

Strombelastbarkeit von Leiterbahnen

Dr. Johannes Adam
Flomerics Ltd.
D-70794 Filderstadt
<http://www.flomerics.de>

Bitte zitieren Sie, wenn Sie
Material entnehmen.

Current Carrying Capacity of PCB Traces

Abstract.

The widely used design rule IPC-2221 (=MIL-STD-275) for the 'current carrying capacity' of traces on printed circuit boards is subject of a closer investigation. These historical studies on correlations between electrical current and temperature rise of the trace can be reproduced by numerical heat transfer simulations, but only if the board has a back 35µm copper layer and the thickness of the trace is 35 µm. As this makes an application to other boards impossible, we are presenting diagrams based on numerical studies for FR4-based board models with other placing of copper planes and also for polyimide foils and ceramic substrates. We also give the correct treatment for trace thickness other than 35 µm. The temperature-current correlations follows closely a power law $\Delta T = B_{LP} w^{-n} \left(\frac{35\mu}{th} \right) \cdot I^2$. The coefficients B_{LP} and n are derived for the calculated PCB models and the correlations are plotted in usable diagrams.

Inhaltsverzeichnis

1. Temperatur und Leiterbahn	1
2. Die Designrichtlinie IPC-2221	2
2.1. IPC-2221	2
2.2. Ursprung der IPC-2221	3
3. Temperatur und Strom	4
3.1. Joule'sche Heizleistung	4
3.2. Energiegleichgewicht	5
3.2.1. Der erste Hauptsatz	5
3.2.2. Energieabfuhr	5
3.3. Erste Simulationsversuche	6
3.3.1. Keine rückseitige Cu-Ebene	7
3.3.2. Mit rückseitiger Cu-Ebene	8
3.3.3. Innenliegende Leiterbahn	8
3.3.4. Vergleich mit IPC und DN	8
3.4. Neue Messungen im Rahmen der IPC-2152	9
3.5. Kritik an der IPC-2221	9
4. Gerechnete Strombelastbarkeitsdiagramme	10
4.1. DN- und IPC-Situation	10
4.2. Strombelastbarkeit in anderen FR4 Leiterplattenaufbauten	11
4.3. Empirische Zusammenhänge der Parameter	12
4.3.1. Leiterbahnbreite	12
4.3.2. Leiterbahndicke	13
4.3.3. Strombelastbarkeit in IPC Darstellung	14
4.4. Polyimidfolie	18
4.5. Keramiksubstrat	19
5. Nicht-homogene Leiterbahnen	19
5.1. Lokale Querschnittsverengung	19
5.2. Wärmeabfuhr durch Anschlusskabel	21
6. Zusammenfassung	21

1. Temperatur und Leiterbahn

Eine Leiterplatte (engl. printed circuit board, PCB) ist, vereinfacht gesagt, ein mit Hilfe von Kunstharz verpresstes Laminat aus kupferbeschichtetem Glasfasergewebe. Das Leiterbild auf den einzelnen Lagen wird dabei photochemisch durch Ätzung erzeugt. Die Temperaturbeständigkeit der Leiterplatte ist allerdings beschränkt. Beim Standardmaterial FR4 liegt die empfohlene Maximaltemperatur bei Dauerbelastung bei ca. 100 °C. Bei höheren

Temperaturen kommt es zu chemischen Reaktionen, Delamination und Verbiegung und damit zu einem Verlust der elektrischen Funktionsf­h­ig­keit. Eine Leiterbahn, durch die ein gen­u­gend hoher Strom flie­h­t - was „gen­u­gend hoch ist“, ist Gegenstand des Vortrags - heizt sich wie ein Tauchsieder auf und f­u­hrt zu lokalen Zerst­o­rungeffekten, die sich unter Umst­anden auf die gesamte Leiterplatte auswirken. Deshalb ist es wichtig den Zusammenhang zwischen Stromst­arke und Temperatur zu kennen. Im deutschen nennt man das Strombelastbarkeit, im englischen *Current Carrying Capacity*. Wir beschreiben in diesem Vortrag, wie sich der Zusammenhang zwischen Temperatur und Stromst­arke f­u­r verschiedene Leiterplattenaufbauten verh­alt.

2. Die Designrichtlinie IPC-2221

2.1. IPC-2221

Die Designrichtlinie IPC-2221 (=IPC-D-275=MIL-STD-275), und in ihrer deutschen ­U­bersetzung FED 22-02, wird von Vielen als Grundlage f­u­r die Absch­atzung der Leitertemperatur verwendet.

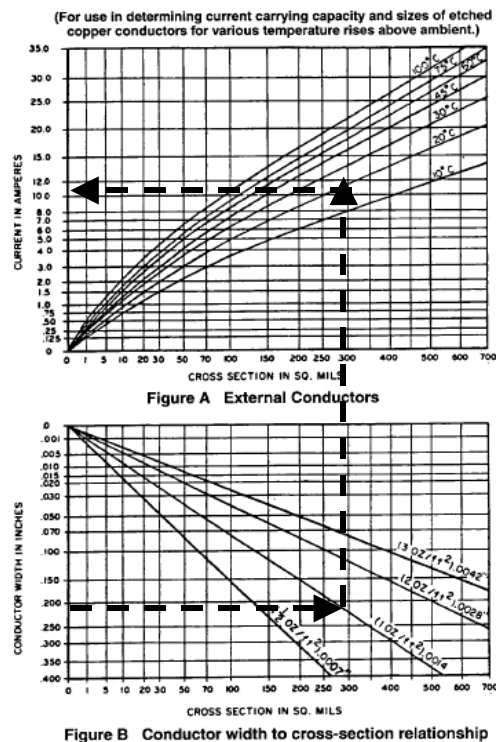


Abb. 2-1: IPC-2221 Nomogramm f­u­r „externe Leiter“ (aus Brooks, 2001) mit Anwendungsbeispiel.

Die Benutzung geht folgenderma­h­en (gestrichelte Linien):

Schritt 1: Man bestimme den Leiterbahnquerschnitt F (in square mils=Quadrat-tausendstelInch) im unteren Hilfsdiagramm aus Leiterbahnbreite (in Inch) und der Leiterbahndicke (in oz)¹

Leiterbahndicke in oz	Leiterbahndicke in μm
0.5	17.5
1	35
2	70

Die Leiterbahnbreite b wird in Inches angegeben.

Leiterbahnbreite in Inches	Leiterbahnbreite in mm
0.1	0.25
1	2.54

Schritt 2: Man ­u­bertr­agt den Leiterquerschnitt in das obere Diagramm und liest das gew­u­nschte Paar aus Stromst­arke I und Temperaturerh­o­hung ΔT ab.

¹ Dickenangabe erfolgt ­u­ber das Fl­achengewicht von Kupfer. 1 oz Kupfer, breitgedr­u­ckt auf 1 ft­² ist 35 μm dick.

Brooks (1989) gibt eine Fitformel f­ur die 1-oz Diagramme an

$$I = 0.065 \cdot \Delta T^{0.43} \cdot A^{0.68} \quad (2.1)$$

mit A hier in sq.mils, bzw.

$$\Delta T = 576 \cdot A^{-1.58} \cdot I^{2.33} \quad (2.2)$$

Au­erdem diskutiert er Ergebnisse aus der Zeitschrift „Design News“ (im folgenden DN) aus dem Jahr 1968 mit folgendem Ergebnis f­ur 1 oz Leiterdicke

$$I = 0.04 \cdot \Delta T^{0.45} \cdot A^{0.69} \quad (2.3)$$

bzw.

$$\Delta T = 178 \cdot A^{-1.53} \cdot I^{2.22} \quad (2.4)$$

Die „Design News“ $I(\Delta T)$ - Kurven sind also im Strom um den Faktor $0.065/0.04=1.63$ gegen­uber der IPC gestaucht, bzw. die $\Delta T(I)$ -Kurven sind in ΔT um den Faktor 3.2 gestaucht.

Brook's etwas elaboriertere lineare Regression ergab (in seiner Notation) mit Leiterbreite W und -dicke Th

$$I = k_{DN} \cdot \Delta T^{0.46} \cdot W^{0.76} \cdot Th^{0.54} \quad (2.5)$$

Wir werden in Kap.4 wieder darauf zur­u­ckkommen.

Vier­elorts hegen Praktiker *Zweifel* an der G­u­ltigkeit des obigen Diagramms:

- in der Praxis k­onnen Leiterbahnen mit h­o­heren Str­o­men belastet werden und
- die analogen Diagramme f­ur „interne“ Leiterbahnen sind in der Stromst­arke um *exakt* den Faktor 2 reduziert.

Woher stammen eigentlich die Diagramme und was steckt wirklich dahinter?

2.2. Ursprung der IPC-2221

Brooks (2001) schreibt: „It is a result of the now recognized fact that the originals have been long lost and these copies have been recopied, rescanned, and redrawn countless times during the last 40+ years! It is remarkable (and a testimony to the care that has always been taken) that they are still as faithful to the originals as they are!“

Im Rahmen der Arbeiten f­ur eine revidierte Designrichtlinie IPC-2152 ist es das Verdienst der IPC Task Group 1-10b um M. Jouppi (2002) die Quellen der IPC-2221 gefunden zu haben. Es waren dies Arbeiten f­ur das National Bureau of Standards (NBS) aus dem Jahr 1956. Die Originalgraphiken (z.B. Abb. 2-2), die es f­ur verschiedene Temperaturerh­o­hungen gibt, zeigen jeweils eine breite Streuung der Messwerte aufgrund der Tatsache, dass unterschiedliche Leiterplatten mit unterschiedlichem Lagenaufbau aus unterschiedlichem Material vermessen wurden.

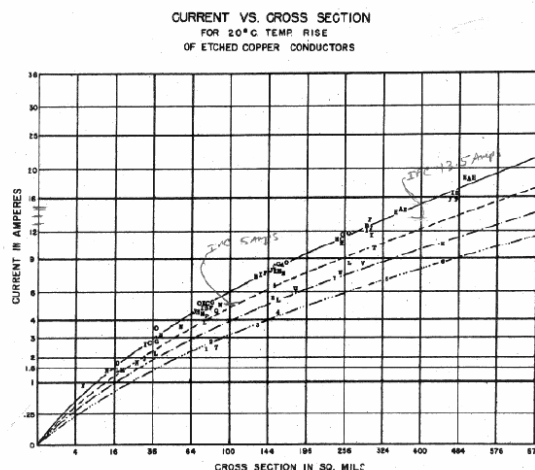


Abb. 2-2: Reproduktion einer NBS Originalmessreihe f­ur $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ (Jouppi, 2003).

Darin eingetragen, stellen sich die Brooks'schen Kurven Gl. (2.1) und (2.3) wie in Abb. 2-3 dar.

