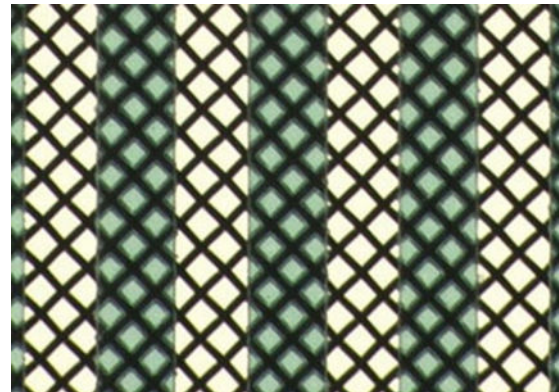


Bild 16: Metallsieb (Maske in grün)

Verschiedene Beschichtungen der Schablonen oder eine Plasmabehandlung beeinflussen das Auslöseverhalten und die Transfereffizienz der Lotpaste positiv. Im Folgenden machen wir am Beispiel des Bildes 17 auf wichtige Aspekte des Schablonendesigns aufmerksam. Zu sehen ist eine Schablonenapertur in sogenannter Oblong-Geometrie (die kurzen Seiten sind in Kreisform ausgeführt).

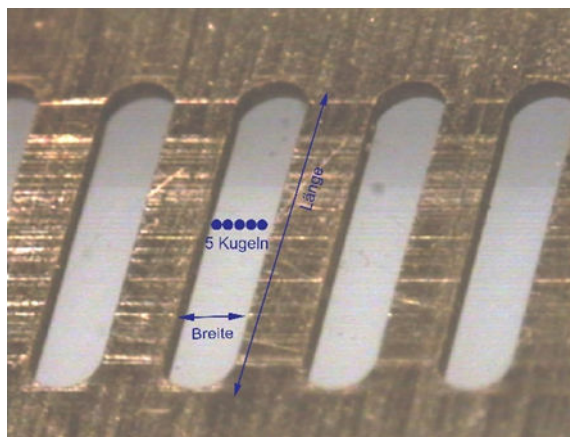


Bild 17: Schablonenapertur (5-Kugel-Regel)

$$\text{Aperturverhältnis: } \frac{\text{Breite}}{\text{Dicke}} \geq 1,5$$

$$\text{Flächenverhältnis: } \frac{\text{Länge} \cdot \text{Breite}}{2(\text{Länge} + \text{Breite}) \cdot \text{Dicke}} > 0,66$$

5-Kugel-Regel: 5 Pasten-Kugeln maximalen Durchmessers sollen in der Aperturbreite Platz finden, in runden Aperturen 6 Kugeln

Je weiter die Miniaturisierung voranschreitet, umso wichtiger werden individuelle Aperturlösungen, die dem optimalen Pastenbedarf gerecht werden. Hippin [14] hat bei seinen Untersuchungen an SOT- und SOD-Bauelementen gezeigt, dass sich das Flächenverhältnis in Richtung 0,7 bis 0,74 verschiebt. Der unterschiedliche Pastenbedarf unterschiedlich großer Bauelemente wird mit sogenannten Stufenschablonen ausgeglichen, deren Dicke lokal variiert (Bild 18a und 18b). Bei Flächendruck – zum Beispiel im Bereich des Exposed Pad eines

QFN – helfen Designanpassungen, um weniger Paste zu applizieren. So wird die Sphärenhöhe des schmelzflüssigen Lotes reduziert und ein Aufschwimmen des Bauelements vermieden.

