



PHYSIK DER FEUCHTE
UND PROZESS
DES TROCKNENS
VON LEITERPLATTEN

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

INHALT

1	MOTIVATION _____	3	6	DER TROCKNUNGSPROZESS _____	19
2	FACHBEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN _____	3	6.1.	Begriffsbestimmung Trocknen und Tempern _____	19
3	FEUCHTEGEHALT – EIN GLEICHGEWICHT _____	3	6.2.	Equipment _____	19
3.1.	Physikalische Vorgänge im Detail _____	4	6.2.1.	Umluft-Trockenschrank _____	20
3.2.	Gezielte Änderungen des Feuchtegleichgewichts _____	6	6.2.2.	Vakuum Trockenschrank _____	21
4	FEUCHTE IN LEITERPLATTEN _____	7	6.2.3.	Trockenlagerschrank _____	22
4.1.	Wann sind Leiterplatten trocken? _____	7	6.3.	Vergleich der Ofenarten und Fazit _____	24
4.2.	Messung von Feuchte _____	8	6.4.	Parameter für das Trocknen _____	25
4.3.	Einflussgrößen auf den Feuchtegehalt in Leiterplatten _____	9	6.4.1.	Ermittlung der Feuchtesensitivität _____	25
4.3.1.	Material _____	9	6.4.2.	Ermittlung von Trockenprofilen _____	26
4.3.2.	Verpackung _____	11	6.4.3.	Ermittlung der Feuchteaufnahme unter Lagerbedingungen _____	26
4.3.3.	Lagerung _____	12	6.4.4.	Anmerkung zur Temperatur _____	26
4.3.4.	Layout _____	12	6.4.5.	Trockenzeit, Pausen, Wartezeiten _____	26
4.3.5.	Trocknung _____	14	6.5.	Anordnung der Leiterplatten im Trockenofen _____	26
5	AUSWIRKUNGEN VON FEUCHTE IN LEITERPLATTEN _____	15	6.6.	Praxisbeispiel _____	28
5.1.	Kritische Feuchtegrenze _____	16	6.7.	Logistik im Trockenprozess, Trocknungsprotokoll _____	30
5.2.	Thermische Belastungen _____	16	6.8.	Typische Fehler beim Trocknen _____	30
5.3.	Fehlerbilder _____	17	6.9.	Auswirkungen des Trocknens auf die Lötbarkeit _____	31
			7	ZUSAMMENFASSUNG _____	31
			8	QUELLEN UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR _____	32

1 MOTIVATION

Ziel dieser Sammlung und Interpretation ist es, ein Verständnis für Feuchtigkeit in Materialien, insbesondere in Leiterplatten, zu entwickeln, die Auswirkungen auf die Weiterverarbeitung zu kennen sowie beim Auftreten von feuchter verursachten Problemen gezielte Korrekturmaßnahmen ableiten zu können. Grundsätzlich sind die Überlegungen für alle Arten von Leiterplatten gültig. Im Speziellen für den Einsatz von flexiblen und starrflexiblen Leiterplatten sind diese Grundlagen von hoher Bedeutung, ihre Beachtung kann über Erfolg oder Scheitern entscheiden.

2 FACHBEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN

PCB	Printed Circuit Board
IPC	Weltweiter Verband für Elektronikfertigung
T_g	Glasübergangstemperatur
CTE	Coefficient of Thermal Expansion / Thermischer Ausdehnungskoeffizient (materialspezifisch)
MBB	Moisture Barrier Bag / Feuchtigkeitssperrverpackung
WVTR	Water Vapor Transmission Rate / Wasserdampf-Durchlässigkeitsrate
RH/RF	Relative Humidity / relative Feuchte (auch r.F.) / maximal zulässiger Feuchtegehalt oder auch kritische Feuchtegrenze (bezieht sich nur auf das Harz)

3 FEUCHTEGEHALT – EIN GLEICHGEWICHT

Feuchtigkeit ist Wasser in molekular gelöster Form. Bei Luftfeuchte ist das Wassermolekül in Luft gelöst. Abhängig von den Bedingungen, beispielsweise der Temperatur der Luft, ist die Löslichkeit unterschiedlich hoch. Kühlt feuchte Luft ab, verringert sich die Löslichkeit des Wassers in der Luft und die Feuchte kondensiert zu Wassertröpfchen. Diese bilden Nebel oder freies Wasser in Wolken, es regnet, schneit oder hagelt sogar aus diesen Wolken.

Im Sommer, bei starkem Sonnenschein, können wir am Himmel auch das Gegenteil beobachten: Wolken lösen sich auf, weil die Temperatur der Luft und damit ihre Wasseraufnahme steigen. Die Wolke verschwindet langsam, die absolute Luftfeuchte nimmt zu.

Genauso kann sich Wasser als Feuchtigkeit in Feststoffen lösen und dabei die Eigenschaften der Materialien ändern. Kaminholz wird beispielsweise tagelang getrocknet, damit es besser und rußfrei brennt. Wird trockenes Kaminholz in feuchter Umgebung gelagert, nimmt das Holz Feuchtigkeit aus der Luft auf, wird dadurch schwerer und brennt schlechter. Die sich jeweils langsam einstellende Holzfeuchte ist abhängig von den Umgebungsbedingungen und stellt das Quasi-Gleichgewicht dar zwischen Aufnahme und Abgabe (wird in der Literatur auch als Sorptionsgleichgewicht bezeichnet). Die Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichts ist abhängig von Druck, Temperatur und der Dicke des Holzes.

Ein Beispiel für den Druckeinfluss auf die Löslichkeit von Gasen ist eine Sprudelflasche. Im Sprudel ist CO₂ in Wasser gelöst. Wird die Flasche erstmalig geöffnet, entweicht CO₂ Gas aus der Flasche, wodurch der Druck der Gasphase in der Flasche sinkt und im Sprudel gelöstes Gas desorbiert. Durch das Öffnen wurde das bisherige Gleichgewicht zwischen der Gasphase und der flüssigen Phase verändert. Nun stellt sich ein neues Gleichgewicht bezüglich des Gasgehalts beider Phasen entsprechend den neuen Bedingungen ein.

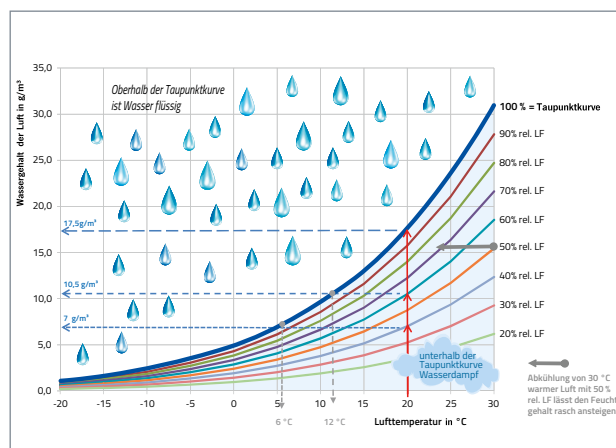


Abb.1: Wasserdampfgehalt in Luft bei verschiedenen Temperaturen [14]

DIESE EINFACHEN BEISPIELE ZEIGEN:



- Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit sind umkehrbare Vorgänge.
- Durch Feuchtigkeit ändern sich Materialeigenschaften.
- Gelöste Feuchtigkeit ist keine Wasserblase im Material. Nur in Poren und Hohlräumen kann sich Wasser in flüssiger Form sammeln.
- Abhängig von den Bedingungen stellen sich in Materialien Feuchte-Gleichgewichte mit der Umgebung ein.
- Durch gezielte Änderung der Bedingungen kann das Gleichgewicht „verschoben“ werden bis zur Erreichung eines neuen Gleichgewichts.
- Diese Erreichung eines neuen, angestrebten Gleichgewichts geschieht nicht spontan, sondern braucht Zeit.
- Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Gleichgewicht einstellt, ist auch abhängig von Druck und Temperatur.
- Sporadisch oder saisonbedingt auftretende Delaminationen beim Löten können ein Indiz dafür sein, dass die Bedingungen im Lager oder der Fertigungsumgebung nicht kontrolliert und geregelt sind.
Im Winter bei niedriger Luftfeuchte gibt es dann selten Probleme!

3.1 PHYSIKALISCHE VORGÄNGE IM DETAIL

Wir betrachten ein System aus Leiterplatte und ihrer Umgebung. Die Oberfläche der Leiterplatte stellt die Grenzschicht im System Leiterplatte/Umgebung dar, die Phasen sind Gasphase, also in diesem Fall die Umgebungsluft, und Festkörper, also die Leiterplatte. Wassermoleküle aus der Umgebung lagern sich an der Oberfläche der Leiterplatte an (Adsorption). Gleichzeitig lösen sich auch Wassermoleküle von der Oberfläche ab, sie desorbieren und lösen sich in der Luft. Im Gleichgewicht ist die Adsorptionsrate gleich der Desorptionsrate.

Ein anderes Gleichgewicht stellt sich im Inneren der Leiterplatte ein: Wassermoleküle diffundieren in den Festkörper hinein (Absorption) und im Quasi-Gleichgewicht in gleichem Maße wieder aus dem Material heraus an die Oberfläche, von dort können sie wieder absorbiert oder desorbiert werden. Grundsätzlich verteilt sich die Feuchtigkeit in Form von Wassermolekülen gleichmäßig durch Diffusion sehr langsam im Festkörper, jedoch abhängig von der stoffspezifischen Feuchteaufnahme des jewei-

ligen Materials in den unterschiedlichen Schichten. Eine Feuchtwanderung in die Leiterplatte durch Poren und Kapillaren (Kapillarkondensation) wie bei Baustoffen (Putz, Beton, Holz oder Mauerwerk) findet aber bei fachgerecht hergestellten Leiterplatten nicht statt.

„Die Triebkräfte einer Diffusion sind verschiedener Art, wobei man zwischen Diffusion in einem isothermen und nichtisothermen System unterscheidet. In einem isothermen System beruht der Diffusionsprozess auf mechanischen Triebkräften; das sind Partialdruck- oder Konzentrationsgradienten. Da „... ein elektronisches System...“ nicht als isothermes System aufgefasst werden kann, muss ein weiterer Effekt berücksichtigt werden - der Thermodiffusionseffekt (Soret-Effekt). Die Diffusionstriebkräfte resultieren hier zusätzlich aus einem Temperaturgradienten... „Der Diffusionskoeffizient ist eine Materialkonstante, die vom Partialdruck, der Temperatur und von der Konzentration abhängt.“ [1]

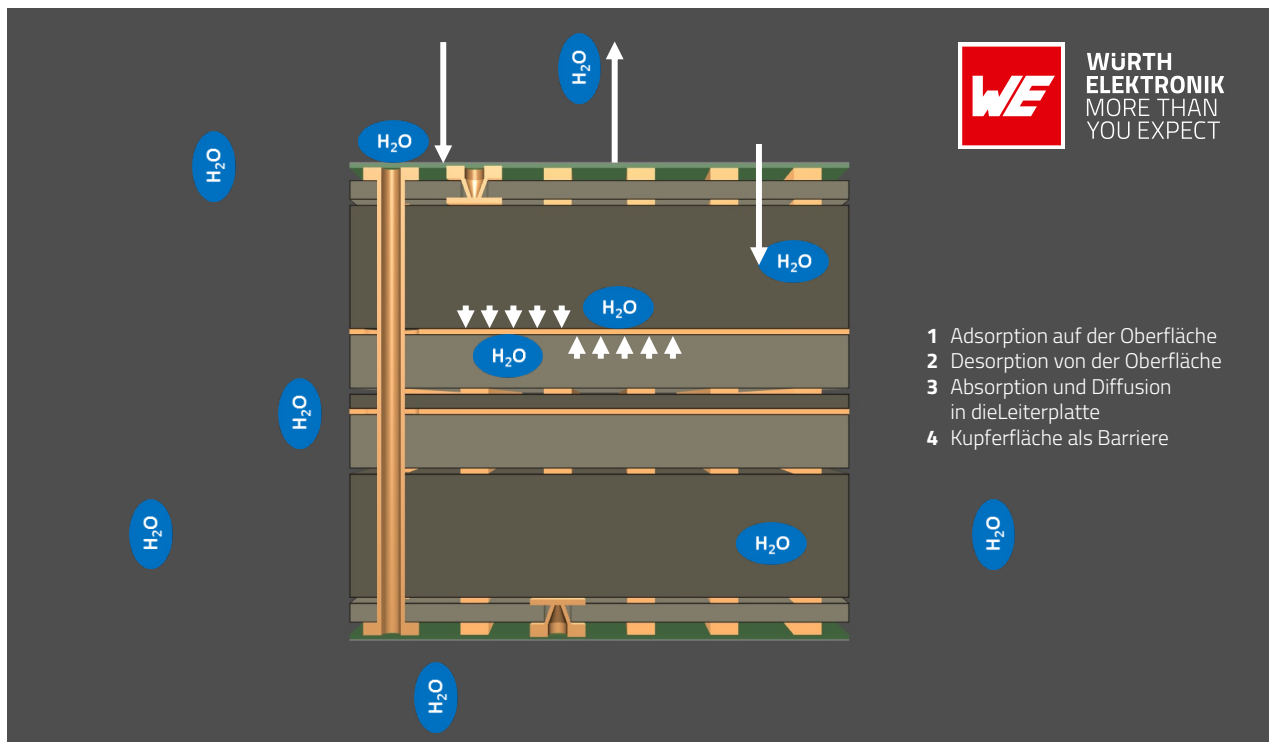


Abb.2: Feuchteprozesse im System Leiterplatte-Umgebungsluft

Die Diffusionsgeschwindigkeiten der Wassermoleküle im Festkörper sind sehr gering, können aber durch die Erhöhung der Temperatur erhöht werden (Arrhenius-Gesetz). Diffusionskonstanten im Harz liegen im Bereich von 10^{-8} cm²/s. Eine Veränderung des Drucks in der Gasphase, zum Beispiel durch Anlegen von Vakuum, wirkt ausschließlich nur an der Grenzschicht der Phasen Luft – Leiterplatte, nicht im inneren der Leiterplatte. Die Diffusionsgeschwindigkeit im Festkörper kann dadurch also nicht beeinflusst werden, wohl aber die Desorptionsrate. Da die Leiterplatte aus vielen unterschiedlichen, festen Materialien besteht, gibt es im Inneren des Festkörpers

viele weitere Grenzschichten. Diese werden im Weiteren wichtig unter dem Gesichtspunkt „Auswirkung von Feuchte“, Kapitel 4 (Klebeprozesse und Haftkräfte).

Eine Besonderheit dieser Grenzschichten ist es, dass sich Feuchte bevorzugt an ihnen anreichern kann. Die aneinandergrenzenden Materialien bieten auf Grund ihrer unterschiedlichen Art und Struktur eine gewisse „Keimwirkung“. Die daraus resultierende, lokal höhere Feuchtekonzentration kann negative Auswirkungen an durch Kleben verbundenen Materialschichtungen haben.

