Neues von der Strombelastbarkeit von Leiterbahnen

Dr. Johannes Adam, Flomerics Ltd., Filderstadt, Deutschland

Bitte zitieren Sie, wenn Sie Material entnehmen.

Kurzfassung

Fließt Strom durch eine Leiterbahn, so heizt sie sich wegen des Ohmschen Widerstands auf. Gewisse Grenztemperaturen, z.B. die Glastemperatur von FR4, dürfen aber nicht überschritten werden. Die am meisten verwendeten Korrelationen zwischen der *Stromstärke* auf einer Leiterbahn und der sich durch die Stromheizung ergebenden *Temperatur* der Leiterbahn sind diejenigen aus der Richtlinie ICP-2221 (=MIL-Std-275). Sie gehen auf einen Report des NBS im Jahre 1956 zurück und die wenigsten kennen die Vorraussetzungen für die Benutzbarkeit bzw. die Grenzen der Gültigkeit. Wir zeigen mit Hilfe von numerischen (CFD-) Simulationen, dass sie nur für 35µ dicke Leiterbahnen auf 1.6 mm dicken FR4 Leiterplatten mit 35µ Kupferrückseite gelten. Die numerische Technik wenden wir auf andere Leiterplattenaufbauten and und berechnen die Temperaturerhöhung **D**T als Funktion von Stromstärke, Leiterbahnbreite *b* und Leiterbahndicke *d*. Dabei werden erstmals auch Keramiksubstrate und Polyimidfolien betrachtet. Die neuen Korrelationen haben die Form $\Delta T = B b^{-q} (35m/d[m]) \cdot I^2$. *B* und *q* sind abhängig vom Leiterplattenaufbau und vom Basismaterial. Die Formeln können dazu verwendet werden, im Voraus die Auslegung von stromdurchflossenen Leiterbahnen abzuschätzen.

1 Strom und Temperatur

1.1 Joule'sche Wärme

James Joule hat auf der Suche nach dem Wärmeäquivalent um 1841 zwei Gesetze experimentell entdeckt. Erstens, den Zusammenhang zwischen der Heizleistung P [W] einer Stromschiene und der Stromstärke I[A] (Gleichstrom)

$$P = R \cdot I^2, \tag{1}$$

zweitens, eine Formulierung für den elektrischen Widerstand *R* [Ohm] eines Metalldrahts als Funktion seiner geometrischer Größen Länge *L* [m] und Querschnittsfläche *F* [mm²] und der Temperatur des Leiters T [°C]

$$R = \frac{L}{F} \mathbf{r}_{20} (1 + \mathbf{a}_{20} \cdot (T - 20^{\circ} \text{C})).$$
 (2)

r [Ohm mm²/m] charakterisiert den spezifischen elektrischen Widerstand des Leitermaterials und a[1/K] einen Temperaturkoeffizient. Die lineare Temperaturabhängigkeit ist natürlich nur eine lineare Approximation an den leicht gekrümmten nicht-linearen Verlauf von r(T). Für reines Kupfer und lineare Anpassung bei 20°C sind es die Werte

$$r_{20}=0.0175$$
 Ohm mm²/m , $a_{20}=0.00395$ 1/K . (3)

Beispielsweise erhält man für den elektrischen Widerstand einer Leiterbahn mit Dicke $d=35 \mu$, Breite b=2 mm und Länge L=10 cm (s. Bild 1) ($F=0.07 mm^2$) R= 0.025 Ohm.

Obwohl mit steigender Länge L die Heizung der Leiterbahn steigt, ist L für die weiteren Betrachtungen irrelevant: auch die kühlende Fläche rechts und links auf der Leiterplatte nimmt mit L linear zu.



Bild 1 Definition der geometrischen Größen einer Leiterbahn auf einer Leiterplatte.

1.2 Energiegleichgewicht

Die Beschreibung der Wärmeerzeugung nach Gln. (1-3) gilt für einen Tauchsieder (Joules Experimente) genauso wie für eine Leiterbahn auf einer Leiterplatte ("LP"). Die Temperatur der Leiterbahn darf aber wegen der Temperaturunbeständigkeit des Leiterplattenmaterials FR4 nicht beliebig hoch sein. Ab einer Temperatur von ca. 130 °C ("Glaspunkt") beginnt sich nämlich das Glasgewebe zu verändern und die LP verbiegt sich. Ab ca. 110°C weichen auch Lotstellen auf.