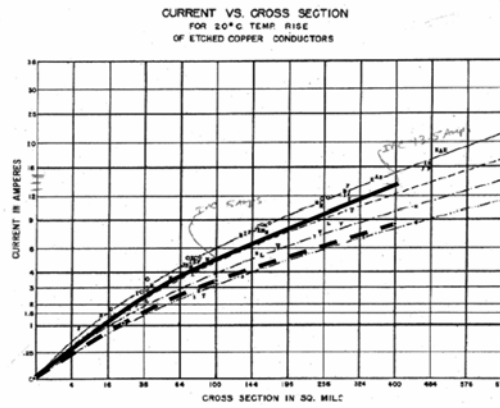


Abb. 2-3: Brooks'sche Fitkurven in den NBS Messungen. Durchgezogen: IPC-Fit, gestrichelt: DN-Fit.

Kann man der gemessenen Punktwolke trauen, kann man sie durch theoretische Berechnungen reproduzieren und daraus verallgemeinerte Erkenntnisse gewinnen?

3. Temperatur und Strom

3.1. Joule'sche Heizleistung

James Joule hat auf der Suche nach dem W­arme­ä­quivalent um 1841 experimentell den Zusammenhang zwischen der Heizleistung P [W] in einem Stromleiter und der Stromst­arke I [A] (Gleichstrom)

$$P = R \cdot I^2 \quad (3.1)$$

entdeckt. Auf Heinrich Lenz, etwa um die gleiche Zeit, geht eine Formulierung f­ur den elektrischen Widerstand R [Ohm] eines Metalldrahts als Funktion seiner geometrischen Gr­o­en L­ange L [m] und Querschnittsfl­ache A [mm²] und der Temperatur des Leiters T [°C] zur­u­ck

$$R = \frac{L}{A} \rho_{20} (1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20^\circ\text{C})). \quad (3.2)$$

ρ_{20} [Ohm mm²/m] charakterisiert den spezifischen elektrischen Widerstand des Leitermaterials und α_{20} [1/K] einen Temperaturkoeffizient, jeweils hier bei 20°C. Die lineare Temperaturabh­angigkeit ist nat­urlich nur eine lineare Approximation an den leicht gekr­u­mmten Verlauf von $\rho(T)$ f­ur Temperaturen unterhalb von ca. 1000 K.

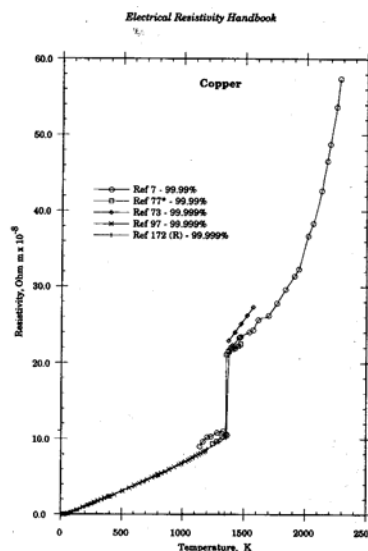


Abb. 3-1: Temperaturabh­angigkeit des spezifischen elektrischen Widerstands von reinem Kupfer (Dyos and Farrel, 1992). Bis zum Schmelzpunkt bei 1358 K ist die Abh­angigkeit ann­ahernd linear.

F­ur reines Kupfer und lineare Anpassung bei 20°C sind die Werte

$$\rho_{20} = 0.0175 \text{ Ohm mm}^2/\text{m}, \quad \alpha_{20} = 0.00395 \text{ 1/K}. \quad (3.3)$$

Beispielsweise erh­lt man f­ur den elektrischen Widerstand einer Leiterbahn mit Dicke $d=35 \mu\text{m}$, Breite $b=2 \text{ mm}$ und L­nge $L=10 \text{ cm}$ ($A=d*b=0.07 \text{ mm}^2$) $R=0.025 \text{ Ohm}$. Den Widerstand R f­ur eine andere Leiterl­nge L erh­lt man aus Abb. 3-2 durch Multiplikation mit L [m] (Adam, 2002a).

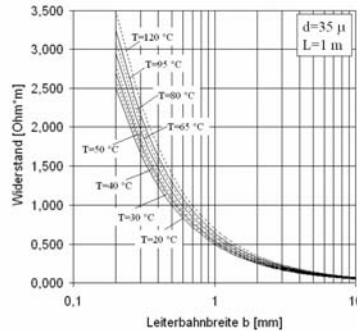


Abb. 3-2: Elektrischer Gleichstromwiderstand einer Leiterbahn von 1 m L­nge und 35 μm Dicke f­ur verschiedene Leitertemperaturen und Leiterbahnbreiten nach Gl.(3.2).

3.2. Energiegleichgewicht

3.2.1. Der erste Hauptsatz

Die Beschreibung der W­rm­erzeugung nach Gln. (3.1) gilt f­ur einen Tauchsieder (Joules Experimente) genauso wie f­ur eine Leiterbahn auf einer Leiterplatte. Die Kenntnis der Heizung allein ist f­ur eine Temperaturbestimmung nicht ausreichend. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik lautet „Die Energie eines abgeschlossenen Systems ist konstant“. In unserem Fall hei­t das, dass die elektrische Leistung P [W] in thermische Formen der Energie umgewandelt werden muss, so dass im thermischen Gleichgewicht (d.h. im zeitlich eingeschwungenen Zustand) Netto Null herauskommt

$$\text{Energiezufuhr} - \text{Energieabgabe} = 0$$

Die Temperatur stellt sich als *Ergebnis* des Gleichgewichts von Heizleistung P und K­hlleistung $K(T)$ ein

$$P = K(T). \tag{3.4}$$

Die elektrische Heizleistung ist also ein Energie(zu)flu­ss = W­rm­emenge/Zeit [J/s = W] und ebenso ist die K­hlleistung ein Energieflu­ss.

3.2.2. Energieabfuhr

Drei Prozesse k­hlen die Leiterbahn/Leiterplatte: W­rm­eleitung, Konvektion und Strahlung. Der W­rm­efluss P , der in der Leiterbahn entsteht, wird ­ber W­rm­eleitung in das Leiterplattenmaterial transportiert und dort mehr oder weniger stark geometrisch gespreizt. Der ‚Temperaturfleck‘ gibt einen Teil des W­rm­eflusses an die Luft ab (Konvektion) und einen Teil ­ber W­rm­estrahlung (Infrarotphotonen) an die Umgebung²

$$K(T) = \dot{Q}_{Ltg}(T) + \dot{Q}_{konv}(T) + \dot{Q}_{rad}(T)$$

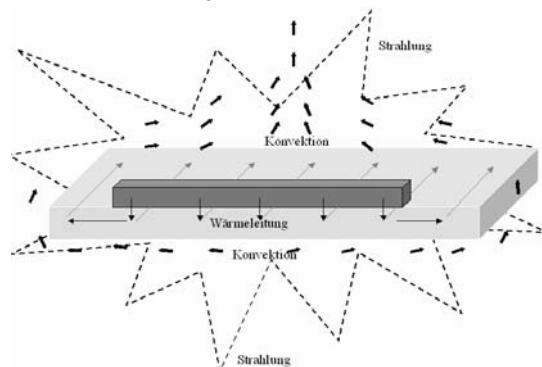


Abb. 3-3: Leiterbahn und Leiterplatte im Querschnitt mit den 3 W­rm­etransportmechanismen

² Q ist der Formelbuchstabe f­ur die W­rm­emenge [J] und der Punkt dar­uber das Symbol f­ur die zeitliche ­nderung [J/s], sprich den W­rm­eflu­ss.

Wenn der W­rmestrom gut abflie­st, ergibt sich bei gleicher Verlustleistung eine niedrige Temperatur T , wenn er schlecht abflie­st, eine h­here Temperatur. Die vereinfachten formelm­igen Zusammenh­nge sind folgende (A in m^2 , T in [K]) (T_U = Umgebungstemperatur):

W ­ rmeleitung	Fouriersches Gesetz	$\dot{Q}_{Ltg} = \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{d} \cdot A$	λ W ­ rmeleitf ­ higkeit des Festk ­ rpers, d Schichtdicke, A Kontaktfl ­ che
Konvektion	Newtonsches Gesetz	$\dot{Q}_{konv} = \alpha(T) \cdot A \cdot (T_{Platte} - T_U)$	α W ­ rme ­ bergangskoeffizient, A LP-Fl ­ che
W ­ rmestrahlung	Stefan-Boltzmann-Gesetz	$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{Platte}^4 - T_U^4)$	ε Emissionskoeffizient (IR), A LP-Fl ­ che, $\sigma = 5.6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, T hier unbedingt in [K]

Typische Zahlenwerte in den obigen Gleichungen sind:

- W­rmeleitf­higkeit (Stoffeigenschaft)

Stoff	λ [W/(m ­ *K)]
Reinkupfer	390
Reinaluminium	240
Reinsilizium @ 100 $^\circ\text{C}$	117
Rein-FR4	0.3
FR4 realistisch	0.5
Luft (ruhend)	0.026

- W­rme­bergangszahl (keine Stoffkonstante !!)³

Str ­ mungstyp	α [W/m ­ ² *K]
Freie Konvektion (Auftriebsstr ­ mung)	$\alpha \approx 5 \dots 7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
Erzwungene Konvektion (L ­ fterstr ­ mung)	$\alpha \approx 10 \dots 50 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ je nach Luftgeschwindigkeit

- Infrarot-Emissionskoeffizient (Oberfl­cheneigenschaft)

Oberfl ­ che	ε [-]
Aluminium (Metalle) poliert	0.03
Aluminium oxidiert	0.2 ... 0.3
Lacke (alle Farben), Kunststoffoberfl ­ chen	0.8 ... 0.9
Keramik	0.5

Eine quantitative Auswertung f­ur ein Beispiel wird weiter unten gegeben: f­ur die dort beschriebene Situation verliert die Leiterplatte ca. 1/3 der Verlustleistung ­ber Konvektion und ca. 2/3 ­ber Infrarotstrahlung. Die Berechnung des Energiegleichgewichts ist wg. der nicht-linearen Zusammenh­nge in $K(T)$ zwischen Temperatur und W­rme­fluss (Stichwort Nusselt-Korrelationen), und der unbekannt­ten Gr­o­e des Temperaturflecks mit analytischen Methoden unseres Wissens nicht allgemein m­glich. Deshalb werden wir in Abschnitt 3.5 und Kap. 4 numerische Verfahren mit kommerziell erh­ltlicher Software verwenden.

3.3. Erste Simulationsversuche

Wir verlassen jetzt die eingetretenen Pfade und gehen die Sache mit numerischen Methoden an. Darunter verstehen wir Computersimulation der Thermodynamik *und* der Str­mungsmechanik in und um das System Leiterbahn

³ Die Bestimmung von α ist ein weites Feld. α h­ngt nicht nur von der Luftgeschwindigkeit ab, sondern auch von der Geometrie und Gr­o­e des umstr­mt­en K­rpers.