3.2. GEZIELTE ÄNDERUNGEN DES FEUCHTEGLEICHGEWICHTS

Der Pressure Cooker Test (DIN EN 60749-33) wird als Materialtest oder zur beschleunigten Simulation von Umweltbedingungen angewendet. Im Autoklav findet dabei eine Heißdrucklagerung in 100 % rel. Feuchte bei $121 \pm 2 \text{ C}^\circ / 202 \text{ kPa}$ statt. Dadurch werden Schwachstellen hinsichtlich Feuchtebeständigkeit oder durch Alterserscheinungen im Materialverbund schnell detektiert. Hohe Feuchte und hoher Druck sind das Ziel dieses Prozesses.

Um eine Beschädigung bei den Lötprozessen zu vermeiden, kann es erforderlich sein, Leiterplatten unmittelbar vor der Bestückung in einem geeigneten Ofen zu trocknen. Zum Trocknen muss das Feuchtegleichgewicht in die gewünschte Richtung verschoben werden. Dabei müssen beide oben beschriebenen Gleichgewichte betrachtet werden:

- **Umgebung:**
Der Feuchtegehalt der Umgebungsluft muss reduziert werden, damit die Desorptionsrate höher wird als die Adsorptionsrate. Damit wird verständlich, warum ein Haushaltsbackofen, der grundsätzlich auch zum Dampfgaren geeignet ist, zum Trocknen nicht funktionieren kann. Ein geeignetes Trocknungsequipment muss eine Ablufteinrichtung haben, die das Entweichen der Feuchtigkeit aus dem Trocknungsraum ermöglicht oder gar fördert.
- **Trocknungsgut Leiterplatte:**
Ein Festkörper aus vielen unterschiedlichen Materialien mit Grenzschichten. Die Dimension Dicke (z-Achse) ist gering im Verhältnis zu Länge und Breite. Dieses Verhältnis wird für den Trocknungsprozess entscheidend, sofern der Diffusionsweg in z-Achse behindert ist.

AUS DIESEN BETRACHTUNGEN KÖNNEN WIR FOLGERN:



- Für eine Trocknung muss sowohl der Feuchteabtransport außerhalb der Leiterplatte wie auch die Feuchtediffusion innerhalb der Leiterplatte betrachtet und beeinflusst werden.
- Kupferflächen wirken als Diffusionssperre und können die Feuchtediffusion und damit ein effizientes Trocknen behindern.
- Unterschiedliche Materialien können unterschiedliche Feuchtaufnahme aufweisen.
- Übergänge von einem Material zu einem anderen Material bilden sogenannte Grenzschichten. Feuchte kann sich bevorzugt an solchen Grenzschichten anlagern.

4 FEUCHTE IN LEITERPLATTEN

4.1. WANN SIND LEITERPLATTEN TROCKEN?

Genau genommen sind Leiterplatten nie vollständig trocken, also ohne Feuchte. Während der Herstellung einer Leiterplatte durchläuft diese viele Nassprozesse und ist der Luftfeuchte der Umgebung ausgesetzt. Trocknungsprozesse während der Produktion zielen meist nur auf die Trocknung der Oberfläche für den nachfolgenden Prozess ab.

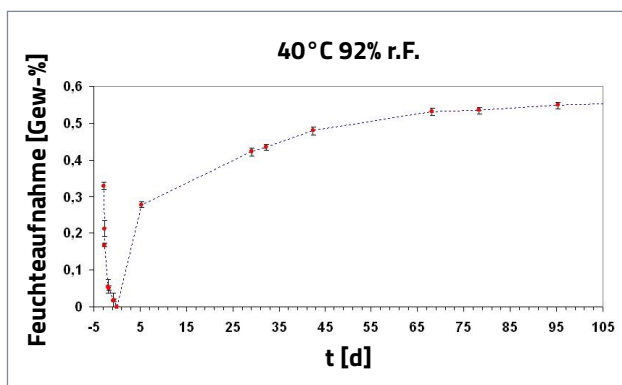


Abb.3: Trocknung und anschließende Feuchteaufnahme FR4 Multilayer [4]

Aus der Produktionsumgebung und den Prozessen hat diese Leiterplatte im Beispiel oben knapp 0,2 Gewichtsprozent Feuchte aufgenommen. Durch 24 Stunden Trocknung wurde danach das Trockengewicht ermittelt und anschließend einem feuchten Klima ausgesetzt.

Ist eine Leiterplatte perfekt getrocknet, also unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g des Basismaterials, kann immer noch ein Rest Feuchte im Epoxidharz gebunden sein, der nur oberhalb T_g entfernt werden kann [9]. Andererseits nimmt eine getrocknete Leiterplatte auch sofort wieder Feuchte auf, sobald sie aus dem Trockenequipment entnommen wird. Deshalb müssen nachfolgende Prozesse und deren Logistik perfekt mit dem Trocknungsprozess koordiniert werden. Dünne Polyimidfolien haben bereits nach zwei Stunden den Großteil der möglichen Feuchte wieder absorbiert!

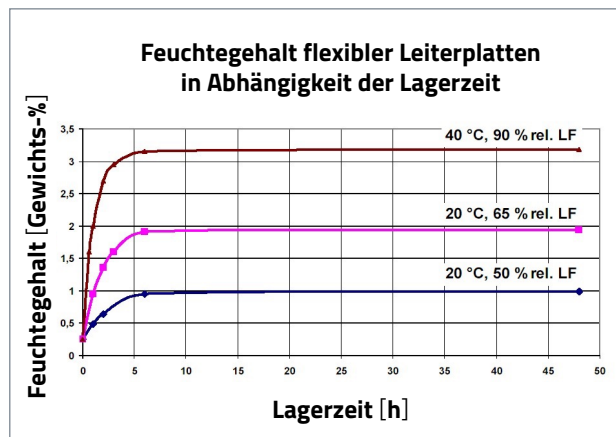


Abb.4: Feuchtegehalt flexibler Leiterplatten in Abhängigkeit der Lagerzeit, Quelle: STN Atlas

4.2. MESSUNG VON FEUCHTE

Durch Feuchtaufnahme, also Absorption von Wasser, verändert sich das Gewicht der Leiterplatte. Diese Gewichtsänderung dient als Maß für die Änderung des Feuchtegehalts:

→
$$\text{Feuchteaufnahme [Gew. \%]} = \frac{\text{Gewicht (t=x Tage)} - \text{Gewicht (t=0)}}{\text{Gewicht (t=0)}}$$

- Das Trockengewicht wird durch langes Trocknen ermittelt bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich das Gewicht praktisch nicht mehr verringert.
- Die maximale Feuchtaufnahme bei bestimmten Bedingungen wird durch langes Befeuchten ermittelt bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich das Gewicht praktisch nicht mehr erhöht.

- Gemessen wird mit einer Präzisionsanalysenwaage, Luftbewegungen müssen dabei ausgeschlossen werden, weil die Gewichtsunterschiede sehr gering sind.

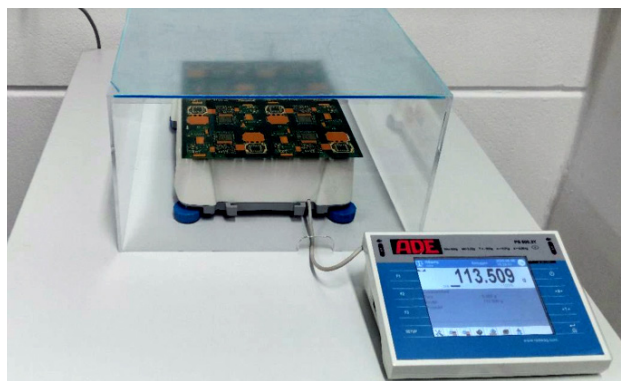


Abb.5: Präzisionsfeinwaage mit Windabdeckung und Prüfling [12]

In welchen Zeiträumen die Feuchtigkeitsaufnahme selbst unter extremen Bedingungen von statten geht, hier bei Tropenklima 40°C und 92% relative Feuchte, zeigt nachfolgendes Diagramm:

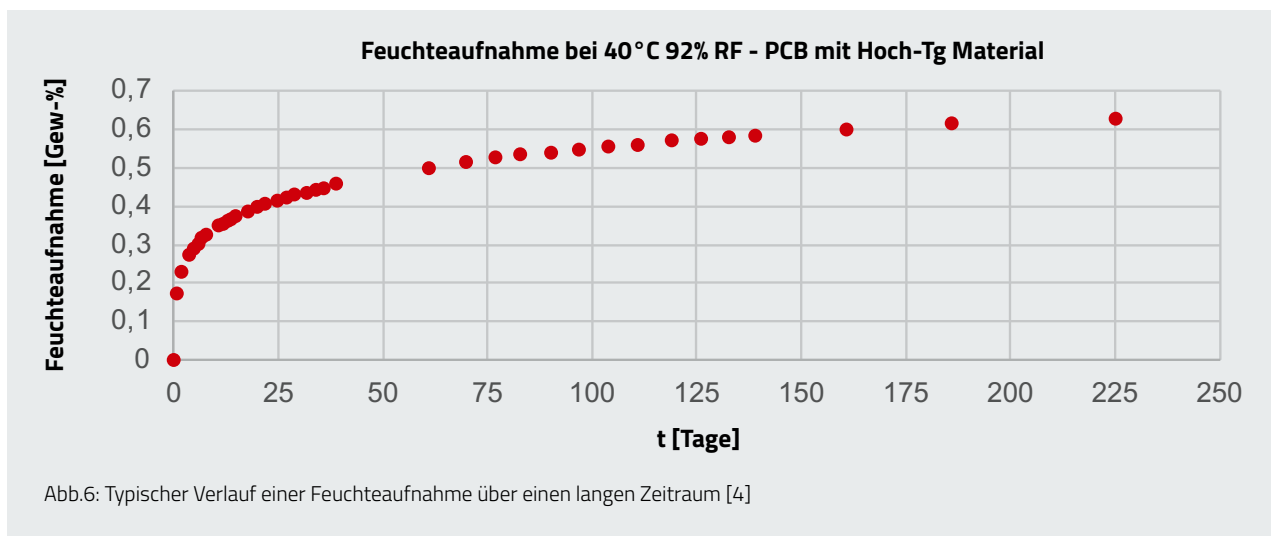


Abb.6: Typischer Verlauf einer Feuchtaufnahme über einen langen Zeitraum [4]

Selbst nach einem halben Jahr ist die Feuchtaufnahme noch nicht abgeschlossen, der Feuchtegehalt nimmt immer noch zu.

4.3. EINFLUSSGRÖSSEN AUF DEN FEUCHTEGEGHALT IN LEITERPLATTEN

DIE MENGE DER AUFGENOMMENEN FEUCHTE HÄNGT VON VIELEN FAKTOREN AB:

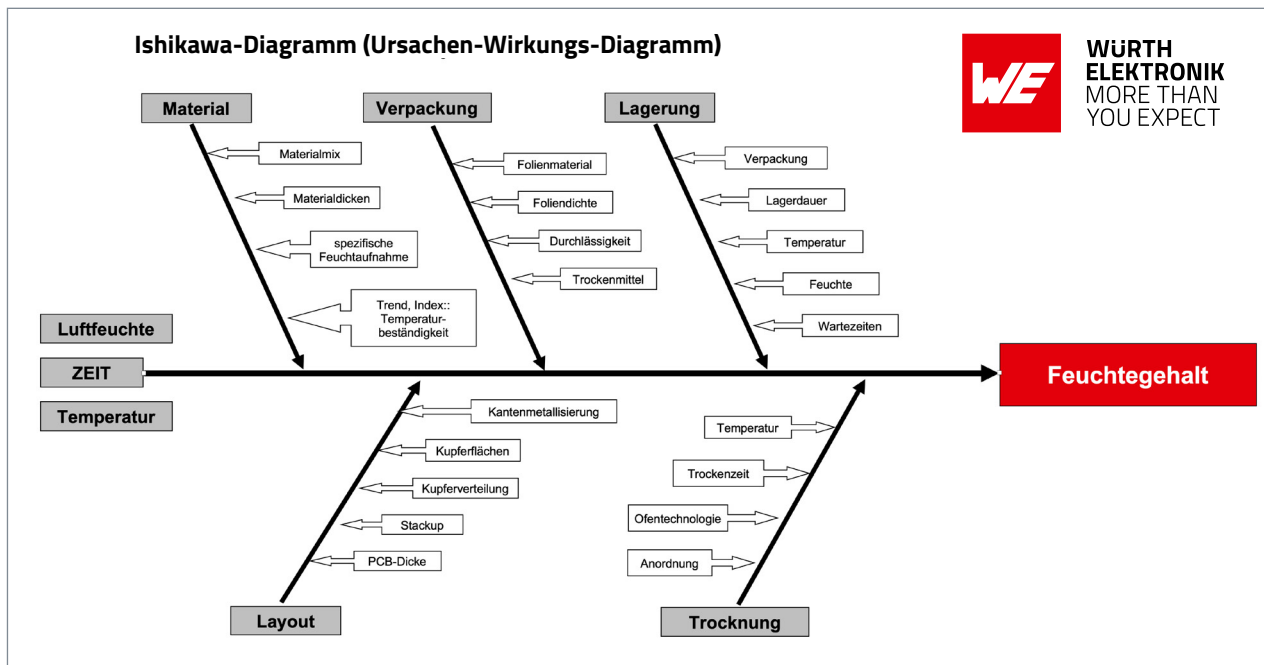


Abb.7: Ishikawa-Diagramm (Ursachen-Wirkungs-Diagramm) „Feuchtegehalt“

4.3.1. MATERIAL

Bezüglich der Feuchtaufnahme und Feuchtedurchlässigkeit unterscheiden sich die Materialien in einer Leiterplatte zum Teil dramatisch.

- Lötstoppmasken zeigen eine Feuchtaufnahme ähnlich Epoxy und stellen für Feuchte keine Barriere dar, sie sind praktisch feuchtetransparent.
- Kupfer nimmt keine Feuchte auf und stellt eine Feuchtebarriere dar. Eine geschlossene Kupferfläche auf den Außenlagen schützt jedoch nicht vor Feuchtaufnahme – dies ist über die offenen Kanten auf längeren Wegen immer noch möglich. Für die Feuchtigkeitseaufnahme wie auch für einen Trocknungsprozess stellt eine große Kupferfläche immer ein Hindernis dar, siehe auch Kapitel 3.3.4 Layout.
- Kunststoffe, wie beispielsweise die Harze des Basismaterials, sind in der Feuchtaufnahme sehr

unterschiedlich und reichen von fast null bei LCP (Liquid Crystal Polymer) über ca. 0,4 Gewichtsprozenten (Gew.%) bei Standardepoxid bis hin zu mehreren Gewichtsprozenten, beispielsweise für Polyimidfolien. In einer Leiterplatte können unterschiedliche Materialien kombiniert sein, zum Beispiel bei Starrflex wird die Kombination aus starren Basismaterialien, flexiblen Polyimidfolien und Deckfolien eingesetzt. Als erster Hinweis bei Epoxy kann die Temperaturbeständigkeit dienen: Mid- und hoch-Tg Materialien zeigen typischerweise eine höhere Feuchtaufnahme im Vergleich zu Tg135 Epoxy.