Die Kenntnis der Heizung Gl.(3) allein ist für eine Temperaturbestimmung nicht ausreichend: die Temperatur stellt sich als Ergebnis (Gleichgewicht) von Heizleistung P und Kühlleistung K(T) ein

$$P = K(T) . \tag{4}$$

Drei Prozesse kühlen die Leiterbahn/Leiterplatte: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Der Wärmefluss (=Verlustleistung), der in der Leiterbahn entsteht wird über Wärmeleitung in das Leiterplattenmaterial transportiert und dort mehr oder weniger stark geometrisch gespreizt. Der 'Temperaturfleck' gibt einen Teil des Wärmeflusses an die Luft ab (Konvektion) und einen Teil über Wärmestrahlung an die Umgebung. Eine quantitative Auswertung für ein Beispiel wird in [1] gegeben: für die dort beschriebenen Situationen verliert die Leiterplatte ca. 1/3 der Verlustleistung über Konvektion und ca. 2/3 über Infrarotstrahlung. Die Berechnung des Energiegleichgewichts ist wg. der nicht-linearen Zusammenhänge in K(T) zwischen Temperatur und Wärmefluss, Stichworte Nusselt-Korrelationen und Stefan-Boltzmann Gesetz, und der unbekannten Größe des Temperaturflecks mit analytischen Methoden unseres Wissen nicht allgemein möglich. Deshalb werden wir in Kap. 2 und 3 numerische Methoden in kommerziell erhältlicher Software [2] verwenden.

2 Designrichtlinie IPC-2221

2.1 IPC-2221

Die Designrichtlinie IPC-2221 (=IPC-D-275=MIL-STD-275) wird von Vielen als Grundlage für die Abschätzung der Leitertemperatur verwendet.



Bild 2 IPC-2221 Nomogramm für "externe Leiter" [aus 3] mit Anwendungsbeispiel.

Die Benutzung geht folgendermaßen (gestrichelte Linien):

Schritt 1: Man bestimme den Leiterbahnquerschnitt *F* (in Quadrat-tausendstel-Inch) im unteren Diagramm aus Leiterbahnbreite (in Inch) und der Leiterbahndicke (in oz, 1 oz entspricht 35 μ , 2oz=70 μ).

Schritt 2: Man überträgt den Leiterquerschnitt in das obere Diagramm und liest das gewünschte Paar aus Stromstärke und Temperaturerhöhung ab.

Vielerorts hegen Praktiker Zweifel an der Gültigkeit des obigen Diagramms:

- in der Praxis können Leiterbahnen mit höheren Strömen belastet werden und
- die analogen Diagramme für "interne" Leiterbahnen sind einfach in der Stromstärke um exakt den Faktor 2 reduziert.

Woher stammen eigentlich die Diagramme und was steckt wirklich dahinter?

2.2 Ursprung und Reproduzierbarkeit der IPC-2221

Im Rahmen der Arbeiten für eine revidierte Designrichtlinie IPC-2152 ist es das Verdienst der IPC Task Group 1-10b um M. Jouppi [4,5] die Quellen der IPC-2221 gefunden zu haben. Es waren dies Arbeiten für das National Bureau of Standards (NBS) aus dem Jahr 1956. Die Originalgraphiken (Bild 3), die es für verschiedene Temperaturerhöhungen gibt, zeigen jeweils eine breite Streuung der Messwerte aufgrund der Tatsache, dass unterschiedliche Leiterplatten mit unterschiedlichen Lagenaufbau aus unterschiedlichem Material vermessen wurden.



Bild 3 Reproduktion einer NBS Originalmessreihe für $\Delta T=20^{\circ}C$ (aus [4]). Die tiefsten Messpunkte gehören zu Metallstreifen ohne Leiterplatte und werden für unsere Zwecke ignoriert. Die obersten Messpunkte gehen in die Diagramme aus Bild 2 ein. Die überlagerten starken Linien sind Ergebnisse unserer

gerten starken Linien sind Ergebnisse unserer numerischen Simulation.

