



TECHNISCHE GRUNDLAGEN ZUM LÖTBARKEITSTEST

1.1 EINLEITUNG

Einige Metalloberflächen sind leichter zu löten als andere. Dabei unterscheiden sich sowohl die Benetzungsgeschwindigkeit als auch die Adhäsionskraft des Lotes an der Oberfläche. Die Benetzungsgeschwindigkeit ist abhängig von dem Wärmebedarf und der Benetzungsfähigkeit der Metalloberfläche. Diese kombinierten Eigenschaften sind bekannt als Lötbarkeit des Materials.

Die Benetzungsfähigkeit des gleichen Materials kann erheblich variieren, da sie stark abhängig von dem Zustand der Metalloberfläche ist. Die Benetzungsfähigkeit wird durch eine dünne Oxid- oder Fettschicht oder durch organische Schmutzstoffe stark beeinflusst.

In einer modernen Produktion ist es unbedingt erforderlich, daß die Bauteile gut lötbar sind, ehe sie in den Produktionsprozeß gelangen. Bedingt durch die große Anzahl gleichzeitig entstehender Lötverbindungen, müssen diese beim ersten Mal korrekt gelötet sein.

Es ist extrem teuer und zeitaufwendig, defekte Lötstellen zu finden und auszubessern; hinzu kommt, daß eine ausgebesserte Lötverbindung nie die gleiche Qualität hat wie eine Verbindung, die im ersten Durchgang sauber gelötet wurde.

Bei den heutigen Lötprozessen werden relativ schwache Lötbedingungen eingesetzt, so daß die Bedeutung gut lötbare Bauteile größer ist als je zuvor. Ursprünglich wurde die Lötbarkeit der Bauteile im Wareneingang mit einem mehr oder weniger einfachen Tauchtest und anschließender visueller Prüfung getestet.

Obwohl diese Tests einfach und schnell durchzuführen sind, sind die Ergebnisse immer subjektiv und den verschiedenen Meinungen der Bediener unterworfen. Für die heutige Technologie ist eine wissenschaftlichere, quantitative Prüfmethode unabdingbar.

Die Einführung der Benetzungswaage als eine quantitative Lötbarkeitsprüfmethode war die Lösung dieses Problems. Bei Tauchprüfungen wird nur das Benetzungsergebnis am Testende angezeigt. Mit der Benetzungswaage erhält man weitaus nützlichere Informationen über die Benetzungsgeschwindigkeit und den Benetzungsgrad während der gesamten Eintauchzeit.

Über viele Jahre war die Benetzungswaage eine Standardprüfmethode für bedrahtete und Dual-in-line Bauteile; sie war jedoch nicht optimal geeignet für die sehr kleinen Anschlüsse von oberflächenmontierten Bauteilen. Aufgrund der neuesten Entwicklungen der Benetzungswaage sind wiederholbare, quantitative Lötbarkeitsmes-

sungen sämtlicher oberflächenmontierter Bauteile möglich, so daß sichergestellt wird, daß nur gut lötbare Bauteile in die Produktion gelangen.

Obwohl die Benetzungswaage in der Elektronikindustrie intensiv genutzt wurde, war ihr Einsatz oft auf den Laborbereich beschränkt. Moderne, computergesteuerte Benetzungswaagen sind einfach zu bedienen und liefern Pass/Fail Daten für neue Bauteile und Bauteile, die nach längerer Lagerung wieder in die Produktion kommen.

Mit zunehmender SMT-Technologie stieg die Forderung nach gut lötbaren Bauelementen; da die SMT-Technologie einen immer breiteren Anwendungsbereich findet und immer mehr Anwender keine visuelle Prüfung mehr durchführen, wird auch der Einsatz der Benetzungswaage immer wichtiger.

In den folgenden Abschnitten werden die Benetzungs- und Lötbarkeitseigenschaften sowie die Theorie der Benetzungswaage unter Einsatz des Lotbades und der Mikrobenezungswaage näher erläutert.

Diese Abschnitte sollten eingehend gelesen werden, da ein Verständnis der Theorie Voraussetzung ist für die effektive Durchführung der Tests und die Testauswertung.

1.2 OBERFLÄCHENERGIE UND BENETZUNG

Um eine Benetzung zwischen dem Substrat und dem geschmolzenen Lot zu erreichen, muß das Zinn im Lot mit dem Substrat reagieren, so daß eine Legierung entsteht. Diese Legierung wird gebildet, wenn das Zinn und das Substrat in molekularen Kontakt kommen. Dies wird nur erreicht, wenn sowohl die Oberfläche des geschmolzenen Lotes als auch des Substrates nicht verunreinigt sind.

In Tabelle 1 ist eine typische Lötbarkeitsliste aufgeführt, wie sie auch in den meisten Fachbüchern zu finden ist. Warum lassen sich jedoch einige Metalle leichter löten als andere? Zunächst muß die Reaktion und die Bildung einer Legierung zwischen Metall und Zinn energetisch begünstigt sein; das ist jedoch noch nicht alles.

Zinn	Sn	Ausgezeichnet
Gold	Au	Ausgezeichnet
Kupfer	Cu	Gut
Messing	Cu/Zn	Gut
Stahl	Fe	Zufriedenstellend
Nickel	Ni	Zufriedenstellend
Aluminium	Al	Schwierig

Rostfreier Stahl	Fe/Cr	Schwierig
Titan	Ti	Sehr schwierig

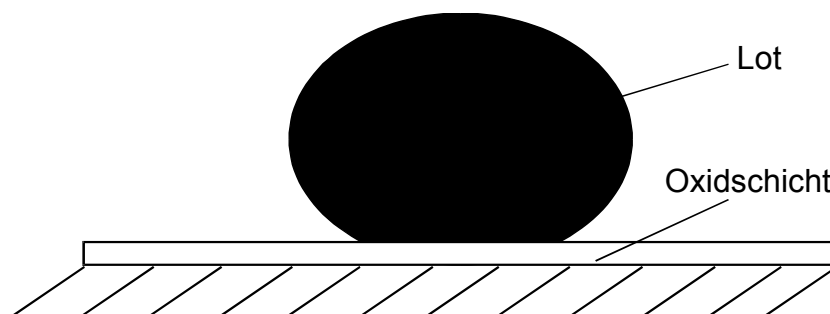
Tabelle 1 Lötbarkeit von Metallen

Um die Ausbreitung geschmolzenen Lotes über ein Substrat und damit die Lötbarkeit besser verstehen zu können, muß zuvor die Oberflächenspannung des Lotes erläutert werden. Ein Tropfen geschmolzenen Lotes im freien Raum bildet eine Kugel, vergleichbar zu einem Tropfen Wasser, der eine sphärische Form annimmt.

Die Tropfenform wird durch die Oberflächenspannung des geschmolzenen Lotes bestimmt. Die Atome im Innern des Tropfens werden alle gleichmäßig von anderen Atomen umgeben; ungeachtet der thermischen Bewegung ist die auf sie wirkende Nettokraft Null. Da auf die Atome an der Oberfläche eine Nettokraft zum Innern des Tropfens wirkt, besteht an der Oberfläche ein Ungleichgewicht der interatomaren Anziehungskräfte.

Der Lottropfen wird immer versuchen, eine Form anzunehmen, mit der ein Minimum an freier Energie entsteht, d.h. eine minimale Oberfläche im Vergleich zum Volumenverhältnis. Diese Situation wird durch eine sphärische Form des geschmolzenen Lotes erreicht. Die Kraft der Oberflächenspannung wird bestimmt durch die Bindungsenergien der Atome innerhalb des geschmolzenen Lotes.

Wird die geschmolzene sphärische Lotkugel auf eine beheizte, oxidierte Kupferplatte gebracht, verändert sie sich durch die Schwerkraft und bildet ein geschmolzenes Pellet, wie in Abb. 2.1 dargestellt.



Lot auf oxidiertem Kupfer

Abb. 2.1 Geschmolzenes Pellet

Wird ein geeignetes Flußmittel auf das geschmolzene Pellet gegeben, wird die Oxidschicht von dem Kupfer und dem Lot entfernt. Das Zinn im Lot reagiert mit dem Kupfer, eine intermetallische Schicht bildet sich, wie in Abb. 2.2 dargestellt, und das Lot breitet sich aus.

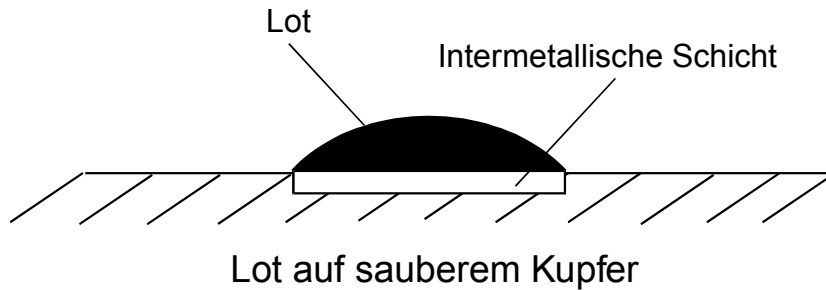


Abb. 2.2 Geschmolzenes Pellet

Die endgültige Form des sich ausbreitenden Lotes ist abhängig von der, in den Übergangsflächen wirkenden, Oberflächenspannung. Auf feste und fest-flüssige Übergangsflächen wirkt ebenfalls eine Oberflächenspannung; um eine minimale freie Energie zu erreichen, werden die Oberflächen immer reduziert. Dadurch wird ein Gleichgewicht aufgebaut, bei dem die Nettokraft an der vordringenden Lotkante Null ist.

In Abb 2.3 sind die Kräfte dargestellt, die auf die vordringende Lotkante wirken. Die Oberflächenspannung von festem Kupfer in Luft wird durch die Oberflächenspannung zwischen flüssigem Lot und Luft sowie flüssigem Lot und Kupfer ausgeglichen.

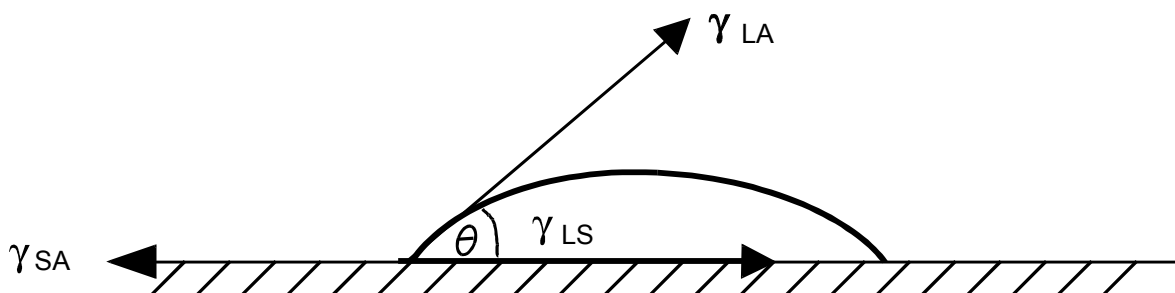


Abb. 2.3 Geschmolzenes Pellet - Kräfteausgleich

Die entstehenden Kräfte an der vordringenden Lotkante können durch die Gleichung

$$\gamma_{SA} = \gamma_{LS} + \gamma_{LA} \cos\theta \quad \text{Gleichung 1}$$

berechnet werden. Es handelt sich hierbei um die Gleichung von Young; der Kontaktwinkel, θ , ist ein Maß für die Ausbreitung. Je geringer der Kontaktwinkel, desto größer die Ausbreitung und desto besser die Benetzung.

γ_{SA} = Oberflächenspannung zwischen festem Kupfer und Luft

γ_{LA} = Oberflächenspannung zwischen flüssigem Lot und Luft

γ_{LS} = Oberflächenspannung zwischen flüssigem Lot und festem Kupfer

Sind die Kohäsionskräfte im Lot größer als die Adhäsionskräfte zwischen Lot und Kupfer, breitet sich das geschmolzene Pellet nicht aus und der Kontaktwinkel übersteigt 90° . Sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte, reagiert das Lot mit dem Kupfer und breitet sich aus, so daß sich der Kontaktwinkel auf unter 90° verringert.

Wird die Gleichung von Young umgestellt, erhält man:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LA}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Für eine Benetzung muß der Kontaktwinkel, θ , unter 90° liegen. Das heißt $\cos\theta$ muß zwischen 0 und 1, vorzugsweise möglichst nahe an 1 liegen. Liegt $\cos\theta$ unter 0, ist der Kontaktwinkel größer als 90° .

Aus Gleichung 2 ist ersichtlich, daß für eine Benetzung γ_{LS} niedrig, γ_{SA} hoch und γ_{LA} wiederum niedrig sein müssen.

Die Oberflächenspannung zwischen dem Feststoff und Luft, γ_{SA} , ist hoch, wenn der Feststoff frei von Oxiden, Sulfiden, Chloriden, Kohlenwasserstoff und anderen Schmutzstoffen ist, die die Oberflächenspannung verringern.

Um eine niedrige Oberflächenspannung zwischen einem flüssigen und einem Feststoff, γ_{LS} , herzustellen, muß zwischen dem Zinn und dem Substrat eine metallurgische Verbindung entstehen. Diese beiden Faktoren erklären die Reihenfolge der Lötbarkeit der Metalle in Tabelle 1.

Einige Metalle bilden mit Zinn schneller eine Legierung und intermetallische metallurgische Verbindung; doch je weiter man in der Tabelle nach unten geht, stellt man ansteigende, stabilere Oxide fest, die entfernt werden müssen, ehe das Zinn im Lot mit dem Metall reagieren kann.

Die Hauptfunktion des Flußmittels besteht darin, das Oberflächenoxid von dem Basismetall und dem Lot zu entfernen und eine Neubildung während des Lötprozesses zu verhindern. Durch Reaktion mit der Oxidschicht auf dem Feststoff und durch ihre Entfernung erhöht sich die Oberflächenspannung des Feststoffes. Je stabiler die Oxidschicht des Metalles ist, desto aggressiver muß das Flußmittel sein.

Durch das Flußmittel wird außerdem die Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen Lot und der Luft, γ_{LA} , reduziert, obwohl die Luft jetzt durch einen Flußmittelfilm ersetzt wird. Dadurch nähert sich $\cos\theta$ in Gleichung 2 dem gewünschten Wert.

Die Oberflächenspannung des Feststoffes in Gleichung 2 kann als Hauptfaktor auf einem hohen Niveau gehalten werden, indem die Oberfläche frei von Schmutzstoffen oder mit einer Schicht überzogen ist, die nur ein schwaches, leicht zu entfernendes Oxid bildet.

Die Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen und dem Feststoff ist abhängig von dem Entstehen einer metallurgischen Verbindung und kann nur beeinflusst werden durch die Wahl des Basismaterials für die Verbindungen.

Die Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen Lot und der Luft oder dem Flußmittelfilm hängt von der Lotlegierung, der Löttemperatur und dem Flußmittel ab. Die Oberflächenspannung der Legierung wird wesentlich beeinflusst durch Unreinheiten im Lot. Schon sehr geringe Verunreinigungen können große Auswirkungen auf die Oberflächenspannung haben, da die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit auf der Zusammensetzung der Lotoberfläche und nicht auf dem Lot als ganzes beruht. Verunreinigungen mit geringen Oberflächenenergien werden rasch an die Oberfläche der Flüssigkeit abgeschieden und verringern den Wert der Oberflächenspannung, γ_{LA} .

Die Oberflächenspannung zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff wird ebenfalls beeinflusst durch Unreinheiten der Lotlegierung und durch eine andere Zusammensetzung, durch die sich die intermetallische Verbindung ändert; dies kann ebenfalls Auswirkungen haben auf die Oberflächenspannung zwischen Feststoff und Luft, durch die die Ausbreitung auf dem Feststoff beeinflusst wird.

Zusätze und Verunreinigungen der Legierung wirken ebenfalls, durch eine andere Viskosität des flüssigen Lotes, auf Ausbreitung und Benetzungseigenschaften der Legierung.

Mit der Benetzungswaage wird vornehmlich die Lötbarkeit von Bauteilanschlüssen gemessen; sie kann jedoch auch sehr sinnvoll eingesetzt werden zur Bewertung von Flußmitteln zum Entfernen von Oxiden und anderen Oberflächenverschmutzungen.

1.3 LÖTBARKEIT

1.3.1 DEFINITION DER LÖTBARKEIT

In den IEC Richtlinien (Internationale Elektrotechnische Kommission) wird Lötbarkeit definiert als die Gesamteignung eines Bauteilanschlusses für das indus-

trielle Löten. Diese Definition führte zu drei Eigenschaften, die bei einem Bauteil und seinen Anschlüssen bewertet werden müssen.

1.3.1.1 BENETZUNGSFÄHIGKEIT

Benetzungsfähigkeit ist die spezifische Eigenschaft eines Bauteilanschlusses, mit Lot eine Legierung zu bilden. Sie ist abhängig von dem Basismaterial des Bauteilanschlusses oder - bei einem beschichteten Anschluß - von dem Zustand und dem Material der Beschichtung.

1.3.1.2 WÄRMEBEDARF

Die Lötstelle muß Löttemperatur erreichen. Möglicherweise wird die Wärme, die auf die Lötstelle gebracht wird, von dem Bauteil absorbiert, so daß die Temperatur auf der Lötstelle so weit absinkt, daß keine entsprechende Lötverbindung mehr entstehen kann.