- Besonderheit Materialmix bei Flex und Starrflex:**
 Je mehr flexible Lagen und damit auch Kleberschichten und Deckfolien in einem Multilayeraufbau vorhanden sind, desto höher ist die Feuchteaufnahme. Der Anteil hygroskopischen Materials ist entscheidend für die Menge der Feuchtigkeit und damit für das Schädigungsrisiko bei fehlender oder nicht ausreichender Trocknung.
 Dabei muss auch beachtet werden, dass in starrflexiblen Leiterplatten die Polyimid Flexfolien auch in den starren Bereichen eingebaut sind, also nicht am Starrflex-Übergang enden, wie oftmals irrtümlich angenommen wird:

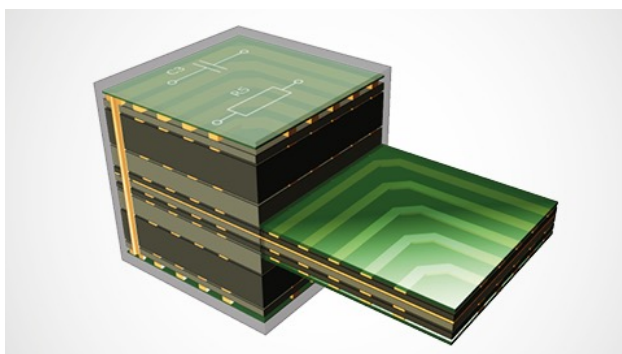


Abb.8: 3D-Darstellung einer Starrflex-Leiterplatte im Aufbau 3Ri-4F-3Ri

Bei innenliegenden Flexfolien ist die Diffusionsstrecke im starren Bereich bis zur Oberfläche länger als bei einer außenliegenden Polyimidfolie. Folglich trocknen bei starrflexiblen Leiterplatten die außenliegenden, feuchtekritischen Flexfolien schneller.

- Füllstoffe zur Erzielung der Flammwidrigkeit und Reduzierung der z-Achsenausdehnung.
- Verstärkungsmaterialien für die Kunststoffe. Heute wird typischerweise Glasgewebe eingesetzt, seltener sind Papier und Aramidfasern. Je höher der Glasanteil in einem Basismaterial, desto geringer wird der Harzanteil und damit die Menge an absorbierbarer Feuchte.

- Kleberschichten, beispielsweise Acryl- oder Epoxykleber. Acrylkleber kann bis zu 4 Gewichtsprozent Feuchtigkeit aufnehmen, Epoxy typisch 0,3 bis 0,5 Gew.%. Diese Kleberschichten können in flexiblen Basismaterialien oder Multilayerkonstruktionen enthalten sein, auf jeden Fall sind sie Bestandteil von Coverlay Deckfolien und Bondplyfolien.
 Abhängig vom eingesetzten Klebermaterial kann sich bei Starrflex oder Flex-Multilayern ein unterschiedliches Verhalten bei Lötprozessen zeigen. Grundsätzlich sind unter diesem Gesichtspunkt
 - Kleberlose Flexmaterialien zu bevorzugen
 - Starrflexible Konstruktionen mit Prepregs günstiger als Aufbauten mit Acrylkleber
 - Deckfolien mit Epoxykleber oder Polyimidkleber denen mit Acrylkleber vorzuziehen.
- Beschichtungen oder Vergussmassen können je nach ihren Eigenschaften die Feuchteaufnahme reduzieren.

Die Dicke der Leiterplatte hat einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Feuchteaufnahme.

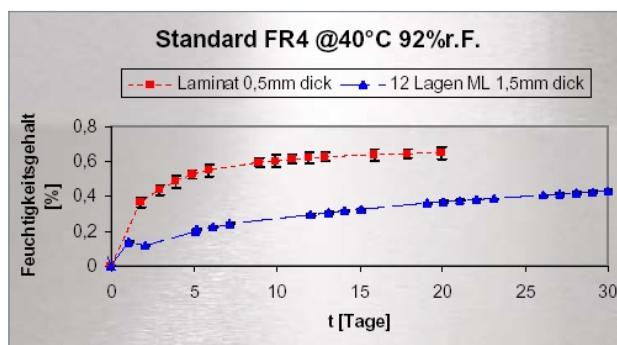


Abb.9.: Feuchteaufnahme bei unterschiedlicher Materialdicke

PHYSIK DER FEUCHTE UND PROZESS DES TROCKNENS VON LEITERPLATTEN

Mit zunehmender Dicke nehmen die Diffusionslängen zu, es dauert also länger, bis sich das Feuchtegleichgewicht eingestellt hat. Beim Trocknen dauert es ebenfalls länger, bis die Feuchtigkeit an die Oberfläche diffundiert und desorbieren kann.

Nachfolgendes Diagramm zeigt neben dem Einfluss der Dicke auch den der Harzqualität:

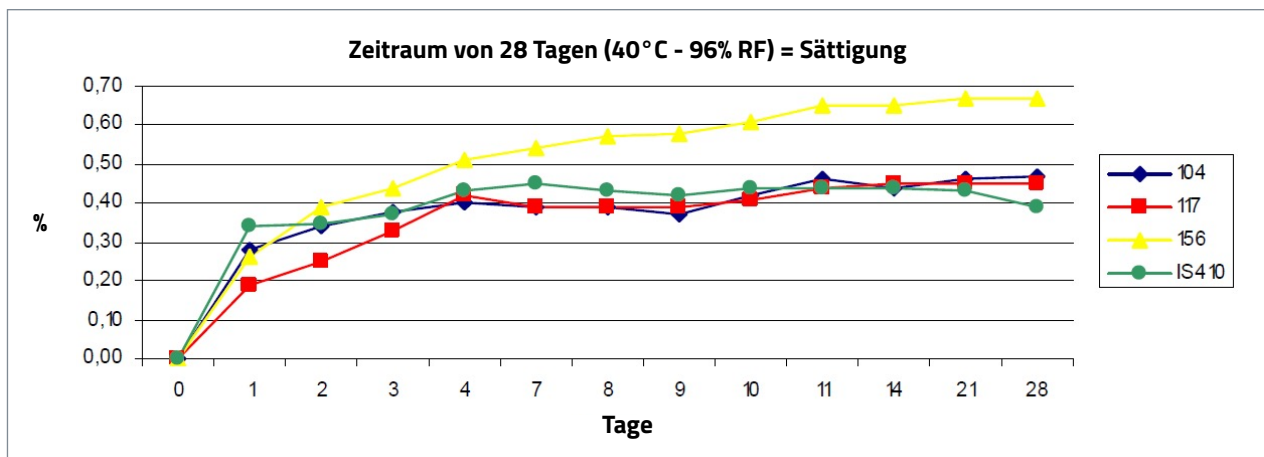


Abb.10: Feuchtigkeitsaufnahme von kupferkaschierten Innenlagen bei verschiedenen Harzqualitäten und Dicken (0,2mm untere Kurvenschar, 1,5mm obere Kurvenschar), [15], bearbeitet

Die Kurven „zeigen den Verlauf der Feuchteaufnahme in nahezu dampfgesättigter Atmosphäre (40 °C, 96% RF) über einen Zeitraum von 28 Tagen. Bei den dünnen Laminaten von 0,2 mm Dicke (Abb. 1) ist bereits nach 14 Tagen und einer Gewichtszunahme von 0,4 bis 0,7 % annähernd Gewichtskonstanz erreicht. Bei Laminaten von 1,5 mm Dicke (Abb. 2) stellt sich diese auch nach 28 Tagen noch nicht völlig ein.

Im Normklima 23 °C, 50% RF (ohne Abbildung) bleibt die Zunahme bis zur Gewichtskonstanz bei beiden Materialstärken auf Werte zwischen 0,25% und 0,35% begrenzt. Bei den Laminaten von 1,5 mm Dicke tritt eine Sättigung nach 3 Monaten ein.“ [15]

4.3.2. VERPACKUNG

Die Standardverpackung von Leiterplatten (PE Schrumpffolie) ist nicht feuchtedicht, sondern stellt für Feuchte ähnlich wie Lötstopplack keine Barriere dar. Auch eine zusätzliche Verpackung in einem PE-Beutel bietet keinerlei Schutz vor Feuchteaufnahme!

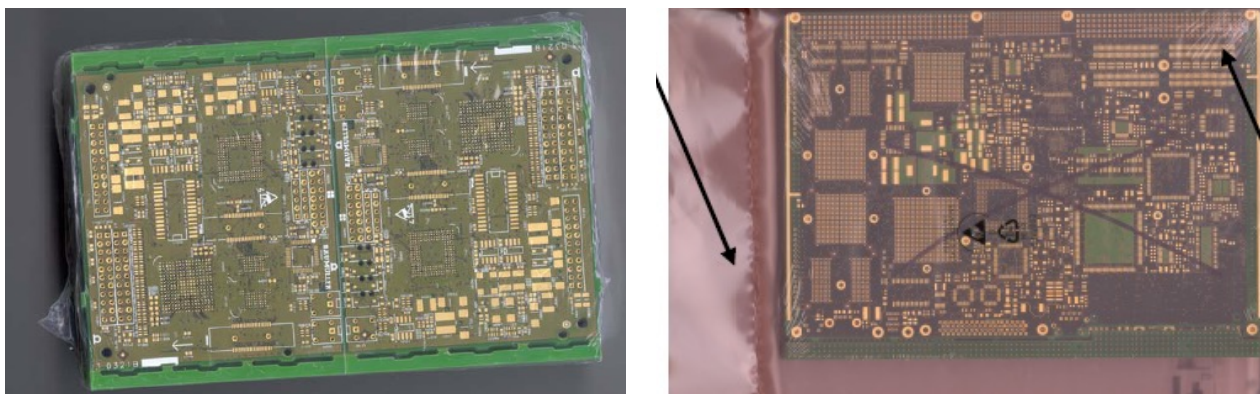


Abb.11: Verpackte Leiterplatten, links in PE-Schrumpffolie, rechts zusätzlich in PE-Beutel 100µm dick

Spezialverpackungen mit Alubeschichtung und definiertem MVTR-Wert (Moisture Vapour Transmission Rate) sind prinzipiell möglich, jedoch sehr material- und zeitaufwändig und damit teuer [9]. Eine Beschädigung der MBB-Verpackung (Moisture Barrier Bag) durch die scharfen Leiterplattenkanten während des Transports muss durch geeignete Maßnahmen sicher verhindert werden. Nach dem Öffnen dieser Verpackungen und bei prozessbedingten Wartezeiten muss die Trockenheit der Leiterplatte wieder durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden.

Bei bekanntermaßen feuchtekritischen Leiterplatten, wie zum Beispiel flexible oder starrflexible, kann die Originalverpackung mit einer Kennzeichnung versehen sein:



Dies ist mit MSL6 bei Bauteilen nach IPC/JEDEC J-STD-033 gleichzusetzen, eine Trocknung vor Weiterverarbeitung ist zwingend erforderlich.

4.3.3. LAGERUNG

Setzt man trockene Leiterplatten einer feuchten Umgebung aus, so stellt sich wieder ein Feuchtgleichgewicht ein. Dieser Prozess dauert viele Wochen, bis eine Sättigung eingetreten ist. In Bezug auf die Feuchte ist es also unter Umständen ein großer Unterschied, ob die Leiterplatten direkt nach der Anlieferung verarbeitet werden oder nach einem halben Jahr. Je nach Lagerbedingungen kann die Leiterplatte ggf. wesentlich feuchter sein oder auch trockener, wenn sie z.B. in einem Trockenschrank gelagert werden.

4.3.4. LAYOUT

Kupfer lässt keine Feuchte durch, ist also eine Feuchtebarriere. Kupferflächen behindern also die Diffusion der Wassermoleküle bei der Feuchtaufnahme, jedoch auch beim Trocknen. Während in der Regel für die Feuchtaufnahme viel Zeit zur Verfügung steht, soll die Trocknung schnell gehen. Deshalb ist es notwendig, Kupferflächen zu rastern bzw. mit Öffnungen zu versehen, damit die Feuchte auf kurzem Weg zur Oberfläche diffundieren kann und nicht wie beispielsweise bei geschlossenen Power-/Grundlagen den langen Weg über die Kante nehmen muss. Nachfolgende Untersuchung zeigt die Zusammenhänge sehr deutlich.

Ein Testlayout mit unterschiedlichen Kupferbelegungen A/B/C/D wurde als doppelseitige Leiterplatte mit einer Dicke von 1,6mm untersucht.

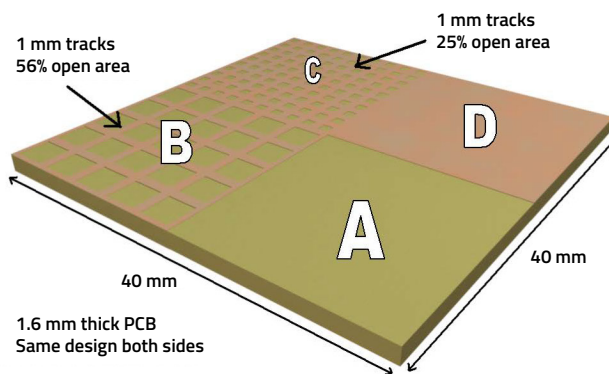


Abb. 12: Layout mit Kupferanteil A (0%) B (44%) C (75%) D (100%) auf Vorder- und Rückseite [8]

PHYSIK DER FEUCHTE UND PROZESS DES TROCKNENS VON LEITERPLATTEN

Nach maximaler Feuchtesättigung wurden 6/15/25/40 Stunden getrocknet und die Restfeuchte in 0,6mm Tiefe in den 4 Sektoren gemessen.