Kann man den gemessenen Verlauf durch theoretische Berechnungen reproduzieren und daraus verallgemeinerte Erkenntnisse gewinnen?

Dazu führen wir numerische Simulationen an einem einfachen 3D Modell von Leiterplatte und Leiterbahn durch. Die Gleichungen, die dabei in diskretisierter Form numerisch gelöst werden sind die Fouriergleichung (Wärmeleitung), die Navier-Stokes Gleichung (Strömungsmechanik) und die Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung). Dazu kommen noch das Stefan-Boltzmann Gesetz (Strahlung) und universelle, dimensionslose Wärmeübergangsgesetze (Wandfunktionen) [2]. Wir beschränken uns auf den thermischen Beharrungszustand und Gleichstrom. Da wir die genauen Daten des Original NBS Setups nicht kennen, machen wir uns ein Modell aus einer Euro-LP (100 mm x 160 mm x 1.6 mm) aus

- einer Platte aus *reinem FR4* (λ =0.3 W/m K, ϵ =0.9),
- *einer* Leiterbahn aus Kupfer von Länge L=100 mm, Dicke d=35 μm (=1 oz),
- optional einer Cu-Ebene auf der Rückseite
- einem Luftvolumen das etwas größer ist als die Leiterplatte in der die Luft in freier Konvektion strömt

Bild 4 zeigt als Berechnungsergebnis die Oberflächentemperatur einer ,nackten' FR4 Leiterplatte mit einer Leiterbahn mit Stromstärke I=3.5 A.



Bild 4 Simulationsergebnis einer 100mm langen Leiterbahn (b=1 mm, $d=35 \mu$; F=54 sq.mils) das zu 40°C Übertemperatur auf einer Euro-LP aus reinem FR4 führt. Die Wärmespreizung ist schlecht.



Bild 5 Oberflächentemperatur der Euro-LP mit der belasteten Leiterbahn (b=1 mm, $\Delta T=40$ °C) aber einer kompletten (35 µ) Cu-Ebene auf der Rückseite. Die Wärmespreizung ist wesentlich deutlicher als in Bild 4. Die Stromstärke die benötigt wird ist dadurch höher.

Bild 5 zeigt das Ergebnis für die gleiche Leiterbahn, allerdings auf einer Leiterplatte mit rückseitiger 35μ Cu-Ebene. Die Stromstärke, die zur Aufheizung um 40° C benötigt wird, ist jetzt 4.6 A.

Berechnungsergebnisse zu anderen Temperaturerhöhungen sind in Bild 3 eingetragen. Den oberen Rand der NBS-Messpunkte gibt das Modell mit der 35μ Cu-Ebene wieder, den unteren Rand das Modell mit der nackten FR4 LP. Aus den Berechnungsergebnissen leiten wir ab:

- Die Strombelastbarkeit ist ab-initio mit numerischen Methoden berechenbar
- Die IPC-2221 Kurven sind mit *einer* bestromten Leiterbahn auf der LP gemessen
- Die IPC-2221 Kurven gelten nur f
 ür eine Leiterplatte aus FR4 mit einer 35
 µ Kupferr
 ückseite





Bild 6 Temperatur-Strom-Diagramme für eine 35μ dicke Leiterbahn auf einer reinen FR4 Leiterplatte und auf einer LP mit 35 μ Cu-Rückseite bei Umgebungstemperatur 20°C. Scharparameter ist die Leiterbahnbreite *b*. Dieses Diagram ist äquivalent zu Bild 2.

Die neuen Messungen zur IPC-2152 aus [4] können durch unsere numerischen Rechnung ebenfalls bestens reproduziert werden [6,7].