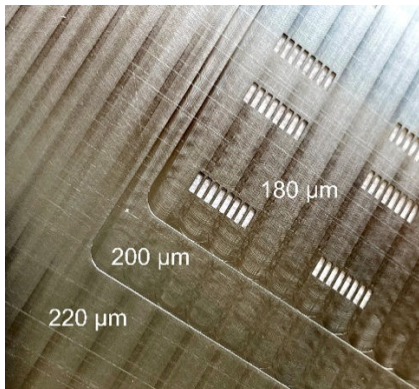


Bild 18a: Stufenschablone  
Stufen: 220, 200, 180 µm

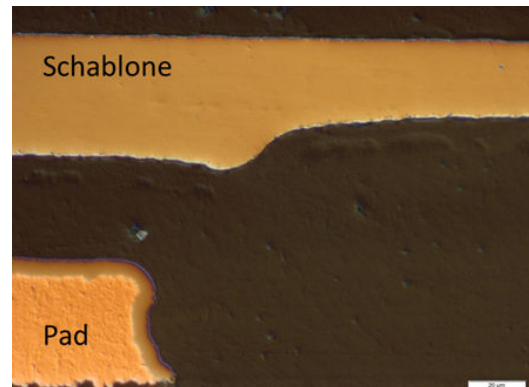


Bild 18b: Schliffbild einer Stufenschablone  
im Bereich eines 03015m-Chips

Individuelle Lösungen sind auch dort gefragt, wo unterschiedlich große Pads für gleiche Bauelemente entstehen – etwa wegen eines suboptimalen Designs. Hier kann die Schablone das Pastenangebot für hinreichend gute Lötstellen variieren. Auf dem Bild 19 ist ein Ausschnitt eines LP-Designs für einen BGA zu sehen – wobei die Padflächen sehr unterschiedlich sind (bis zu 10 % Flächenunterschied). Und: Das schmelzflüssige Lot breitet sich auf der gesamten Padfläche aus. Das hat Einfluss auf die finale Gestaltung der Lötstellen. So können z.B. nicht erreichte Sphärenhöhen zu Nichtlötungen (wie Head in Pillow) führen. Die Hersteller von Druckschablonen haben viel Erfahrung und helfen bei der Anpassung der Aperturdesigns. Allgemein bekannt ist, dass der Pastendruck im Bereich eines QFN-Exposed Pad in Einzeldeposite aufgefächert werden sollte. Dadurch werden die Sphärenhöhen der schmelzflüssigen Lote auf Outer- und Exposed Pads angeglichen. So wirkt man dem Aufschwimmen und Verschieben des QFN entgegen (Bild 20).

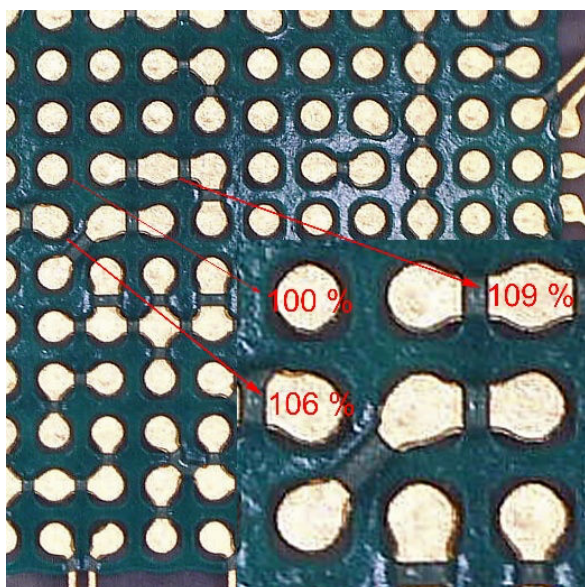


Bild 19: Drucklayout für einen QFN und unten die Sphärenhöhen des schmelzflüssigen Lotes

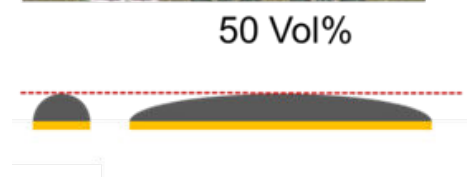
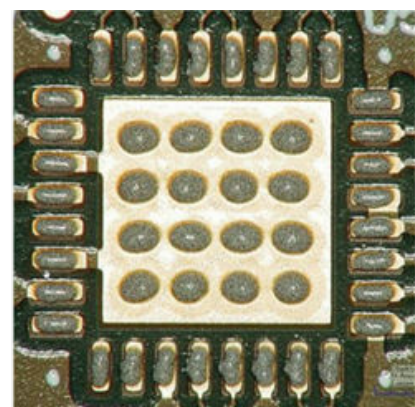


Bild 20: LP-Design im Bereich eines BGA

## 4. Der Druckprozess

### 4.1 Anlage + Parameter

**Im Folgenden beschreiben wir den Prozess und diskutieren einige Wechselwirkungen der Maschinenparameter auf das Druckergebnis.**

Je nach Produktionsvolumen kommen Offline- oder Inline-Drucksysteme zum Einsatz. Kraus Hardware verfügt über ein Ersa VERSAPRINT-MP-1 System mit integrierter 2D-Pasteninspektion (SPI). Es ist zudem verknüpft mit einem 3D-SPI-Offline-System, das die Früherkennung von Fehldrucken sicherstellt und den First Pass Yield (FPY) signifikant verbessert.