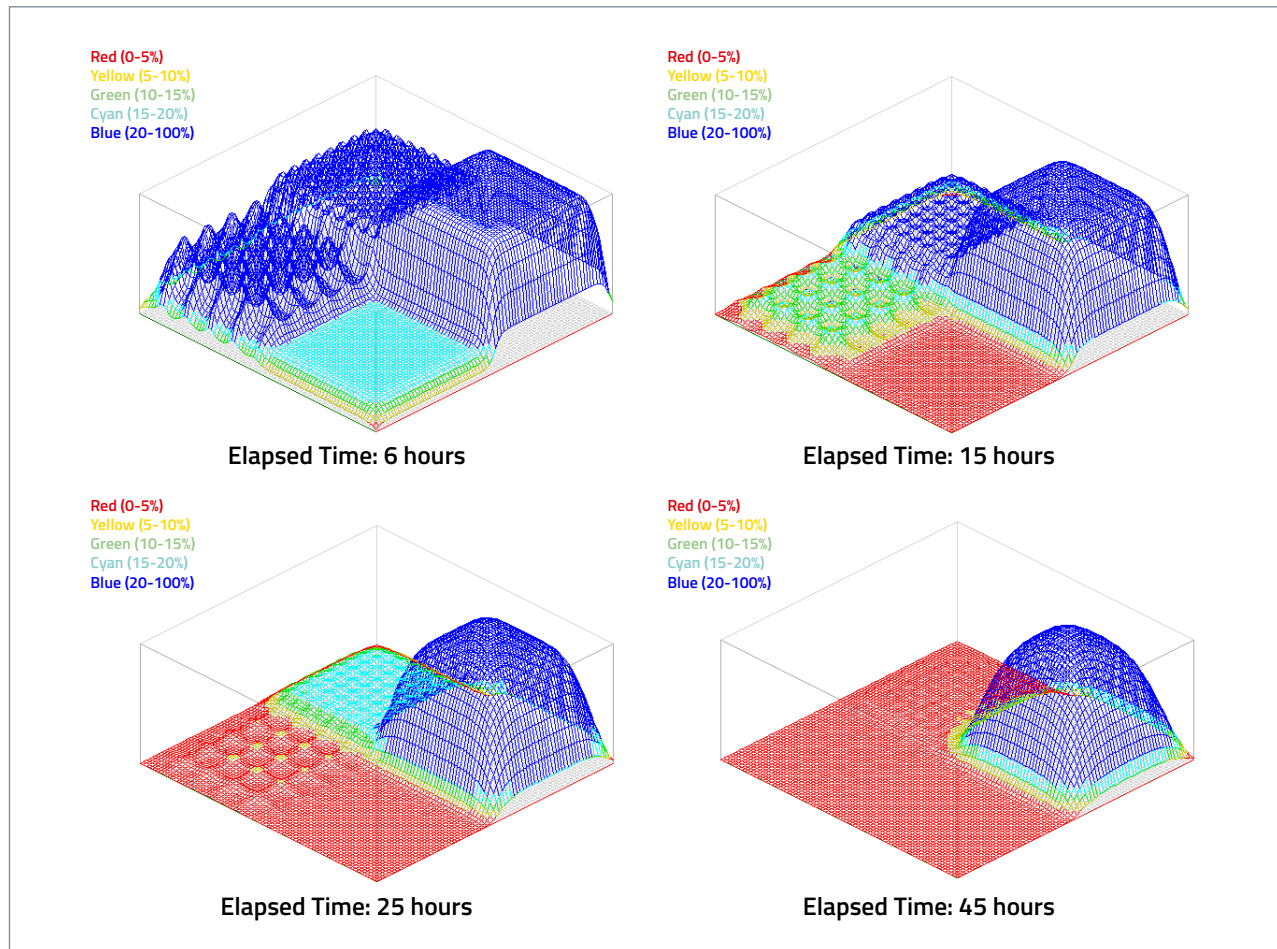


Abb.13: Restfeuchte in der Leiterplatte in 0,6mm Tiefe nach 6 / 15 / 25 / 40 Stunden Trocknung bei 125°C [8]

ERGEBNIS:



- Sektor „A“ = reines Basismaterial ohne Kupfer trocknet gleichmäßig und schnell. Nach 6 Stunden ist weniger als 20% der Ausgangsfeuchte messbar.
- Sektor „B“ mit 44% Kupferbedeckung braucht dafür ca. doppelt so lange.
- Sektor „C“ mit 75% Kupferbedeckung braucht dafür ca. vier Mal so lange
- Sektor „D“ mit geschlossener Kupferbedeckung trocknet nur von den Kanten her, auch nach 45 Stunden hat die Feuchte in der Mitte nur geringfügig abgenommen!

Solche Unterschiede in der Kupferbedeckung gibt es auch in einem einzigen Design. Power- und Logikbereiche können sich zum Beispiel stark unterscheiden, wie nachfolgendes Beispiel zeigt.

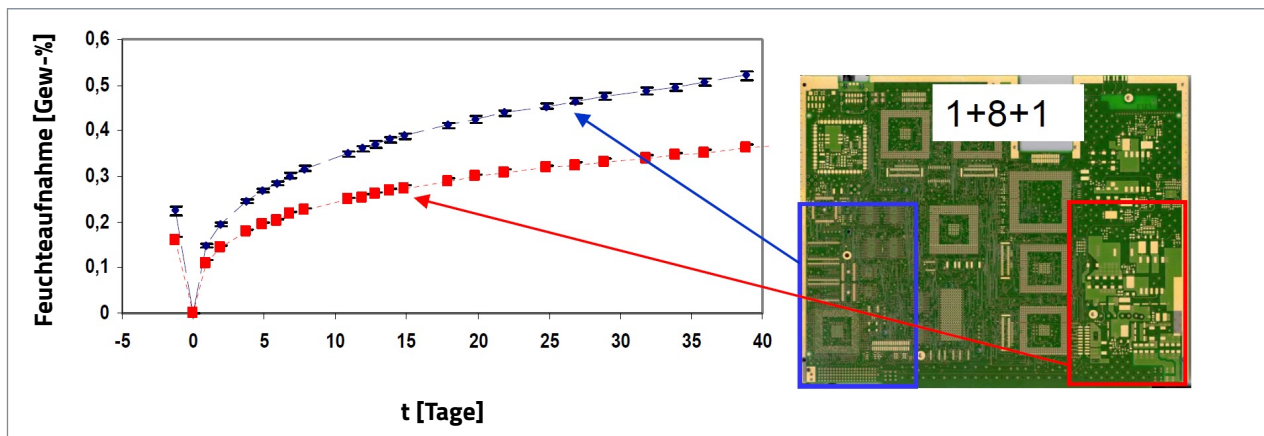


Abb.14: Feuchteaufnahme bei identischer PCB an unterschiedlichen Stellen [4]

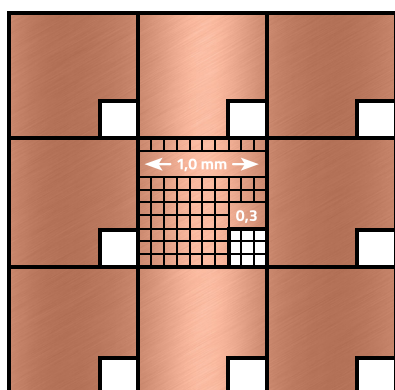
Im Feuchteaufnahme Diagramm kann man erkennen, dass der rote Bereich mit der höheren Kupferbedeckung zu Beginn des Experiments weniger Feuchte aufgenommen hatte. Nach der Trocknung erfolgte hier auch die Feuchteaufnahme deutlich langsamer. Wenn jedoch ausreichend Zeit bis zur Feuchtesättigung durch eine lange Lagerung vergangen ist, muss in einem solchen Fall solange getrocknet werden, bis auch der rote Bereich ausreichend getrocknet ist.

4.3.5. TROCKNUNG

Trocknen ist die Umkehrung der Feuchteaufnahme. Dazu muss die Feuchte im Material an die Oberfläche diffundieren, danach von der Oberfläche desorbieren können. Da die Diffusionsrate temperaturabhängig ist, werden die Leiterplatten in der Regel erwärmt. Zum Trocknungsprozess siehe Kapitel 5.

Unter dem Gesichtspunkt „Design-for-Drying“ ergeben sich somit folgende Punkte:

- Die größte zusammenhängende Kupferfläche ist das kritische Maß für die Trocknung.
- Vollflächige Kupferlagen ohne Unterbrechungen sollten vermieden werden, auch auf Innenlagen.
- Im Bereich von kritischen Signalen, die einen ungestörten Rückstrompfad auf der Referenzlage erfordern, können die Öffnungen entsprechend entfernt oder um das notwendige Maß verschoben werden.
- Bereits kleine Öffnungen im Kupfer stellen Diffusionskanäle für eine Trocknung dar.
- Nachfolgend eine Designempfehlung für Kupferöffnungen aus unseren Designregeln für Starrflex: 0,3mm von 1mm Kupferlänge (bis 70µm Basiskupferdicke)



5 AUSWIRKUNGEN VON FEUCHTE IN LEITERPLATTEN

Feuchtigkeit führt durch den Dipolcharakter des Wassers zu Änderungen der dielektrischen Eigenschaften des Basismaterials. Diese Einflüsse werden jedoch hier nicht weiter vertieft. „Durch Feuchteaufnahme im Laminat quillt die Harzmatrix auf, was zur Verringerung der Glasübergangstemperatur führt. Da Quellvorgänge reversibel sind, kann nach einer Trocknung die ursprüngliche Glasübergangstemperatur wieder erreicht werden.“ [15]

„Feuchte reduziert die kritische Bruchzähigkeit“ und das E-Modul von Polymeren, wodurch eine Rissausbreitung begünstigt wird. Ebenso ändert sich das viskoelastische Verhalten. [21]

Feuchtigkeit in der Leiterplatte führt insbesondere bei hohen Temperaturen zu Schädigung mit Fehlerbildern wie Fehlstellen, Delamination oder Rissen. Dabei entspricht die Vorstellung vom Dampfkochtopf mit hohen Wasserdampfdrücken bei hohen Temperaturen über einer flüssigen Phase nicht den tatsächlichen Verhältnissen während eines Lötvorgangs.

Eine Wasseransammlung mit Phasengrenze flüssig/gasförmig bzw. Änderung des Aggregatzustandes flüssig nach gasförmig liegt ja nur dann vor, wenn es tatsächlich Hohlräume gibt, in denen sich die Feuchtigkeit sammeln konnte. Grundsätzlich verteilt sich dagegen die Feuchtigkeit in Form von Wassermolekülen im Polymer-Festkörper, abhängig von der Feuchteaufnahme des jeweiligen Materials, jedoch mit Anreicherungen an den Grenzschichten (siehe ausführliche Erklärung unter Kapitel 2.1).

Feuchtigkeit kann somit Ursache von Fehlstellenbildung durch Ausgasung oder von Degradation von Kunststoffen sein: Sie kann bei Polyimid durch Hydrolyse an der Oberfläche zu einer Verschlechterung von Bindungen führen [5]. An Grenzschichten wie z.B. Kleberschichten können die Haftungskräfte reduziert werden, was dann auch Ursache für Delamination durch thermische Belastung und Ausdehnung sein kann.

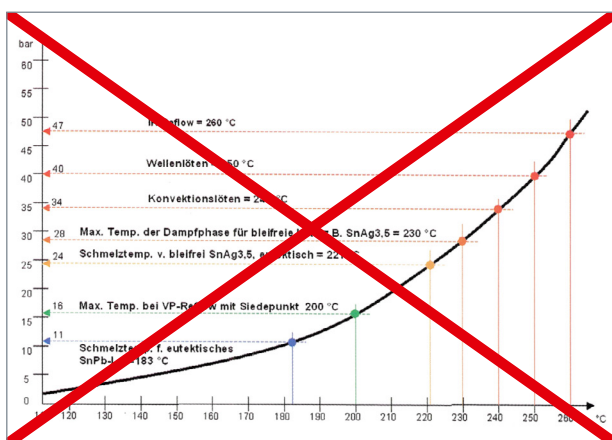


Abbildung 15: Dampfdruckkurve von Wasser [3]

5.1. KRITISCHE FEUCHTEGRENZE

Viele Leiterplattendesigns überstehen Reflow Lötbelastungen ohne Beschädigung, wobei ich hier nochmals anmerken möchte, dass die Absenkung der Peaktemperatur um wenige Kelvin den Stress schon spürbar reduziert. Ausnahmen stellen generell kritische Designs und feuchte-kritische Basismaterialien dar, wie sie beispielsweise bei flexiblen und starrflexiblen Leiterplatten eingesetzt werden. Für solche Fälle sollte die produkt- beziehungsweise designspezifische kritische Feuchtegrenze für die vorgesehene Weiterverarbeitung durch Versuche ermittelt werden, siehe auch Kapitel 6.4.

Eine allgemein gültige kritische Feuchtegrenze gibt es nicht, sie muss für jeden Leiterplattenartikel spezifisch ermittelt werden. Grundsätzlich bestehen folgende Abhängigkeiten:

- Verwendetes Basismaterial oder Basismaterial-Mix
- Lagenaufbau bei Mehrlagenleiterplatten
- Layout, also Kupferdesign
- Lötprofile und sonstige thermische Belastungen

Ist die ermittelte kritische Feuchtegrenze überschritten, ist ein kontrollierter Trocknungsprozess vor Prozessen mit hohen Temperaturen erforderlich. Zur Ermittlung des tatsächlichen Feuchtegehalts kann IPC-TM-650 Methode 2.6.28 angewandt werden.

Die Ermittlung einer kritischen, produktspezifischen Feuchtegrenze ist nur dann möglich und sinnvoll, wenn das Kupferdesign für Trocknung geeignet ist. Die Messung von Feuchte über das Gewicht stellt als Ergebnis einen arithmetischen Mittelwert dar und macht keinen Sinn, wenn Feuchte unter einer großen Kupferfläche beim Trocknen gar nicht entweichen kann, siehe Kapitel 4.3.4.

5.2. THERMISCHE BELASTUNGEN

Durch das Bleiverbot und den Wechsel zu bleifreien Lötprozessen mit höheren Löttemperaturen hat sich die Notwendigkeit von Trocknungsprozessen selbst bei „normalen“ Multilayer aus FR4 merklich erhöht. Je höher der Temperaturstress beim Lötprozess ist, desto höher ist auch das Risiko von Fehlern. Umso mehr gilt das für feuchteempfindlichere bzw. hygroskopischere Materialien, die also mehr Feuchtigkeit als Standard-FR4 aufnehmen. Beispiele dafür sind Aramidfasern, hoch Tg-FR4 oder insbesondere Polyimid, wie es in flexiblen und starrflexiblen Leiterplatten eingesetzt wird. Bei letzterem ist eine trockene Leiterplatte vor dem Löten zwingend erforderlich, was in der Regel durch einen Trockenprozess unmittelbar vor dem Bestücken erfolgt.

Auch geringe Unterschiede im Lötprofil können im Grenzfall über Erfolg oder Schädigung des Substrats entscheiden. So gesehen ist im Lötprozess jeder gut gemeinte „Sicherheitszuschlag“ als kritisch anzusehen. Thermische Belastungen treten außerdem mehrfach auf, je nach Art der Bestückung und Weiterverarbeitung.

Nachfolgend ein Beispiel für eine mögliche Kombination thermischer Belastungen einer Leiterplatte:

- a. Trocknen eines Lötabziehlacks
- b. Trocknen der Leiterplatte vor dem Lötprozess, z.B. 4 Stunden bei 120°C
- c. 1. Vorwärmen der PCB bei 180°C + Reflowlöten bei 230-250°C
- d. Kleberaushärten bei 2-seitig SMD-Bestückung
- e. 2. Vorwärmen der PCB bei 200°C + Reflowlöten bei 230-250°C
- f. Wellenlötung bei 250-270°C
- g. Selektive Wellenlötung partiell
- h. Nacharbeit (eventuell Handlötung, besonders kritisch)**
- i. Reparatlöten (eventuell Handlötung, besonders kritisch)**

PHYSIK DER FEUCHTE UND PROZESS DES TROCKNENS VON LEITERPLATTEN

An dieser Stelle muss besonders darauf hingewiesen werden, dass auch für Nacharbeits- und Reparaturlötprozesse die ausreichende Trockenheit sichergestellt werden muss. Meist hatte die Leiterplatte bis zu diesem Zeitpunkt viel Zeit und nicht optimale, also trockene Umgebungsbedingungen. Sie kann also durchaus mehr Feuchte aufgenommen haben als eine unbestückte Leiterplatte im Anlieferungszustand nach der Produktion.

Starke Temperaturerhöhungen führen in einem Materialmix, wie er bei jeder Leiterplatte immer auftritt, zu Spannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen.