2.3 Kritik an der IPC-2221

Aus der Analyse dieser und anderer Berechnungsergebnisse kann man weitere kritische Punkte an der IPC-2221 anbringen

- Es gibt kaum Unterschiede zwischen der Temperaturerhöhung einer außenliegenden und innenliegenden Leiterbahn. Die Unterscheidung ist Hysterie.
- Die Diagramme (Bild 2) gelten nur für einen Typ von Leiterplattenaufbau
- Die reine Abhängigkeit der Strombelastbarkeit von *F* in Bild 2 kann nicht richtig sein. Beispielsweise hat die Leiterbahn in Bild 7 den gleichen Querschnitt, aber es ist die Grundfläche auf der LP, die den Wärmeeintrag in die LP mitbestimmt. Die linke Konfiguration kann bei gleicher Temperatur mit einem höheren Strom belastet werden.



Bild 7 Fehler in der IPC-2221. Die Leiterbahnen links und rechts haben den gleichen Querschnitt, können aber bei gleichem Strom nicht die gleiche Temperatur haben.

3 Neue I(**D**T) – Korrelationen

3.1 FR4 LP

Die erfolgreiche Reproduktion der IPC-2221 Kurven ermutigt zur Extrapolation auf andere Leiterplattenszenarien. Die berechneten LP Aufbauten [7] sind in Bild 8 zusammengefasst. Das Basismaterial ist FR4, Leiterplattendicke ist immer 1.6 mm.





Bild 8: Temperatur-Strom-Diagramme von Leiterplatten mit unterschiedlichem Kupfergehalt und einer 35 μ dicken Leiterbahn unterschiedlicher Breite [7].

Da die Diagramme sich ähnlich sehen, experimentieren wir für Bild 9 mit einer modifizierten y-Achse. Mit $y' = \Delta T / b [\text{mm}]^{-1.43}$ ordnen sich die berechneten Werte bei nicht all zu großen Stromstärken fast auf einer lg y'-lg *I*-Geraden der Steigung 2. Also ist y'=*AI*², bzw y'=*A'P*.

$$\Delta T = B_{LP} b^{-1.43} I^2 \qquad . \tag{5}$$

Die Proportionalitätskonstante B_{LP} hängt vom Leiterplattenszenario (Kupfergehalt und Abstand der Leiterbahn von der ersten Cu-Lage) ab.



Bild 9 FR4 Hilfsdiagramm

Die berechneten obigen Diagramme (wie die der IPC-2221 auch) gelten nur für die Leiterbahndicke d=35µm. Wie sind die Verhältnisse bei anderer Dicke d? Entscheidend für die Temperatur sind der Wärmeeintrag durch die Verlustleistung *P* über den Footprint der Leiterbahn. Angenommen, wir wollen die obigen Δ T-I-Diagrammen für eine Leiterbahn der doppelten Dicke, also d=70 µ verwenden, dann müssen wir **die Kurve für dieselbe Leiterbahnbreite** *b* benutzt. Allerdings ist der Widerstand der Leiterbahn bei d=70 µ nur halb so groß. Wegen $P=R*I^2$ würde aber ein $\sqrt{2}$ mal stärkerer Strom wieder die gleiche Verlustleistung und damit die gleiche Temperaturerhöhung bringen.. Diese Skalierungsregel für andere Leiterbahndicken *d* kann man schreiben als

$$\frac{1}{35\mathbf{m}\cdot b}\cdot I_{35\mathbf{m}}^2 = \frac{1}{d\cdot b}I^2.$$
(6)

Unter Verwendung von G.I. (5)

$$\Delta T = B_{LP} \ b^{-1.43} I_{35\mu}^2$$

folgt daraus als allgemeinerer Zusammenhang (d ist natürlich in μ m zu messen, b in mm)

$$\Delta T = B_{LP} \ b^{-1.43} \ \frac{35 \,\mathrm{m}}{d} I^2 \quad . \tag{7}$$

Für den

- Leiterplattenaufbau 2 (Bild 6) der IPC-2221 ist *B*₂=1.6,
- für den Aufbau 1 (Bild 6) ist $B_1=3.6$,
- für den Aufbau 5 (Bild 8) ist $B_5=0.9$.

3.2 Keramik LP

Wir ersetzen das FR4 Basismaterial durch ein typisches Keramikmaterial (Al₂O₃) mit Wärmeleitfähigkeit λ =16 W/m K und führen für Substratdicken *D*=1 mm und 0.5 mm dieselben Simulationen durch.