Ein weiterer Qualitätsfaktor bei Kraus Hardware ist die automatische Schablonenreinigung im Drucksystem: Pastenreste in den Aperturen und auf der Oberfläche der Schablone werden regelmäßig mit chemischen Lösemitteln und Reinigungstüchern entfernt. Dabei erfolgt der Prozess zyklisch oder am Ende der Bestückung. Deshalb stehen stets saubere Schablonen für den nächsten Auftrag bereit.

In einem ersten Schritt wird die Schablone ins Drucksystem eingespannt und exakt zur Leiterplatte ausgerichtet. Dafür gibt es in den Anlagen unterschiedliche Hilfesysteme. Parallel wird die Lotpaste sorgfältig aufbereitet und geschmeidig gerührt, um eine homogene Konsistenz zu gewährleisten. Anschließend wird sie manuell aufgetragen. Dabei kommen je nach Drucksystem auch Kartuschen zum Einsatz.

Während des Drucks rollt ein Rakel die Lotpaste über die Schablone. Kraus Hardware verwendet hierfür das verbreitete Metallrakel. Es gibt auch Kunststoffrakel. Das Rollen der Paste sorgt einerseits für ihre gleichmäßige Durchmischung sowie dem Erhalt der viskosen Eigenschaften. Außerdem werden die Aperturen somit vollständig gefüllt. Interessant dabei: Die runde Geometrie der Lotpasten-Körner unterstützt diesen Vorgang – wobei es darum geht, die Paste nicht über die Schablone zu „schieben“. Darüber hinaus beeinflussen Parameter wie Rakelkraft und -winkel, Druckgeschwindigkeit sowie Abhebe- und Trenngeschwindigkeit das Ergebnis. Außerdem ist wichtig: Die Schablone liegt plan auf der Leiterplatte, was eine perfekte Abdichtung zwischen Pad und Apertur gewährleistet. Ein kleiner Anstellwinkel des Rakels ( $45^\circ$ ) ergibt eine kleinere Vortriebskraft und eine größere Transferkraft (füllt die Apertur). Ein größerer Anstellwinkel ( $60^\circ$ ) ergibt eine größere Vortriebskraft und eine kleinere Transferkraft, (Bilder 21a und 21b).