Es liegt also eine Fehlanpassung der Ausdehnungen vor, auch „CTE Mismatch“ genannt (CTE = Coefficient of Thermal Expansion, Wärmeausdehnungskoeffizient). Durch die Verstärkung des Epoxidharzes mit Glasfasergewebe ist FR4 beispielsweise gut an die Ausdehnung des Kupfers in der Ebene angeglichen, jedoch nicht in der Z-Achse. Hier kommt es zu starken Belastungen der Kupferhülle einer metallisierten Bohrung, beispielsweise beim Lötprozess. Je stärker der Mismatch und je höher die Löttemperaturen sind, desto höher ist die thermomechanische Belastung. Diese wirkt auch auf die Grenzschichten.

5.3. FEHLERBILDER

NACHFOLGEND EINIGE FÜR FEUCHTE TYPISCHE FEHLERBILDER:

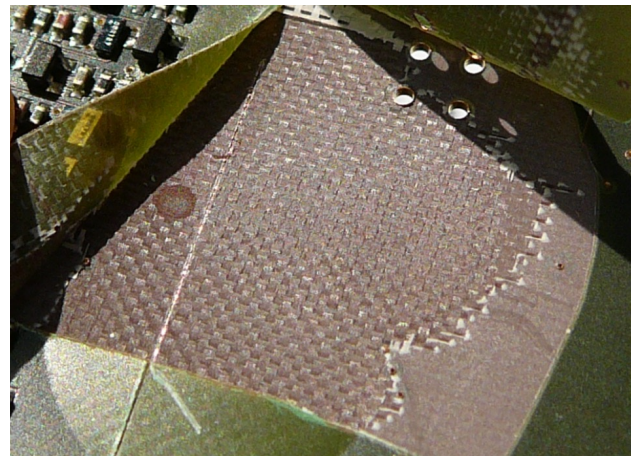
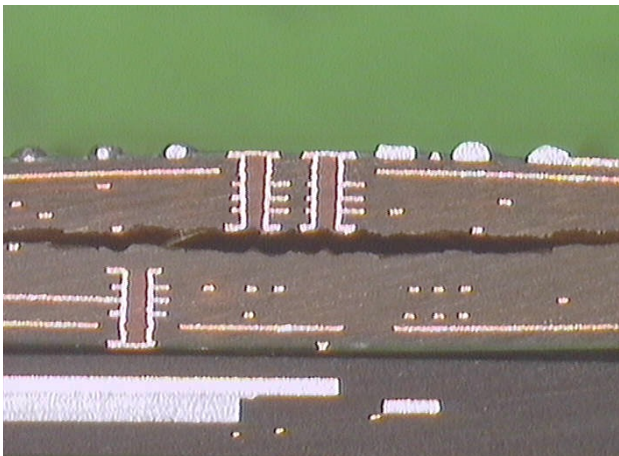


Abb.16: Massive Delamination zwischen zwei „Sub-Stacks“ (links), Blase geöffnet (rechts)

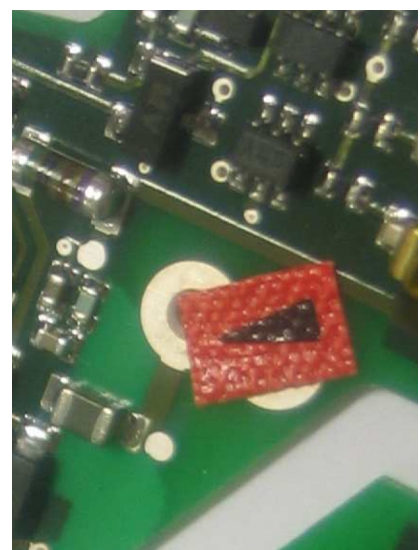
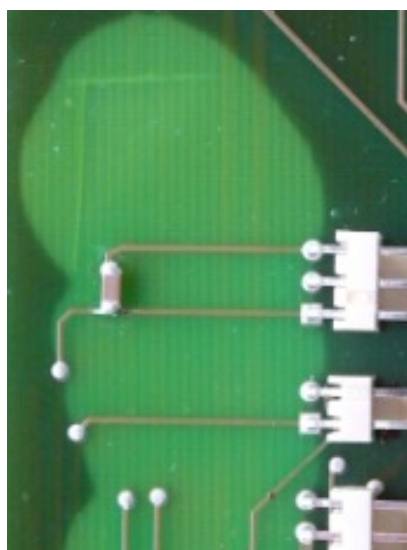
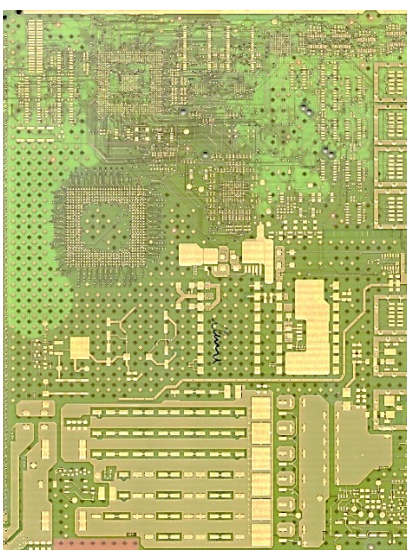


Abb.17: Helle Flächen deuten auf mögliche Delamination hin

PHYSIK DER FEUCHTE
UND PROZESS DES TROCKNENS
VON LEITERPLATTEN

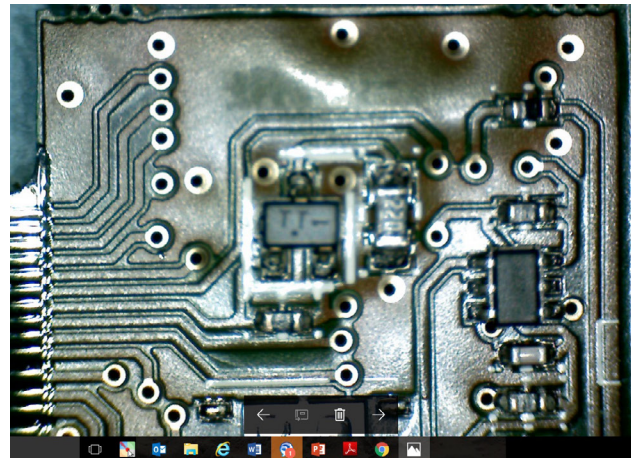
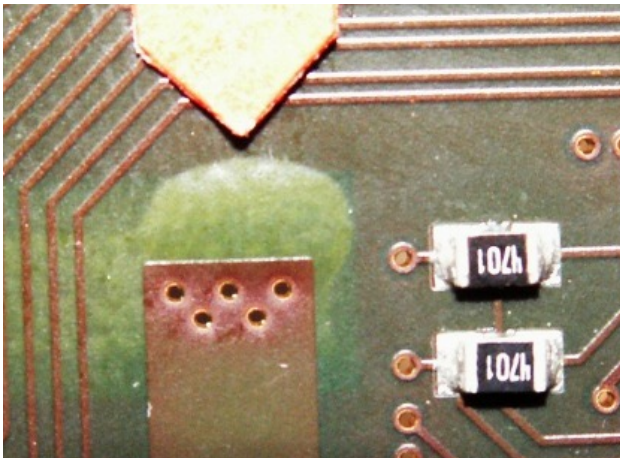


Abb.18: Die großen Kupferflächen sind sicher nicht ganz unschuldig an den blasigen Delaminationen

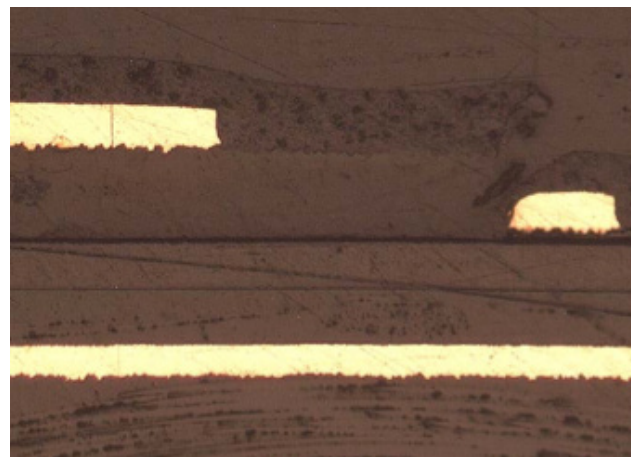
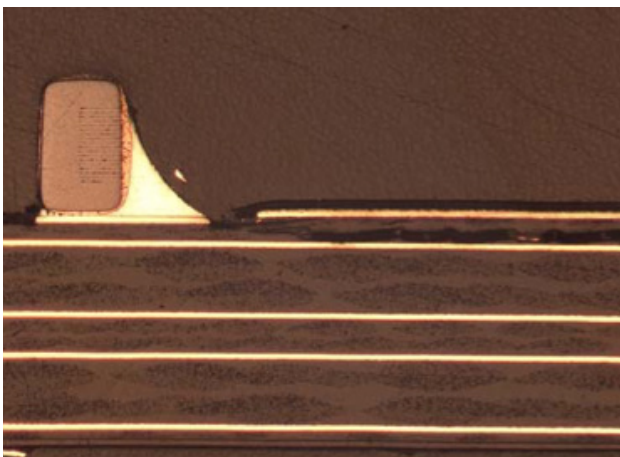


Abb.19: Trennung im Materialverbund – Prepreg (links) und kleberhaltige Flexlage außen (rechts)

Rundliche, helle, blasenähnliche Geometrien sind ein Indiz für die Schädigung des Materialverbunds. Es liegt eine Materialtrennung vor, die meist entlang der Grenzschichten verläuft.

6 DER TROCKNUNGSPROZESS

Für einen Trocknungsprozess muss sowohl der Feuchteabtransport außerhalb der Leiterplatte wie auch die Feuchtediffusion innerhalb der Leiterplatte betrachtet und beeinflusst werden.

Es gibt unterschiedliches Equipment zum Trocknen, das nachfolgend im Detail vorgestellt wird (Kapitel 6.2). Reduziert auf die physikalischen Zusammenhänge unterscheiden sich alle Trocknungsprozesse nur durch die folgenden Parameter:

- **Temperatur** und Temperaturübertragung auf das Trockengut. Die Temperatur hat großen Einfluss auf die Diffusionsgeschwindigkeit in der Leiterplatte.
- **Feuchte** und Möglichkeit der Entfeuchtung. Je geringer die Feuchte im Trockenraum, desto höher ist die Desorptionsrate von der Oberfläche der Leiterplatte.
- Je geringer der von der Leiterplatte aufgenommene Feuchtegehalt, desto schneller kann der kritische Feuchtegehalt unterschritten werden.
- **Zeit**, also notwendige Trockenzeit. Die Trockenzeit ist das Resultat aus Temperatur und Feuchte im Trockenprozess

6.1. BEGRIFFSBESTIMMUNG TROCKNEN UND TEMPERN

Unter „Trocknen“ verstehen wir im Folgenden das Entfernen von Feuchte, während „Tempern“ für das „Erwärmen des Materials mit erhöhten Temperaturen“ steht, „ein Verfahren, um die Stoffeigenschaften von Festkörpern zu verändern. In der Leiterplattentechnik wird das Tempern ... zum Abbau von inneren Spannungen, die sich in Verwölbungen und Verwindungen zeigen, eingesetzt“ [2]. Zum

Tempern müssen Temperaturen oberhalb des Glasübergangspunktes T_g der Harze gewählt werden, während Trocknen in der Regel bei niedrigeren Temperaturen unterhalb T_g stattfindet.

Im Englischen ist auch der Begriff „BAKING“ (beispielsweise IPC-1602) oder „Pre-Bake“ üblich.



Temperatur Trocknen < T_g (Harzsystem) < Temperatur Tempern

6.2. EQUIPMENT

Unabhängig vom Trocknungsprozess ist auf Sauberkeit großen Wert zu legen, denn Verschmutzungen wie z.B. Kondensat-Ablagerungen im Einbrennofen können sich auf der Leiterplattenoberfläche niederschlagen und verschlechtern die Lötbarkeit der Oberflächen unnötig, aber merklich.

6.2.1. UMLUFT-TROCKENSCHRANK

Der Umluft-Trockenschrank hat durch erzwungene Konvektion sowohl eine gute Wärmeübertragung auf das Trockengut als auch eine gute Feuchteabfuhr von der Oberfläche des Trockengutes, sofern diese zugänglich ist. Aufgrund des schnellen Durchwärmens sind diese Geräte sehr effizient und werden sowohl zum Trocknen als auch zum Tempern eingesetzt. Mit Frischluftzufuhr und geführter Abluft kann der Feuchtegehalt der Luft niedrig gehalten werden.

Zur Info: Nachfolgendes Diagramm zeigt die normierte Darstellung von Trockenkurven identischer Leiterplatten bei unterschiedlichen Temperaturen in einem Umluft-Trockenschrank:

Der Unterschied zwischen 80°C und 125°C ist gravierend. Eine weitere Temperaturerhöhung auf 150°C bringt praktisch kaum Verbesserung, erhöht jedoch die Temperaturbelastung stark. Ein grundsätzlicher Nachteil ist das Risiko der Verformung der Leiterplatten bei derart hohen Temperaturen. „Die Trocknung bei 130°C führte bei allen Leiterplattentypen zu Verwerfungen...“ [13]. Mehr dazu in Kapitel 5.5. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Leiterplatten nach der Entnahme aus dem heißen Ofen erst abkühlen müssen, bevor sie in die Bestückungsmagazine umgesetzt werden können.

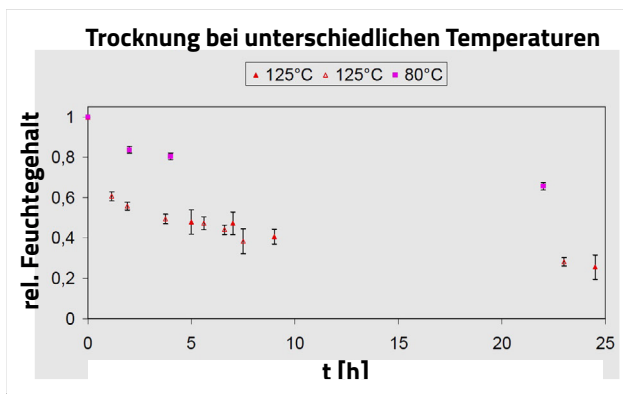


Abb.20: Trockenkurven bei unterschiedlichen Temperaturen [8]



Abb.21: Beispiel für einen kleinen Umluft-Trockenschrank [7]

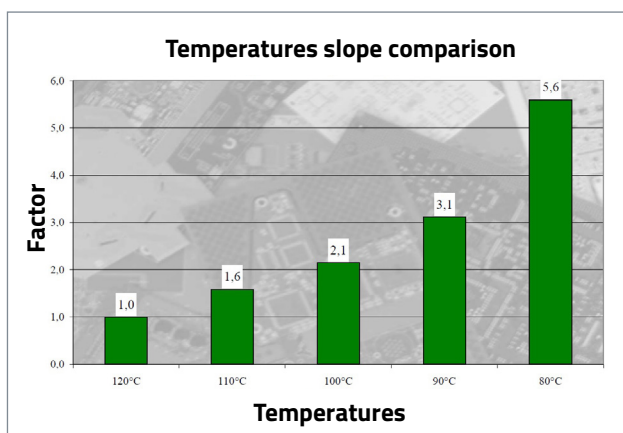


Abb.22: Vergleich der Trocknungszeitenfaktoren bei verschiedenen Temperaturen [6]

6.2.2. VAKUUM TROCKENSCHRANK

Vakuum wirkt erst dann, wenn die Wassermoleküle an der Oberfläche sind. Diesbezüglich sind Diagramme mit niedrigen Siedepunkten von Wasser bei Druckverringering

irreführend, weil es diesen „Wassertopf“ ja nicht gibt. Das Vakuum führt allenfalls zu einer höheren Desorptionsrate.