1.3.1.3 WÄRMEBESTÄNDIGKEIT

Das Bauteil muß der durch den Lötprozeß entstehenden Wärmebelastung ohne Funktionsverlust standhalten können. Dies ist bei den gegenwärtigen Fertigungsmethoden, bei denen sich die Temperaturen schnell ändern, von besonderer Bedeutung.

Aufgrund der Definition wurde eine Matrix von Lötbarkeitsrichtlinien entwickelt, bei der eine oder alle drei Eigenschaften einzeln oder - in einigen Fällen - eine Kombination der ersten beiden Eigenschaften gemessen wird.

Mit der Benetzungswaage wird die Kombination von Benetzungsfähigkeit und Wärmebedarf gemessen; obwohl die Auswirkungen des Wärmebedarfs beobachtet werden können, wird die Wärmeübertragungsrate in das Bauteil teilweise durch seine Benetzungsfähigkeit beeinflusst.

1.3.2 WAS HAT EINFLUSS AUF DIE LÖTBARKEIT?

1.3.2.1 SUBSTRAT

Die Benetzungsfähigkeit der Metalle ist sehr unterschiedlich. Kupfer ist zum Beispiel leichter zu löten als Nickel, dies ist wiederum leichter zu löten als Aluminium.

Die Lötbarkeit eines Metalles ist abhängig von der metallurgischen Verbindung zwischen dem Zinn im Lot und dem Substrat. Für das Entstehen einer Verbindung muß eine Reaktion zwischen dem Zinn im Lot und dem Substrat stattfinden.

Um eine Verbindung herzustellen, muß ein molekularer Kontakt zwischen Lot und Substrat hergestellt werden. Dafür müssen Lot und Substrat frei sein von Kontaminationen, wie zum Beispiel Oxiden, Chloriden und Sulfiden.

Eine Funktion des beim Lötprozeß eingesetzten Flußmittels ist, Verschmutzungen von Lot und Substrat zu entfernen und die Oberflächen zu schützen, bis ein Kontakt zwischen dem sauberen Substrat und Lot hergestellt werden kann. Die Stabilität der Verbindung zwischen Verunreinigung und Substrat hat erhebliche Auswirkungen auf die Lötbarkeit und spielt eine Hauptrolle bei der Benetzung des Substrates durch das geschmolzene Lot. Je stabiler die Verbindung zwischen Substrat und Verunreinigung ist, desto schwieriger kann sie durch das Flußmittel entfernt werden und desto geringer ist die Lötbarkeit des Substrates.

Benetzungsgeschwindigkeit und -grad sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Substratoberfläche. Der Benetzungsgrad wird außerdem beeinflusst durch den physikalischen Zustand der Oberfläche, insbesondere durch ihre Rauheit. Obwohl sich die Berichte in diesem Punkt widersprechen, geht man allgemein davon aus, daß eine rauhere Oberfläche den Ausdehnungsgrad einer vordringenden Lotfläche reduziert.

Eine Ausnahme sind hier parallele Rillen, die in Richtung des vordringenden Lotes verlaufen. In diesem Fall wird die Benetzung durch den Kapillareffekt der Rillen erhöht.

1.3.2.2 LOTZUSAMMENSETZUNG

Die Zusammensetzung der Lotlegierung beeinflusst die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes. Bereits relativ geringe Verunreinigungen im Lot können erhebliche Konsequenzen auf die Benetzungseigenschaften des Lotes haben.

Die Gleichung von Young zeigt, daß die bei einer metallurgischen Verbindung entstehende Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen Lot und dem Substrat gering sein muß, um einen kleinen Kontaktwinkel zu erhalten. Die Oberflächenspannung zwischen dem festen Substrat und Gas muß hoch sein, d.h. das Substrat darf keine Verunreinigung aufweisen, und die Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen Lot und Gas muß relativ gering sein.

Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit ist lediglich abhängig von der Zusammensetzung der Oberfläche und nicht von der Zusammensetzung der gesamten Flüssigkeit. Schmutzstoffe mit geringer Oberflächenspannung dringen sehr schnell an die Lotoberfläche und verringern hier die Oberflächenspannung.

Schmutzstoffe im Lot haben ebenfalls Auswirkungen auf Art und Wachstum der intermetallischen Phase und ändern somit die Oberflächenspannung zwischen dem festen Substrat und dem flüssigen Lot. Sie können ebenfalls die Diffusion des vordringenden Lotes beeinflussen, so daß sich die Oberflächenspannung zwischen Feststoff und Gas ändert.

Die Art der Oxide an der Lotoberfläche sowie die Viskosität des flüssigen Lotes werden ebenfalls durch Schmutzstoffe im Lot bestimmt und führen zu einer Modifikation der Oberflächenspannung zwischen flüssigem Lot und Gas und demzufolge des Ausbreitungsgrades des flüssigen Lotes.

Flußmittel während eines Lötprozesses dienen verschiedenen Zwecken. Zunächst werden die Schmutzstoffe von Substrat und der Oxidfilm auf der geschmolzenen Lotoberfläche entfernt. Dann werden die gereinigten Oberflächen durch das Flußmittel geschützt, bis ein molekularer Kontakt hergestellt werden kann. Dadurch, daß die

Oberflächen durch das Flußmittel gereinigt werden, dient es als Wärmeübertragungsmedium zwischen dem flüssigen Lot und dem Substrat; und schließlich verringert das Flußmittel die Oberflächenspannung zwischen geschmolzenem Lot und Gas, so daß sich das Lot besser ausbreiten kann.

Bei allen Erörterungen bezog sich die Oberflächenspannung auf eine Messung in Gas. Im allgemeinen handelt es sich hierbei um Luft; es besteht jedoch großes Interesse, im Lötprozeß eine Schutzgas- oder Reaktivgasatmosphäre einzusetzen. Der Einsatz verschiedener Gase hat nicht nur Auswirkungen auf die Lot- und Substratoberfläche nach deren Reinigung durch Flußmittel, sondern auch auf die Oberflächenspannung zwischen dem geschmolzenen Lot und dem festen Substrat.

1.3.2.3 ALTERUNG

Alterung ist ein natürlicher Prozeß, durch den die Lötbarkeit eines Bauteils im Laufe der Zeit abnimmt. Die meisten Bauteilanschlüsse bestehen aus einem Basismaterial mit einem lötbaren Überzug, so daß die Lötbarkeit des Anschlusses erhalten bleibt. Im allgemeinen wird vor der Lotschicht eine Sperrschicht auf das Basismaterial aufgebracht, besonders dann, wenn sich das Basismaterial leicht im Lot löst.

Es wurde bereits festgestellt, daß für eine gute Benetzung die Oberflächenspannung zwischen dem Substrat und der Luft (Gas) hoch sein muß. Um dies zu erreichen, müssen Oxide oder andere Schmutzstoffe durch das Flußmittel leicht zu entfernen sein.

Bei modernen Lötprozessen wird gefordert, daß das Flußmittel relativ mild ist, so daß die nicht-korrosiven Rückstände nach dem Löten leicht entfernt werden können.

Kupfer und Nickeleisen oxidieren bei Raumtemperatur leicht in Luft; obwohl diese Oxide durch Flußmittel entfernt werden können, sind sie im allgemeinen für normale Lötprozesse zu aggressiv.

Normalerweise werden alle Substrate, die zu einem späteren Zeitpunkt gelötet werden sollen, mit einer lötbaren Schicht überzogen. Diese Schicht besteht gewöhnlich aus Zinn oder Zinn-Blei; Gold, Silber und Nickel kommen jedoch ebenfalls vor.

Bei Raumtemperatur bilden Zinn und Blei immer noch eine Oxidschicht mit der Atmosphäre; diese Oxide sind jedoch sehr schwach und können mit milden Harz-Flußmitteln gut entfernt werden.

Wird ein Substrat mit Lot überzogen, bildet sich zwischen Substrat und Lotschicht eine intermetallische Verbindung. Wird die Schicht durch Eintauchen aufgebracht oder reflowgelötet, löst sich die intermetallische Verbindung im flüssigen Lot und es bilden sich weitere intermetallische Verbindungen. In der Nähe der intermetallischen Schicht ist das Lot mit Substratanteilen angereichert. Ist das Lot flüssig, erreicht die intermetallische Verbindung eine gleichmäßige Stärke, bei der der Grad der Auflösung intermetallischer Verbindungen der Bildung neuer intermetallischer Verbindungen entspricht. Demzufolge kann im flüssigen Zustand des Lotes die maximale Stärke der intermetallischen Verbindung erreicht werden.

Kühlt sich das Lot ab, steigt die Substratkonzentration an der intermetallischen Schicht, die bei Erkalten in die Flüssigkeit wächst.

Die Art der intermetallischen Schicht ist abhängig von der Abkühlung und der während dieser Zeit verfügbaren Lotmenge. Ist das Lot noch flüssig, ist die intermetallische Schicht ziemlich gleichmäßig, da hervorstehende Teile in der Flüssigkeit aufgelöst werden.

Wird das Substrat eingetaucht, fließt das geschmolzene Lot über die intermetallische Verbindung und bildet bei Abkühlung eine glatte, intermetallische Schicht. Kühlt das Substrat mit einer begrenzten Lotmenge ab, wie es zum Beispiel beim Reflowlöten einer Lotpaste oder eines plattierten Substrates der Fall ist, entsteht eine gezackte Struktur, bei der feine Nadeln aus der intermetallischen Schicht in die Lotschicht vordringen.

Die Mehrzahl der elektronischen Bauteilanschlüsse sind mit Zinn oder Blei-Zinn überzogen, so daß die meisten intermetallischen Schichten Zinn enthalten. Es wurde vorstehend erwähnt, daß sich die intermetallische Schicht ständig neu bildet und wieder aufgelöst ist, wenn das Lot geschmolzen ist. Im festen Zustand wandert das Zinn im Lot weiterhin in die intermetallische Schicht, das Substrat diffundiert durch die intermetallische Schicht, so daß diese in der Lotschicht ansteigt.

Dieser Prozeß ist proportional zur Quadratwurzel der Temperatur und ist selbst bei Raumtemperatur noch bedeutend. In Abb. 2.4 ist die Benetzungszeit eines lotüberzogenen Bauteilanschlusses im Verhältnis zur Alterungszeit dargestellt.

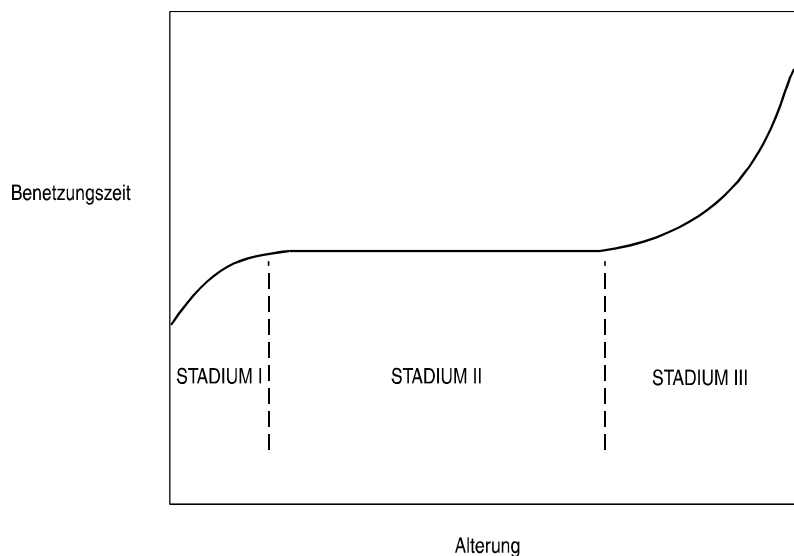


Abb. 2.4

Benetzungszeit eines lötbaren Substrates im Verhältnis zur Alterungszeit

In der Abbildung sind drei unterschiedliche Phasen dargestellt. Zunächst steigt die Benetzungszeit, während die Lötbarkeit durch Oxidbildung oder Korrosion auf der Lotoberfläche abnimmt. Danach verschlechtert sich die Situation nicht mehr, da die Lotoxidschicht eine weitere Oxidation verhindert, indem die Diffusion durch die Oxid-

schicht nachläßt, und es zu einer chemischen Passivierung der Oberfläche kommt. In der dritten Phase ist die intermetallische Schicht durch die Lotoberfläche gedrun- gen, so daß die Benetzungszeit wieder ansteigt.

Die erforderliche Zeit und die Auswirkungen dieser Phasen hängen von der Art und der Stärke der ursprünglichen Schichten und der Lagerbedingungen der Bauteile ab.

In einer feuchten Atmosphäre ist die Oxidation im Stadium 1 sehr schnell. In einer korrosiven Atmosphäre kann es sein, daß keine Passivierung in Stadium II auftritt. Ein dünner Überzug wird durch intermetallisches Wachstum schnell aufgebraucht, so daß Stadium III sehr viel früher eintreten kann. Der ursprüngliche physikalische Zu- stand der intermetallischen Schicht hat ebenfalls Auswirkungen auf die erforderliche Zeit, bis die intermetallische Schicht die Oberfläche erreicht hat; alle diese Prozesse werden wiederum durch die Lagertemperatur beeinflusst.

Kupfer bildet mit Zinn zwei intermetallische Verbindungen. Cu_6Sn_5 entwickelt sich bei allen Temperaturen, über 60°C entsteht Cu_3Sn . Dies ist abhängig von der Tempera- tur, dem Verhältnis Zinn/Blei und dem ursprünglichen chemischen Zustand des Kup- fers.

Andere Substrate, wie Gold, Silber, Nickel und Eisen, bilden mit Zinn intermetallische Verbindungen. Zwischen Gold und Zinn entsteht sehr rasch eine intermetallische Verbindung. Eisen, Silber und Nickel reagieren ungefähr wie Kupfer; bei hohen Temperaturen jedoch ist die Reaktion von Nickel - Zinn im Vergleich zu Kupfer - Zinn sehr verlangsamt; aus diesem Grunde wird Nickel auch oft als Sperrschicht zwischen Kupfer und Zinn oder Zinn-Blei Schichten eingesetzt.

Das Anwachsen der intermetallischen Schichten Cu_6Sn_5 und Cu_3Sn durch die Lot- schicht an die Oberfläche führt zu einem schnellen Anstieg der Benetzungszeit. Die intermetallischen Verbindungen selbst können durch aktivierte Flußmittel gut gelötet werden, deren Oxide sind jedoch sehr stabil und lassen sich mit den Flußmitteln, die in der Elektronikindustrie eingesetzt werden, nicht löten.

Der Anstieg der intermetallischen Phase reduziert nicht nur die Lötbarkeit des Bau- teils; tritt sie nach dem Löten der Platine auf, hat die verstärkte intermetallische Schicht Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Lötstelle, da sie spröder als das Lot der Lötverbindung ist. Durch eine verstärkte intermetallische Schicht verringert sich demzufolge die Haltbarkeit älterer Lötverbindungen.

Das intermetallische Wachstum spielt bei der Lötbarkeit eines Substrates eine Hauptrolle, abnehmende Lötbarkeit ist jedoch ursprünglich zurückzuführen auf die Reaktion der lötbaren Schicht mit der Atmosphäre. Zinn bildet mit der Atmosphäre ein Oxid SnO , das eine Schutzschicht auf dem Substrat entwickelt. Der Oxidations- grad wird durch die Temperatur und den Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre be- schleunigt.

Blei bildet mit der Atmosphäre ebenfalls ein Oxid PbO ; da jedoch die Affinität zwi- schen Zinn und Sauerstoff größer ist, entsteht vorzugsweise SnO .

Der Schwefelgehalt in der Atmosphäre ist im allgemeinen gering und Zinn und Blei zeigen mit Schwefel in geringer Konzentration nur wenig Reaktion. Silber hingegen reagiert mit Schwefel bereits in sehr geringer Konzentration und bildet eine schwarze Sulfidschicht, die die Lötbarkeit des Substrates reduziert.

Stickstoffdioxid (NO_2) und Chlor reagieren mit Zinn und Blei und entwickeln Bleinitrat (PbNO_3) sowie Zinn- und Bleichloride (SnCl_2) (PbCl_2). Bleinitrat ist eine nicht-schützende Schicht, die schwierig zu löten ist. Die beiden Chloride sind ebenfalls nicht-schützende Schichten und verringern die Lötbarkeit, Bleichlorid wird normalerweise in Bleinitrat umgewandelt, das sich wiederum mit den in der Elektronikindustrie eingesetzten Flußmitteln nicht löten läßt.

Werden Bauteile gekauft, kann die Lötbarkeit mit einem Test festgestellt werden. In der Regel werden diverse Bauteile vor ihrem Einsatz immer gelagert oder sie wurden vor ihrer Auslieferung vom Lieferanten gelagert. Im Wareneingang muß die Lötbarkeit der Bauteile nach 6 oder 12 Monaten bestimmt werden können.