Bild 10 Temperatur-Strom-Diagramm für 35μ dicke Leiterbahnen auf einer Keramikplatte der Dicke D=0.5 mm.



Bild 11 Temperatur-Strom-Diagramm für 35μ dicke Leiterbahnen auf einer Keramikplatte der Dicke D=1 mm.

Bild 10 und 11 werden wieder zu einer Geraden im log y'-log I Diagramm, aber mit signifikant *anderer* Skalierung $y' = \Delta T / b [mm]^{-1.1}$.

Die mathematischen Formalismen (5) bis (6) angewandt auf die Keramikergebnisse liefert

$$\Delta T = C_{LP} \ b^{-1.1} \frac{35 \, \mathbf{m}}{d} I^2$$
 (8)

mit

- $C_{D=0.5 mm} \approx 0.63$
- $C_{D=1 mm} \approx 0.45.$



Bild 12 Keramik Hilfsdiagramm. y' hat bei FR4 und Keramik unterschiedliche Potenzen.

3.3 Polyimidfolie

Als letztes ersetzen wir die Leiterplatte durch eine dünne Polyimidfolie der Dicke D=0.3 mm mit Wärmeleitfähigkeit $\lambda=0.3$ W/m-K und berechnen wieder ein neues T-I Diagramm (Bild 13).



Bild 13 Temperatur-Strom-Diagramm für 35μ dicke Leiterbahnen auf einer Polyimidfolie der Dicke D=0.3 mm.



Bild 14 Polyimid Hilfsdiagramm. y' hat bei FR4 und Keramik unterschiedliche Potenzen.

Bild 13 wird zu einer Geraden im log y'-log I Diagramm (Bild 14), aber diesmal wieder mit der FR4 *Skalierung* $y' = \Delta T / b [\text{mm}]^{-1.45}$.

Die mathematischen Formalismen (5) bis (6) angewandt auf die Polyimidergebnisse liefert

$$\Delta T = D_{LP} \, b^{-1.45} \, \frac{35 \, \mathbf{m}}{d} \, I^2 \tag{8}$$

mit

• $D_{D=0.3 mm} \approx 4.9$

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag haben wir 3 Ziele verfolgt:

- 1. Aufklärung über die Herkunft und Beschränkungen der Designregel IPC-2221 (=IPC-D-275).
- 2. Beweis der Reproduzierbarkeit durch numerische Simulation
- 3. Extrapolation auf andere Leiterplattenszenarien durch numerische Simulation
- Fassen der berechneten Ergebnisse in formelmäßige Zusammenhänge (Korrelationen).

Die Diagramme können für eine erste Abschätzung der Strombelastbarkeit einer Leiterbahn verwendet werden. Weitere Anwendungsbeispiele sind in [7] zu finden. Aussagen für eine detailliertere Leiterform (Verengungen, Verzweigungen) können damit nicht gemacht werden. Dazu sind nur numerische Modelle in der Lage.

5 Literatur

- Adam, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Teil I Grundlagen. PLUS 4(2002) H.10, S. 1669-1673
- [2] Flotherm 4.2 User Manual. Flomerics Ltd., 2003
- [3] Brooks, D.: Temperature Rise in PCB Traces. pdf-file <u>http://www.ultracad.com</u> from the Proceedings of the PCB Design Conference, West, March 23-27, 1998
- [4] Jouppi, M.R.: Thermal Characterization of PCB Conductors, paper IPC 39. Electronics Circuits World Convention 9 Köln, October 7-9, 2002
- [5] Jouppi, M.R.: <u>http://www.thermalman.com</u>
- [6] Adam, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Teil II IPC-Richtlinie IPC-D-275: Mythos und Wirklichkeit. PLUS 4(2002) H.11, S. 1817-1823
- [7] Adam, J.: IPC-2152: Neue Richtwerte f
 ür die Strombelastbarkeit von Leiterz
 ügen in Leiterplatten. Konferenzband 11. FED-Konferenz 2003, S. 11-33