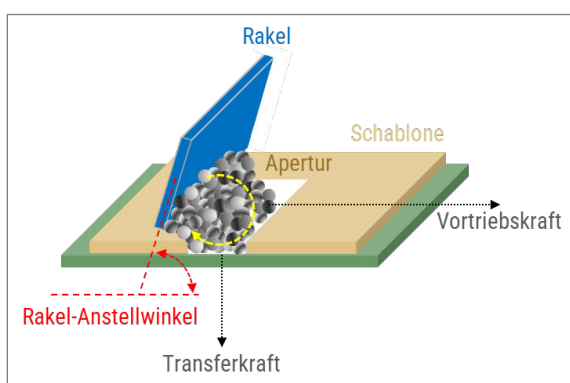


Bild 21a: Schema des Rakel-Drucks



21b: Druck mit einem Edelstahlrakel

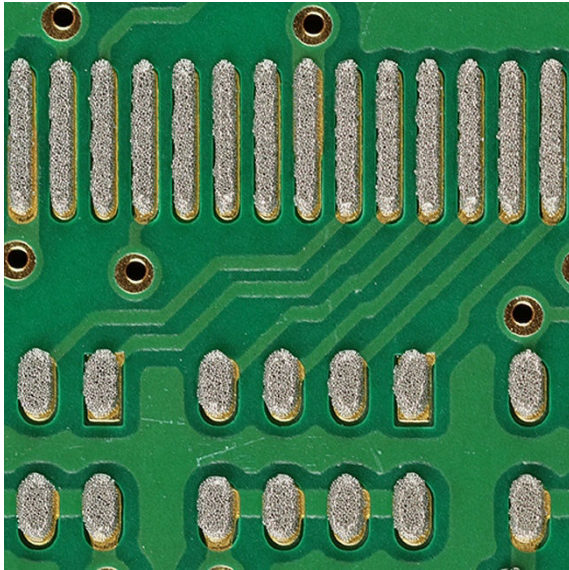
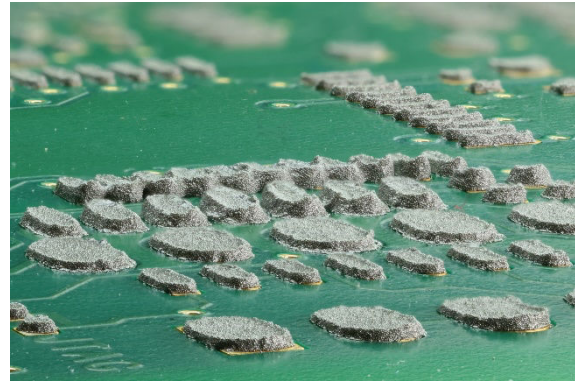


Bild 22a: Perfekt bedruckte Leiterplatte, Lotpaste, Typ 4



22b: Fehldruck aufgrund falscher Rakelparameter

#### 4.2 Wie groß ist der Einfluss des Lotpastendrucks auf die Qualität der Baugruppe?

Der Einfluss ist groß. Schließlich stellt die Lotpaste das wesentliche Verbindungselement (Lot) zur Verfügung. Dies heißt im Umkehrschluss: Unzureichende oder übermäßige Lotmengen haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Baugruppe. Die Wechselwirkung zwischen Anlage (bzw. ihren Druckparametern) und Lotpaste zeigt sich deutlich während der sogenannten Einlaufphase (Einschwingverhalten), denn das Lotpastenvolumen ist über die Fertigungszeit nicht 100 % stabil. Da die Viskosität der Lotpaste erst nach einigen Drucken ihr Optimum erreicht, haben die ersten Drucke oft weniger Pastenvolumen als die folgenden. Stillstandszeiten während der Fertigung wiederholen in gewisser Weise die Einlaufphase (Bilder 23a und 23b).

Übrigens: Die Lotpaste sollte nicht mit festem Lot verwechselt werden, da sie einen großen Volumenanteil an Chemie enthält (bis zu 50 %). Das homogene Lotmetallvolumen entsteht erst durch den Reflowlötprozess nach dem Umschmelzen der Lotpaste!

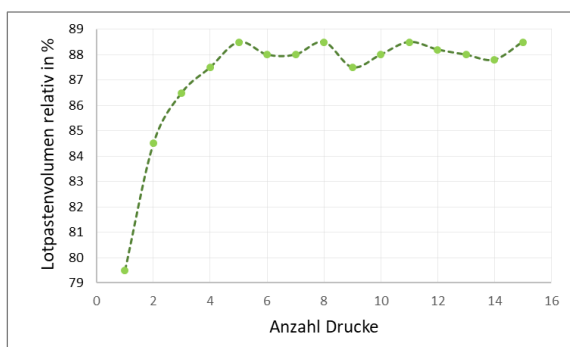
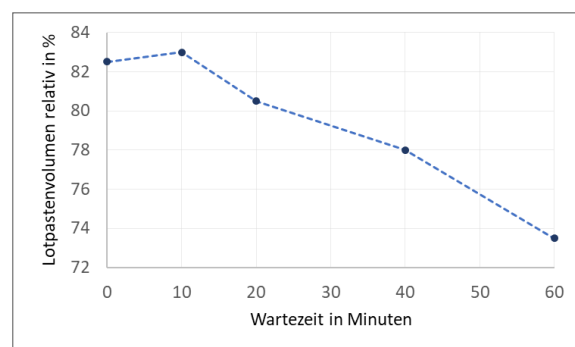


Bild 23a: Transfereffizienz in der Einlaufphase des Druckers, Stillstandszeiten – nach Daten von [16-Wohlrabe]



23b: Transfereffizienz nach Drucker- nach Daten von [16-Wohlrabe]

In der Tabelle 3 sind einige Druckparameter und ihre Auswirkungen auf das Ergebnis aufgeführt.

Parameter	Auswirkung
Rakeldruck zu niedrig	Verschmierungen zu hohe Lotdepots unvollständige Füllung
Rakeldruck zu hoch	Ausschöpfen der Paste Brückenbildung erhöhter Rakel- und Schablonenverschleiß
Rakelgeschwindigkeit zu niedrig	Die Paste rollt nicht, sie gleitet über die Schablone, wodurch die Aperturen schlecht befüllt werden.
Rakelgeschwindigkeit zu hoch	Die Aperturen können sich kaum füllen. Es sind Rampenbildung am Pastendepot sowie Verschmierungen auf der Schablonenoberseite zu beobachten.
Rakel-Anstellwinkel	Siehe hierzu Bild 21a
Trenngeschwindigkeit zu gering	Die Paste wird insbesondere an den Kanten / Wänden wieder mitgenommen (Dominanz der Adhäsion), wodurch Zipfelbildung (doggy ears) entstehen kann.
Trenngeschwindigkeit zu hoch	Die Paste hat ungenügend Zeit, sich von den Aperturwänden zu lösen, wodurch eine ungleichmäßige Form der Pastendepots entsteht. Teilweise entstehen auch Zipfel.
Absprung Ist der Abstand zwischen der Leiterplatte und der Unterseite der Schablone	Absprung > 0 = Paste wird verschmiert / verschleppt  <i>Anmerkung: Spielt beim Metallschablonendruck als Maschinenparameter meist keine Rolle, beim Siebdruck hingegen schon.</i>

*Tabelle 3: Auswirkungen der Druckparameter, siehe hierzu [1-Bell]*

Lempke [15] hat die Trenngeschwindigkeit sogar als dominanten Einflussfaktor analysiert. Hier gibt es eine Wechselwirkung mit der Adhäsion (Klebkraft) der Paste. Beschichtungen (u.a. Plasma- oder Nanobeschichtung), wie sie von verschiedenen Schablonenherstellern angeboten werden, beeinflussen die Adhäsion und das Auslöseverhalten positiv. Ein Absprung – also eine zusätzliche Distanz zwischen Schablonenunterseite und Leiterplattenoberfläche – verändert zusätzlich das Trennverhalten. Zudem eröffnet der Gap die Möglichkeit, dass sich die Paste außerhalb der Aperturöffnung verbreitet. Ein Gap kann auch die Leiterplatte verursachen, wenn sie nicht vollständig planparallel zur Schablone hin abdichtet. Einen solchen Fall hat Wohlrabe beschrieben. Seine vergleichenden Untersuchungen zwischen einer sogenannten Over-Top-Klemmung und einem Drucknest zeigten ein wesentlich gleichmäßiger gedrucktes Pastenvolumen – wenn mit einem Drucknest gearbeitet wurde [16-Wohlrabe]. Die Over-Top-Klemmung erzeugte im untersuchten Fall einen Absprung von 100 µm.

Im Übrigen betrifft der simultane Lotpastendruck stets die gesamte Leiterplatte bzw. den Leiterplatten-Nutzen. Deshalb wirken sich kleine Fehler (etwa ein nicht vorhandenes Lotpastendeposit wegen eines mangelhaften Pasten-Auslöseprozesses) global aus. Inspektionssysteme wie das SPI (Solder Paste Inspection), die bei Kraus Hardware zum Einsatz kommt, erkennen Fehler unmittelbar nach dem Druck und helfen somit dabei, finale Lötfehler zu vermeiden. Die Bilder 24a und 24b zeigen ein nicht bedrucktes Pad, was die SPI des Druckers (Bild 24b) bereits erkannt und markiert hat. Welche Auswirkungen Druckfehler haben, wird anhand der folgenden Bilderpaare 25 bis 27 deutlich (links jeweils das Druckbild, rechts das Lötgergebnis nach Reflow).

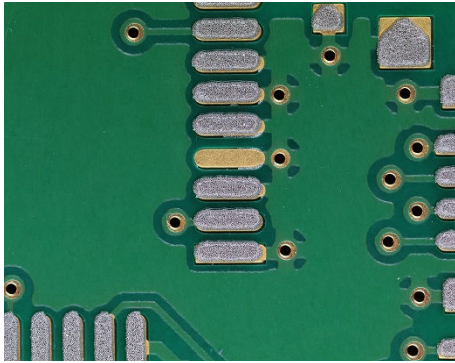
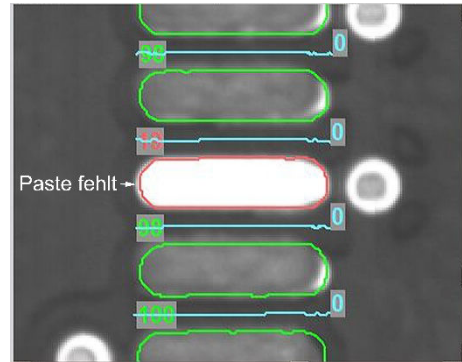


Bild 24a: Fehldruck, ein nicht bedrucktes Pad



24b: Durch das SPI erkannter Fehldruck

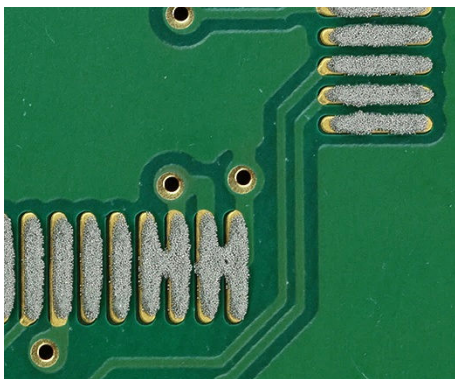


Bild 25a+b: Lotbrücken

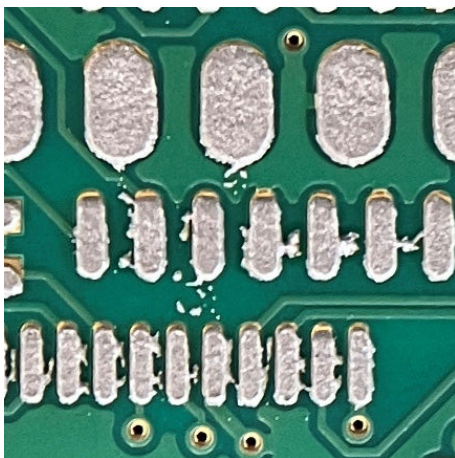
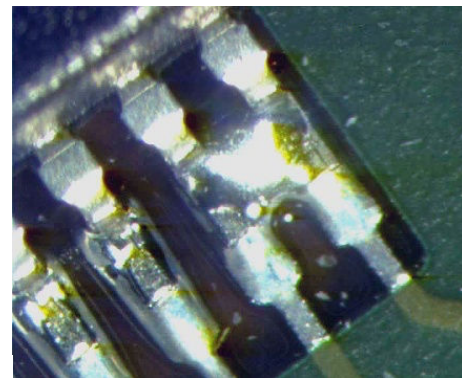