Es wurde bereits erwähnt, daß der natürliche Alterungsprozeß eines Bauteils sehr kompliziert ist und sich nicht von einem auf das andere Bauteil übertragen läßt, da dann die Lagerungsbedingungen (Umgebung und Temperatur) für einen langen Zeitraum vorherbestimmt werden müßten. Der Alterungsprozeß muß also auf eine kurze Zeit komprimiert werden können, um den Zustand der Bauteile bei Eintritt in die Fertigung bestimmen zu können.

Es ist unmöglich, eine Alterungsmethode zu finden, die den gleichen Alterungsprozeß aufweist wie die natürliche Alterung. In den internationalen Lötbarkeitsnormen sind einige Methoden zur Beschleunigung des Alterungsprozesses sowie Daten zum Vergleich der natürlichen Alterung aufgeführt, obwohl der genaue Ablauf dieser nie entspricht.

Nachstehend einige typische Beispiele von Alterungsmethoden:

1. Trockene Wärme: in Luft bei 155°C für 2, 16, 72 oder 96 Stunden
2. Feuchte Wärme: in feuchter Luft bei 40°C , 93% relative Feuchte für 4, 10, 21 oder 56 Tage
3. Dampf: in Dampf mit oder ohne zusätzlichem Gas (Luft, Sauerstoff, Schwefeldioxid)
4. Feuchte Wärme im Zyklus: in feuchter Luft bei 95% relativer Feuchte, zwischen 25°C und 55°C , 3 Stunden bei ansteigender Temperatur und 9 Stunden bei gleichbleibender Temperatur (24 Stunden Zyklus).

Diese Methoden beeinflussen durch die Feuchtigkeit oder eine korrosive Atmosphäre die Lotoberfläche oder beschleunigen durch hohe Temperaturen das intermetallische Wachstum. Sie müssen vorsichtig eingesetzt werden, da verschiedenartige Schmutzstoffe in der Luft zu unterschiedlichen Änderungen der Lotoberfläche führen.

Aus Abb. 2.4 ist ersichtlich, daß das Verhältnis zwischen Benetzungs- und Alterungszeit nicht linear ist, sondern von der Substratart abhängt. In Abb. 2.5 ist das Verhältnis zwischen Benetzungs- und Alterungszeit für ein Substrat, das bei 100°C luft- und dampfgealtert wurde, dargestellt. Das Verhältnis ist wiederum nicht linear, die Auswertung der Oxiddicke gegenüber der Benetzungszeit weist jedoch ein lineares Verhältnis aus.

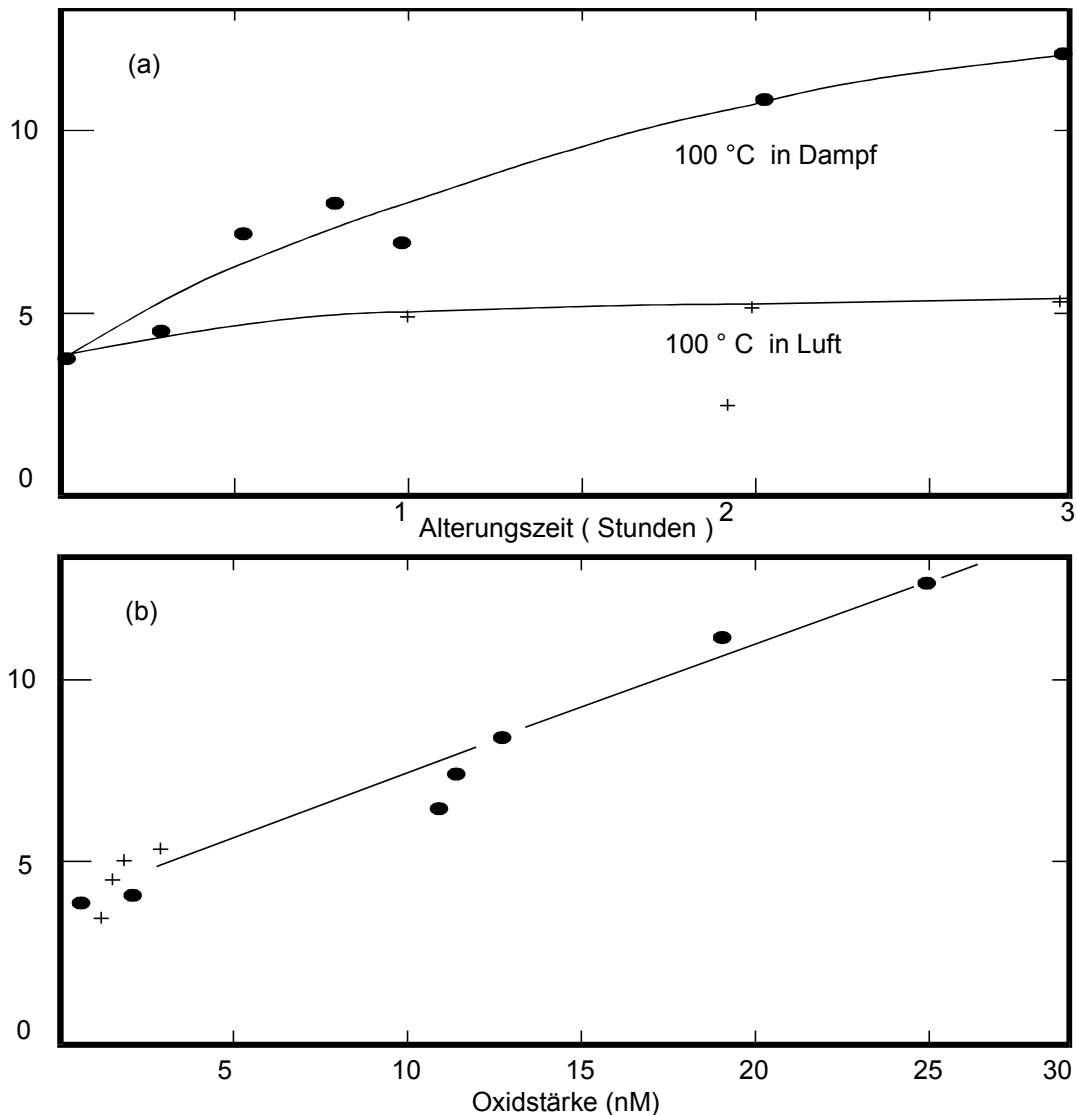


Abb. 2.5: a) Benetzungszeiten für lotüberzogenes Kupfer, das bei 100°C luft- und dampfgealtert wurde

b) Auswertung der Benetzungszeiten gegenüber der Oxidstärke mit linearem Verhältnis.

Die Stärke der Lotschicht hat eindeutig erhebliche Auswirkungen auf die Alterung des Bauteils. In Abb. 2.6 ist dargestellt, wie sich die Benetzungszeiten eines dampfgealterten Kupferbauteils mit unterschiedlicher Schichtstärke ändern.

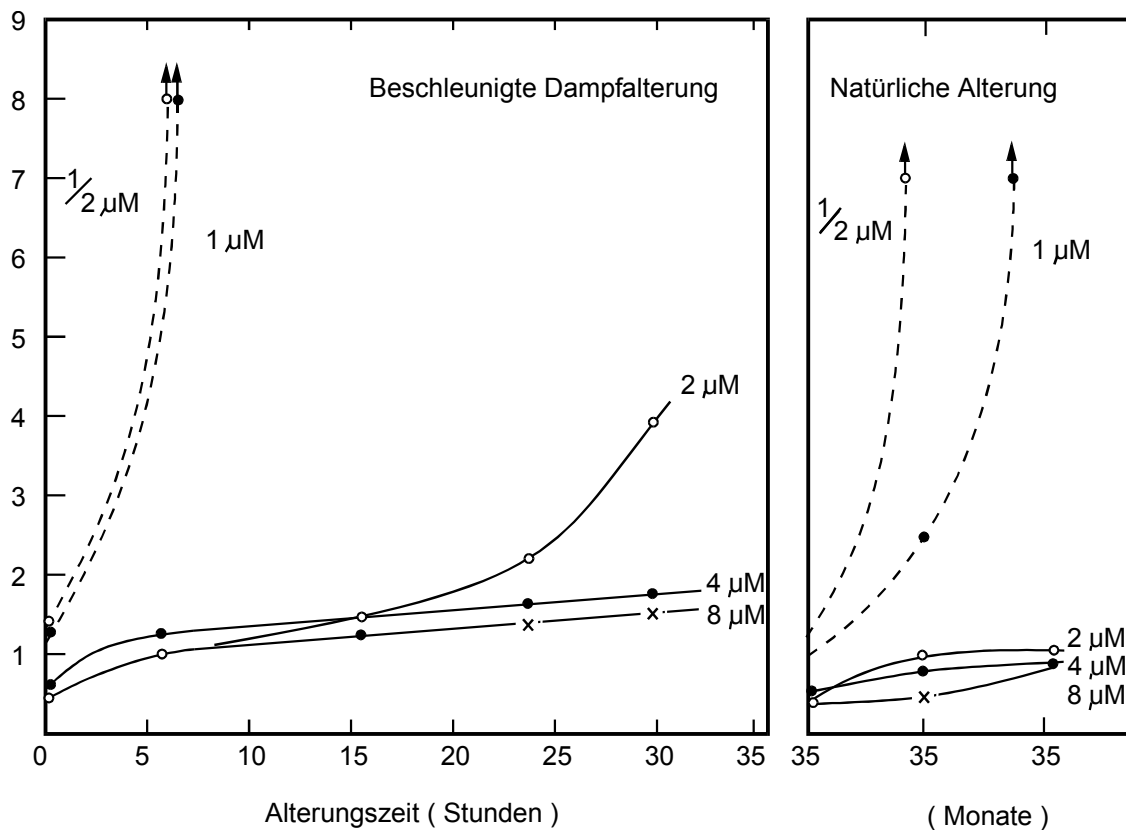


Abb. 2.6: Benetzungszeit von zinnüberzogenen Kupferbauteilen mit unterschiedlicher Schichtstärke und den Auswirkungen der Dampf- und der natürlichen Alterung.

Die Bauteile mit einer Zinnschicht unter 2 μm haben, selbst vor ihrer Alterung, eine geringere Lötbarkeit. Bei Bauteilen mit einer Zinnschicht von 2, 4 und 8 μm verringert sich zunächst mit wachsender Oxidschicht die Lötbarkeit; bei einer Zinnschicht von 2 μm werden die drei, in Abb. 2.4 dargestellten, Stadien durchlaufen: zunächst wächst die Oxidschicht, danach folgt - im Verhältnis zu der Schichtstärke - eine sehr kurze Passivierung, und dann wächst die intermetallische Schicht durch die Oberfläche, oxidiert und verringert somit weiter die Lötbarkeit.

Eine sehr kurze Dampfalterung hat nur Auswirkungen auf dünne Überzüge oder Schichten mit ohnehin sehr kurzer Lagerzeit. Der Alterungsvorgang entspricht nicht der natürlichen Alterung, da sich intermetallisches Wachstum und Diffusion bei zirka 100°C ändern. Um ein intermetallisches Wachstum zu erzeugen, wie es bei einer natürlichen Alterung von einem Jahr auftritt, müßte ein Bauteil für mindestens 24 Stunden dampfgealtert werden.

Um die natürliche Alterung zu simulieren, müßten bei Zinn-Blei Legierungen durchschnittliche Prozeßdaten von 40°C, 93% relativer Feuchte eingesetzt werden.

Je nach Alterungsprozeß werden verschiedene Überzüge auf unterschiedliche Art und Weise angegriffen. Trockene Hitze mit 155°C beschleunigt zum Beispiel das intermetallische Wachstum sowie das Ansteigen der Oxidschicht bei einem Zinn-Blei legierten Bauteils, jedoch nicht bei einem Silber-Palladium Bauteil, da es bereits während der Herstellung mit 800°C gebrannt wurde.

Die Lötbarkeit eines Zinn-Palladium überzogenen Bauteils wird von Schmutzstoffen in der Luft, insbesondere von Schwefel, beeinflusst; die Simulation der natürlichen Alterung eines derartigen Bauteils ist wesentlich komplizierter als für ein Blei-Zinn überzogenes Bauteil.

Mit der beschleunigten Alterung sollen ein oder zwei Jahre natürlicher Alterung auf wenige Stunden reduziert werden. Es ist bereits erwiesen, daß dies nicht möglich ist, da sich der Alterungsprozeß mit steigender Temperatur zur Beschleunigung der Reaktion ändert. Eine Simulation der Lagerbedingungen ist ebenfalls schwierig, dies gilt vor allen Dingen für die Auswirkungen der Schadstoffe in der Atmosphäre und deren Bestimmung.

Beschleunigte Alterungsprozesse können nur ein Hinweis auf die geänderte Lötbarkeit eines Bauteils während seiner Lagerung sein, entsprechen jedoch nicht den physikalischen und chemischen Eigenschaften der natürlichen Alterung.

1.3.3 WIE ERHÄLT MAN GUTE LÖTBARKEIT?

Die lötbare Schicht eines Bauteils oder einer gedruckten Schaltung hat bedeutenden Einfluß auf die Lötbarkeit. In den meisten Fällen soll diese Schicht nur die Lötbarkeit während der Lagerung erhalten.

Würde ein Bauteil direkt nach seiner Produktion gelötet, wäre eine lötbare Schicht nicht erforderlich. Offensichtlich ist dies nicht möglich, da Bauteile und Leiterplatten vor ihrem Einsatz eine gewisse Zeit gelagert werden und Bauteilanschlüsse während der Produktion des Bauteils Prozessen unterzogen werden, die zur Unlötbarkeit der Anschlüsse führen können.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde erläutert, daß die Lötbarkeit von der Oxidstärke auf der Substrataußenseite und von einem verminderten intermetallischen Wachstum unter der lötbaren Schicht abhängig ist.

Um die Reaktionen auf der Substrataußenseite zu verringern, müssen die Bauteile in einer kühlen, trockenen Umgebung, idealerweise zwischen 10 und 15°C, gelagert werden. Die Atmosphäre sollte geringen Feuchtigkeitsgehalt haben und frei sein von Chloriden, Nitraten und Sulfiden, da diese korrosiv auf die Substrataußenschicht wirken. Die Korrosion wird durch hohe Feuchtigkeit beschleunigt. Dieses Problem ist in Industriegebieten schwerwiegender als in ländlichen Gebieten mit geringerer Luftverschmutzung.

Die in einigen antistatischen Lagermaterialien vorkommenden Carbonsäuren wirken auf die Außenflächen ebenfalls schädlich: die Produktion dieser Lagermaterialien wird nach und nach eingestellt.

Es gibt patentamtlich geschützte Materialien, mit denen Schmutzstoffe aus der Atmosphäre entfernt werden. Es handelt sich im allgemeinen um absorbierende Streifen, die zusammen mit den Bauteilen versiegelt sind und die den Abbau der Außenfläche von Bauteilen und gedruckten Schaltungen durch Absorption der atmosphärischen Schmutzstoffe verringern.

Das Anwachsen der intermetallischen Schicht läßt sich durch Lagerung der Bauteile bei relativ geringen Temperaturen und einer Sperrschicht, wie zum Beispiel Nickel, zwischen Substrat und lötbare Schicht verringern. Die meisten Bauteilhersteller setzen diese Praxis ein, durch die sich viele Lötprobleme - insbesondere das der Zersetzung der Metallisierung - verringern lassen.

Viele Beschichtungsmetalle, die für die Bauteilanschlüsse verwendet werden, lösen sich leicht in geschmolzenem Lot; in extremen Fällen wird der Bauteilanschluß vollständig aufgelöst, besonders dann, wenn eine große Lotmenge für den Lötprozeß zur Verfügung steht.

Bei Einführung der Silber-Palladium Anschlüsse war das ein Hauptproblem. Während des Wellenlötens kam es vor, daß sich der Überzug des Bauteilanschlusses vollständig im Lot löste. Durch eine Nickel Sperrschicht auf dem Silber-Palladium und einen Zinn-Blei Überzug wurden die Schwierigkeiten gelöst. Hierdurch verringert sich nicht nur das Problem der Auflösung, sondern die Lötbarkeit des Bauteils wird ebenfalls verbessert.

Bei einem Reflow-Lötvorgang, bei dem die Lotmenge begrenzt ist, spielt die Auflösung des Überzugs keine Rolle; die Auflösung des Überzugs in der geringen Lotmenge ändert jedoch die physikalischen Eigenschaften der Lötverbindung. Durch gelöste Metalle aus dem Bauteilanschluß wird die Mikrostruktur und demzufolge auch die Stärke der Lötverbindung beeinflusst. Dieses Problem läßt sich wieder durch eine Sperrschicht zwischen Substrat und lötbare Schicht reduzieren.

Die ursprüngliche Stärke der Lotschicht auf einem Substrat hat wesentlichen Einfluß auf die Lagerbeständigkeit des Bauteils. Eine Lotschicht von mindestens 5 µm ist zu empfehlen, wenn das Bauteil nach einer Lagerzeit von 2 Jahren noch lötbar sein soll.

Intermetallische Schichten wachsen sehr schnell durch einen zu dünnen Überzug und verringern dann die Lötbarkeit des Bauteils. Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß bei Zinnüberzügen Zinn einen höheren Schmelzpunkt (232°C) als Zinn-Blei (183°C) hat und so eine längere Lötzeit, insbesondere bei Reflow-Lötvorgängen, bei denen die Reflowtemperatur unter dem Schmelzpunkt des Zinns liegt, erfordert.