→ Leiterplatte → Umgebung in 3 Dimensionen. Wir behandeln hier nur den thermischen Beharrungszustand. Die partiellen Differentialgleichungen, die dabei in diskretisierter Form numerisch gelöst werden, sind die Fouriergleichung (Wärmeleitung), die Navier-Stokes-Gleichung (Impulserhaltung der Strömungsmechanik) und die Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung). Dazu kommen noch universelle, dimensionslose Wärmeübergangsgesetze (Wandfunktionen). Wir benutzen das Programm FLOTHERM[®] von Flomerics. Die Genauigkeit der Ergebnisse liegt in der Größenordnung von +- 5% bzgl. Umgebungstemperatur.

Wir verfolgen 2 Ziele:

- 1) zu verstehen, was der Hintergrund der Unterschiede der IPC und der DN. Kann man auf rechnerischem Wege die Kurven reproduzieren?
- 2) Sollten die IPC Kurven berechenbar sein, dann werden wir die Methode auf *neue Szenarien* anwenden, für die die IPC Kurven nicht gemacht sind.

Die geometrischen Größen sind wie in Abb. 3-4 definiert.



Abb. 3-4: Definition der Breite und Dicke der Leiterbahn auf der Leiterplatte

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 „reinem“ FR4 ($\lambda=0.3$ W/m K, $\epsilon=0.9$),
 - darauf *einer* Leiterbahn aus Kupfer von Länge $L=100$ mm, Dicke $d=35$ μm (=1 oz),
 - optional einer Cu-Ebene auf der Rückseite der Leiterplatte,
 - einem Luftvolumen, das etwas größer ist als die Leiterplatte in der die Luft in freier Konvektion strömt und
 - stellen die Leiterplatte senkrecht (das ist nicht wesentlich).
- In das Leiterbahnvolumen legen wir eine feste Leiterbahntemperatur T_{LB} (bzw. Übertemperatur ΔT).
 - FLOTHERM berechnet das Energiegleichgewicht aus Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung⁴ für freie Konvektion mit strömungsmechanischen Methoden (ohne Vorgabe des Wärmeübergangs)
 - Wir lassen uns aus dem Endergebnis den gesamten abgegebenen Wärmestrom (Leistung) P , der die Leiterplatte und Leiterbahn verlässt, ausdrucken.
 - Aus dem Wärmestrom P folgt nach Gl. (3-1) und (3-2) die Stromstärke I .

3.3.1. Keine rückseitige Cu-Ebene

Das Ergebnis für $T_U=20$ °C, $T_{LB}=40$ °C ($\Delta T=20$ °C), $b=5$ mm (=197 mils), $d=35$ μm ($A=0.175$ mm²) ist

$$\dot{Q}_{rad} = 0.34 \text{ W}, \dot{Q}_{konv} = 0.20 \text{ W} \Rightarrow P = 0.54 \text{ W}$$

Die dazugehörige Stromstärke folgt aus

$$I = (P / R)^{1/2} = \left(P \cdot \frac{b \cdot d}{L \cdot \rho_{20} (1 + \alpha_{20} (T_{LB} - 20))} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

und ergibt $I=7.1$ A.

Das berechnete Temperaturbild auf der LP ist in Fig. 3-5 dargestellt. Wegen der geringen Leitfähigkeit des FR4 ist die Wärmespreizung auf/in der Leiterplatte klein. Man sieht anhand dieser Abbildung, dass je länger die Leiterbahn ist, auch die Kühlfläche in gleichem Maße zunimmt. Deshalb ist die Länge kein Input Parameter für die IPC-2221.

⁴ Dauert weniger als 1 Minute auf dem PC.

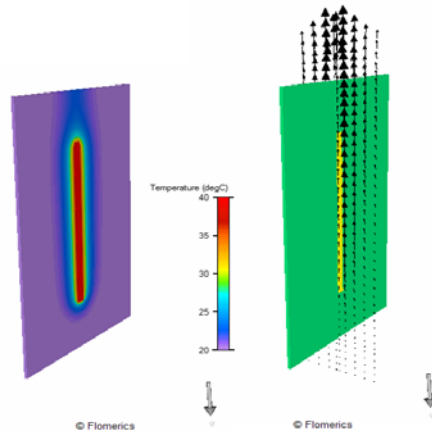


Abb. 3-5: Perspektivische Darstellung des Simulationsergebnis f­ur eine 100 mm langen Leiterbahn ($b=5$ mm, $d=35$ μ m) mit 20­°C ­U­bertemperatur auf einer Euro-LP aus reinem FR4. **Links:** Oberfl­achentemperaturen sind als Farben dargestellt, **rechts:** berechnete Luftstr­omung (v_{\max} ca. 0.3 m/s).

3.3.2. Mit r­uckseitiger Cu-Ebene

- Wie in vorhergehender Rechnung: 1 belastete Leiterbahn: $d=35$ μ m, $b=5$ mm, $L=0.1$ m, $\Delta T=20$ $^{\circ}$ C
- auf der R­uckseite eine vollgeflutete Cu-Ebene: Dicke=35 μ m, 100 x 160 mm

Ergebnis f­ur Leiterbahnbreite $b=5$ mm: $P=1.30$ W entspricht $I=11.0$ A.

Die Stromst­arke ist h­oher, weil die W­arme durch die Kupferfl­ache besser verteilt wird und dadurch eine effektiv gr­o­ere Fl­ache zur W­arme­u­bertragung an die Umgebu­ng hat.

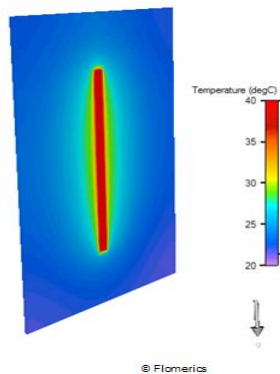


Abb. 3-6: Euro-LP mit einer belasteten Leiterbahn ($b=5$ mm, $\Delta T=20$ $^{\circ}$ C) und eine kompletten Cu-Ebene auf der R­uckseite ($d=35$ μ m). Die W­armespreizung ist wesentlich deutlicher als in Fig. 3-5.

3.3.3. Innenliegende Leiterbahn

Das gleiche Beispiel f­ur die Leiterbahn mittig in der Innenlage (ohne Kupferr­uckseite) gerechnet ergibt: $P=0.57$ W, $I=7.3$ A. Es gibt also kaum einen Unterschied zu 0.54 W.

Wir sehen, dass bei innenliegenden Leiterbahnen genau die H­alfte von 7 A herauskommen soll, ist physikalisch durch nichts motiviert. Brooks (1998) schreibt s­uffisant: „I have heard rumors (which I have not confirmed) that the IPC internal charts were simply derated 50% from the external ones.“ Jouppi (2002) best­atigt ebenfalls, dass es keinen experimentellen Hinweis darauf gibt, dass sich innenliegende Leiterbahnen wesentlich anders verhalten sollten als aussenliegende.

3.3.4. Vergleich mit IPC und DN

Wir vergleichen in Abb.3-7 unsere numerischen Rechnungen mit Gln. (2-1) und (2-3). Die ­U­bereinstimmung ist sehr gut.

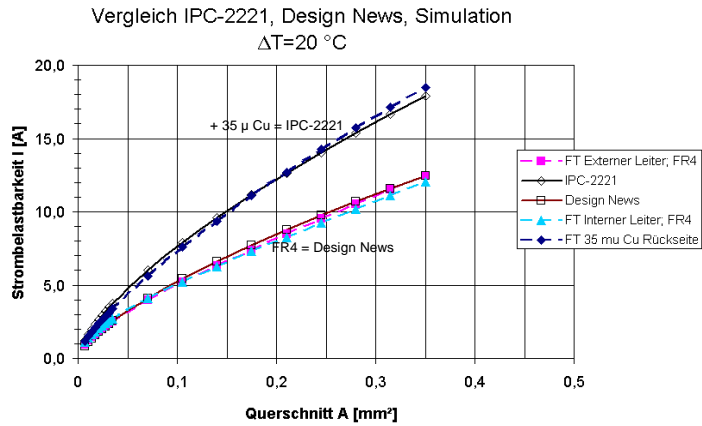


Abb. 3-7: Strombelastbarkeit zu $d=35\ \mu\text{m}$ und $\Delta T=20\ \text{°C}$ aus Simulationsergebnissen („FT“) und Brook’s Fitkurven zur IPC-2221 und zu „Design News“.

Man kann also zusammenfassen, dass

- die IPC-Kurven **nur** f­ur eine 2-seitig kupferkaschierte Leiterplatte mit unge­z­t­ter R­u­ck­sei­te und
- die DN Kurven nur f­ur eine 1-lagige Leiterplatte gelten.

3.4. Neue Messungen im Rahmen der IPC-2152

Jouppi (2002) pr­asentiert f­ur die Neuauflage der IPC-Designrichtlinie, genannt IPC-2152⁵, einen neuen experimentellen Aufbau und einen Teil der daraus abgeleiteten Strom-Temperatur-Zusammenh­ange. Neu gegen­uber der IPC-2221 sind Messungen unter Vakuumbedingungen. Die Ergebnisse der entsprechenden Modelle sind in Abb. 3-8 mit seinen Messungen verglichen. Die neuen Messungen zur IPC-2152 k­onnen durch unsere numerischen Rechnungen ebenfalls bestens reproduziert werden.

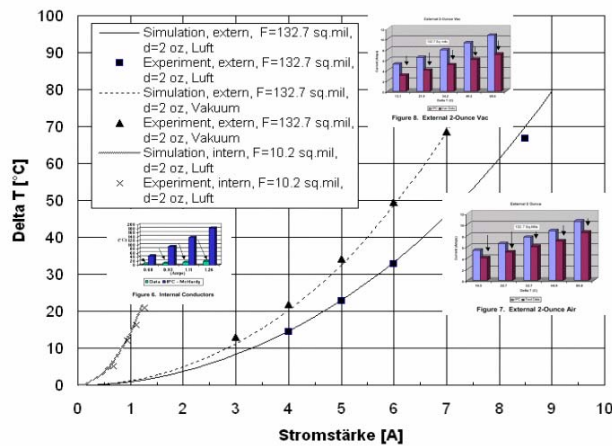


Abb. 3-8: Temperatur­an­stieg in der Leiterbahn als Funktion der Stromst­arke f­ur 3 Szenarien aus der neuen IPC-2152. Symbole: Messungen (Jouppi, 2002), Kurven: Simulationen. (Adam, 2002b).

3.5. Kritik an der IPC-2221

Aus der Analyse dieser und anderer Berechnungsergebnisse kann man folgende Kritikpunkte an der IPC-2221 zusammenfassen

- Die Diagramme (Abb. 2-1) gelten nur f­ur einen Typ von Leiterplattenaufbau.

⁵ Die Arbeiten an dieser Richtlinie scheinen eingeschlafen zu sein.