Bild 26a+b: Lotperlen

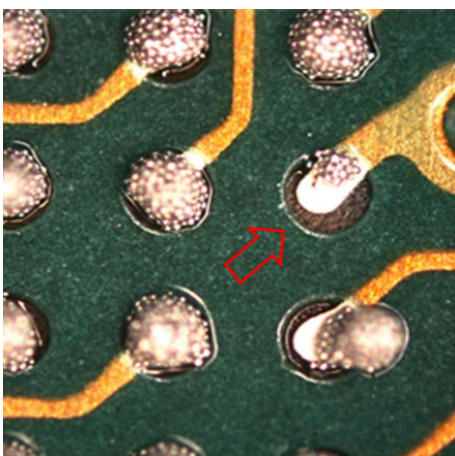
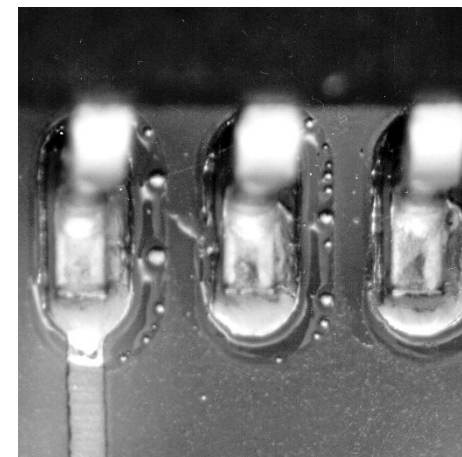
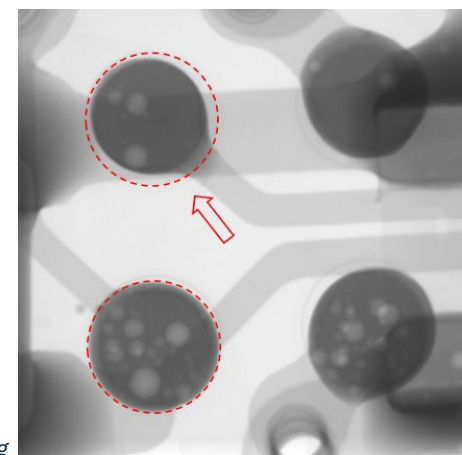


Bild 27a+b: Unterbelotung



## 5. Alternativen zum Lotpastendruck

Es gibt andere Verfahren, um die Lotpaste auf die Leiterplatte zu transferieren. Dazu gehören das Dispensieren und das Jetten (Tabelle 4). Als hochproduktives simultanes Verfahren dominiert der Schablonendruck jedoch im Markt.

Drucken		Dispensieren		Jetten	
Sieb	Schablone	Zeit-Druck-Ventil	Schrauben-Ventil	Piezo-Ventil *	Dynamischer Stößel
Simultan, hoch produktiv		Sequenziell, Wartungsaufwand		Sequenziell, spezielle Pasten, sehr teuer	
Nur für große Pitches	Sehr große Verbreitung	Kleine Fertigungsvolumen		Kleine Fertigungsvolumen	
Kaum noch in der SMT angewendet	Stufenschablonen für komplexe Designs		Höhere Präzision	Sehr präzise Dots	
				* Nutzt das Prinzip des Tintenstrahldruckers	

Tabelle 4: Pastentransfer-Verfahren im Vergleich

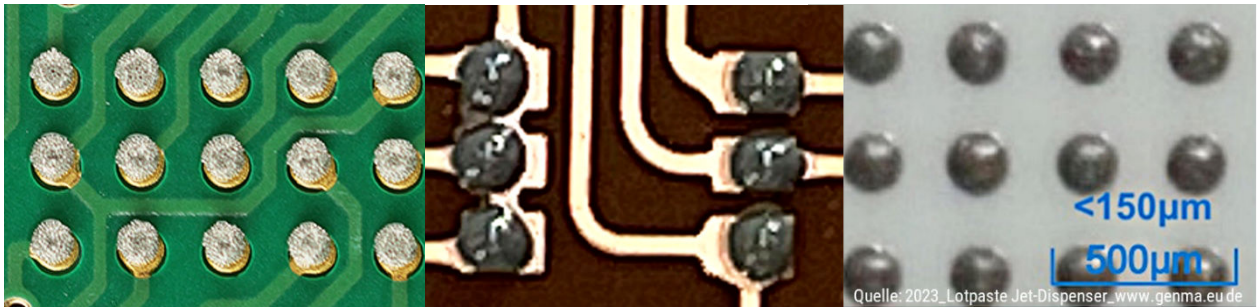


Bild 28a: Schablonendruck

28b: Dispensieren

28c: Jetten, Bild: [www.genma.eu](http://www.genma.eu)

## 6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde die Komplexität der Schablonendruck-Technologie diskutiert und es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie man das Druckergebnis beeinflusst. Dabei ist die Wechselwirkung zwischen der Lotpaste, der Druckanlage sowie der Schablone entscheidend. In der Tabelle 6 sind einige Aspekte zusammengefasst, die bei einer Pastenauswahl zu berücksichtigen sind.