Matte Metallisierungsvorgänge werden glänzenden vorgezogen. Bei glänzenden Metallisierungsvorgängen werden organische Materialien eingesetzt, die in dem Überzug eingeschlossen werden und zu Lötproblemen führen können.

Das Reflowlöten plattierter Oberflächen kann bei Führungskanten und Platinen mit durchkontaktierten Bohrungen zu Problemen führen. Während des Reflow-Lötvorganges läuft das flüssige Lot von den Ecken und Kanten des Substrates ab. Dies ist bedingt durch die Oberflächenspannung des Lotes, durch die die Oberfläche der Flüssigkeit durch Bildung einer Kugel reduziert wird. Da das Substrat durch das Lot benetzt wurde, ist dies nicht möglich; die Stärke des Überzugs an der Kante eines Löt pads und an den Führungskanten oder der durchkontaktierten Bohrung wird aber verringert.

Die Lötbarkeit an den dünn beschichteten Stellen nimmt schneller ab als an den dicker beschichteten Flächen; im schlimmsten Fall wird die intermetallische Schicht während des Lötvorgangs freigelegt. Dies war der Hauptgrund für die Schwachstellen an den Kanten durchkontaktierter Bohrungen.

Im allgemeinen sollten nur Bauteile mit einem runden Querschnitt verzinkt oder reflowgelötet werden, da hier das Problem dünnerer Lotschichten an den Kanten nicht auftritt. Führungskanten sollten beschichtet und nicht reflowgelötet werden, um eine Reduktion der Schicht zu vermeiden.

1.3.4 WARUM IST DIE LÖTBARKEIT WICHTIG?

Um verstehen zu können, warum die Lötbarkeit eine immer wichtigere Rolle spielte, muß man sich die Änderungen des Produktionsprozesses im Laufe der vergangenen Jahre vor Augen führen. Traditionell wurden elektronische Bauteile manuell mit Löt kolben in gedruckte Schaltungen gelötet.

Die Lötverbindungen wurden mit Hochtemperatur-Löt kolben (300-400°C) und Lot draht mit einem aktivierten Harzflußmittel hergestellt. Jede Lötverbindung wurde sofort geprüft, so daß fehlerhafte Verbindungen durch Aufbringen von Lot und eine längere Heizzeit leicht behoben werden konnten. Da es für die Herstellung der Lötverbindungen keine Zeitbeschränkung gab, war eine sofortige Nacharbeit defekter Stellen möglich, bei denen oft Praktiken eingesetzt wurden, über die man in einer modernen Produktion die Stirn runzeln würde.

Obwohl dieses Verfahren aus Sicht der Kontrolle ideal ist, ist es eindeutig zu arbeitsaufwendig. Demzufolge sollten alle Lötverbindungen gleichzeitig auf einem Lotbad hergestellt werden, was zur Entwicklung der Wellenlötmaschine führte. Leider zog dies am Anfang Schwierigkeiten nach sich, da das Löt ergebnis von Bauteilen, die zuvor bei 300°C gelötet wurden, bei 240-260°C in der Löt welle nicht zufriedenstellend war.

Offensichtlich mußte die Lötbarkeit der Bauteile verbessert werden. Zuvor war jedoch eine Methode zur Bewertung der Lötbarkeit erforderlich, so daß die erste quantitative Prüfmethode, der Lotkugelttest, entwickelt wurde.

Die Herstellung einer Lötverbindung wurde nicht nur durch die geringeren Temperaturen erschwert, sondern auch durch die begrenzte Zeit, die zur Verfügung stand.

Die Kontaktzeit zwischen der Lötanschlußstelle und dem geschmolzenen Lot beträgt bei einer Lötwellen gewöhnlich nur 2-3 Sekunden.

Das Auffinden von Fehlerstellen wird weiterhin erschwert durch die höhere Anzahl von Lötverbindungen. Mit Einführung der Wellenlötssysteme wurde das Herstellen einer Lötverbindung komplizierter, so daß die Bauteile eine bessere Lötbarkeit aufweisen mußten.

Durch SMT-Bauteile und das Reflow-Lötverfahren kamen weitere Schwierigkeiten hinzu. Die Anzahl der Lötverbindungen wurde erneut größer, so daß das Prüfverfahren sehr viel aufwendiger wurde. In der SMT-Technik sind Reparatur- und Nachbesserungsarbeiten besonders problematisch.

Bei Reflow-Lötprozessen werden geringere Temperaturen verwendet als bei Wellenlötverfahren sowie nur mild aktivierte Flußmittel. Hierdurch wurden die wichtigen Lötparameter erheblich geschwächt. Es stieg damit der Bedarf an Bauteilen mit guter Lötbarkeit.

SMT-Bauteile werden im allgemeinen mit mild aktivierten Flußmitteln gelötet, da sich dieses nach dem Löten viel leichter entfernen läßt als ein aktiviertes Flußmittel.

Die bei Reflow- und Wellenlötverfahren eingesetzten No-Clean Flußmittel mit geringem Feststoffgehalt sind schwächer als die in der Vergangenheit verwendeten aktivierten Harz-Flußmittel.

In einigen Fällen werden für die Bauteilanschlüsse Metalle mit geringeren Benetzungseigenschaften, wie zum Beispiel Silber-Palladium und Nickellegierungen, benutzt. All diese Faktoren machen das moderne Löten kompliziert und erhöhen das Erfordernis an Bauteilen mit guter Lötbarkeit.

Das Nacharbeiten defekter Lötverbindungen ist nicht nur zeit- und kostenintensiv; es ist erwiesen, daß nachgearbeitete Lötverbindungen nie so stabil sind wie Lötverbindungen, die beim ersten Durchgang korrekt gelötet wurden. Es handelt sich also bei diesen Lötverbindungen immer um eine potentielle Schwachstelle auf einer gedruckten Schaltung. Das ist ein weiterer Punkt, warum Bauteile und Platinen gut lötbar sein müssen, so daß bereits beim ersten Durchlauf einwandfreie Lötverbindungen gewährleistet sind.

1.3.5 WO SOLLTE DIE LÖTBARKEIT GEPRÜFT WERDEN?

Traditionell erfolgte eine Überprüfung der Lötbarkeit in der Warenannahme, um die Lötbarkeit von Bauteilen und gedruckten Schaltungen vor Eintritt in die Produktion zu gewährleisten.

Eine Lötbarkeitsüberprüfung sollte im Idealfall vom Hersteller des Bauteils oder der Leiterplatte durchgeführt werden; dadurch allein kann jedoch eine gute Lötbarkeit nicht garantiert werden, da Bauteile von einem Händler gelagert werden können, ehe sie an den Verbraucher geliefert werden. Auf sämtlichen Bauteilen sollte das Herstellungsdatum - nicht das Verpackungsdatum - vermerkt sein, so daß der Verbraucher das tatsächliche Alter der Bauteile ersehen und einen entsprechenden Lagerkreislauf festlegen kann. Verständlicherweise kennzeichnen einige Produzenten ihre Produkte nur widerwillig mit dem tatsächlichen Herstellungsdatum.

Werden Bauteile nicht kurze Zeit nach der Prüfung in der Warenannahme eingesetzt, sollten sie vor dem Test einem Alterungsprozeß unterzogen werden.

Eine Überprüfung der Lötbarkeit ist eine sehr wertvolle Hilfe zur Fehlerfindung, mit der die Ursache von Problemen in der Produktion ermittelt werden kann. Moderne Lötverfahren sind sehr komplex und die Änderung eines Parameters in einem Teil des Prozesses hat oft Auswirkungen auf die anderen Prozeßteile.

Wurden Bauteile länger als ein Jahr gelagert, sollten sie nochmals geprüft werden, ehe sie in die Produktion kommen. Der Austausch oder die Nachbesserung eines Bauteils mit geringer Lötbarkeit ist wesentlich einfacher als das Auffinden und Nacharbeiten einer schadhafte Lötverbindung nach Löten der Platine.

Im Labor haben sich Lötbarkeitsprüfmethoden ebenfalls als sehr nützlich erwiesen. Viele Methoden, die zur Bewertung der Lötbarkeit eingesetzt werden, eignen sich zur Bewertung des Wirkungsgrades von Flußmitteln, der Auswirkungen von Herstellungsverfahren auf die Lötbarkeit oder von verschiedenen Plattierungsverfahren und -materialien auf die Benetzungsfähigkeit der Bauteilanschlüsse.

1.3.6 VORTEILE GUTER LÖTBARKEIT

In diesem Abschnitt wurden die Faktoren erläutert, die die Lötbarkeit von Bauteilen und Platinen beeinflussen. In vielen Fällen sind die Vorteile guter Lötbarkeit ziemlich offensichtlich, werden nachstehend dennoch nochmals zusammengefaßt.

1.3.6.1 STÄRKERE LÖTVERBINDUNGEN - HÖHERE ZUVERLÄSSIGKEIT

Bauteile mit guter Lötbarkeit verbessern die Benetzung während des Lötprozesses und führen zu stärkeren, zuverlässigeren Lötverbindungen. Eine Lötverbindung mit einer definierten Lotfüllung hat eine längere Lebenserwartung und kann thermische Belastungen besser vertragen.

1.3.6.2 STABILER ELEKTRISCHER KONTAKT

Ein Bauteil mit guter Lötbarkeit bildet eine starke, gleichmäßige Verbindung mit einem stabilen und zuverlässigen elektrischen Kontakt.

1.3.6.3 GERINGE LÖTTEMPERATUREN

Der Lötbarkeitsgrad steht im Verhältnis zur Löttemperatur. Durch den Einsatz von Bauteilen mit guter Lötbarkeit können die Löttemperaturen niedrig gehalten werden, so daß empfindliche Bauteile nicht beschädigt und das Verkohlen von Harzflußmitteln verhindert wird.

1.3.6.4 KURZE LÖTZEITEN

Gute Bauteile benötigen nur eine geringe Zeit bei Löttemperatur, so daß das Risiko der Beschädigung wärmeempfindlicher Bauteile weiter reduziert wird. Durch kurze Lötzeiten wird ebenfalls die Stärke der während des Lötprozesses entstehenden intermetallischen Schicht dezimiert. Die intermetallische Schicht ist spröder als Lot und könnte die Lebensdauer der Lötverbindung während der Temperaturzyklen verringern.

1.3.6.5 EINSATZ MILD AKTIVIERTER FLUßMITTEL

Bauteile und gedruckte Schaltungen mit guter Lötbarkeit können mit mild aktivierten Flußmitteln gelötet werden. Dadurch vermindert sich das Risiko einer Ansammlung korrosiver Materialien auf der Platine, die deren Zuverlässigkeit beeinträchtigen. Rückstände schwacher Flußmittel lassen sich ebenfalls leichter von einer gedruckten Schaltung entfernen als Rückstände starker Flußmittel. Folglich entstehen auch weniger Rückstände potentiell schädlicher Flußmittel auf der Leiterplatte.

1.3.6.6 EINHEITLICHE LÖTZEITEN

Gut lötbare Bauteile gewährleisten einheitliche Lötzeiten; dies ist besonders wichtig bei bedrahteten und Chip-Bauteilen während des Reflow-Prozesses. Eine nicht gleichmäßige Lötbarkeit kann ein Verschieben der Bauteile oder ein Aufrichten von Chip-Bauteilen während des Lötprozesses zur Folge haben.

1.3.6.7 KOSTEN

Dies ist immer ein ausschlaggebender Punkt; es ist jedoch sehr viel einfacher, Bauteile mit geringer Lötbarkeit nicht dem Produktionsprozeß zuzuführen als eine schadhafte Lötverbindung ausfindig zu machen und nachzuarbeiten. Die reparierte Stelle hat nie die gleiche Qualität wie eine Lötverbindung, die beim ersten Mal korrekt ausgeführt wurde. Sie ist eine potentielle Schwachstelle, die dann wird zu einer teuren Fehlerstelle werden kann.

1.4 DIE THEORIE DER BENETZUNGSWAAGE

Mit der Benetzungswaage werden die vertikalen Auftriebskräfte und die Oberflächenspannung gemessen, wenn ein gefluxter Prüfling in ein Lotbad getaucht wird. Die Benetzungskraft wird von einem Meßwandler in ein analoges Signal umgewandelt. Dieses Signal kann direkt in einen X/T Recorder übernommen oder in einem Rechner digitalisiert und analysiert werden. Mit dem digitalen Signal wird die Kraft-Zeit Kurve erstellt und analysiert, um die erforderlichen Kräfte und Zeiten aus ihr zu errechnen.

1.4.1 DIE BENETZUNGSKRÄFTE

Mit der Benetzungswaage wird die Lötbarkeit von Bauteilen anhand der Schnelltauch- oder der stationären Methode, wie sie ebenfalls manchmal genannt wird, bewertet. In diesem Modus wird das Bauteil so schnell eingetaucht, daß keine oder nur geringe Benetzung auftritt; die vertikale Kraft wird überwacht, während das Bauteil unbeweglich im Lotbad gehalten wird.

In Abb. 2.7 ist eine flache Platte zu Testbeginn in einem Lotbad dargestellt. Sie wurde mit 20 oder 25 mm s⁻¹ eingetaucht und ist noch nicht gelötet. Die Lotoberfläche wurde heruntergedrückt und die Oberflächenspannung versucht, die Platte aus dem Lotbad zu pressen, so daß es zu einer nach oben wirkenden Kraft kommt.

Die Kraft der Oberflächenspannung γ (Gamma) wirkt tangential in einem Winkel θ (Theta) zwischen Lot und der flachen Platte auf die Lotoberfläche. Der Kontaktwinkel θ wird immer innerhalb des geschmolzenen Lotes gemessen.

Während des Eintauchens ersetzt die flache Platte die Lotmenge, die dem verdrängten Volumen entspricht. Diese Verdrängung führt zu einer Auftriebs- oder archimedischen Kraft, die ebenfalls nach oben wirkt und die Platte aus dem Lotbad drückt.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Platte vertikal, in einem Winkel α (Alpha) zur Horizontalen eingetaucht wurde. Die Auswirkungen unterschiedlicher Eintauchwinkel wird in einem späteren Teil erläutert.

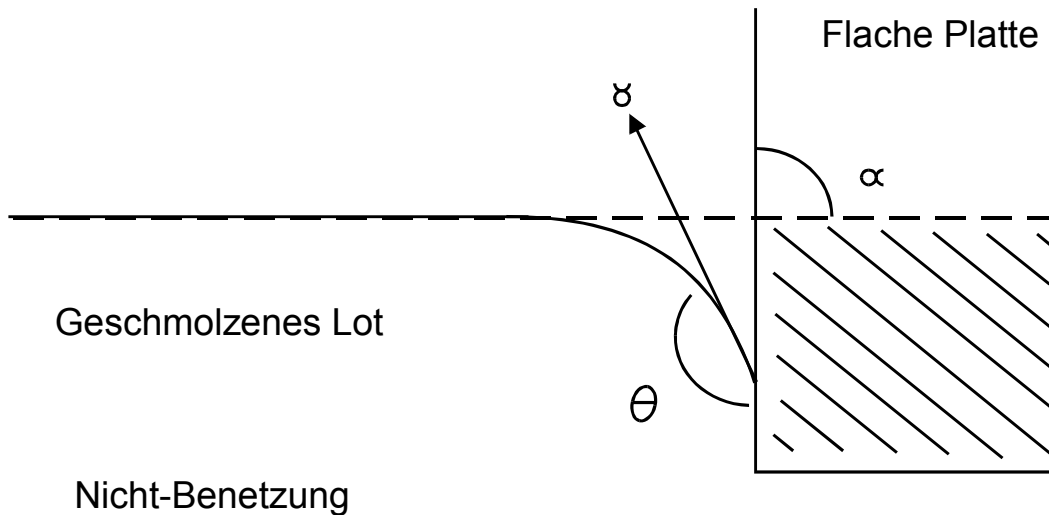


Abb. 2.7 Benetzung einer flachen Platte durch geschmolzenes Lot

Hat der Lötvorgang begonnen, steigt das Lot an der Platte hoch, bis die Lotoberfläche wieder horizontal ist. An diesem Punkt wirkt die Kraft der Oberflächenspannung des Lotes horizontal, ohne vertikale Komponenten, entlang der Badoberfläche. Die Auftriebskraft ist in diesem Fall die einzige, auf die Platte wirkende vertikale Kraft.

In Abb. 2.8 ist die vertikale Platte am Ende des Tests mit der Benetzungswaage bei vollendeter Lötung dargestellt. Die Kraft der Oberflächenspannung wirkt jetzt nach unten und versucht, die Platte in das Lotbad zu ziehen. Der Kontaktwinkel, θ , liegt jetzt unter 90° , und die Platte ist benetzt. Liegt der Kontaktwinkel über 90° , wie zu Testbeginn, hat keine Benetzung der Platte stattgefunden.

Ist die Platte gut lötbar, steigt das Lot über die Badoberfläche auf eine Höhe H . Die Anstiegshöhe und demzufolge die durch die Benetzungswaage gemessene Benetzungskraft ist von der Lötbarkeit der Platte abhängig. Die theoretische, maximale Anstiegshöhe wird von der Oberflächenspannung und der Dichte des geschmolzenen Lotes bestimmt.