- Es gibt kaum Unterschiede zwischen der Temperaturerh­hung einer au­enliegenden und innenliegenden Leiterbahn. Die Unterscheidung ist Hysterie.
- Die reine Abh­ngigkeit der Strombelastbarkeit von A in Abb. 2-1 kann nicht richtig sein. Beispielsweise hat die Leiterbahn in Abb. 3-9 den gleichen Querschnitt, aber es ist die Grundfl­che auf der Leiterplatte, die den W­rmeeintrag in die LP und dadurch die K­hlung mitbestimmt. Die linke Konfiguration kann bei gleicher Temperatur mit einem h­heren Strom belastet werden.

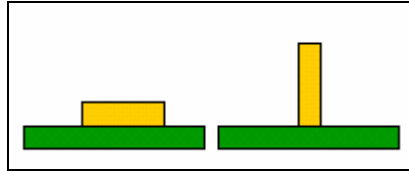


Abb. 3-9: Fehler in der IPC-2221. Die Leiterbahnen links und rechts haben den gleichen Querschnitt, k­nnen aber bei gleichem Strom nicht die gleiche Temperatur haben.

4. Gerechnete Strombelastbarkeitsdiagramme

4.1. DN- und IPC-Situation

Mit dem oben diskutierten Berechnungsmodell und –verfahren berechnen wir Leitertemperaturen f­ur ein erweiter­tes Feld von Parametern.

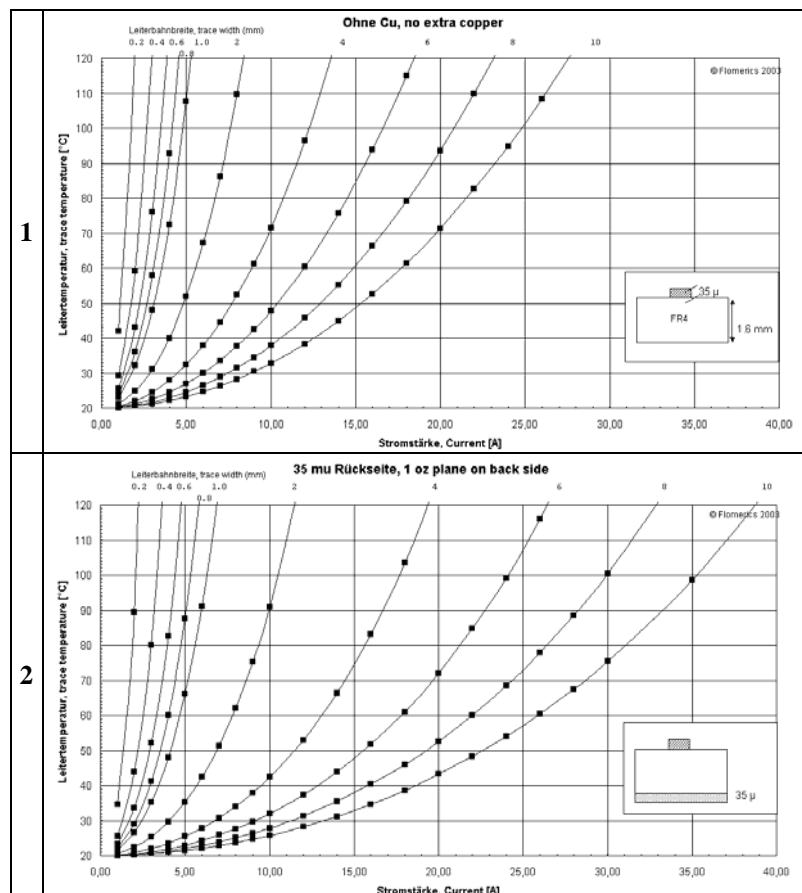
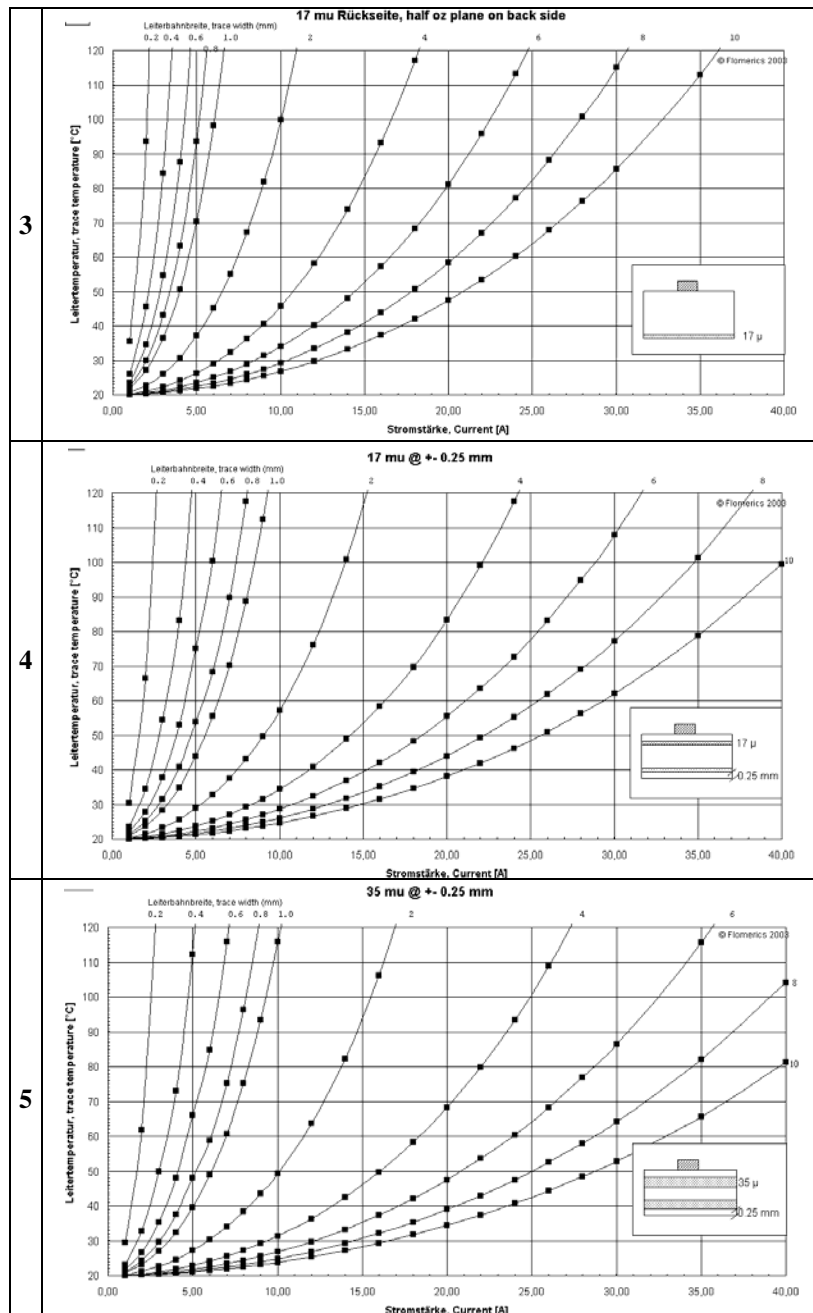


Abb. 4-1: Temperatur-Strom-Diagramme f­ur eine 35­ μ m dicke Leiterbahn bei Umgebungstemperatur 20­ $^{\circ}$ C. **1:** auf einer reinen FR4 Leiterplatte (DN-Situation), **2:** auf einer LP mit 35­ μ Cu-R­ckseite (IPC-Situation). Schar­parameter ist die Leiterbahnbreite b (in mm) zwischen 0.2 und 10 mm.

4.2. Strombelastbarkeit in anderen FR4 Leiterplattenaufbauten

Die erfolgreiche Reproduktion der IPC-2221 Kurven ermutigt zur Anwendung auf andere Leiterplattenszenarien. Die berechneten Leiterplattenaufbauten⁶ (Adam, 2003, 2004a,b,c) sind in Abb. 4-2 zusammengefasst. Das Basismaterial ist FR4, Leiterplattendicke ist immer 1.6 mm.



⁶ Die Leiterplattenaufbauten wurden vorgeschlagen von Dr. Ch. Lehnberger, Andus GmbH, Berlin

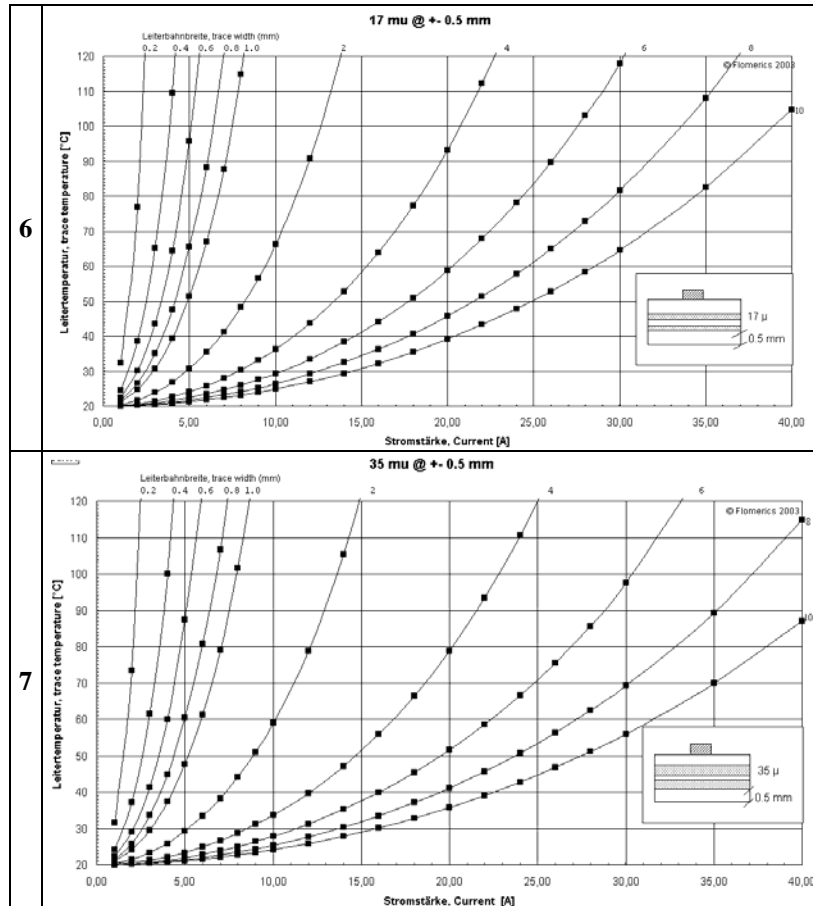


Abb. 4-2: Temperatur-Strom-Diagramme von Leiterplatten mit unterschiedlichem Lagenaufbau und einer 35 μm dicken Leiterbahn unterschiedlicher Breite (aus Adam, 2003).