	<u>Worauf u.a. zu achten ist</u>		<u>Bemerkung</u>
1	Lagerfähigkeit	Klimatische Bedingungen	Bedingungen am Produktionsstandort
2	Druckbarkeit	Schablonen-Aperturen, Baugruppendesign	Bauelement groß (Powerelekt.) versus Bauelement klein (01005)
		Kontinuierliche /diskontinuierliche Produktion	
		Auftragsverfahren, Druckverfahren	Schablone, Dispensen, Jetten
		Druckgeschwindigkeit	
3	Verarbeitung	Klebrigkeit (Tackiness)	Wechselwirkung mit der Schablone beachten
		Konturenstabilität (Slump)	Hat direkte Auswirkung auf das Fehlerniveau
		Schablonenstandzeit / Reinigungszyklen	Wie oft muss gereinigt werden? Waschbarkeit
4	Lötbarkeit	Reflow-Prozessfenster	Möglichst große Flexibilität für die Profilierung
		Benetzung und Ausbildung der Lötstellen	Spread-Test, Luft versus Stickstoff
		Keine Fehler	Solderballs, Flux-Spatter, Tombstones
5	Inspektion	Geringe Flux-Rückstände	AOI, ICT
6	Waschbarkeit	Rückstandslos, No-Clean?	Vorbereitung für evtl. Beschichtung
7	Zuverlässigkeit	Korrosion / Migration	Elektromigration, Ionischer Rückstand, SIR usw.
		Lebensdauer	Temperaturwechsel, Mission Profile usw.
8	Nachhaltigkeit	Ressourcen, Recycling	Legierungselemente, CO <sub>2</sub> -Footprint

## 7 Quellen

- [1-Bell] *Reflowlöten - Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler* ISBN 3-87480-202-7, Eugen G. Leuze Verlag GmbH & Co. KG, 2005
- [2-RoHS] *Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Directive 2011/65/EU, European Union*
- [3-Wittke] *Klaus Wittke, W Scheel, Homologe Temperatur und die Lötverbindung, PLUS 4/2016, S. 755ff*
- [4-Müller] *T. Müller, J. Trodler, MSE 08, High Reliability Connection for Packaging Technology, Nürnberg 2008*
- [5-Westerlaken] *E. Westerlaken, Charakterisierung von Lotpulvern, Cobar Europe BV 2001*
- [6-Koenen] *Christian Koenen GmbH, Ottobrunn 2016*
- [7-Towell] *Gayle Towell, Wann Sie Ihre Lötpaste verkleinern sollten, PLUS 10/2025, S. 1227, Leuze Verlag*
- [8-Beuth] *DIN EN 61189-5-3:2015-11, Lotpaste für bestückte Leiterplatten, Beuth Verlag 2015*
- [9-Wistron] *Wistron Corporation, Solder Paste Investigation, Taiwan 2004*
- [10-Kaloudis] *Prof. Dr. M. Kaloudis, Metallographische Untersuchungen an Sn-8Zn-3Bi- und Sn-57Bi-1Ag-Lötverbindungen, Arbeitskreis "Zuverlässige bleifreie Systeme,, 14.03.2012 Berlin*
- [11-Trodler] *Jörg Trodler, Eigenschaften von Lotpasten und Flussmitteln, Proceedings OTTI, Regensburg 10.06.2015*
- [12-Fischer] *Peter Fischer, Eigenschaften von Lotpasten und Flussmitteln, OTTI-Proceedings, Regensburg 2014*
- [13-Venkatesh] *Venkatesh R.S., K. Srihari, A. Mazloom, S. Kamath, J. Craik, Solder Paste Evaluation for Lead-Free Assembly, APEX 2001*
- [14-Hippin] *C. Hippin, Fehleranalyse und Prozessentwicklung am Beispiel von QFN's, Proceedings 17. EE-Kolleg, Sant Jordi 21.03.2013*
- [15-Lempke] *Andrea Lemke, Trainalytics, Optimierung des Fertigungsprozesses Schablonendruck mit Hilfe DoE, PLUS 9 / 2015*
- [16-Wohlrabe] *Heinz Wohlrabe, Präzisere Setups für den Lotpastendruck, [7-Schäfer] Uwe Schäfer, Herausforderungen 03015, Technology Day REHM, Blaubeuren 2014 Proceedings „Wir gehen in die Tiefe“, Dresden 20.6.2012*