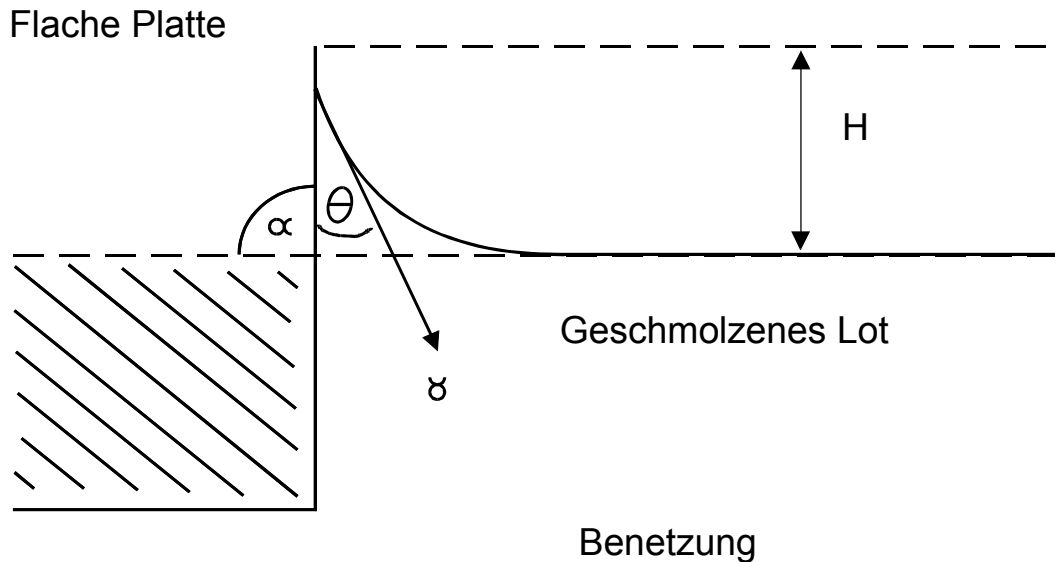


Abb. 2.8 Benetzung einer Platte durch geschmolzenes Lot

Die von der Benetzungswaage aufgezeichnete vertikale Kraft mißt während des Lötens der Platte die Veränderung der vertikalen Komponente der Oberflächenspannungskraft, wenn das Lot über die Lotoberfläche ansteigt.

Die Benetzungswaage zeigt die Änderung des Kontaktwinkels zwischen geschmolzenem Lot und der Platte während der Testdauer an. Dies ist durch das proportionale Verhältnis zwischen vertikaler Kraft und dem Kosinus des Kontaktwinkels bedingt. Die von der Benetzungswaage gemessene vertikale Kraft ist in Gleichung 3 wiedergegeben.

$$F = \gamma p \cos \theta - gpv \quad \text{Gleichung 3}$$

Hier sind:

γ = Oberflächenspannung des geschmolzenen Lotes mit Flußmittel ($0,4 \text{ mN mm}^{-1}$)

p = Umfang des Prüflings (mm)

g = Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

ρ = Dichte des geschmolzenen Lotes (8 mg mm^{-3})

v = verdrängtes Volumen (mm^3)

Die rechte Seite der Gleichung (gpv) ist die an der eingetauchten Platte entstehende Auftriebskraft. Diese ist abhängig von der verdrängten Lotmenge und wird während des Tests als konstant betrachtet.

Die Benetzungskraft wird durch $\gamma \rho \cos \theta$ dargestellt. Je größer der Umfang des Prüflings, um so größer ist die verfügbare zu lötende Fläche und um so höher die daraus resultierende Benetzungskraft. Die Abmessungen des Prüflings und die Oberflächenspannung bleiben während der Testdauer wahrscheinlich konstant, so daß sich lediglich der Kontaktwinkel, θ , ändert.

Wird für die Oberflächenspannung bei einem 60/40 Zinn-Blei Lot mit reinem Harzflußmittel ein Wert von $0,4 \text{ mN mm}^{-1}$ eingesetzt, kann die maximale, theoretische Benetzungskraft errechnet werden, vorausgesetzt, der Kontaktwinkel θ fällt bei vollständiger Benetzung auf Null.

Mit diesem theoretischen Wert können die Benetzungskräfte tatsächlicher Bauelemente verglichen werden. Dies ist die Basis einer der Standardprüfmethoden, die an anderer Stelle erläutert werden.

1.4.2 DIE BENETZUNGSKURVE

In Abb. 2.9 ist eine typische Benetzungskurve dargestellt, bei der die Kraft auf der vertikalen Achse und die Zeit auf der horizontalen Achse erscheint. Vor Testbeginn werden Gewicht des Prüflings und des Bauteilhalters austariert, so daß der Test auf der Nulllinie der Kraft beginnt.

Nicht-Benetzungskräfte werden als negative Kräfte dargestellt, bei denen der Cosinus von θ unter Null liegt, Benetzungskräfte als positive Kräfte, bei denen der Cosinus von θ über Null liegt.

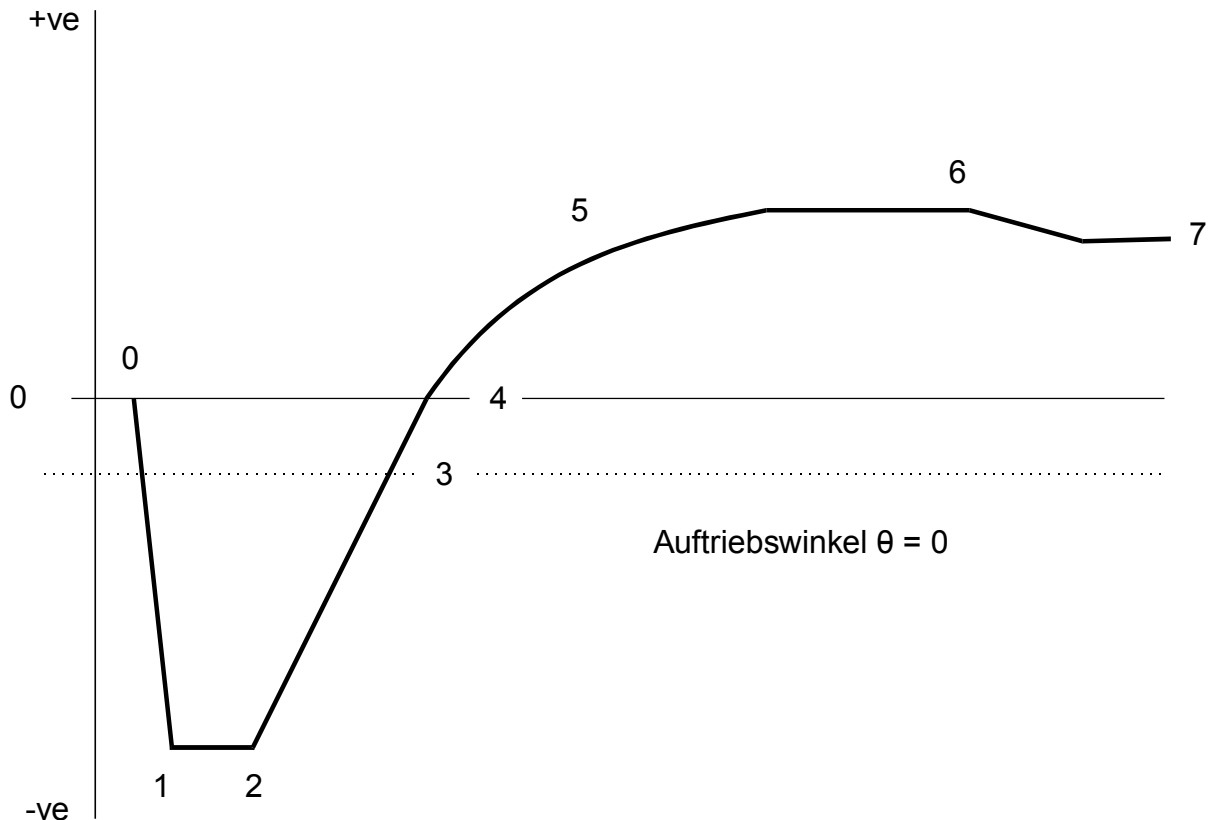


Abb. 2.9 Die Benetzungskurve

Punkt 0 - Das Lotbad wird nach oben gefahren, um einen Kontakt mit dem Prüfling herzustellen. Dies wird als Ausgangspunkt der Prüfung betrachtet. Das Bad fährt weiter nach oben, bis der Prüfling vollständig bis zur voreingestellten Tiefe eingetaucht ist.

Punkt 1 - Das Bad stoppt, der Prüfling ist vollständig eingetaucht. Prüflinge mit geringem Wärmebedarf und guter Lötbarkeit werden sofort gelötet. Es ist sogar möglich, daß bei einigen der Lötvorgang bereits während des Eintauchens, trotz einer hohen Eintauchgeschwindigkeit, beginnt; dies gilt vor allen Dingen für Prüflinge mit leicht schmelzbaren Überzügen und guter Lötbarkeit.

Punkt 2 - Es kann sein, daß Prüflinge mit einem hohen Wärmebedarf oder die einem Test mit wasserlöslichen Flußmitteln unterzogen wurden, bis zu diesem Punkt noch nicht gelötet werden. Der Unterschied zwischen den Punkten 1 und 2 ist die Zeit, bis der Prüfling Löttemperatur erreicht oder bis das Lösemittel aus dem Flußmittel verdampft und das Flußmittel aktiviert ist.

Hat der Lötvorgang begonnen, steigt das Lot an dem Prüfling hoch, der Kontaktwinkel innerhalb des Lotes verringert sich und die negative Benetzungskraft nimmt ab.

Punkt 3 - Die Lotoberfläche ist wieder horizontal, der Kontaktwinkel ist auf 90° gefallen. Die Kraft der Oberflächenspannung wirkt jetzt horizontal und hat keine vertikalen Auswirkungen. Die einzige, noch wirksame vertikale Kraft ist die Auftriebskraft.

Die Auftriebskraft ist der durch das verdrängte Lotvolumen entstehende Auftrieb und entspricht dem Volumengewicht des durch den Prüfling verdrängten Lotes.

Das Lot steigt jetzt über die Lotbadoberfläche hinaus und der Kontaktwinkel fällt unter 90° .

Punkt 4 - Jetzt entspricht die nach unten ziehende Kraft der Lotoberflächenspannung genau der Auftriebskraft, so daß sich eine Nettokraft von Null ergibt.

Punkt 5 - Das Lot steigt weiterhin über die Lotbadoberfläche; dieser Punkt, das heißt die Kraft nach einer spezifischen Eintauchzeit, im Normalfall zirka zwei Sekunden, wird oft als Referenzwert für die Lötbarkeit des Prüflings genommen.

Punkt 6 - Die maximale Benetzungskraft ist erreicht, das Lot hat die maximale Höhe oberhalb der Lotbadoberfläche an dem Prüfling erlangt und der Kontaktwinkel ist auf dem Minimalwert. Bei einer Entnetzung nimmt die Benetzungskraft mit dem Rückgang des Lotes von dem Prüfling ab, während der Kontaktwinkel gleichzeitig ansteigt.

Eine ähnliche Reduktion der Benetzungskraft tritt auf, wenn sich der Überzug des Prüflings löst oder wenn ein schwer schmelzbarer Überzug oberhalb des Lotmeniskus schmilzt.

Punkt 7 - Im allgemeinen entspricht die Kraft an diesem Punkt der maximalen Benetzungskraft und zeigt einen stabilen Benetzungszustand an. Hier endet die Verweilzeit und das Lotbad fährt von dem Prüfling zurück.

An diesem Punkt wird der Test als beendet betrachtet, da nach Entfernen des Prüflings aus dem Lotbad wahrscheinlich keine verwertbaren Informationen mehr zu erwarten sind.

Die Benetzungswaage wird sowohl mit der stationären als auch mit der Schnelleintauchmethode eingesetzt, bei der ein Prüfling so rasch eingetaucht wird, daß es zu keiner wahrnehmbaren Benetzung kommt. Danach wird die Probe unbeweglich in dem Lotbad gehalten, während die Lotkräfte überwacht werden.

Bei geringen Eintauchgeschwindigkeiten unter 15 mm s^{-1} findet eine Benetzung während des Eintauchvorgangs statt und führt zu einer Reduktion der ursprünglichen Nicht-Benetzungskraft, Punkt 1 in Abb. 2.9, da sich der vollständige Nicht-Benetzungswinkel während des Eintauchens nicht entwickelt.

Die Steilheit der Benetzungskurve zwischen den Punkten 2 und 5 in Abb. 2.9 ist ein guter Hinweis auf die Lötbarkeit des Prüflings. Je steiler der Anstieg an diesem Punkt ist, desto schneller wird das Bauteil gelötet und desto besser ist die Lötbarkeit.

Die Auftriebslinie, an der die Lotbadoberfläche wieder horizontal und der Kontaktwinkel unter 90° gefallen ist, wird bei Standard-Prüfmethoden oft als fester Referenzpunkt genommen.

Mit der Benetzungswaage wird die Änderung des Lotkontaktwinkels um die Auftriebslinie aufgezeichnet. Ein Erhöhen der Eintauchtiefe führt zu einer größeren Auftriebskraft und senkt die Auftriebslinie, wie in Abb. 2.9 dargestellt. Da jedoch die Benetzungskurve mit der Auftriebslinie zentriert ist, bewegt sich die gesamte Benet-

zungskurve nach unten, um mit der Auftriebslinie zentriert zu bleiben und entfernt sich dabei von der Nulllinie.

Aus diesem Grunde wird die Auftriebslinie oft als fester Referenzpunkt für die Messung der Benetzungskräfte und -zeiten genommen.

Die Nulllinie als Referenzpunkt sollte mit Vorsicht eingesetzt werden, da die Zeit, die die Kurve zum Kreuzen der Nulllinie benötigt, von der Eintauchtiefe abhängt.

Wurde die maximale Benetzungskraft während des Tests erreicht, sollte sie im Idealfall stabil bleiben. Eine abnehmende Benetzungskraft zwischen der maximalen Kraft und dem Testende wird im allgemeinen als Entnetzung bezeichnet, obwohl es sich nicht unbedingt um richtige Entnetzung handeln muß. Die Auflösung der Plattierung eines Prüflings sowie das Schmelzen einer schwer schmelzbaren Beschichtung haben die gleichen Auswirkungen.

Wird der Prüfling aus dem Lotbad entnommen, wird die Benetzungskurve bei den Standard-Prüfmethoden nicht mehr berücksichtigt, so daß die Geschwindigkeit der Entnahme ohne Bedeutung ist. Die Entnahme des Prüflings aus dem Lotbad lieferte keine zuverlässigen Informationen. Das Hauptproblem bei der Auslegung dieses Vorgangs ist die Oxidschicht, die sich während des Tests gebildet hat und zu einer Haut zwischen Prüfling und Lotbad führt, die eine nicht vorhersehbare Verbindung zwischen beiden herstellt.

Mit der Benetzungswaage wird vor allen Dingen die Lötbarkeit von Bauteilen bewertet; sie eignet sich jedoch auch hervorragend als Laborgerät zur Berechnung von Prozeßvariablen und Materialveränderungen, wie zum Beispiel zur Bewertung von Flußmitteln, wenn sie anhand eines Standard-Prüfstücks verglichen werden.

1.4.3 STANDARD PRÜFMETHODEN

Zahlreiche nationale und internationale Richtlinien setzen die Benetzungswaage zum Prüfen der Lötbarkeit von Bauteilanschlüssen ein. In diesem Abschnitt sind die Prüfbedingungen und -erfordernisse einiger gebräuchlicher Standardmethoden kurz erwähnt. Weitere Einzelheiten sind in den entsprechenden Richtlinien aufgeführt.

1.4.3.1 IEC 68-2-54: 1985 UND BS 2011: TEIL 2.1 TA: 1989

Die Prüfung mit der Benetzungswaage ist Teil der grundlegenden Umweltprüfverfahren, Teil 2: Tests - Ta: Löten. Die Verfahren nach BS 2011 sowie IEC 68-2-54 sind in jeder Hinsicht identisch.

Bei dem Verfahren wird eine Prüftemperatur von 235°C und ein nicht-aktiviertes Harz-Flußmittel eingesetzt. Bei allen Lötbarkeitsprüfmethoden mit geringen Prüftemperaturen und schwachen Flußmitteln ist dieses Verfahren üblich. Dies dient als Sicherheitsfaktor, da die Prüfungen im allgemeinen an einem Bauteil aus einer Charge durchgeführt werden und es unwahrscheinlich ist, daß die schlechtesten Bauteile einer Prüfung unterzogen werden. Sind die Ergebnisse unter den schwachen Prüfbedingungen einwandfrei, müsste die Produktion bei höheren Löttemperaturen und einem aktiveren Flußmittel zufriedenstellend sein.