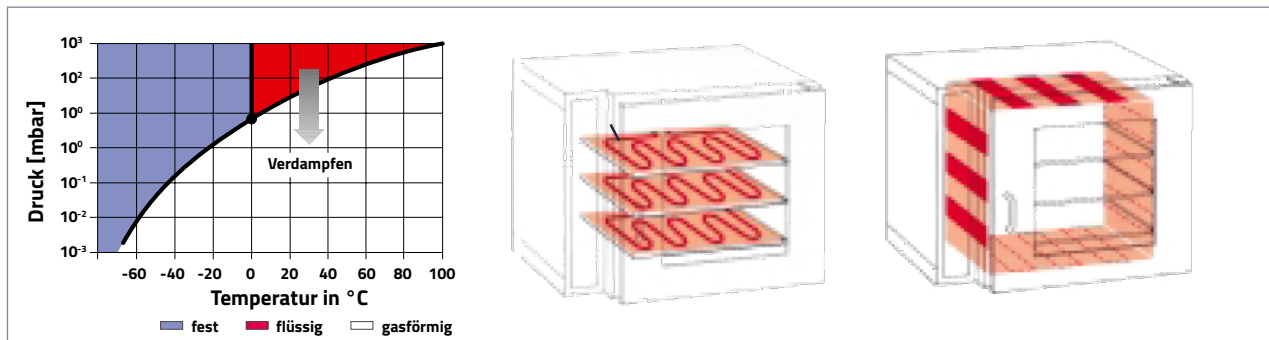


Abb.23: Siedepunktniedrigung durch Vakuum, Platten- und Mantelheizung (von links nach rechts) [7]

Schwieriger ist im Vakuum die Erwärmung des Trockenguts: Mantel- oder Plattenheizungen sind notwendig, Wärmeübertragung durch Konvektion kann Prinzip bedingt nicht stattfinden. Es ist auch ein Prozess mit abwechseln-

der Heizphase und Vakuumphase möglich. Nachteilig, weil teuer ist die aufwändige Vakuumtechnik, ein Vorteil ist die Vermeidung von Oxidation im Vakuum, wodurch Lötfläche und Material geschützt werden.

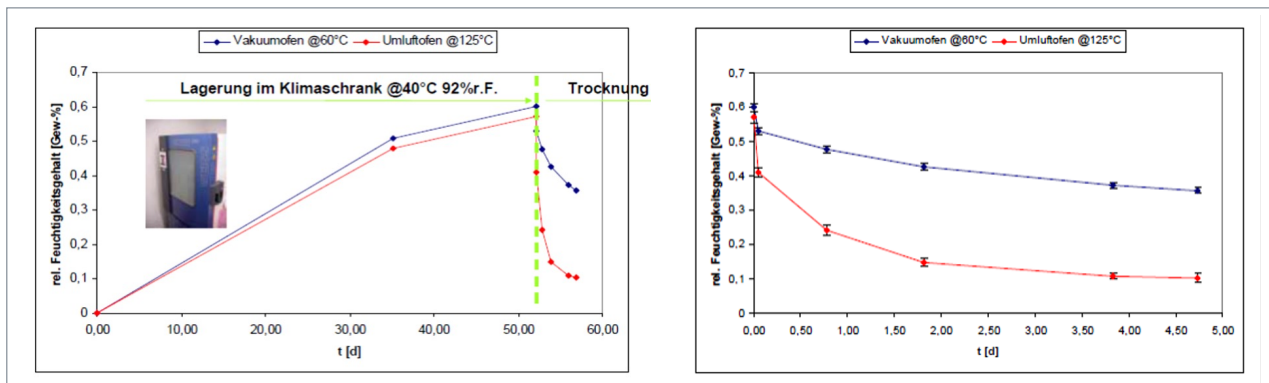


Abb.24: Vergleich Trocknung mit Vakuum versus Umluft von unkaschiertem FR4 1,5mm dick

Die niedrigere Temperatur im Vakuumofen schlägt sich direkt in einer langsameren Trocknung nieder. Erst die Erhöhung der Temperatur auf ebenfalls 125°C führt zu ähnlich schneller Trocknung, wobei der Gewichtsverlust in den ersten Stunden geringer ist, was auf die langsamere Erwärmung des Trockenguts im Vakuum zurückzuführen sein sollte.

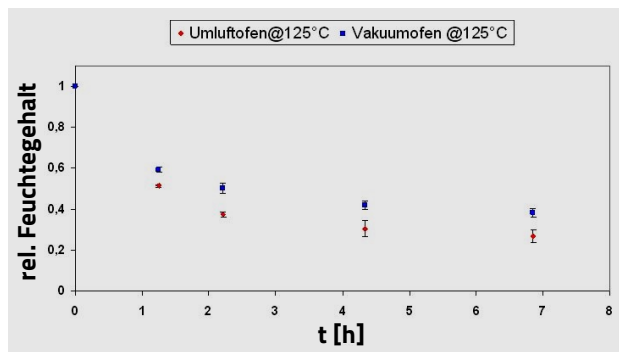


Abb.25: Vergleich Vakuum mit Umluft bei 125°C

6.2.3. TROCKENLAGERSCHRANK

Trockenlagerschränke entfeuchten die Luft im Schrank durch Trockenmittel. Über die Steuerung lassen sich verschiedene Feuchtigkeitsstufen, z.B. 10 / 5 / 2 / 1% RF einstellen. Durch automatische Regeneration des Trockenmittels ist ein kontinuierlicher Betrieb möglich. Vorteilhaft sind die geringen Betriebskosten und die fehlende Temperaturbelastung. So können Leiterplatten

auch in Originalverpackung im Trockenschrank gelagert werden.

Bei Bedarf kann die Temperatur auf 45°C oder 60°C erhöht werden, wodurch eine deutlich schnellere Trocknung erreicht wird (Höhere Diffusionsgeschwindigkeit und höhere Desorptionsrate).

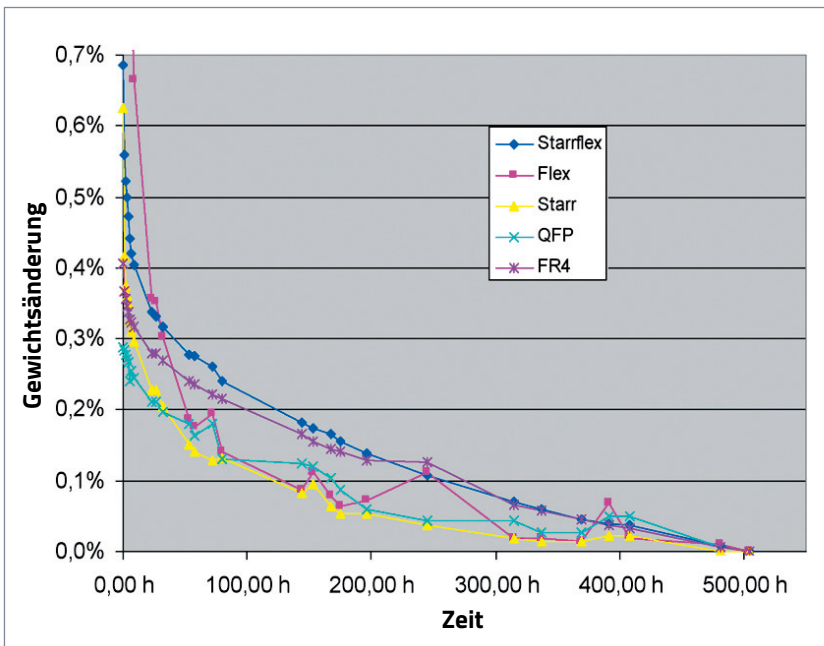


Abb.26: Trocknungskurve im Trockenlagerschrank, 45°C / <1%RF nach Sättigung in 85/85-Klima [13]



Abb.27: Beispiel Trockenlagerschrank [8]

Die Trocknungseffizienz wird von einem Hersteller bei FR4 folgendermaßen beschrieben [8]:

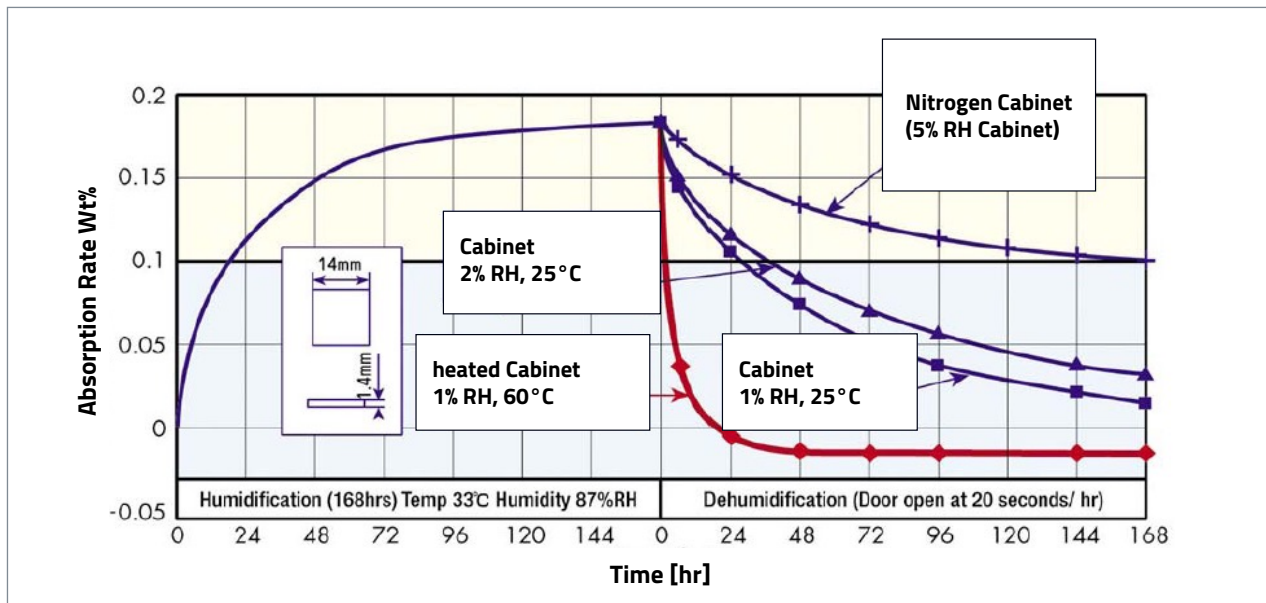
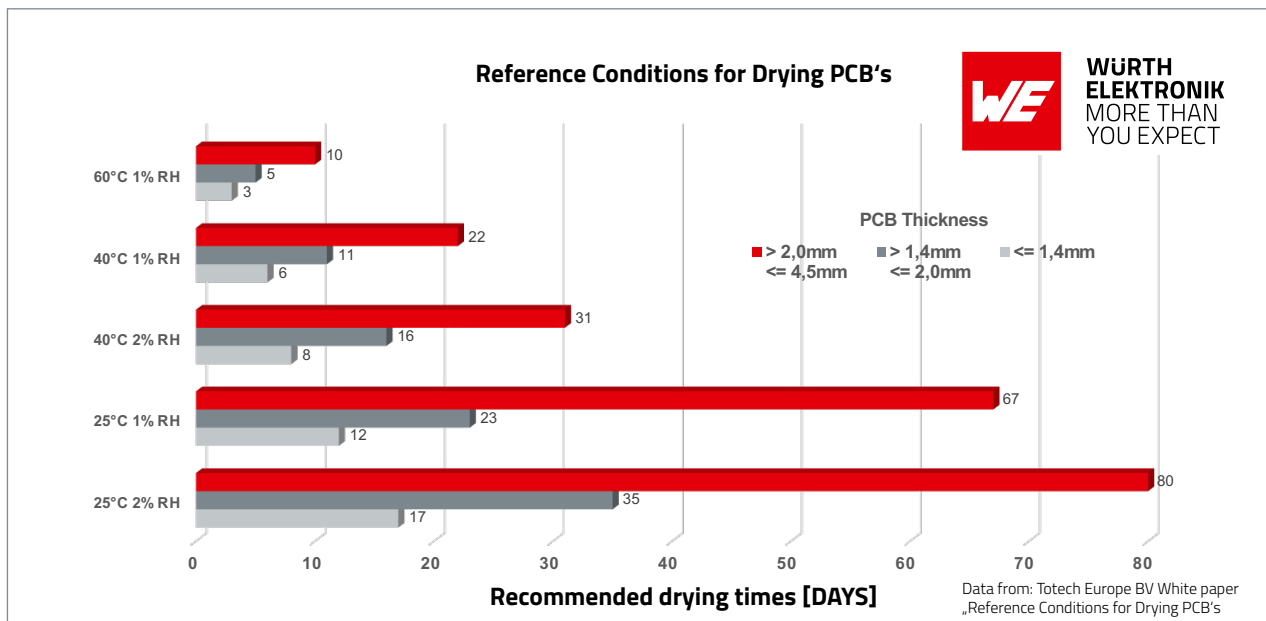


Abb.28: Trocknung von FR4 1,4mm dick im Trockenlagerschrank [8]

Die Grafik zeigt ein paar interessante Aspekte:

- Stickstofflagerung (Nitrogen Cabinet) ist für die Trocknung von Leiterplatten ungeeignet.
- Die Höhe der Feuchte im Trockenlagerschrank hat einen Einfluss über die Desorptionsrate.
- Die Temperatur zeigt, wie zu erwarten, einen großen Einfluss über die höhere Diffusionsgeschwindigkeit.
- Die Proben wurden vor der Befeuchtung nicht getrocknet. Das Trockengewicht ist deshalb geringer als das Ausgangsgewicht, der Feuchtegehalt negativ.

Abschließend folgt eine eigen erstellte Grafik basierend auf Daten der Firma Totech Europe BV:



Bitte beachten Sie, dass die Zeitangaben für das Trocknen in der Einheit „Tage“ sind!