4.3. Empirische Zusammenhänge der Parameter

4.3.1. Leiterbahnbreite

Da sich die Diagramme ähnlich sehen, versuchen wir einen ‚universellen‘ Zusammenhang zu entwickeln. Die Ergebnisse von Abb. 4-1(2), d.h. die IPC Situation, dekadisch doppelt-logarithmisch aufgetragen, zeigen Geraden der Steigung 2, d.h. einen $\Delta T = B * I^2$ -Zusammenhang (Abb.4-3 links). Jede Gerade gehört zu einer bestimmten Leiterbreite b , wobei die unteren zu den großen Leiterbreiten gehören. Nun experimentieren wir mit einer modifizierten y-Achse, um die verschiedenen Leiterbreiten zu vereinheitlichen. Zwischen $y' = \Delta T / b[\text{mm}]^{-1.4}$ und $y' = \Delta T / b[\text{mm}]^{-1.5}$ ordnen sich die berechneten Werte bei nicht all zu kleinen Stromstärken fast alle auf einer $\log y'$ - $\log I$ -Geraden der Steigung 2. Also ist $y' = cI^2$. Wir entscheiden uns für den Exponenten -1.45 (Abb. 4-3 rechts)

$$\Delta T = B_{LP} b^{-1.45} I^2 \quad . \quad (4.1)$$

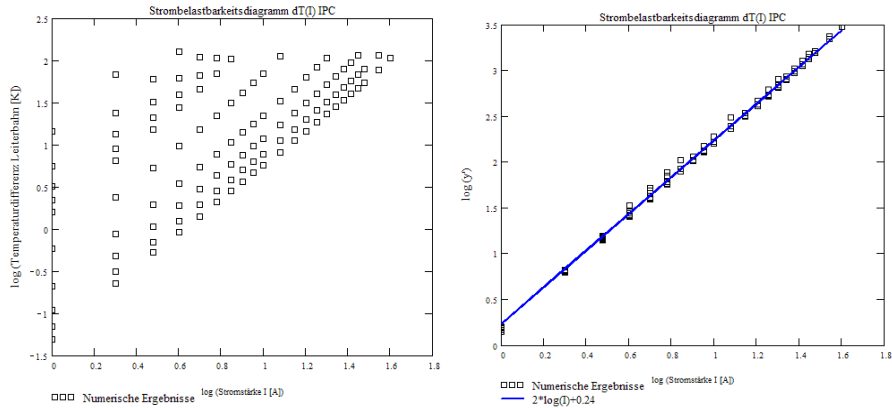


Abb. 4-3: Entwicklung eines empirischen Zusammenhangs zwischen Temperaturerhoerung, Stromstärke und Leiterbahnbreite. Links: Rohversion f­ur die IPC Leiterplatte ergibt im doppeltlogarithmischen Diagramm eine Gerade mit Steigung 2. Rechts: mit Einbeziehung der Leiterbreite in y' .

Die Proportionalitätskonstante B_{LP} hängt vom Leiterplattenaufbau (Kupfergehalt und Abstand der Leiterbahn von der ersten Cu-Lage) ab und ist f­ur die IPC-Werte (Abb. 4-3) $B_{LP} = 10^{0.24} = 1.7$. Die Hilfsdiagramme der anderen Leiterplatten sehen sehr ähnlich aus und in $\log y'$ nur nach oben oder unten parallel verschoben. In Tab. 4-1 fassen wir die Koeffizienten B_{LP} zusammen. Je besser die effektive thermische Leitfähigkeit der Leiterplatte ist, desto kleiner ist B_{LP} .

Tab. 4-1: Werte des Koeffizienten B_{LP} f­ur Gl. (4.1)

Leiterplattenaufbau	$\log B_{LP}$	B_{LP}
1 (DN)	0.56	3.6
2 (IPC)	0.24	1.7
3	0.30	2.0
4	0.10	1.2
5	-0.02	0.95
6	0.13	1.3
7	0.03	1.1

Es ist näherungsweise m­oglich auch den Koeffizienten B durch geometrische und thermische Eigenschaften der Leiterplatte zu parametrisieren. Eingangsgr­o­en sind der thermische Widerstand zwischen Oberfläche und erster Kupferlage und die horizontale Leitfähigkeit (quasi Kupfergehalt) der Leiterplatte. Wegen der Komplexität verzichten wir hier jedoch auf eine Darstellung.

4.3.2. Leiterbahndicke

Die berechneten obigen Diagramme (wie die der IPC-2221 auch) *gelten nur* f­ur die Leiterbahndicke $d=35 \mu\text{m}$. Wie sind die Verhältnisse bei anderer Dicke d ? Entscheidend f­ur die Temperatur ist der Wärmeeintrag durch die Verlustleistung P *­*ber den Footprint der Leiterbahn. Angenommen, wir wollen die obigen ΔT -I-Diagrammen f­ur eine Leiterbahn der doppelten Dicke, also $d=70 \mu\text{m}$ verwenden, dann m­ussen wir **die Kurve f­ur dieselbe Leiterbahnbreite b** benutzen. Allerdings ist der Widerstand der Leiterbahn bei $d=70 \mu\text{m}$ nur halb so gro­o. Wegen $P=R \cdot I^2$ w­urde aber ein $\sqrt{2}$ -mal stärkerer Strom wieder die gleiche Verlustleistung und damit die gleiche Temperaturerhoerung bringen. Die Temperatur ist gleich, wenn die Leistung $R \cdot I^2$ und die Leiterbreite gleich sind. Diese Skalierungsregel f­ur andere Leiterbahndicken d kann man demnach schreiben als

$$\frac{1}{35 \mu \cdot b} \cdot I_{35 \mu}^2 = \frac{1}{d \cdot b} \cdot I^2 \quad (4.2)$$

$I_{35 \mu}$ wird in Gl. (4.1) benutzt bzw. definiert

$$\Delta T = B_{LP} b^{-1.45} I_{35 \mu}^2$$

$I_{35 \mu}$ aus Gl. (4.2) darin eingesetzt ergibt als allgemeinen Zusammenhang (d ist nat­urlich in μm zu messen, b in mm):

$$\Delta T = B_{LP} \left(\frac{b}{\text{mm}} \right)^{-1.45} \left(\frac{d}{35 \mu\text{m}} \right)^{-1} \cdot I^2 \quad (4.3)$$

Erinnern wir uns an Brook's Gl. (2.5) $I = k_{DN} \cdot \Delta T^{0.46} \cdot W^{0.76} \cdot Th^{0.54}$! Wenn wir Gl. (4.3) nach I auflösen, ergibt sich

$$I = B_{LP}^{-0.5} \cdot \Delta T^{0.5} \cdot \left(\frac{b}{\text{mm}} \right)^{0.72} \cdot \left(\frac{d}{\mu\text{m}} \right)^{0.5}$$

also so gut wie das identische Ergebnis, nur dass ihm die entsprechende Empirie für die IPC nicht zur Verfügung stand.

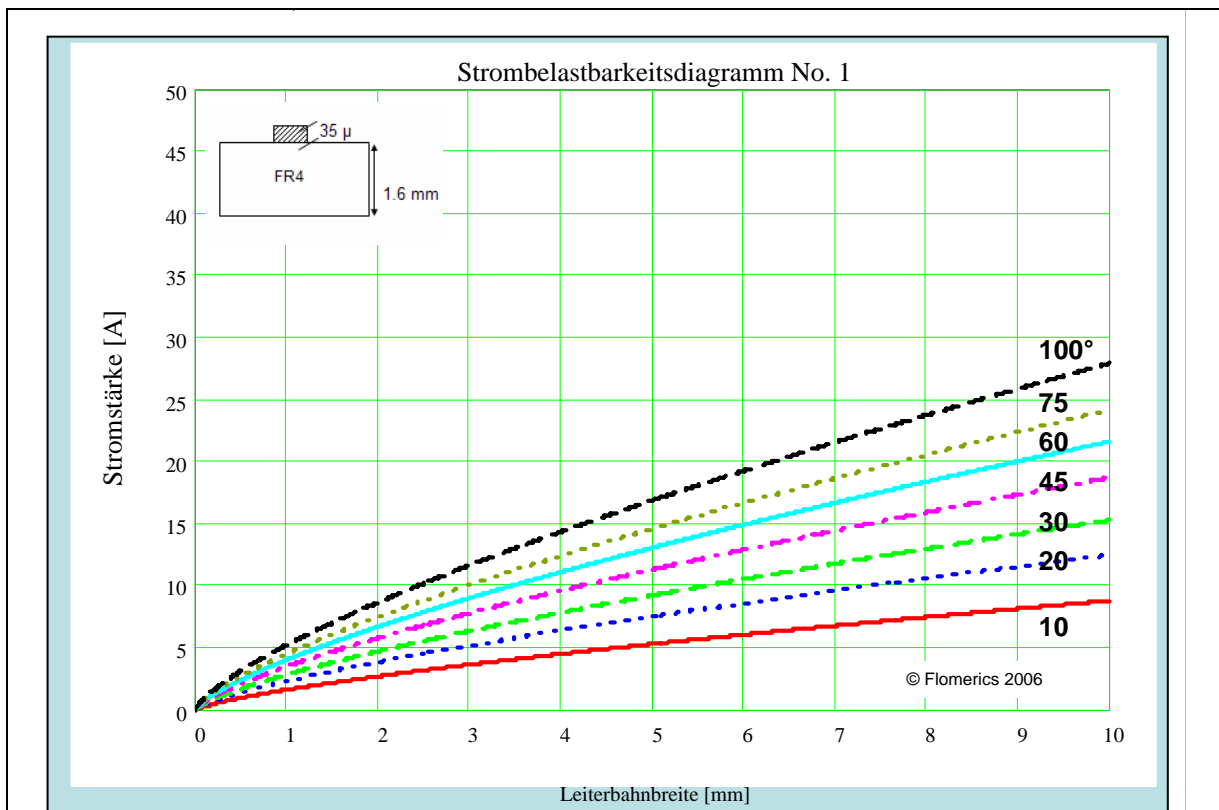
Ein kleines Anwendungsbeispiel: Eine Leiterbahn mit Breite $b=5$ mm aus Dickschichtkupfer $d=100 \mu\text{m}$ auf einer einlagigen Leiterplatte (DN-Typ) darf sich um $40 \text{ }^\circ\text{C}$ gegen Umgebung erhitzen. Die maximale Stromstärke ist dann ca. 18 A

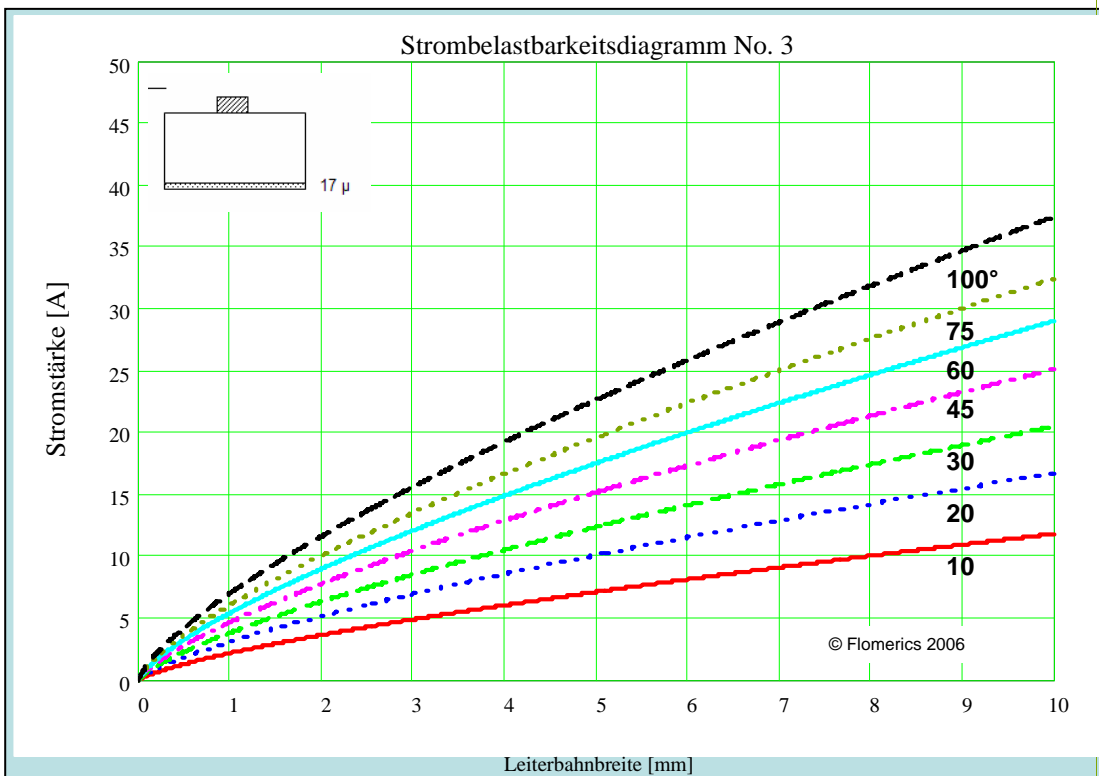
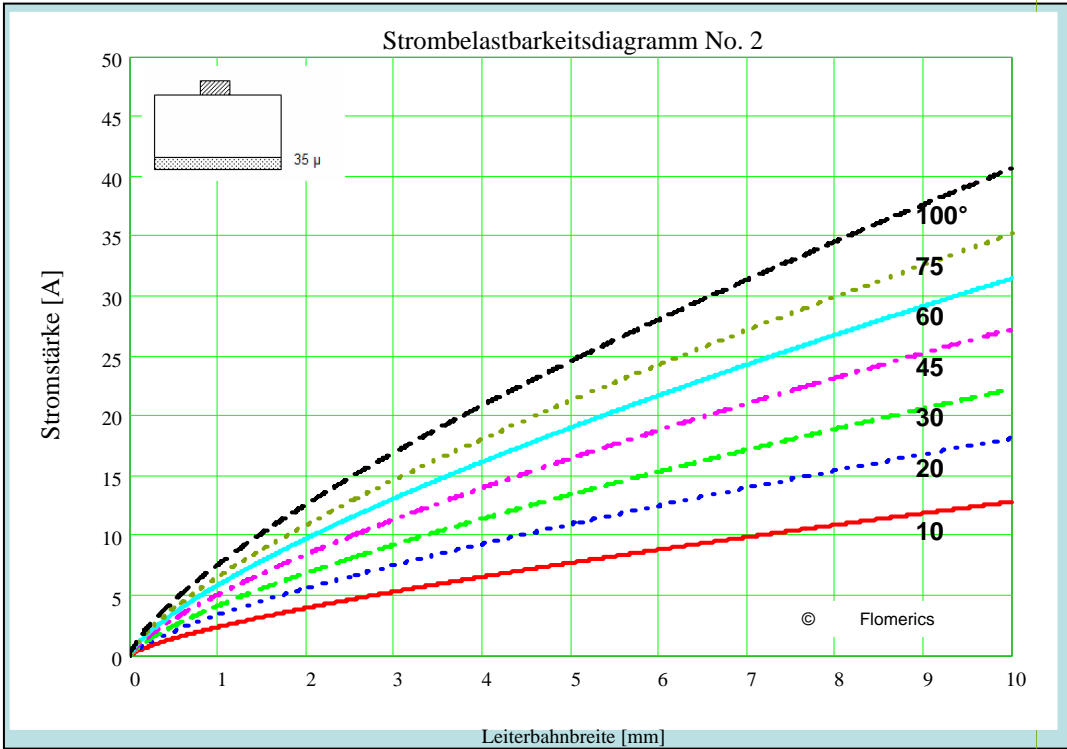
4.3.3. Strombelastbarkeit in IPC Darstellung

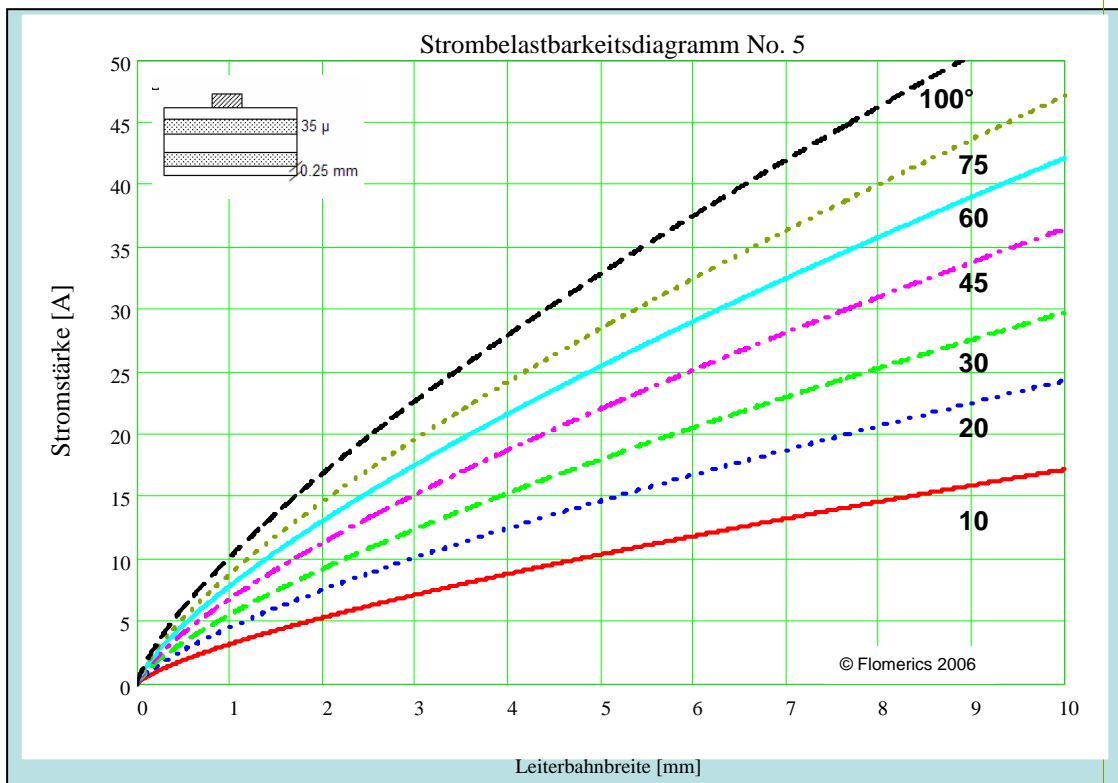
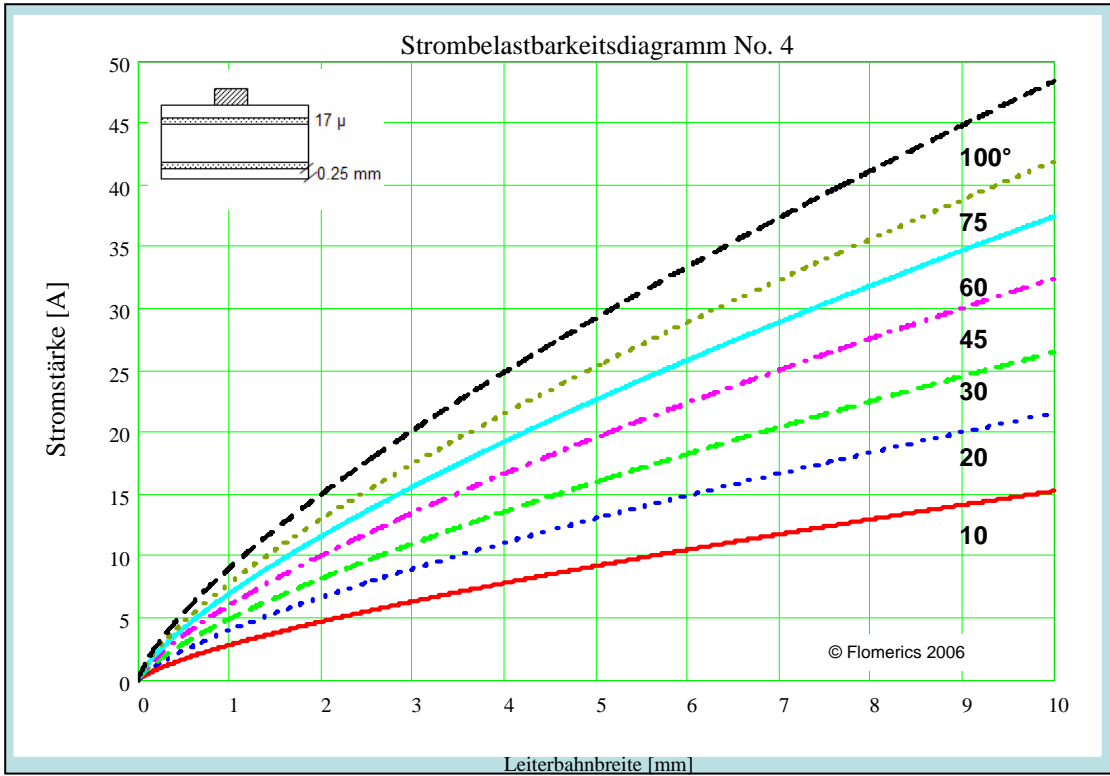
In den folgenden Diagrammen ist nach Gl. (4.4) mit den Koeffizienten aus Tab. 4-1 die Standard IPC Darstellung $I(\Delta T)$ für $d=35 \mu$ aufgetragen

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T}{B_{LP}} \left(\frac{b}{\text{mm}} \right)^{1.45}} \quad (4.4)$$

Für eine andere Leiterdicke d (in μm) ist der abgelesene Wert von I mit $\sqrt{d/35\mu\text{m}}$ zu multiplizieren. Die Nummerierung entspricht Tabelle 4-1.







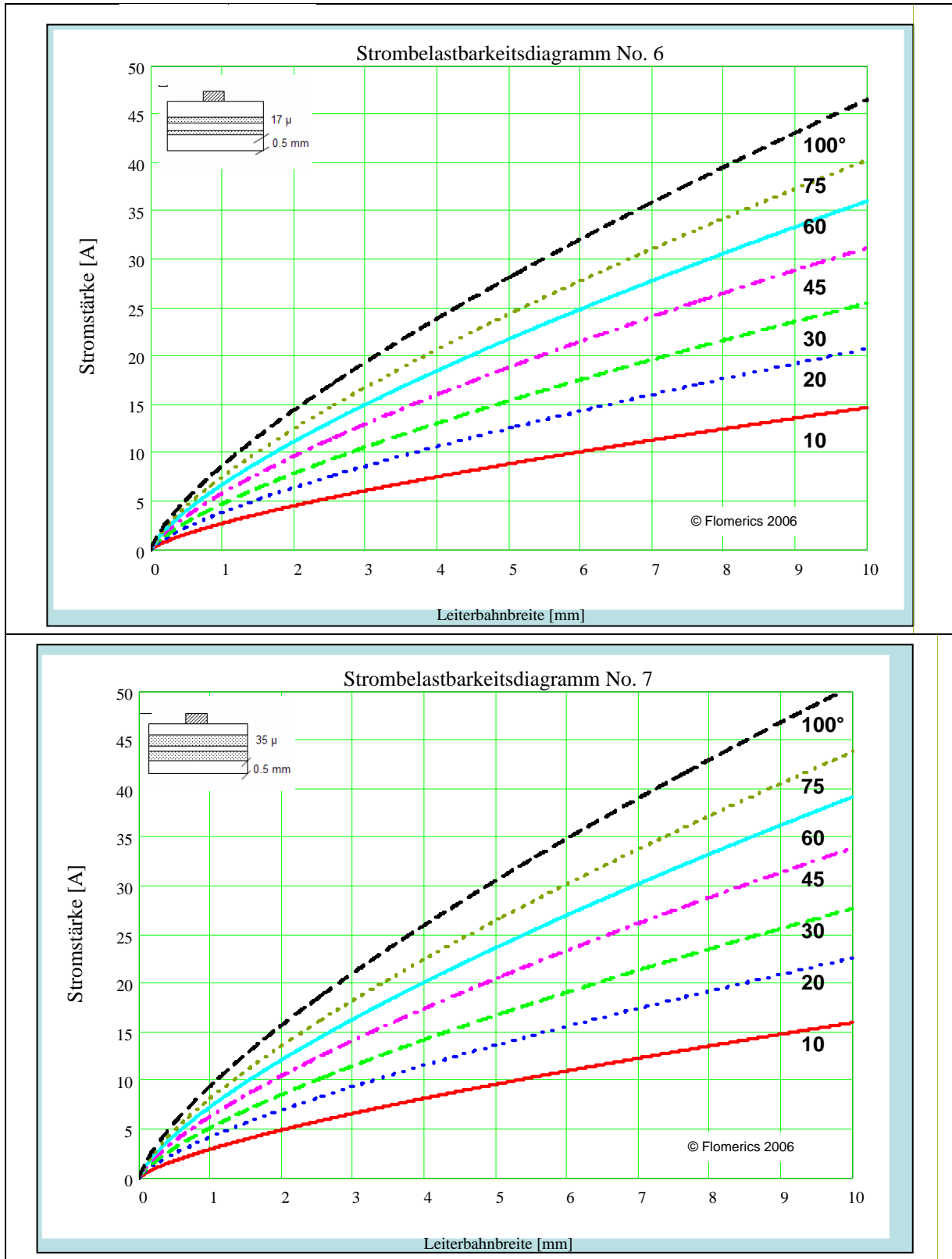


Abb. 4-4: Strombelastbarkeit in einer IPC-ähnlichen Darstellung für die FR4-Leiterplattenaufbauten aus Tab. 4-1. Die Leiterbahndicke ist 35 μm (1 oz). Für eine andere Leiterbahndicke d (in μm) ist der abgelesene Wert von I mit $\sqrt{d / 35 \mu\text{m}}$ zu multiplizieren. Scharparameter ist die Temperaturerhöhung in °C.

4.4. Polyimidfolie

In flexiblen Leiterplatten(teilen) werden d­unne Polyimidfolien benutzt. Wir berechnen T(I) Diagramme wie in Kap. 3.3 f­ur eine d­unne Polyimidfolie der Dicke 0.3 mm mit W­armeleitf­ahigkeit $\lambda=0.3$ W/m-K.

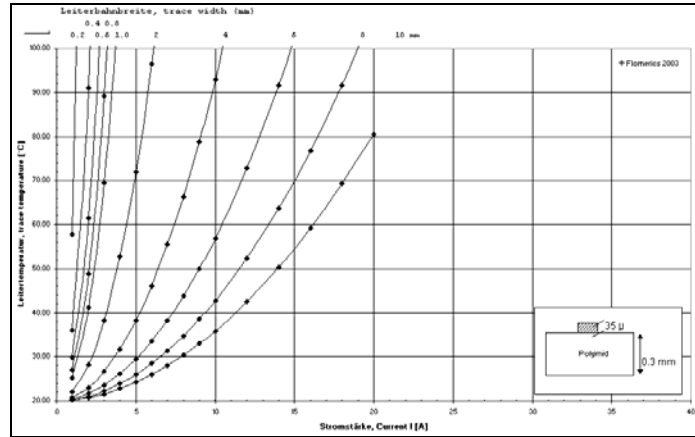


Abb. 4-5: Temperatur-Strom-Diagramm f­ur eine 35­ μ m dicke Leiterbahn auf einer Polyimidfolie der Dicke 0.3 mm.

Die gleiche Analysetechnik wie in Kap. 4.3.1. ergibt

$$\Delta T = 4.9 \left(\frac{b}{\text{mm}} \right)^{-1.45} \left(\frac{35\mu}{d} \right) I^2 \quad (4.5)$$

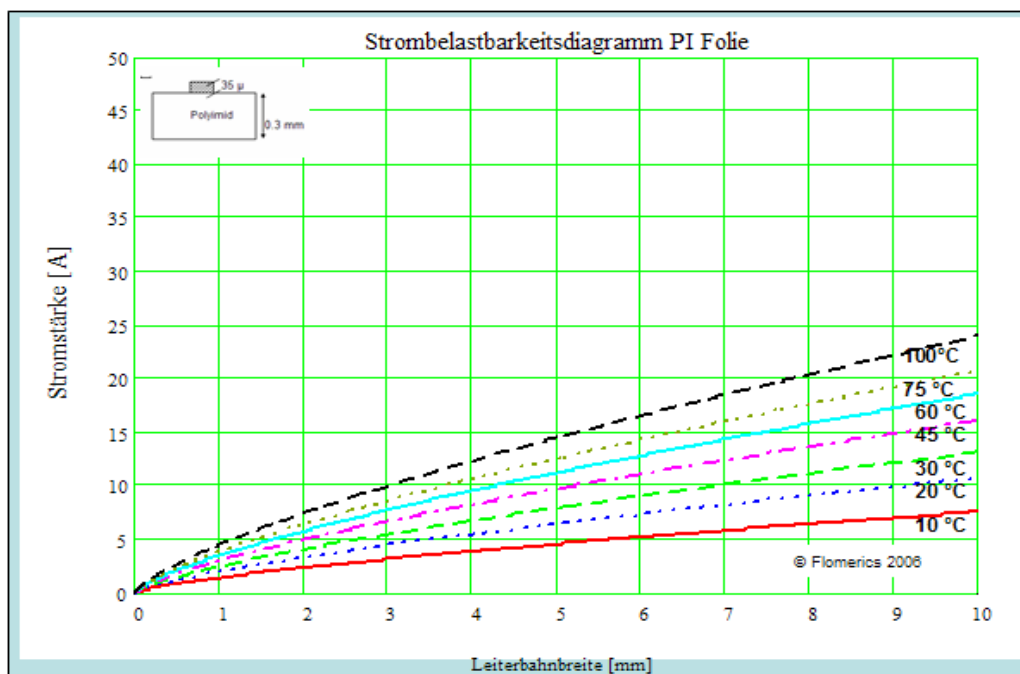


Abb. 4-6: Strombelastbarkeit in einer IPC­ahnlichen Darstellung f­ur eine d­unne Polyimidfolie. Die Leiterbahndicke ist 35 μ m (1 oz). F­ur eine andere Leiterbahndicke d (in μ m) ist der abgelesene Wert von I mit $\sqrt{d/35\mu\text{m}}$ zu multiplizieren. Scharparameter ist die Temperaturerh­ohung.

4.5. Keramiksubstrat

Das kunststoffbasierte Tr­germaterial ersetzen wir nun durch eine 1 mm dicke Keramikplatte mit W­rmeleitf­higkeit $\lambda=16$ W/m K. Er gibt sich (Adam, 2004c)

$$\Delta T = 0.45 \left(\frac{b}{\text{mm}} \right)^{-1.1} \left(\frac{35 \mu}{d} \right) I^2. \quad (4.6)$$

Man beachte, dass der Exponent f­ur b sich signifikant ge­ndert hat.

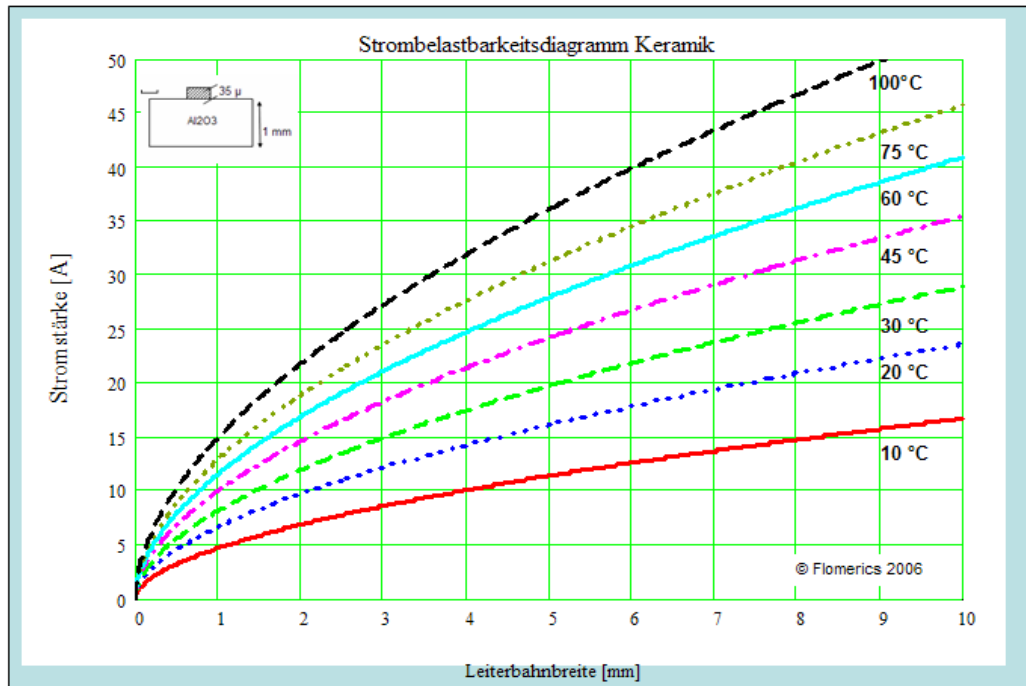


Abb. 4-7: Strombelastbarkeit in einer IPC-­hnlichen Darstellung f­ur ein 1 mm dickes Keramiksubstrat. Die Leiterbahndicke ist 35 μm (1 oz). F­ur eine andere Leiterbahndicke d (in μm) ist der abgelesene Wert von I mit $\sqrt{d / 35 \mu\text{m}}$ zu multiplizieren. Scharparameter ist die Temperaturerh­hung.

5. Nicht-homogene Leiterbahnen

5.1. Lokale Querschnittsverengung

Sollte eine Leiterbahn ihren Querschnitt ­ndern, dann sind die IPC Diagramme nicht mehr zu gebrauchen. Wir zeigen dies an einem einfachen gerechneten Beispiel. In K­urze die Parameter:

- 2 Zuleitungen: 50 mm Leiterbahnl­nge, 2 mm Leiterbreite
- Engstelle: 3 mm L­nge, 0.7 mm Breite
- Leiterdicke 35 μm Cu

Wir w­hlen die Stromst­rke so, dass ohne Engstelle gem­a­ß Strombelastbarkeitsdiagramm No.1 eine Temperaturerh­hung $\Delta T=60$ ­ C, d.h. eine Leitertemperatur von 80­ C, herauskommt (Abb. 5-1).

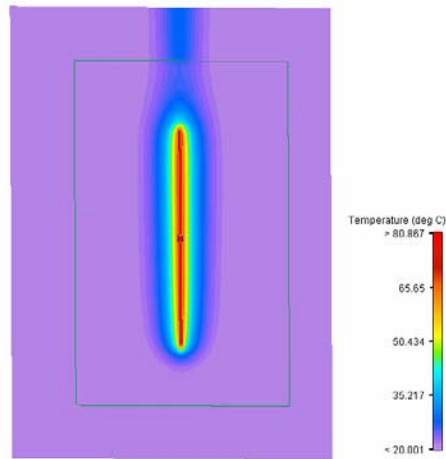


Abb. 5-1: Basismodell ohne Engstelle: nur Zu- und Ableitung mit 6.7 A belastet. Die Temperatur der Leiter ist erwartungsgemäß 78°C bis 80 °C.

Mit einer Engstelle ist die IPC leider nicht zu gebrauchen. Die ergäbe nämlich Temperaturen über 200 °C, wenn man in Gl. (4.3) die geometrischen Daten nur für die Engstelle einsetzt. In Wirklichkeit wirken die Zu- und Ableitungen als Kühlkörper, so dass die Engstellentemperatur auf 111°C einstellt (Abb. 5-2 und 5-3).

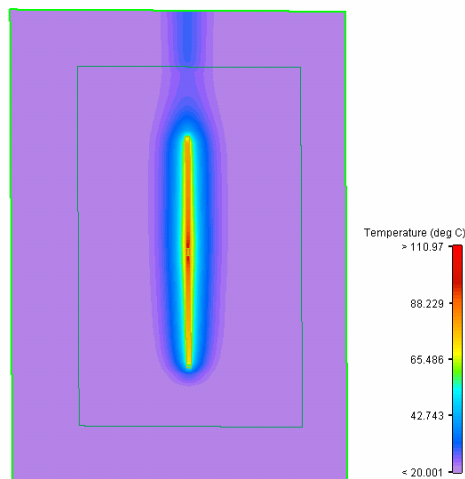


Abb. 5-2: Modell mit Engstelle. Die Temperatur steigt dort (nur) auf 111 °C.

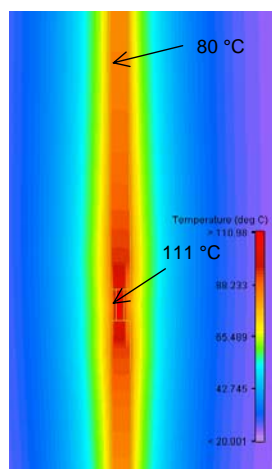


Abb. 5-3: Zoom um die Engstelle.

5.2. Wärmeabfuhr durch Anschlusskabel

Wie immer in der Elektronikkühlung ist es gefährlich nur Teile des wärmetransportierenden Netzwerks zu betrachten. Oft stimmen Berechnung und Messung nicht überein, weil die Wärmeableitung über die Anschlusskabel nicht berücksichtigt wird. Die Kabel sind in der Thermographie nicht warm, weil sie durch Joulesche Heizung erwärmt werden, sondern weil sie Wärme von der Wärmequelle zum Netzteil transportieren. Das Beispiel in Abb. 5-4 links zeigt eine 4-lagige Testleiterplatte mit 4 Leiterzügen. Die Anschlusskabel sind mit einem MKDSP25 Steckverbinder von Phoenix Contact angeschlossen. Über jedes Kabel fließen 100 A und heizen die Oberfläche auf ca. 60°C-65 °C auf. Bei genauer Betrachtung der Thermographieaufnahme (rechts) sieht man dass die Anschlusskabel warm sind.

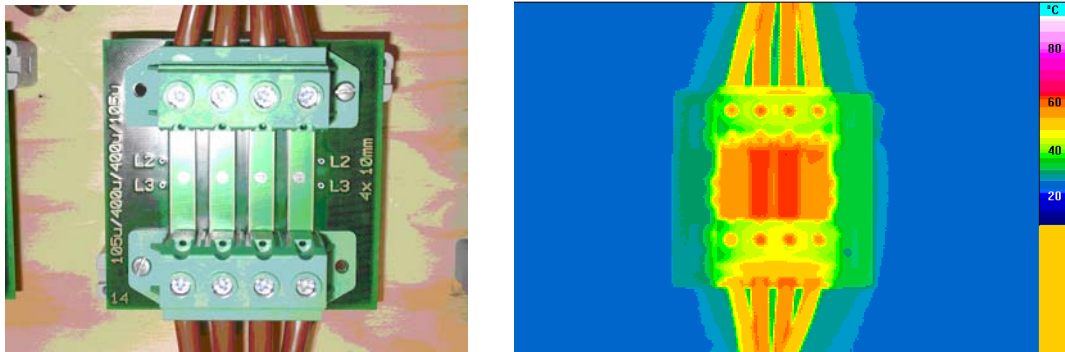


Abb. 5-4: 4-lagiges Testboard mit 4x100 A Belastung. Die Infrarotaufnahme zeigt warme Kabel (Quelle: Phoenix Contact GmbH, Blomberg).

Die numerische 3D-Simulation der Leiterplatte mit ihren Leiterbahnen und dem Steckverbinder ergibt demnach eine mit 106 °C (Abb. 5-5 links) zu hohe Temperaturen (Adam, 2005). Erst durch Hinzunahme der Kabel, obwohl sie ebenfalls mit 100 A geheizt werden, stimmen Messung und Rechnung überein. Die Wärme fließt von den Leiterbahnen über den Steckverbinder in die Kabel. Die Kabel werden durch die Wärmabgabe an die Umgebung und an das Netzteil als Wärmesenke gekühlt.

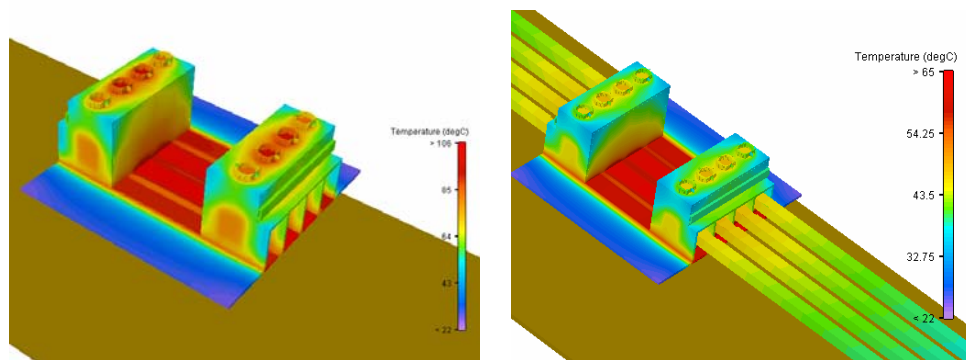


Abb. 5-5: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit und ohne Kabel. Mit Kabel stimmen sie mit der Messung überein.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag haben wir 4 Ziele erreicht:

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.
4. Fassen der berechneten Ergebnisse in formelmäßige Zusammenhänge (Korrelationen).

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

Danksagung

Dr. D. Niemeier, Fa. Flomerics, sei für sorgfältiges Korrekturlesen gedankt.

Literaturverzeichnis

- Adam, J.: „*Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Teil I Grundlagen*“. PLUS 4(2002a) Heft 10, S. 1669-1673
- Adam, J.: „*Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Teil II IPC-Richtlinie IPC-D-275: Mythos und Wirklichkeit*“. PLUS 4(2002b) Heft 11, S. 1817-1823
- Adam, J.: *IPC-2152: Neue Richtwerte für die Strombelastbarkeit von Leiterzügen in Leiterplatten*. Konferenzband 11. FED-Konferenz (2003), S. 11-33
- Adam, J.: „*New Correlations Between Electrical Current and Temperature Rise in PCB Traces*“. Proc. 20th IEEE SEMI-THERM Symposium, 292-299 (2004a)
- Adam, J.: „*Strombelastbarkeit von Leiterbahnen III. Weitere Diagramme für Multilayer und Umrechnungsregeln*“, PLUS 6 Heft 4, 513-518 (2004b)
- Adam, J.: „*Neues von der Strombelastbarkeit von Leiterbahnen*“, DVS/GMM-Fachtagung „Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik. GMM-Fachbericht 44, 117-123 (2004c)
- Adam, J.: *Hochstromplatinen: Alleine und im Team*. Phoenix Contact Technologietag (2005)
- Brooks, D.: „*Temperature Rise in PCB Traces*“, pdf-file <http://www.ultracad.com/articles/pcbtemp.pdf> Reprinted from the Proceedings of the PCB Design Conference, West, March 23-27 (1998)
- Brooks, D.: „*Using the IPC temperature charts*“ http://www.ultracad.com/using_ipc_temp_charts.pdf (2001).
- Dyos, G.T., Farrel, T. (Eds.) 1992: *Electrical Resistivity Handbook*. Peter Peregrini Ltd. Stevenage.
- Flomerics Ltd.: www.flotherm.com
- Jouppi, M.R.: *Thermal Characterization of PCB Conductors*, paper IPC 39. Electronics Circuits World Convention 9 Köln, October 7-9 (2002)
- Jouppi, M.R.: <http://www.thermalman.com> (2003). Existiert nicht mehr.