Bei der Methode wird eine Eintauchgeschwindigkeit von 15 bis 25 mm s⁻¹ und eine Eintauchtiefe zwischen 2 und 5 mm eingesetzt. Eine geringe Eintauchtiefe führt zu einer schwachen Wärmeübertragung und zu einer Verzögerung des Benetzungsbeginns. Je größer die Eintauchtiefe, desto höher ist die Wärmeübertragung an den Prüfling und um so schneller beginnt die Benetzung.

Mit der Eintauchtiefe steigt die Auftriebskraft, demzufolge entfernt sich die weitere Kurve von der Nulllinie nach unten. Ist die Eintauchtiefe ausreichend, kann die Benetzungskurve während der gesamten Testdauer unterhalb der Nullkraftlinie verbleiben.

Bei der Prüfmethode wird die Zeit, in der die Benetzungskurve erneut die Auftriebslinie (Ta in Abb. 2.10) kreuzt, als Zeit für den Beginn der Benetzung genommen. Dann ist die Lotoberfläche wieder horizontal und der Lotkontaktwinkel ist auf 90° gefallen.

Die Testmethode benutzt einen Minimalwert der Benetzungskraft in einer bestimmten Zeit, üblicherweise zwei Sekunden, ausgedrückt als Prozent der theoretischen maximalen Benetzungskraft oder Referenzbenetzungskraft.

Die Referenzbenetzungskraft wird bestimmt durch die maximale Benetzungskraft, die bei einem Prüfling, der mit einem aktiven Flußmittel vorverzinnt wurde, erreicht werden kann. Die Vorverzinnung wird so oft wiederholt, bis die maximale Benetzungskraft nicht mehr steigt.

Die Stabilität der Benetzung wird errechnet durch die eventuell abnehmende Kraft zwischen maximaler Benetzungskraft und Testende. Die abnehmende Kraft wird als Prozent der maximalen Lötbarkeitskraft ausgedrückt. Bei dieser Methode werden sämtliche Kräfte ab der Auftriebslinie gemessen.

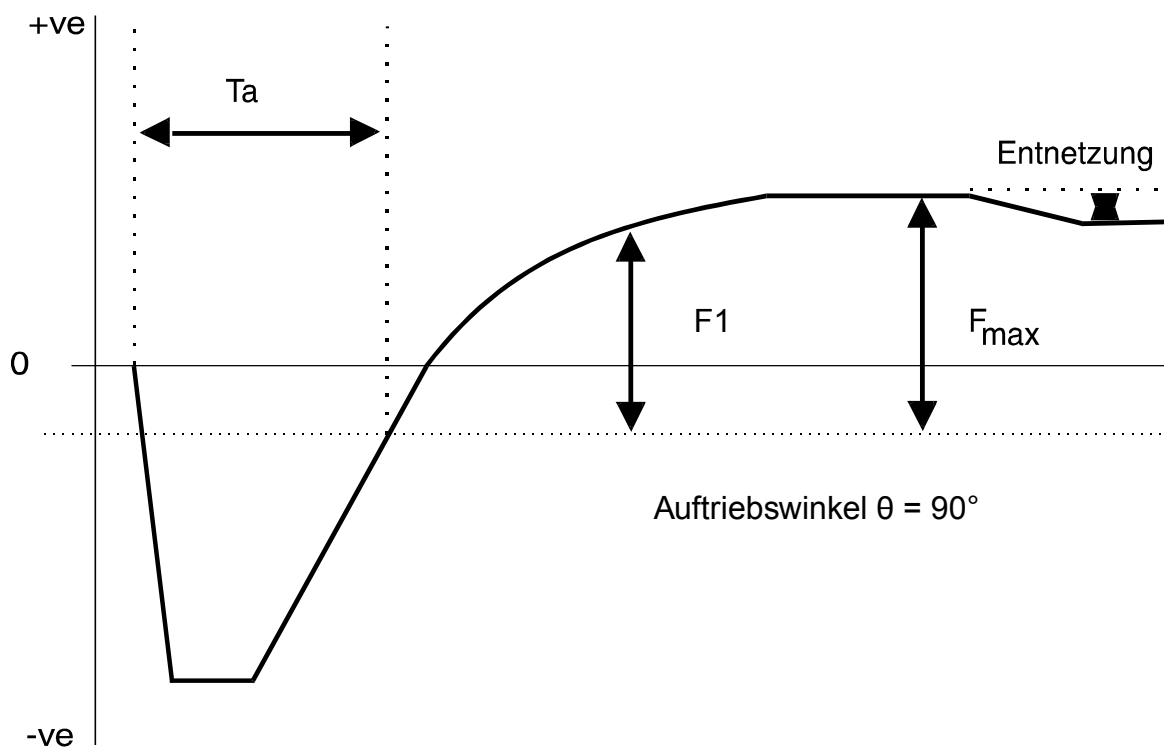


Abb. 2.10 IEC 68-2-54 Auslegung der Benetzungswaage.

Die Richtlinien sehen eine künstliche Alterung der Bauteile vor deren Prüfung vor, wenn dies aufgrund der Bauteilspezifikation erforderlich ist.

1.4.3.2 MIL-STD-883C METHODE 2022

Mit dieser Methode werden die Anschlüsse eines Dual-In-Line Bauteils geprüft. Vor der Prüfung wird das Bauteil dampfgealtert, sämtliche Bauteilanschlüsse werden gleichzeitig in das Lotbad getaucht.

Die Bauteile werden mit einem R oder RMA Flußmittel bei einer Lotbadtemperatur von 245°C getestet. Die Eintauchgeschwindigkeit beträgt 20 bis 30 mm s⁻¹ mit einer Verweilzeit von 5 Sekunden. Es wird eine Eintauchtiefe von 4 mm empfohlen, obwohl diese für die meisten Dual-In-Line Bauteile unpraktisch ist und sich eine Eintauchtiefe von 2 mm als praktischer herausstellt.

Die Benetzungskurve wird ausgewertet anhand der Zeit, bis die Kurve erneut die Nullkraftlinie kreuzt - diese muß unter 0,6 Sekunden liegen - sowie der Zeit, bis die Kurve 2/3 ihres Maximalwertes erreicht hat; diese muß unter 1,0 Sekunden sein.

Es sei darauf hingewiesen, daß bei dieser Methode die Zeit, bis die Nulllinie gekreuzt wird, von der Eintauchtiefe beeinflusst wird. Durch eine größere Eintauchtiefe wird die Kurve von der Nulllinie entfernt und nach unten bewegt. Auch Prüflinge mit geringer Maximalbenetzungskraft können noch 2/3 des Maximalwertes in weniger als 1,0 Sekunden erreichen.

1.4.3.3 ANSI/J-STD-002 TEST C

Diese Methode eignet sich für SMT- und für bedrahtete Bauteile. Die Prüfung wird mit einem R Flußmittel bei einer Lotbadtemperatur von 245°C durchgeführt. Eintauchgeschwindigkeit und -tiefe hängen von den zu prüfenden Bauteilen ab.

Bedrahtete, konventionelle Bauteile werden vertikal in das Lotbad mit einem Eintrittswinkel von 90° eingetaucht (siehe Abb. 2.7). Bedrahtete SMD-Bauteile werden mit einem Eintrittswinkel zwischen 45 und 70° eingetaucht. Bei einem SMT-Bauteil mit mehreren Anschlüssen wird eine gesamte Bauteilreihe eingetaucht.

Bei dieser Methode muß die Benetzungskraft die Auftriebslinie in weniger als 1,0 Sekunden kreuzen und innerhalb von maximal 2,5 Sekunden 0,20 mN mm⁻¹ übersteigen. 4,5 Sekunden nach Testbeginn muß die Benetzungskraft noch über 0,20 mN mm⁻¹ liegen.

1.4.3.4 ANSI/J-STD-002 TEST D

Mit dieser Methode werden unter Einsatz des Lotbades unbedrahtete Bauteile getestet. Das unbedrahtete Bauteil wird mit einem Flußmittel des Typs R geflут und in einem Winkel zwischen 45 und 70°C zur Vertikalen eingetaucht. Die Eintauchgeschwindigkeit beträgt 5 mm s⁻¹, die Eintauchtiefe 0,03 mm.

Das Bauteil wird für zirka fünf Sekunden nach Erreichen des Kräftegleichgewichts im Lot gehalten, das heißt, bis die Benetzungskraft fünf Sekunden nach Erreichen der Maximalkraft stabil geblieben ist.

Die Benetzungskurve wird errechnet durch Kalkulation des Anstiegs der Benetzungskraft zwischen dem Kontaktpunkt zwischen Bauteil und Lot und dem Kräftegleichgewicht. Sie wird in mN s^{-1} ausgedrückt und muß bei einem akzeptablen Bauteil 0,15 übersteigen. Abb. 2.11 gibt weitere Erläuterungen des erforderlichen Wertes.

Die ANSI/J-STD-002 Richtlinie beinhaltet ebenfalls eine Dampfalterung. Die Dampfalterung ist abhängig von dem Überzug der Bauteilanschlüsse sowie der abgelaufenen Lagerzeit bis das Bauteil gelötet wird.

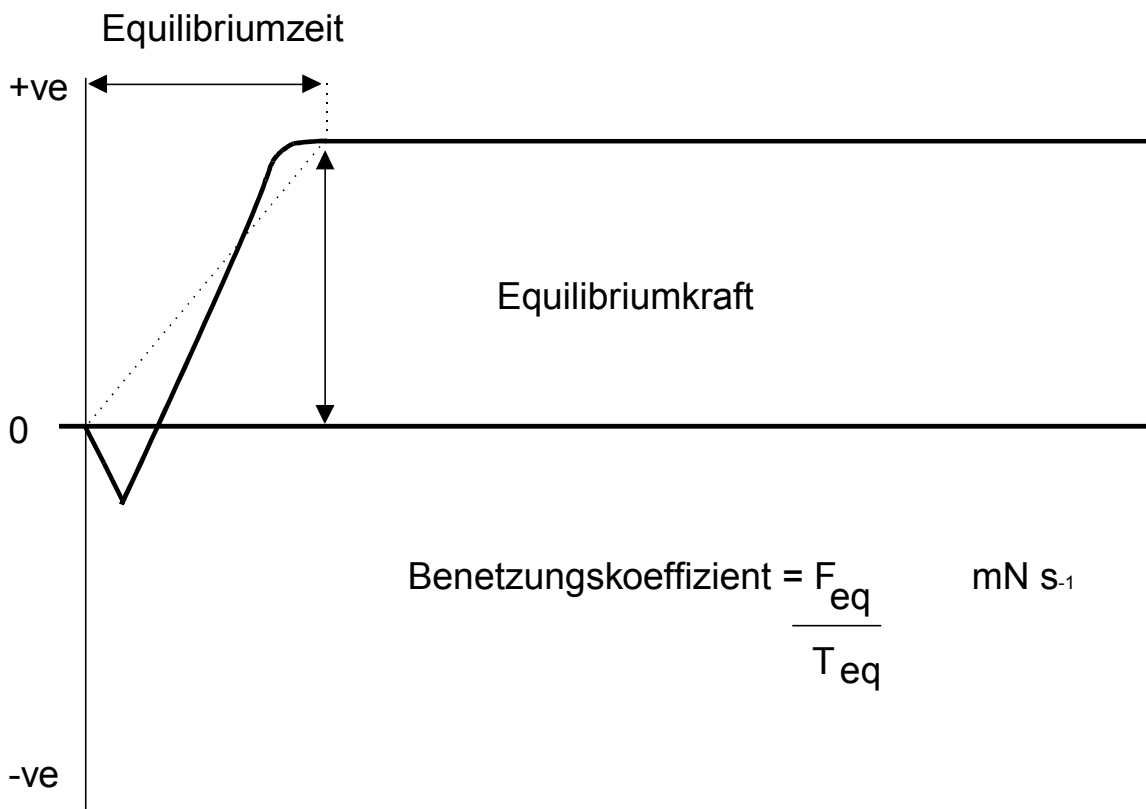


Abb. 2.11 Benetzungskurve eines unbedrahteten Bauteils unter Einsatz des Lotbades.

1.4.3.5 ANSI/J-STD-003

Diese Norm beinhaltet eine Prüfung mit der Benetzungswaage für metallisierte Abschnitte. Ein Abschnitt einer spezifischen Größe, der auf beiden Seiten metallisiert ist und zusammen mit der Leiterplatte produziert wird, wird vor der Prüfung von dieser entfernt.

Der Prüfling kann dampfgealtert oder der gleichen Vorbehandlung wie die Produktionsplatte unterzogen werden. Diese kann Entfetten, Wasserreinigung, Erhitzen etc. umfassen.

Der Prüfling wird mit einem Flußmittel des Typs R gefluxt und mit einer Geschwindigkeit von $20\text{-}25\text{ mm s}^{-1}$ bis auf eine Tiefe von 5 mm eingetaucht. Die Benetzungskurve wird berechnet anhand der Zeit, bis die Auftriebslinie gekreuzt wird sowie durch Messen der maximalen Benetzungskraft. In Abb. 2.12 sind die von der Benetzungskurve abgeleiteten Werte dargestellt.

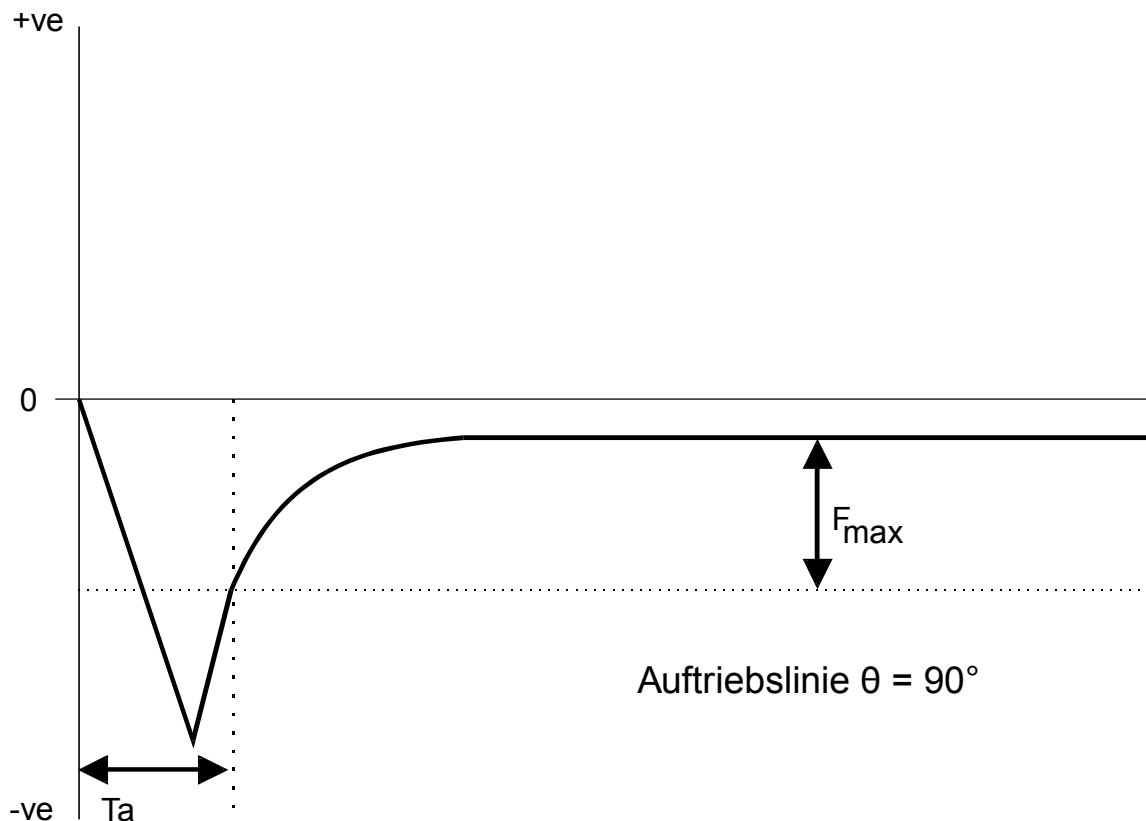


Abb. 2.12 Benetzungskurve eines Testabschnitts einer Leiterplatte

Die Benetzungszeit T_a sowie die Benetzungskraft sind abhängig von der Dicke des Prüfabschnitts. Prüfabschnitte dieser Art haben eine hohe Auftriebskraft und die Benetzungskurve kreuzt die Nulllinie während der Prüfdauer nicht.

Nach Entfernen des Flußmittels sollte der Prüfabschnitt visuell untersucht werden, um eine Entnetzung festzustellen und zu gewährleisten, daß die benetzte Fläche 95% übersteigt.

1.5 DIE MIKROBENETZUNGSWAAGE

1.5.1 EINLEITUNG

Die Benetzungswaage ist ein sehr leistungsfähiges Gerät zum Messen der Lötbarkeit bedrahteter Bauelemente und Testabschnitte. Das Lotbad, hingegen, ist für Bauteile mit kurzen Anschlüssen nicht optimal geeignet. Dies liegt daran, daß die Anstiegshöhe des Lotes an den Bauteilanschlüssen und demzufolge die Benetzungskraft durch die Lötbarkeit der Anschlüsse begrenzt wird. Durch Bauteile mit sehr kurzen Anschlüssen, wie zum Beispiel SOT 23, wird die Anstiegshöhe und folglich die Benetzungskraft durch die Länge und nicht durch die Lötbarkeit der Bauteilanschlüsse begrenzt.