6.3. VERGLEICH DER OFENARTEN UND FAZIT

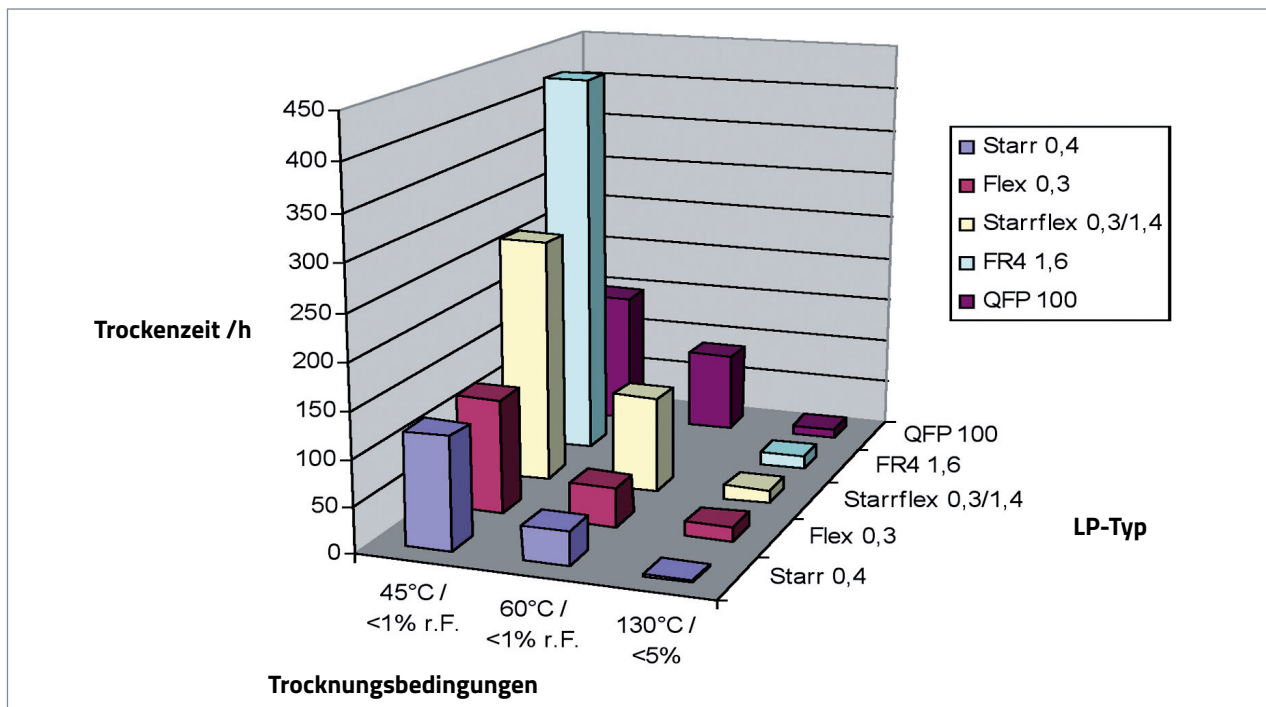


Abb.29: Vergleich der Trockenzeiten bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen [13]

In der Vorstellung der einzelnen Ofenarten wurden bereits viele Eigenschaften, Leistungsunterschiede und Parameter ausgeführt. Abschließend folgt ein letzter Vergleich zwischen den beiden bevorzugten Trockenmethoden Umluft-Trockenschrank und Trockenlagerschrank.

„Die Trocknung von vier verschiedenen Leiterplattentypen im Trockenschrank (korrekt: „Trockenlagerschrank“, Anmerkung der Redaktion) und im Ofen (korrekt: „Umluft Trockenschrank“, Anmerkung der Redaktion) zeigen, dass die drei Methoden der Leiterplattentrocknung bei 45°C/<1%RF, 60°C/<1%RF und 130°C/<5%RF eine klare systematische Staffelung der Trockenzeit nach der Dicke der Leiterplatten und nach den Trocknungsbedingungen aufweist.“ [13]

ALS FAZIT KANN ZUSAMMENGEFASST WERDEN:



- Aufgrund der geringen Diffusionsgeschwindigkeiten im Festkörper Leiterplatte ist der Temperatureinfluss der Vorheizung im Lötprozess für eine Trocknung nicht ausreichend.
- Klimaprüfschränke, Vakuumofen und Stickstofflagerschränke sind eher nicht für einen serientauglichen Trocknungsprozess geeignet, dazu noch mit hohen Unterhaltskosten verbunden.
- Trocknung im Umluft-Trockenschrank bei 120°C ist sehr effizient und schnell, stellt aber eine hohe thermische Belastung und Alterung der Löttoberfläche dar. Das Risiko einer Verformung der Leiterplatten besteht und muss bei der Anordnung der Leiterplatten im Ofen berücksichtigt werden, siehe später.
- Der Trockenlagerschrank ist „...zur schonenden Trocknung von Bauelementen gut geeignet.“ [13]. Dies gilt auch für Leiterplatten. Längere Trockenzeiten müssen jedoch eingeplant werden. Der Trockenlagerschrank ist auch erste Wahl bei der Überbrückung von Wartezeiten für bereits getrocknete Ware.

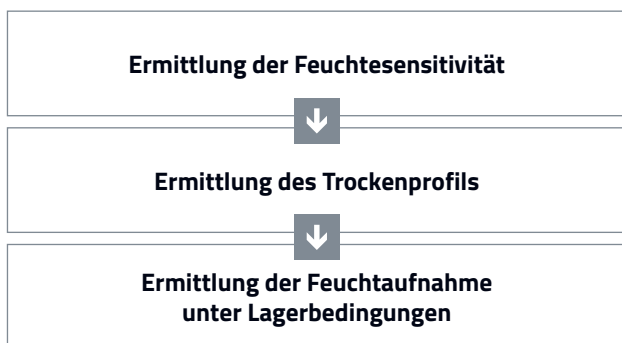
6.4. PARAMETER FÜR DAS TROCKNEN

Trocknungsparameter sind wie bereits ausgeführt von vielen Faktoren abhängig. Dabei spielen das Leiterplatten-design und die Vorgeschichte des „Feuchtelebens“ der Leiterplatte eine Rolle.

- Wieviel Feuchte hat die Leiterplatte absorbiert?
- Welche Entfeuchtung muss erfolgen, damit der folgende Temperaturstress keine Beschädigung hervorrufen kann?
- Welche Trocknungseigenschaften zeigt das eingesetzte Basismaterial beziehungsweise der Materialmix?
- Wie sieht das Leiterplattendesign bezüglich Feuchtaufnahme und Entfeuchtung aus?
 - Leiterplattendicke
 - Platzierung und Größe von Kupferflächen, auch Referenzflächen
 - Versorgungs- und Grundlagen
 - Kantenmetallisierung
- Welche Zeit ohne Feuchteschutz muss zulässig sein?

Trocknungsparameter von Leiterplattenherstellern können hierbei nur als Anhaltswerte oder grobe Empfehlung verstanden werden, denn sowohl die Designeinflüsse als auch die spezifischen Umgebungs-, Trocken- und Lötbedingungen mit der dazu gehörigen Logistik spielen eine entscheidende Rolle und sind dem Leiterplattenhersteller in der Regel gar nicht bekannt.

Folglich müssen produktspezifische Trocknungsparameter durch den Leiterplattenbestücker über folgenden Prozess ermittelt werden:



6.4.1. ERMITTLUNG DER FEUCHTESENSITIVITÄT

Zuerst soll ermittelt werden, ab welchem Feuchtegehalt eine Leiterplatte in einem bestimmten Lötprozess beschädigt wird. Übersetzt aus IPC-1601A 3.3.6: „Die Empfindlichkeit einer bestimmten Konstruktion gegenüber feuchtigkeitsinduzierter Delamination kann durch thermische Belastungstests charakterisiert werden. Die bevorzugte Methode für thermische Belastungstests ist IPC-TM-650 Testmethode 2.6.27. Zusätzliche Reflow-Zyklen können spezifiziert werden, oder die Proben können einer thermischen Belastung bis zum Versagen unterzogen werden, um nützliche Daten zu erhalten oder die Designspanne zu validieren. Für die meisten Designs liegt der maximal akzeptable Feuchtigkeitsgehalt (MAMC) zwischen 0,1 % und 0,5 % des Feuchtigkeitsgewichts zum Harzgewicht.“

An dieser Stelle sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass für das Trocknen ein geeignetes Kupferlayout Voraussetzung ist. Große Kupferflächen müssen durch Kupferöffnungen durchlässig für Feuchte gemacht werden, siehe auch Kapitel 4.3.4.Layout.

6.4.2. ERMITTLUNG VON TROCKENPROFILEN

Layout-spezifische Trocknungsparameter lassen sich durch die Ermittlung von Trocknungskurven festlegen. Dazu werden die Leiterplatten mit Feuchte gesättigt und danach kontrolliert getrocknet, bis sich das Gewicht nicht mehr ändert und die Leiterplatte „knochentrocken“ ist. Wichtig ist dabei, dass die Parameterermittlung auf dem für die Serie geeigneten und geplanten Equipment stattfindet. Dabei sollten die Trocknungsparameter so ausgewählt werden, dass sie den Anforderungen des Materials und der Fertigung gerecht werden. Unter anderem muss die Alterung der Lötfläche beachtet werden.

6.4.3. ERMITTLUNG DER FEUCHTEAUFNAHME UNTER LAGERBEDINGUNGEN

Ausgehend von einer „knochentrockenen“ Leiterplatte wird bestimmt, wie schnell eine konkrete Leiterplatte Feuchte aufnimmt. Dazu kann IPC-TM-650 Methode 2.6.28 angewendet werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Feuchte nicht von Kupfer oder Glasfasern absorbiert wird. Der Feuchtegehalt im Harz kann also nur berechnet werden, wenn das Gewicht von Kupfer und Glasfasern bekannt ist und vom Gewicht abgezogen wird.

Die ermittelte Absorptionsrate dient der Festlegung der maximalen Zeit, die die Leiterplatten ungeschützt bearbeitet oder gelagert werden dürfen. Eine übliche Empfehlung lautet: Maximal zwei Stunden.

6.4.4. ANMERKUNG ZUR TEMPERATUR

Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass bei Epoxy eine gewisse Menge an Feuchtigkeit nur oberhalb des T_g des Basismaterials ausgetrieben werden kann. [9] Gemäß unserer Definition, siehe Kapitel 5.1, sprechen wir dabei nicht mehr von Trocknen, sondern von Tempern. Da es sich hierbei um chemisch gebundene Feuchte handelt, spielt diese hinsichtlich der in 6.4.1 beschriebenen Empfindlichkeit keine Rolle.

6.4.5. TROCKENZEIT, PAUSEN, WARTEZEITEN

In der Fertigungspraxis stehen weder die tatsächliche Feuchte noch das Trockengewicht der Leiterplatten zur Verfügung. Durch den oben beschriebenen Prozess im Zuge der Serienqualifikation können die erforderlichen Trocknungszeiten für die tägliche Fertigungspraxis festgelegt werden, unter Beachtung der Umgebungsbedingungen und der Prozesse und Prozessabläufe der jeweiligen Fertigung.

Die Sicherstellung der Vermeidung von Beschädigungen bei den Löt- und Temperaturprozessen wird also durch die Einhaltung der festgelegten Trockenprozesse und Fertigungsabläufe sichergestellt. Dies umfasst ebenso die Zeiten von Pausen und Wartezeiten, in denen die Leiterplatten vor Feuchte ungeschützt sind.

6.5. ANORDNUNG DER LEITERPLATTEN IM TROCKENOFEN

Neben der Trockentemperatur und -zeit ist die Anordnung der Trockenware, also hier der Leiterplatten, ein wesentlicher Parameter für die Trocknungseffizienz. Werden Platten im Stapel getrocknet, dauert es länger, bis die innen liegenden auf Trockentemperatur sind. Dadurch nimmt der Trocknungsgrad ab, je tiefer im Stapel die Leiterplatte liegt. Die Streuung der Qualität im Lötresultat kann entsprechend groß von „in Ordnung“ bis „großflächig delaminiert“ sein. Die Trocknungsparameter werden im Stapel durch das mittige Exemplar vorgegeben.

Werden Platten dagegen einzeln im Schlitzbrett stehend getrocknet, so kann zu einer jede Platte schnell erwärmt werden und zum anderen die Desorption optimal erfolgen: die Trocknung ist effizienter.

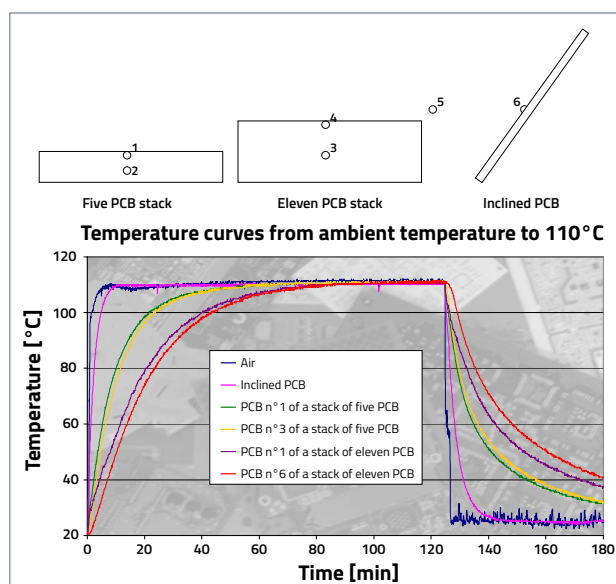


Abb.30: Temperaturkurven bei 5er / 11er Stapel bzw. einzeln im Schlitzbrett [6]

PHYSIK DER FEUCHTE UND PROZESS DES TROCKNENS VON LEITERPLATTEN

Je höher der Stapel und damit die thermische Masse des Stapels wird, desto langsamer erwärmt sich der gesamte Stapel. Interessanterweise sind die Temperaturunterschiede zwischen innerem und äußerem Exemplar recht gering.

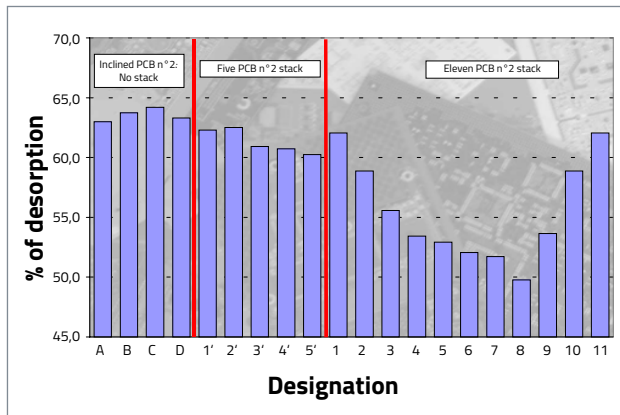


Abb.31: Trocknungsgrad im Schlitzbrett bzw. bei 5er / 11er Stapel [6]

Die Trocknungseffizienz im 5-er Stapel ist etwas geringer als einzeln im Schlitzbrett, das Ergebnis jedoch ähnlich gleichmäßig. Im 11-er Stapel zeigen sich jedoch große Unterschiede innerhalb des Stapels, eine entsprechend lange Prozessdauer wäre die Folge, um auch die inneren Exemplare ausreichend zu trocknen und ein gleichmäßiges Ergebnis zu erzielen.