Diese Einschränkung ist bei bedrahteten Bauelementen ein Problem, das bei Chip-Bauteilen mit einer Metallisierung unter 1 mm eine noch größere Rolle spielt.

1.5.2 ANSTIEG DES MENISKUS

Bei Einsatz des Lotbades wird das Bauteil vollständig eingetaucht und die Kraftänderung bei Löten des Bauteils beobachtet. Anhand der Form des Lotmeniskus kann die maximale Anstiegshöhe errechnet werden. Die maximale Anstiegshöhe ist ebenfalls die maximale Tiefe, auf die der Meniskus bei Testbeginn heruntergedrückt werden kann.

In Gleichung 4 ist die von Raleigh abgeleitete elastische Kurve für die Form des flüssigen Meniskus dargestellt.

$$H = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \times 2 \frac{\sin(\alpha - \theta)}{2} \quad \text{Gleichung 4}$$

Hier ist:

γ die Oberflächenspannung des geschmolzenen Lotes ($0,4 \text{ Nm}^{-1}$)

ρ die Lotdichte (8000 kg m^{-3})

g die Schwerebeschleunigung ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

α der Eintrittswinkel

θ der Kontaktwinkel

Wird die rechte Seite der Gleichung $\sqrt{(\gamma/\rho g)}$ mit den obigen Annäherungswerten berechnet, erhält man $2,25 \times 10^{-3}$ m oder 2,25 mm. Bei einer flachen Platte, die vertikal eingetaucht wird, beträgt der Eintrittswinkel 90° . Geht man von einer optimalen Benetzung aus, ist $\theta = 0^\circ$ und $H = 3,2$ mm. In der Praxis wird ein Kontaktwinkel von 0° nur selten erreicht; der durchschnittliche Kontaktwinkel bei einem gut benetzten Prüfling liegt bei 40° . Dadurch wird die Anstiegshöhe auf zirka 2 mm reduziert, aber trotzdem ist für eine Prüfung mit der Benetzungswaage eine Bauteilanschlußlänge von 4 mm erforderlich.

Ein SMT-Bauteil hat selten eine freie Bauteilanschlußlänge von 4 mm, so daß die Prüfung mit der Benetzungswaage nicht vollständig möglich ist. Mit dem Lotbad ist bei einer geringen Eintauchtiefe eine Prüfung mit der Benetzungswaage möglich, was für einige bedrahtete SMT-Bauelemente durchaus angebracht ist.

Um einen möglichst großen Teil des Bauteilanschlusses über der Lotbadfläche frei zu lassen, wäre eine Eintauchtiefe von Null ideal. Nähert sich jedoch die Eintauchtiefe einem Wert von Null, ist die Wärmeübertragung des Lotes an den Bauteilanschluß ziemlich unbeständig und führt zu einer langen und unregelmäßigen Wärmeübertragung, ehe es zu einem Löten kommt.

Um eine gleichmäßige Wärmeübertragung zu erhalten, ist in der Praxis eine Eintauchtiefe von 0,1 mm erforderlich. Bei dieser Eintauchtiefe können einige SMD-Bauteile mit dem Lotbad getestet werden; andere Bauelemente - insbesondere Chip-Bauteile - haben nur geringe Benetzungskräfte, die bei unterschiedlichen Lötbarkeitsgraden lediglich kleine Differenzen aufweisen, da der Meniskusanstieg und demzufolge die Benetzungskraft durch die metallisierte Bauteilanschlußlänge und nicht die Lötbarkeit begrenzt werden.

1.5.3 VERRINGERUNG DES EINTAUCHWINKELS - α

Um die Benetzung eines SMT-Bauteils zu messen, sollte die maximale Höhe des Meniskusanstiegs begrenzt werden, so daß man die Benetzungskraft als Meßwert noch benutzen kann.

In Gleichung 4 ist die einzige veränderbare Variable α , der Eintrittswinkel zwischen der vertikalen Seite des Bauteilanschlusses und der Lotoberfläche. Leider kann bei dem Lotbad der Eintrittswinkel nicht durch Kippen des Bauteils reduziert werden, da er sich auf der einen Seite verringert, aber auf der gegenüberliegenden Seite vergrößert. Es ist wesentlich einfacher, den Eintrittswinkel durch Krümmen der Lotoberfläche zu reduzieren. Hierbei wird das Lotbad durch eine kleine Kugel geschmolzenen Lotes ersetzt. In Abb. 2.13 ist dargestellt, wie sich der Eintrittswinkel durch die Lotkugel verkleinert.

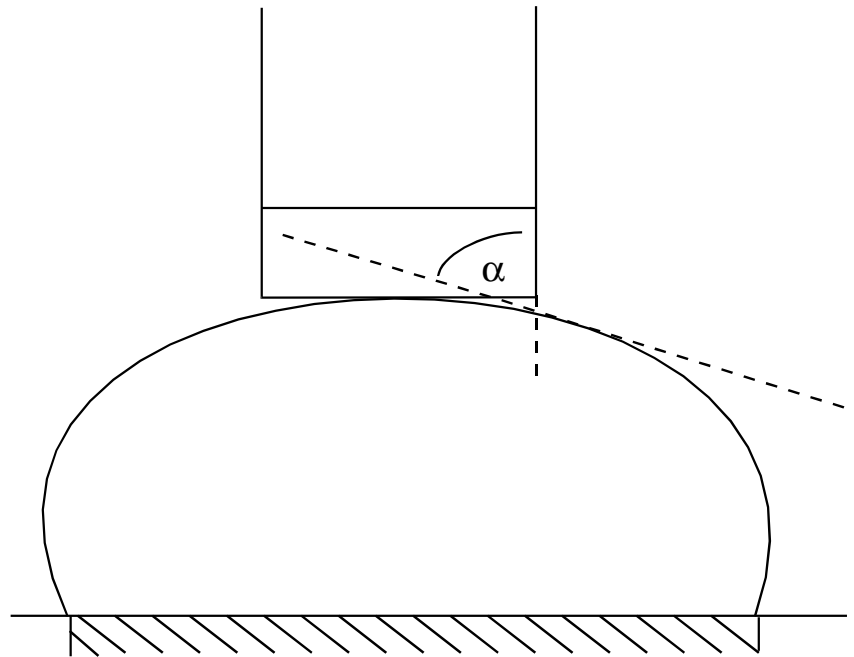


Abb. 2.13 Verringerung des Eintrittswinkels durch die Lotkugel

Bei Prüfung eines 1206 Chip-Kondensators wird der Eintrittswinkel bei Einsatz einer 200 mg Lotkugel von 90° auf zirka 70° reduziert. Geht man von Gleichung 4 für die flache Platte aus, vermindert sich die theoretische Anstiegshöhe bei einem Eintrittswinkel von 70° anstelle von 90° von 3,2 mm auf 2,6 mm. Bei einem Kontaktwinkel von 40° anstelle von 0° sinkt die theoretische Anstiegshöhe von 1,9 mm auf 1,2 mm.

Die theoretische, maximale Anstiegshöhe wird jetzt auf einen Wert begrenzt, der sich der verfügbaren Anschlußlänge nähert. Die Tatsache, daß im allgemeinen nur kleine Bauelemente eingetaucht werden, führt zu einer Krümmung der horizontalen Lotoberfläche. Dadurch wird die maximale Anstiegshöhe des Lotmeniskus weiter gesenkt, so daß dieser Wert sehr viel näher an der verfügbaren Bauteilanschlußlänge liegt.

Sinn der Reduktion des Meniskusanstiegs ist, daß Abweichungen von der maximalen Benetzungskraft auf geringe Lötbarkeit zurückzuführen sind und nicht auf die physikalische Begrenzung des Prüflings.

1.5.4 VERGLEICH ZWISCHEN MIKROBENETZUNGSWAAGE UND LOTBAD

In Abb. 2.14 sind die Benetzungskurven eines 1206 Chip-Kondensators, einmal unter Einsatz des Lotbades und einmal unter Einsatz einer 200 mg Lotkugel, dargestellt. In beiden Fällen wurde nur eine Kante des Bauteils eingetaucht.

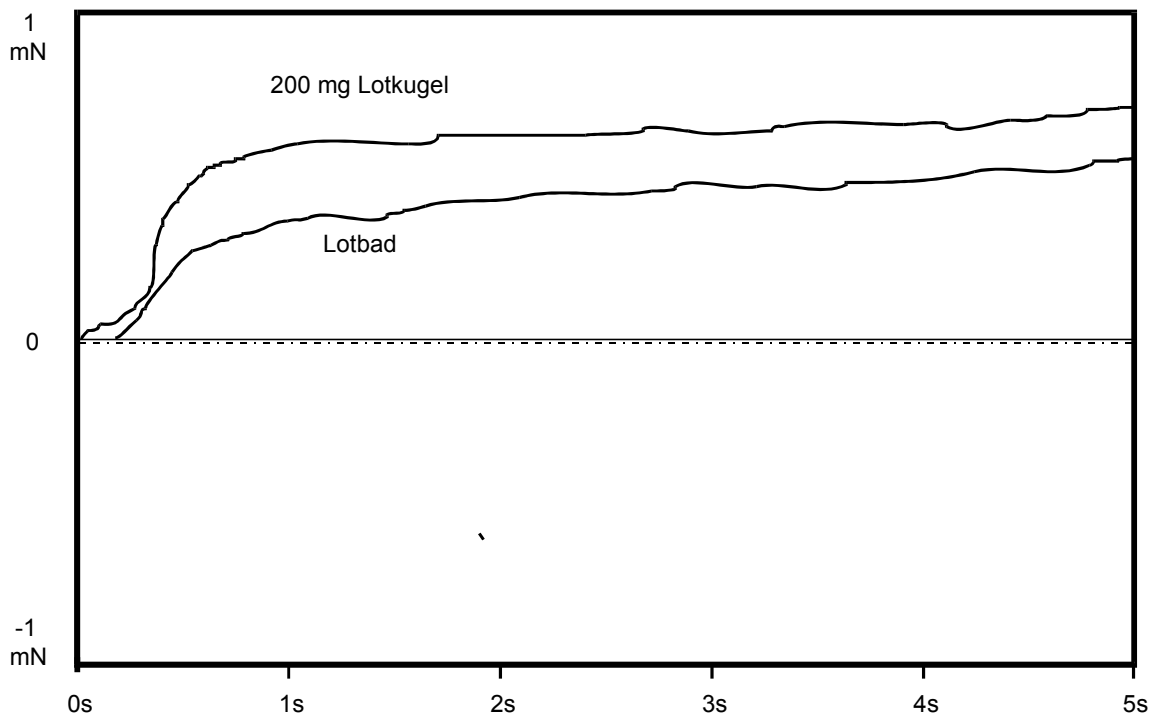


Abb. 2.14 Benetzungskurven eines 1206 Chip-Kondensators mit dem Lotbad und der Mikrobenetzungswaage.

Die Benetzungskurven in Abb. 2.14 sind beides Durchschnittswerte aus zehn Prüfungen. Bei der 200 mg Lotkugel ist die Benetzungskraft weitaus größer als bei dem Lotbad. Was jedoch ist der Grund für diese größere Kraft?

Man vermutete, daß die größere Kraft darauf zurückzuführen ist, daß das Lot den Raum unterhalb des Bauteils füllt, da nur die flache Kante des Bauteils mit der Spitze der gekrümmten Lotkugel in Kontakt kommt. Abb. 2.15 zeigt eine maßstabgerechte Zeichnung eines 1206 Chip-Kondensators, der 0,1 mm in eine 200 mg Lotkugel getaucht wird.

Obwohl die Kante eines tatsächlichen Bauteils nicht ganz flach ist, wird der größte Teil des Raumes unterhalb des Bauteils bei einer Eintauchtiefe von 0,1 mm mit Lot gefüllt.

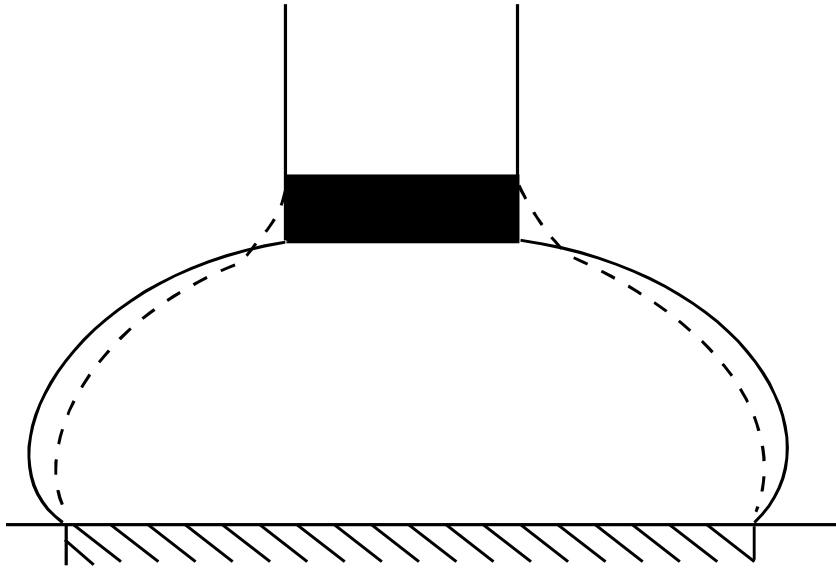


Abb. 2.15A Ein 1206 Kondensator, der 0,1 mm in eine 200 mg Lotkugel getaucht wurde.

Wenn auch ein Teil der erhöhten Benetzungskraft auf die Lotfüllung an den Außenkanten unterhalb des Bauteils zurückzuführen ist, wie anhand des Ausgangs der Benetzungskurve in Abb. 2.14 ersichtlich, ist die erhöhte Benetzungskraft bei Einsatz der Lotkugel nicht allein hierdurch bedingt.

Die Lotkugel ist im Vergleich zum Lotbad eine begrenzte Lotmenge, die deformiert wird, wenn das Lot an dem Bauteilanschluß aufsteigt (siehe Abb. 2.15). Die Lotoberflächenspannung ist eine sehr starke Kraft, die versucht, das Lot in der Kugelform zurückzuhalten. Durch Verformung der Lotkugel während des Lötvorganges muß gegen die Oberflächenspannung angegangen werden; die Kraft der Deformierung addiert sich also zu der normalen Benetzungskraft sowie zu der Kraft der Lotfüllung unterhalb der Bauteilkanten, so daß die Benetzungskraft wesentlich höher liegt als bei dem Lotbad.

Bedingt durch die veränderte Lotkugelform während des Lötens steigt nicht nur die Benetzungskraft, sondern reduziert sich durch einen kleineren Eintrittswinkel nochmals der Meniskusanstieg.

Die mathematische Berechnung der Verformungskraft ist äußerst kompliziert; man versucht gegenwärtig noch, die Kraftänderung durch die Lotkugel auf dem Rechner quantitativ zu bestimmen. Die erhöhte Kraftänderung führt jedoch zu einer detaillierteren Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Lötbarkeitsgraden, so daß kleinere Bauteile mit der Benetzungswaage geprüft werden können, die bei Einsatz des Lotbades erhebliche Schwierigkeiten bereiten würden.

Die Mikrobenetzungswaage hat im Vergleich zu dem Lotbad einen weiteren Vorteil: Dadurch, daß sich eine kleine, 200 mg Lotkugel in einem Aluminium-Heizblock auf einem 4 mm Eisenstift befindet, können einzelne Anschlüsse von SOIC, PLCC und QFP Bauteilen geprüft werden. Mit der 25 mg Lotkugel auf dem 2 mm Eisenstift ist ein Test von empfindlichen Bauteilanschlüssen, wie zum Beispiel SOT 23, möglich. Die kleinere Lotkugelgröße empfiehlt sich auch für die kleinen Chip-Bauelemente 0603 und 0402.

In Abb. 2.16 sind die Ergebnisse für einen 0603 Chip-Kondensator mit dem Lotbad, einer 200 mg Lotkugel und einer 25 mg Lotkugel dargestellt. Der Anstieg der Benetzungskraft bei der 200 mg Lotkugel ist beachtlich und steigt bei der 25 mg Lotkugel noch an. Er ist zurückzuführen auf die größere Verformungskraft, die auf die kleinere Lotkugel wirkt.

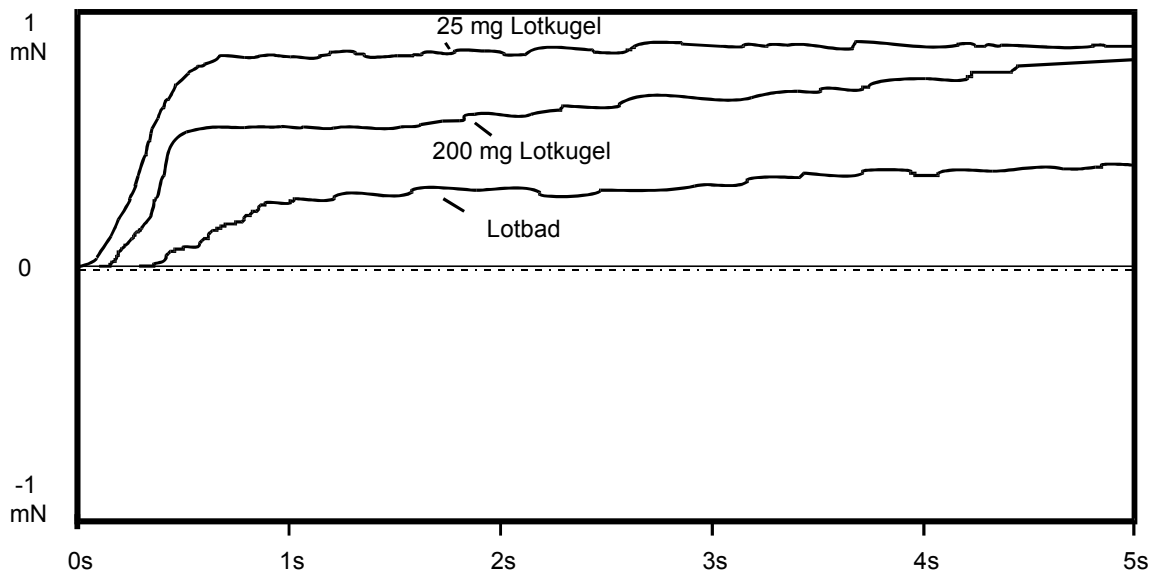


Abb. 2.16 Benetzungskurve bei einem 0603 Chip-Kondensator mit dem Lotbad und der Mikrobenetzungswaage mit zwei Lotkugelgrößen.

Abb. 2.17 zeigt die Prüfergebnisse eines einzigen Anschlusses eines SOT 23 Bauteils mit den gleichen drei Lotformen. Mit der Lotkugel wird wieder eine bemerkenswerte Benetzungskraft erreicht, der Unterschied zwischen der 200 mg und der 25 mg Lotkugel ist jedoch nicht signifikant.

In diesem Fall steigt die Kraft nicht durch die Benetzung auf der Bauteilunterseite, sondern aufgrund der Verformung der Kugel; die Verformungskräfte der kleinen Bauteilanschlüsse eines SOT 23 sind anscheinend bei beiden Lotkugelgrößen gleich.

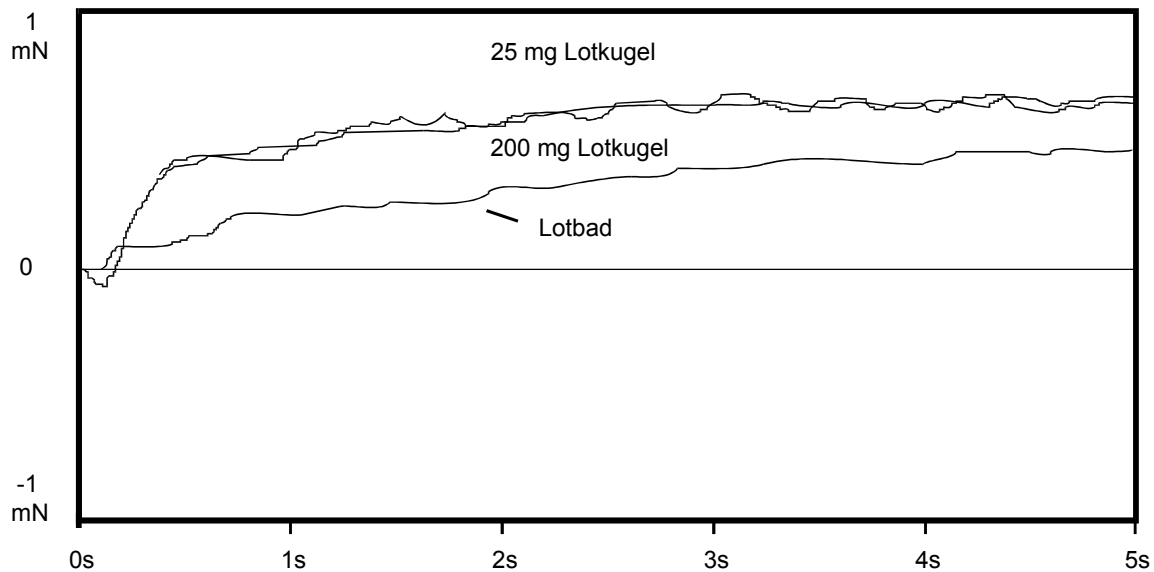


Abb. 2.17 Benetzungskurve eines SOT 23 Bauteils mit dem Lotbad und der Mikrobenetzungswaage mit zwei Lotkugelgrößen.

1.5.6 WÄRMEBEDARF UND BENETZUNGSFÄHIGKEIT

Ein Bauteil mit mehreren Anschlüssen kann mit dem Lotbad getestet werden; dabei wird eine komplette Anschlußreihe geprüft. In diesem Fall wird die Lötbarkeit als Kombination sämtlicher Anschlüsse dargestellt.

Oft ist es wünschenswert, die Lötbarkeit einzelner Anschlüsse zu schätzen; obwohl sie einzeln entfernt und mit dem Lotbad geprüft werden können, ist die Auflösung im allgemeinen gering.

Der Wärmebedarf einzelner Anschlüsse bei einigen Halbleitern ist sehr unterschiedlich. Bei gleicher Benetzungsfähigkeit kann die Lötbarkeit durchaus differieren. Durch den geringen Krümmungsradius der Lotkugel können einzelne Anschlüsse eines Bauteils getestet werden, ohne daß die Anschlüsse entfernt werden müssen. Ein extremes Beispiel der Wärmeauswirkung findet man bei einem SOT 89, bei dem der mittlere Anschluß eindeutig eine größere Wärmeleistung hat als die beiden äußeren Anschlüsse.

Abb. 2.18 zeigt die Benetzungskurve eines SOT 89 mit der 200 mg Lotkugel. Bei dem mittleren Anschluß dauert es sehr viel länger, bis die Löttemperatur erreicht ist, da die Wärme in die große Metallfläche des Bauteilanschlusses abfließt. Bei Erreichen der Löttemperatur ist die Benetzungsfähigkeit der beiden äußeren Anschlüsse sehr ähnlich, durch die Kombination zwischen Wärmebedarf und Benetzungsfähigkeit erhält man jedoch unterschiedliche Lötbarkeitsergebnisse.

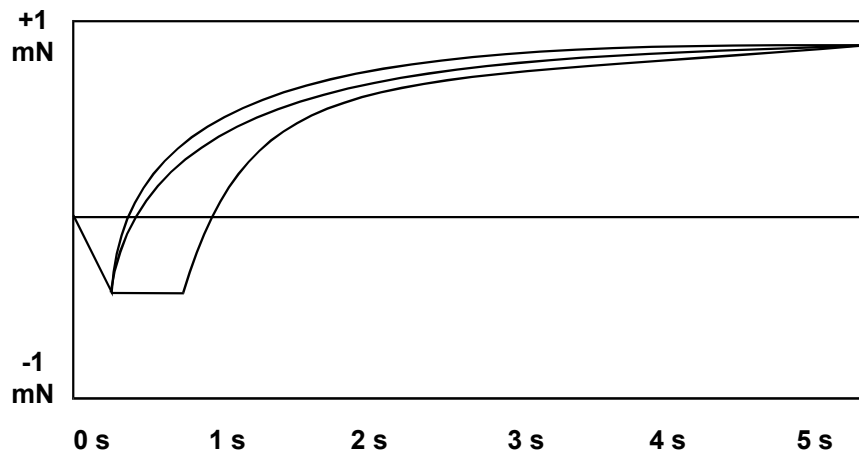


Abb. 2.18 Benetzungskurve, an der der Wärmebedarf eines SOT 89 ersichtlich ist.

1.5.7 AUSRICHTEN DES BAUTEILS

Die Benetzungswaage mit dem Lotbad eignet sich ausgezeichnet für die Prüfung von Bauteilen mit einem gleichmäßigen Querschnitt, die vertikal in das Lotbad getaucht werden. Leider fallen nur wenige SMT-Bauteile unter diese Kategorie. Bei Ausrichten eines Bauteils muß die zu untersuchende Fläche in möglichst vertikaler Richtung ohne Einschränkung des Meniskusanstiegs eingetaucht werden. Dies gilt vor allen Dingen für Bauteile mit geformten Anschlüssen.

Bei der Prüfung von Bauteilen mit geformten Anschlüssen darf der Kontaktwinkel nicht auf Null fallen, ehe das Lot noch nicht die zu prüfende Fläche erreicht hat. Ist der Kontaktwinkel auf Null gefallen, kann das Lot nicht mehr an dem Bauteilanschluß aufsteigen. Deshalb müssen "Gull Wing" -Bauteile im allgemeinen mit einem Winkel von 45° eingetaucht werden, so daß die Lötbarkeit der Anschlußunterseite und des Winkels getestet werden können.

Die Flächen eines Bauteils, die nicht mit einer benetzbaren Schicht überzogen sind, dürfen nicht eingetaucht werden. Nicht-benetzbare Teile führen zu Nicht-Benetzung- und Auftriebskräften, mit denen die Lötbarkeitskräfte durch Reduktion der Empfindlichkeit herabgesetzt wird, da das Benetzungssignal einen kleineren Teil der gemessenen Kraft darstellt.

Bei den Bauteilhaltern für die einzelnen Bauelemente wurden diese Faktoren berücksichtigt. In Anhang A ist die Eintauchausrichtung der gebräuchlichsten Bauteilarten dargestellt.

1.5.8 PRÜFUNG VON PCB PADS UND PLATTIERTEN DURCHKONTAKTIERTEN BOHRUNGEN

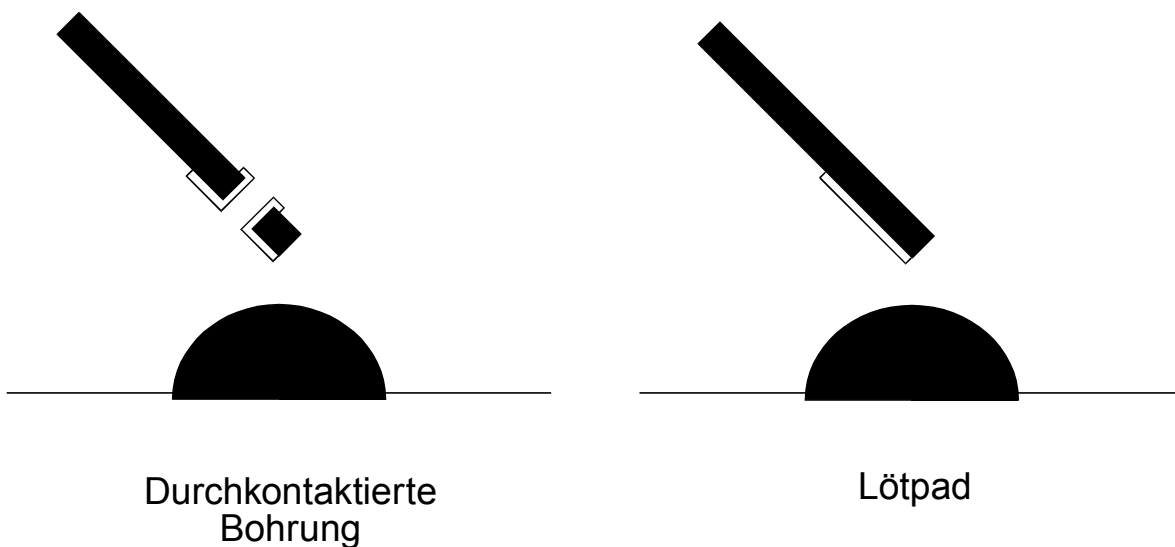
Die Benetzungswaage wurde überwiegend für das quantitative Messen der Lötbarkeit von Bauteilanschlüssen eingesetzt; eine quantitative Prüfmethode für PCB-Pads und durchkontaktierte Bohrungen stellte sich jedoch als weitaus komplizierter heraus.

Bei einer gedruckten Schaltung ist die gesamte Oberfläche mit einem nicht-lötbar Material überzogen. Wird ein Abschnitt einer Leiterplatte genommen und vertikal in geschmolzenes Lot getaucht, ist die Benetzungskraft im allgemeinen sehr gering, da trotz der Benetzung der Leiterbahnen und der Löt pads Einzelheiten der Benetzungskraft aufgrund der Nicht-Benetzungskraft der Platine und der Lötstopmmaske nicht mehr zu erkennen sind.

Mit der Mikrobenetzungswaage ist die Prüfung einzelner Löt pads und durchkontaktierter Bohrungen eines Prüfabschnitts möglich, ohne daß das Lot mit dem nicht-lötbar Material in Berührung kommt.

Der Abschnitt muß so ausgeschnitten werden, daß die metallisierte Fläche des zu prüfenden Löt pads oder der durchkontaktierten Bohrung an der rechten Kante des Ausschnitts herausragt. Dadurch wird sichergestellt, daß die Lotkugel nur mit der Metallisierung und nicht mit dem nicht-benetzbar Material der Platine in Kontakt kommt.

Um weiterhin zu gewährleisten, daß die Lotkugel nicht mit dem nicht-benetzbar Material an den Kanten und auf der Rückseite des Abschnitts in Berührung kommt, beträgt der Eintauchwinkel 45° ; die Pads befinden sich auf der Unterseite des Prüfabschnitts.



Die Pads von SMT-Bauteilen haben generell eine verhältnismäßig kleine Oberfläche. Für eine maximale Benetzungskraft ist eine Eintauchtiefe von 0,1 mm erforderlich, so daß sich der größte Teil des Löt pads oberhalb der Lotoberfläche befindet. Dadurch kann das Lot an eine größtmögliche Fläche fließen und die durch die Abschnittskante hervorgerufene Nicht-Benetzungskraft wird verringert.

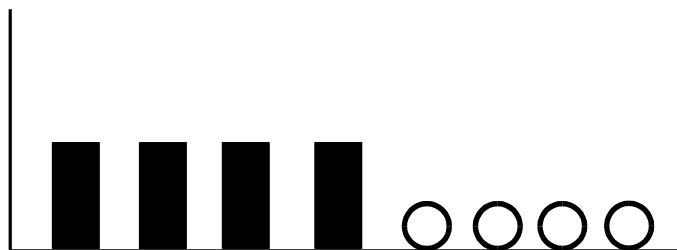
Durch den computergesteuerten X/Y Tisch des MUST II kann die Lotkugel automatisch von einem Löt pad zum nächsten gefahren werden. Die aufgenommene Lot-

menge ist - im Gegensatz zu SMT-Bauteilen - erheblich, so daß die Prüfung einer gesamten Reihe von Löt pads oder durchkontaktierter Bohrungen nicht mit einer einzigen Kugel möglich ist; nach jedem Prüfvorgang ist demzufolge die Lotkugel manuell zu wechseln.

Lotspitzen, die auf den Löt pads oder den durchkontaktierten Bohrungen durch die größere thermische Masse der Platine zurückbleiben, müssen entfernt werden, um eine Berührung mit der Lotkugel während des nächsten Tests zu vermeiden. Nachdem die Lotkugel bei Beendigung des Testzyklus heruntergefahren wurde und ehe sie zur nächsten Position weiterfährt, kann die Lotspitze einfach mit einem Löt kolben auf das Löt pad zurückgeschoben werden.

Für die meisten Löt pads und durchkontaktierten Bohrungen ist eine Prüfdauer von 5 Sekunden ausreichend, da während dieses Testzyklus die Lotkugel gewechselt und Lotspitzen entfernt werden können. Stellt sich dieser Zeitraum als zu kurz heraus, kann er durch Erhöhen der Verweilzeit leicht verlängert werden.

Am besten ist es, Prüfabschnitte in eine Platine zu integrieren, bei der die Löt pads und die durchkontaktierten Bohrungen an der Platinenkante herausragen.



Die Ergebnisse können in ein Schema zur statistischen Prozeßüberwachung übernommen werden, um eine Datenbank mit Test-Grenzwerten zu erstellen.

Für die Prüfungen wird ein aktiviertes Harz-Flußmittel (ACTIEC5) auf die Lotkugel und den Löt pad oder die durchkontaktierte Bohrung gebracht. Hierdurch wird sichergestellt, daß die Lotkugel während des Testzyklus oxidfrei bleibt. Die meisten kleinen SMD-Löt pads können mit der 25 mg Lotkugel auf Lotkugelblock 1 (2 mm) geprüft werden; bei größeren Löt pads kann eine 50 mg oder 75 mg Lotkugel auf Lotkugelblock 1 erforderlich werden, um eine vollständige Benetzung der Löt pads zu gewährleisten.

Bei plattierten, durchkontaktierten Bohrungen mit einem Durchmesser bis zu 1,0 mm die 75 mg Lotkugel auf Lotkugelblock 1 einsetzen, damit die Bohrung gefüllt wird. Größere Bohrungen oder Bohrungen in großen Löt pads oder Leiterbahnen machen unter Umständen den Einsatz einer größeren Lotkugel notwendig.

Die Benetzungskraft zu einem bestimmten Zeitpunkt sollte als Maß für die Lötbarkeit eines Löt pads oder einer durchkontaktierten Bohrung genommen werden. Bei einer Prüftemperatur von 235°C wird empfohlen, diese Kraft nach 2 Sekunden messen.