Das Risiko der Verformung bei hohen Temperaturen wurde bereits angesprochen. Hier zur Illustration ein paar Beispiele:

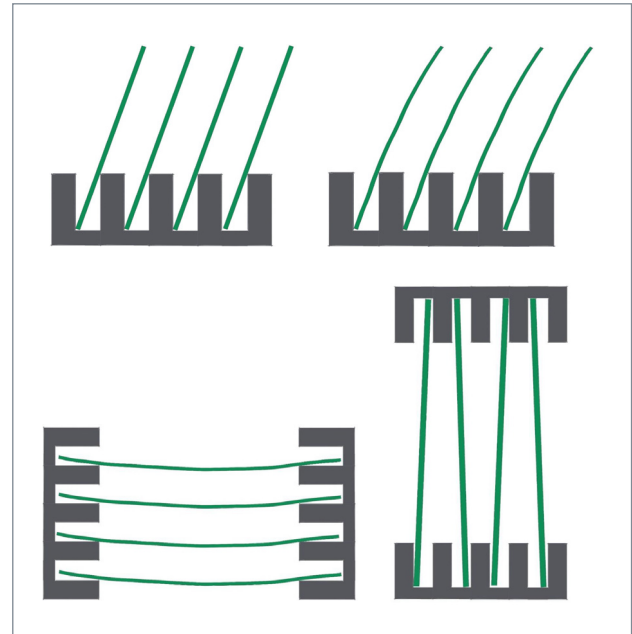


Abb.32: Verschiedene gefächerte Anordnungen, teilweise Gefahr der Wölbung [12]

Unter Serienaspekten ist das Trocknen im Stapel in Betracht zu ziehen, es muss jedoch auf einige Punkte geachtet werden [12]:

- Durchtrocknung gleichmäßig?
- Kein „Transfer-Druck“ zwischen den Leiterplatten?
- Etiketten (Ausbluten des Klebers?)
- Verkratzen der Oberflächen?

6.6. PRAXISBEISPIEL

Herr Esra Stoll, Firma BASLER, hat am 10. März 2021 einen Vortrag im Rahmen eines FED-Webinars gehalten zum Thema „Umgang mit Starr-Flex, ein Anwenderbericht“, siehe auch Quelle [12]. Dankenswerterweise liegt mir die Präsentation vor und ich darf daraus zitieren!

BASLER verarbeitet starrflexible Leiterplatten mit dem Aufbau 3Ri-2F-3Ri in großen Mengen und hat dafür einen seriengerechten Trockenprozess entwickelt.

- Ermittlung der Trocknungszeit
 - Durchfeuchtung der PCB-Nutzen
 - Protokollierte Trocknung in einem Umluft-Trockenofen bei 120°C
 - Entnehmen, wiegen und protokollieren: alle 30 Minuten
 - Solange, bis mehrmals nacheinander keine Gewichtsabnahme mehr gemessen wird.
- Lagerung im Trockenlagerschrank, 5% RF, Protokollierung.
Nach Erreichen des Gleichgewichts Entnahme.
- Ermittlung der Feuchteaufnahme in der Produktionsumgebung
 - Wiegen und protokollieren: alle 30 Minuten
 - Festlegung des MSL

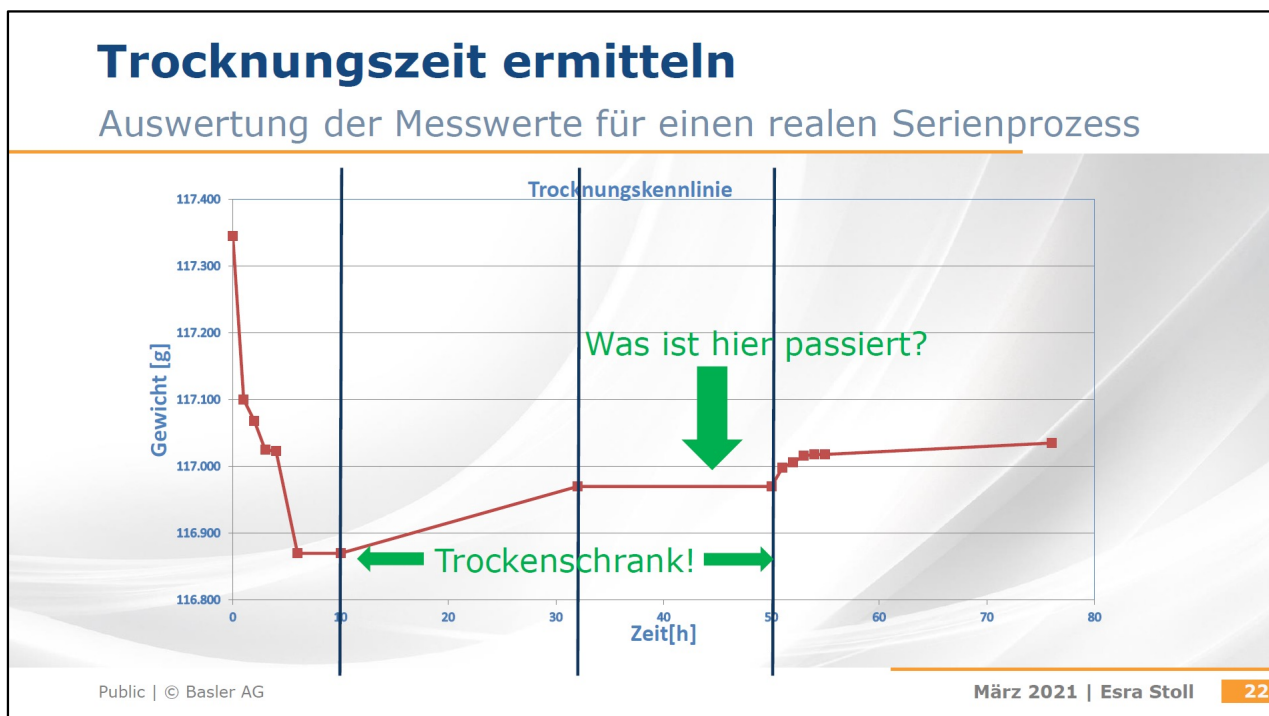


Abb. 33: Feuchtigkeitsgehalt im Verlauf des Trocknungsprozesses [12]

Aufgrund der im Trockenlagerschrank herrschenden Feuchte von 5%RF nehmen die „knochentrockenen“ Leiterplatten zunächst wieder etwas Feuchte auf, dies dauert bis zum Gleichgewicht etwas mehr als 30 Stunden.

PHYSIK DER FEUCHTE UND PROZESS DES TROCKNENS VON LEITERPLATTEN

Aus den Messwerten wurde bei BASLER folgender Trocknungsprozess abgeleitet:

- Trocknung im Umluft-Trockenofen @120 °C: 4 Stunden
- Umsetzung in den Trockenlagerschrank @23 °C ohne Abkühlung
- Die Verarbeitung aus dem Trockenlagerschrank mit 5%RF ist möglich.
- Die Leiterplatten dürfen zwei Stunden ungeschützt bearbeitet werden.
Wenn die Verarbeitung innerhalb von zwei Stunden nicht möglich ist, müssen die Leiterplatten im Trockenlagerschrank zwischengelagert werden.
- Ein Reflow-Durchgang setzt die Zeit wieder auf null.
- Die Fertigung ist Kanban-mäßig organisiert: Sobald wieder Platz im Trockenlagerschrank ist, wird nachgeliefert und neu getrocknet.

Der Trockenprozess wird für mehr als 50 verschiedene Starrflex-Design mit ähnlichem Lagenaufbau und ähnlicher Kontur verwendet, ist stabil über lange Zeit bei unterschiedlichen Lieferchargen und Lieferanten.



Abb.34: Serienprozess Trocknen Stufe 1 im Umluft-Trockenschrank bei BASLER [12]

Nachfolgende Tabelle zeigt eine gleichmäßige Trocknung innerhalb eines Stapels:

Zeitpunkt	Oben [g]	Mitte [g]	Unten [g]
Nach dem Öffnen	122,106	123,556	121,709
9:45 Uhr	122,125	123,577	121,728
13:50 Uhr	121,816	123,246	121,410
Delta 4 Std	0,309	0,331	0,318
Gewichtsverlust	0,253%	0,268%	0,261%

Abb.35: Trocknungsdaten im Stapel, Firma BASLER [12]

6.7. LOGISTIK IM TROCKENPROZESS, TROCKNUNGSPROTOKOLL

Liegezeiten sind so kurz wie möglich zu halten, idealerweise maximal zwei Stunden.

Es empfiehlt sich, zumindest für die Etablierung des Trockenprozesses ein Protokoll zu führen. Somit können die Ursachen für Auffälligkeiten leichter gefunden werden. Nachfolgend ein Vorschlag für ein Trocknungsprotokoll.

company																		Drying Record for moisture sensitive pcbs					
location:				department:				oven inventory number:				oven type:				logistics		first solder process start		remarks			
part number	revision	supplier	date code	oven temperature [°C]		planned duration [hours]	date	drying log		real duration	quantity	done by (name / sign)		waiting, magazin	date	time	time	re-drying, storage for further solder processes etc.					
				start	end			in / start	out/end			in	out						1st pcb	last pcb			
Example:																							
CPU main flex	03	Würth	1346	127	124	4	2014/01/07	8:15	13:25	5:10	220	Frank	John	25min	2014/01/07	15:05	16:15	dry cabinet 10%r.H. for 2nd reflow					

proposal

6.8. TYPISCHE FEHLER BEIM TROCKNEN



Abb.36: Zwei gravierende Fehler: Eindeutig zu dicker Stapel starrflexibler PCBs und nicht geeigneter Backofen

Trocknen im Backofen kann nicht funktionieren, weil die nach IPC- 1602 geforderte, maximal zulässige relative Feuchte <5%RF nicht möglich ist. Andererseits wollte ich auch keinen staubtrockenen Kuchen essen, der in einem Umluft-Trockenofen gebacken wurde.

6.9. AUSWIRKUNGEN DES TROCKNENS AUF DIE LÖTBARKEIT

Grundsätzlich stellt jede Temperaturbelastung nach dem Aufbringen der Lötfläche eine beschleunigte Alterung dar. Die Auswirkungen zeigen sich in einer Reduzierung der spezifizierten Lagerzeiten durch Verschlechterung der Lötbarkeit. Die Lötbarkeit kann durch Benetzungstests

und Ausbreitungstests im Versuch ermittelt werden. Die inzwischen weit verbreitete ENIG Oberfläche (Electroless Nickel immersion Gold) gilt als sehr robust und kann auch mehrfach getrocknet werden, ohne die Lötbarkeit zu beeinträchtigen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Grundsätzlich weisen Leiterplatten direkt nach der Herstellung durch die Herstellprozesse und Umgebungsbedingungen bereits einen gewissen Feuchtegehalt auf. Sie sind also ohne besondere Behandlung nie frei von Feuchtigkeit, die in die dielektrischen Materialien eindiffundiert ist. Über die Lagerungszeit kann der Feuchtegehalt bei ungünstigen Lagerbedingungen weiter ansteigen.

Um eine Beschädigung bei den Lötprozessen zu vermeiden, kann es erforderlich sein, die Leiterplatten unmittelbar vor der Bestückung in einem geeigneten Ofen zu trocknen oder für eine längere Zeit in einer trockenen Atmosphäre zu lagern (Trockenlagerschrank). **Für flexible und starrflexible Leiterplatten ist dieses Trocknen vor dem Löten obligatorisch!** Bei der Prozessplanung für die Verarbeitung von flexiblen und starrflexiblen Leiterplatten und auch anderen feuchteempfindlichen Materialien muss eine adäquate Trocknung berücksichtigt werden, deren Auswirkungen auf die Lötbarkeit eingeschlossen.

Lötprofile sollten so schonend wie möglich gestaltet werden. Bereits einige wenige Kelvin niedrigere Peak-Temperaturen im Lötprofil sind von Vorteil.

Die notwendigen Trocknungsparameter sind abhängig vom Leiterplattendesign (Kupferflächen), dem Trocknungsequipment und der Anordnung der Leiterplatten darin, dem Leiterplattenmaterial, dem Lötprozess und den Lötparametern, letzteres gegebenenfalls auch mehrfach und kombiniert aus Reflow-, Wellen- und partieller Löttechnik. Diese Trocknungsparameter müssen beim Leiterplattenbestücker ermittelt und verifiziert werden. Besonderer Wert ist dabei auch auf die Logistik und insbesondere Liegezeiten zu legen, da die getrockneten Leiterplatten aus der Umgebung wieder Feuchte aufnehmen. Eine Verpackung der Leiterplatten in einer Feuchtigkeitssperrepackung (Moisture Barrier Bag, MBB) für die Lieferkette und Lagerung ist nicht ausreichend.

Alternativen im Materialaufbau und Design der Leiterplatte sollten konsequent genutzt werden, um das Trocknungsverhalten zu optimieren.

8 QUELLEN UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR

- [1] Physik des Feuchtaustauschs in einem Öl-Zellulose Isoliersystem unter Beachtung des Grenzschichtverhaltens. Dipl. Ing. Bernd Buerschaper, Prof. Dr. Thomas Leibfried, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Deutschland, 2005
- [2] FED-Wiki, <http://wiki.fed.de/fed-wiki/index.php/Tempern>, Internet Stand Mai 2009
- [3] Reise, Ritz et.al: Flexible und starrflexible Leiterplatten, Leuze Verlag, S. 63, ISBN: 3-87480-223-X
- [4] Diverse Untersuchungen und Präsentationen, Dr. Lothar Weitzel, Würth Elektronik Circuit Board Technology
- [5] DuPont Electronics, Flexible Printed Circuit Processing Guide, July 1993, S.59
- [6] PCB materials behaviour towards humidity and baking impact on wettability, Walter Horaud, Vincent Vallat, Solelectron, 2003, S.4 ff.
- [7] Thermo Fisher Scientific Inc – Online Katalog
- [8] Fa. Totech, Präsentation „Moisture Sensitive Devices – a real production problem“, Gerhard Kurpiela, PDF, 2006
- [9] Moisture solubility and diffusion in epoxy and epoxy-glass composites, L.L.Marsh et.al., IBM J. RES. DEVELOP, Vol.28, No.6, Nov. 1984
- [11] Moisture Measurements in PCBs and Impact of Design on Desorption Behavior, Christopher Hunt, Owen Thomas, Martin Wickham, ISBN: 978-1-61782-845-4, IPC APEX EXPO Technical Conference 2011
- [12] Umgang mit Starr-Flex, ein Anwenderbericht, FED Webinar, 10.3.2021, Esra Stoll, Basler
- [13] Trocknen von Leiterplatten, G.Schubert et.al., PLUS 10/2009, S.2230ff
- [14] Gestalten mit Glas, Technische Information Fa. SANCO, 2012 (nach DIN 4108-3, Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 3)
- [15] Trocknen von Innenlagen und Leiterplatten, Paper von Fa. Isola, 2009(?)
- [16] IPC-1602 Standard for Printed Board Handling and Storage, 2020 April
- [17] IPC-TM-650 Test Methods Manual, 2.6.28 Water Absorption Bulk Content and/or Water Absorption Rate, Printed Circuit Boards
- [18] IPC/JEDEC J-STD-033 Handling, Packaging, Shipping and Use of Moisture/Reflow Sensitive Surface Mount Devices
- [19] Reference Conditions for Drying PCB´s, Totech White paper, 2010
- [20] IPC-1601A Printed Board Handling and Storage Guidelines, 2016 June
- [21] Fraunhofer IZM, Dr. Hans Walter, Einfluss von Feuchte und Temperatur auf die Zuverlässigkeit von Packaging Materialien, 14. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, März 2011



Würth Elektronik GmbH & Co. KG
Circuit Board Technology
Salzstr. 21
74676 Niedernhall · Germany
Tel: +49 7940 946-3539
flex@we-online.com
www.we-online.com

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT