



Fachverband für Design,
Leiterplatten- & Elektronikfertigung

Belastbarkeit von Leiterbahnen auf und in Leiterplatten

Dipl.-Ing. Lothar Oberender

Tel.: +49-30 404 5204

Mobil: +49-172 8767 846

E-mail: lothar.oberender@t-online.de



Inhalt

- Grundlagen
- Strom und Entwärmung
- Die Praxis und Beispiele
- Welche Ressourcen gibt es

Haftungsausschluss/Urheberrecht

Text, Abbildungen und technische Angaben wurden sorgfältig erarbeitet und überprüft und spiegeln die Ansicht und Meinung des jeweiligen Autors wider. Trotzdem sind Fehler nicht völlig auszuschließen. Der Herausgeber/Autor weist darauf hin, dass er für die Fehlerfreiheit keine Gewährleistung und für eventuelle Folgen aus Fehlern keine Haftung übernimmt. Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Reproduktionen, gleichwelcher Art, sind nur mit schriftlicher Zustimmung des FED e.V. und des Autors gestattet.

Elektrischer Widerstand
bei 20 °C

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega]$$

Elektrischer Widerstand
eines Leiters bei 20 °C

$$R_{20} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad [\Omega]$$

ρ = spez. Widerstand [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]

ϱ = Leitfähigkeit [$\text{m}/\text{mm}^2 \Omega$]

l = Leiterlänge[m]

t_{real} = Temperatur [°C]

R_{20} = Widerstand bei 20°C [Ω]

A = Querschnitt [mm^2]

R_t = Widerst. bei realer Temp. [Ω]

Elektrischer Widerstand
bei $t_{\text{real}} - 20$ °C

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] \quad [\Omega]$$

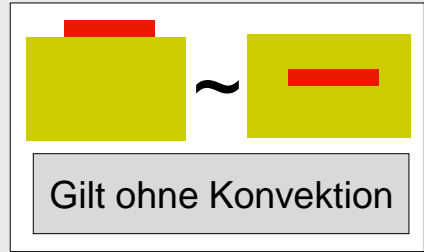
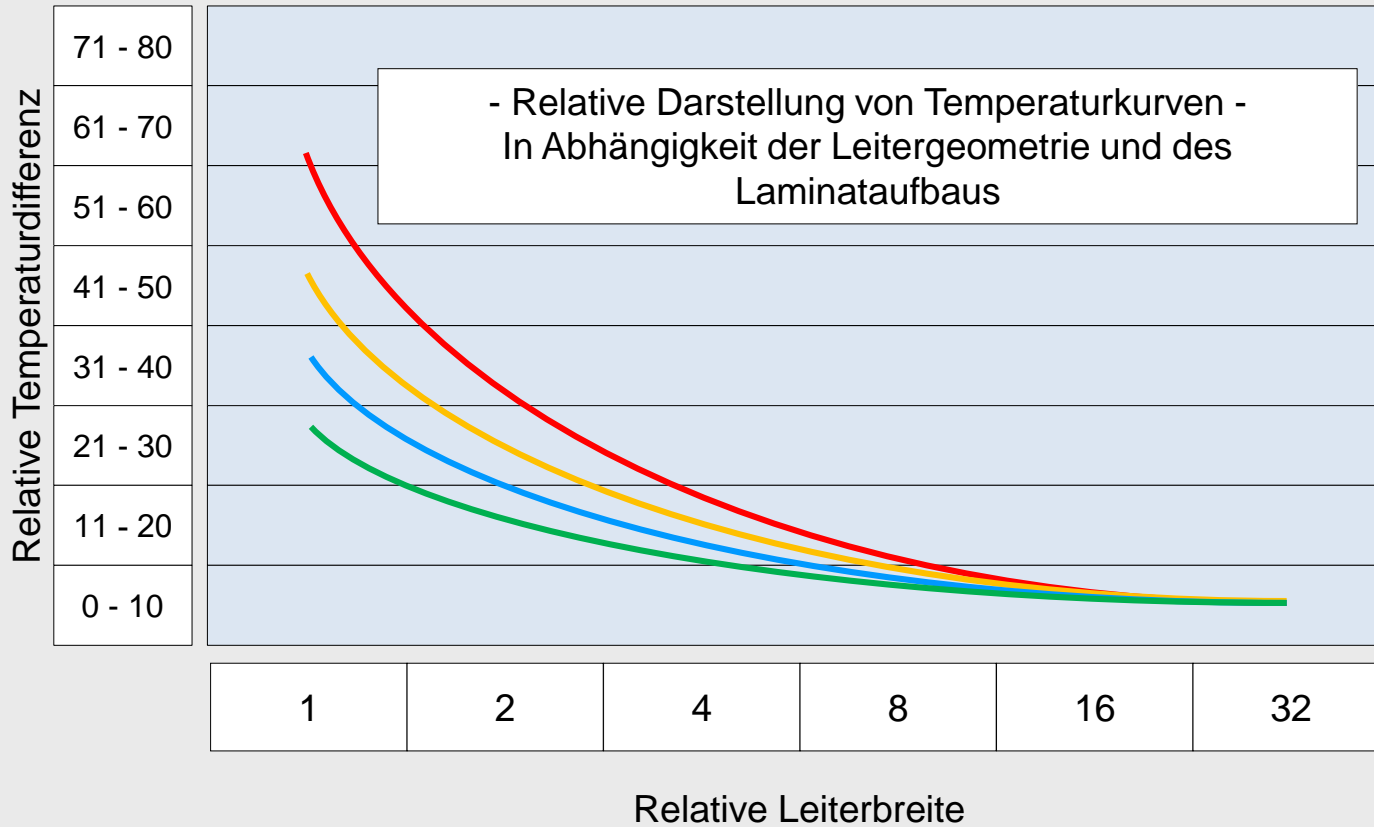
Elektrischer Widerstand
eines Leiters bei 20 °C

$$R_{20} = \frac{l}{\varrho \cdot A} \quad [\Omega]$$

U = Spannung [V]

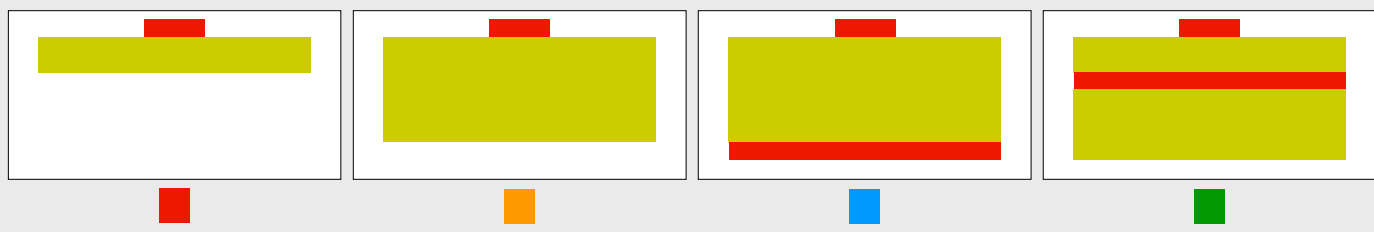
I = Strom [A]

α = elektr. Temp.-Koeff. [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]



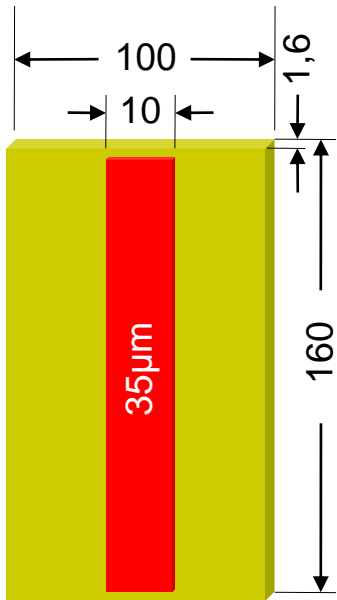
Es gilt seit 2010 die IPC-2152 (Näheres siehe in den entsprechenden Folien in dieser Präsentation)

Die Kurven für die Stromtragfähigkeit auf und in Leiterplatten aus der IPC 2221 sind ungültig. Diese Kurven waren von Anfang an falsch!

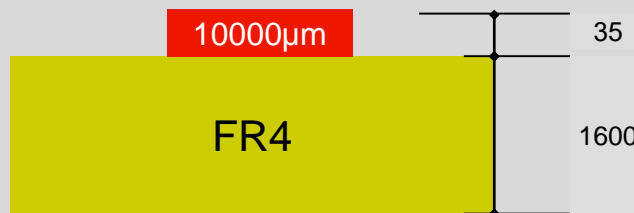
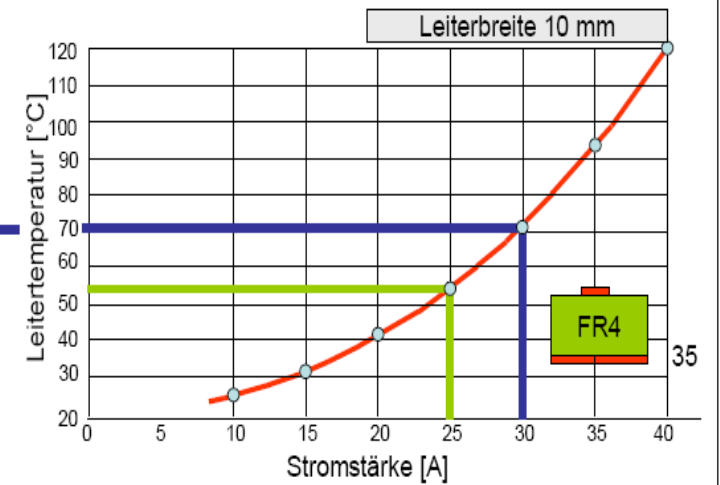
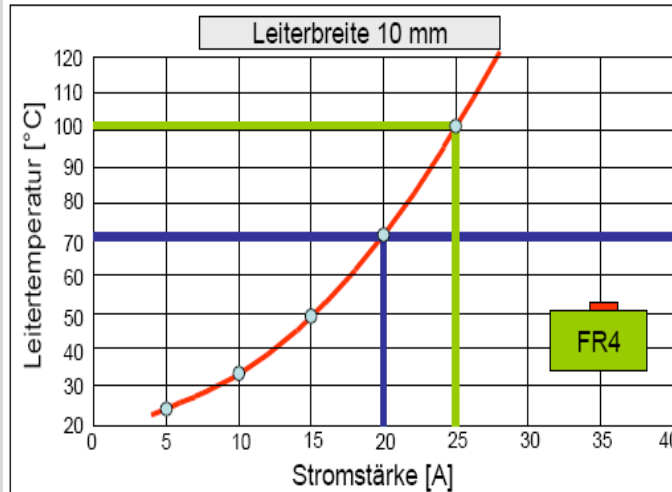


Erhöhung der Stromtragfähigkeit eines Leiters durch Veränderung der Schichten.

Die Kurven gelten für die Abmessungen der Leiterplatte unten.



Alle Maße in mm

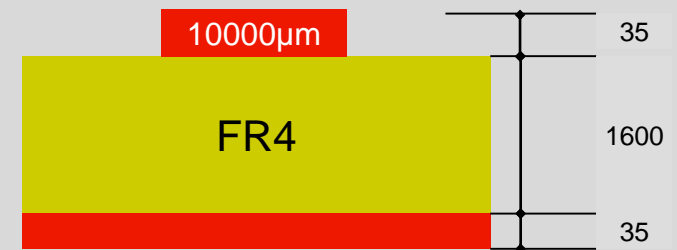


$$T = 70^{\circ}\text{C}$$

$$I = 20\text{ A}$$

$$T = 100^{\circ}\text{C}$$

$$I = 25\text{ A}$$



$$T = 70^{\circ}\text{C}$$

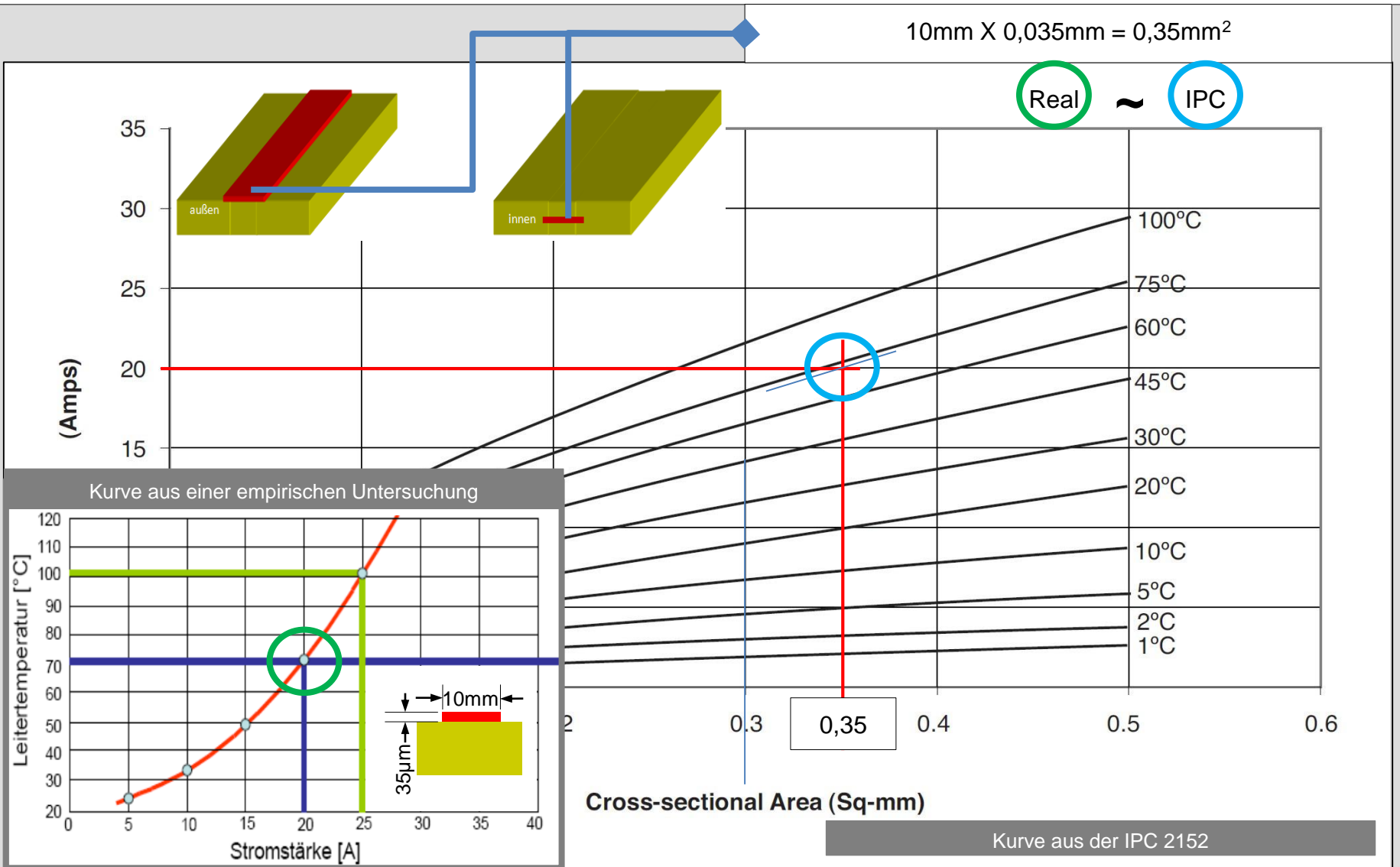
$$I = 30\text{ A}$$

$$T = 53^{\circ}\text{C}$$

$$I = 25\text{ A}$$

Alle Maße in µm

Bild 5-7 Leiter auf Innen- und Außenlagen (ruhende Luft) (0,001 - 0,5 mm²)

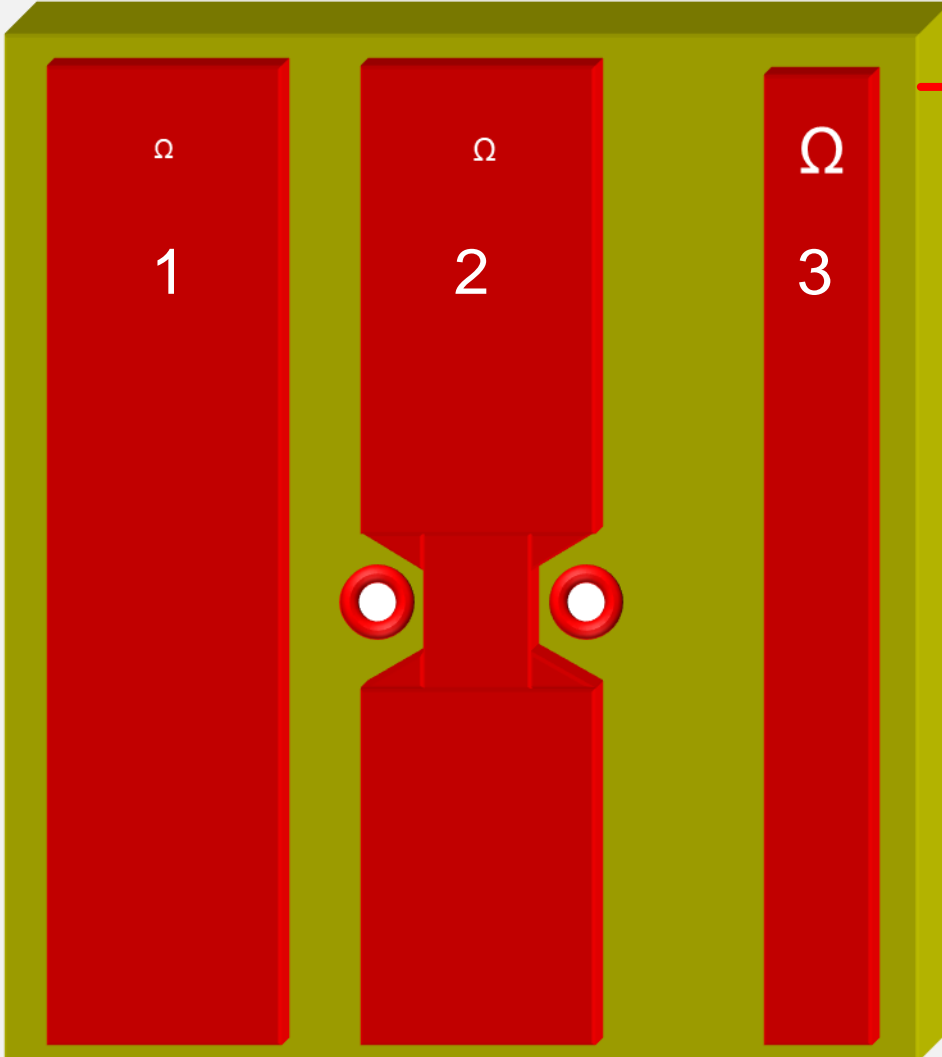


$$R_{\text{ges-1}} = \frac{\rho \cdot l_1}{A_1} [\Omega]$$

$$R_{\text{ges-2}} = \rho \left(\frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} + \frac{l_4}{A_4} \right) [\Omega]$$

$$R_{\text{ges-3}} = \frac{\rho \cdot l_5}{A_5} [\Omega]$$

Grundregeln Berechnung Strombelastbarkeit



Die Temperatur t ist neben R , U und I sozusagen die vierte Dimension

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$$

Für die Stromtragfähigkeit eines Leiters ist der elektrische Widerstand des gesamten Strompfades verantwortlich.

Die zu erwartende „Temperatur“ eines dimensionierten Leiters ist im Grenzfall zu berechnen → Gesetze des Thermischen Widerstandes

R_t = Widerst. bei realer Temp. $[\Omega]$

ρ = spez. Widerstand $[\Omega \text{mm}^2/\text{m}]$

A = Querschnitt $[\text{mm}^2]$

α = elektr. Temp.-Koeff. $[\text{°C}^{-1}]$

R_{20} = Widerstand bei 20°C $[\Omega]$

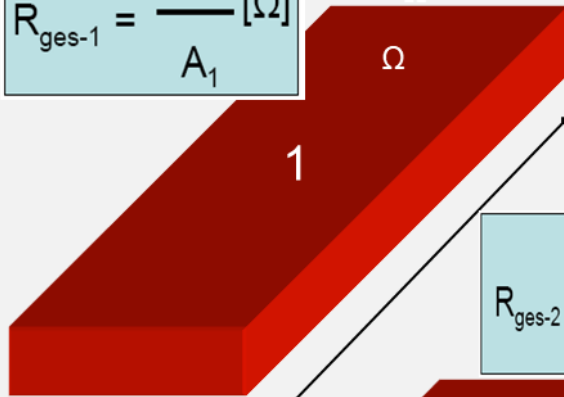
l = Leiterlänge $[\text{m}]$

t_{real} = Temperatur $[\text{°C}]$

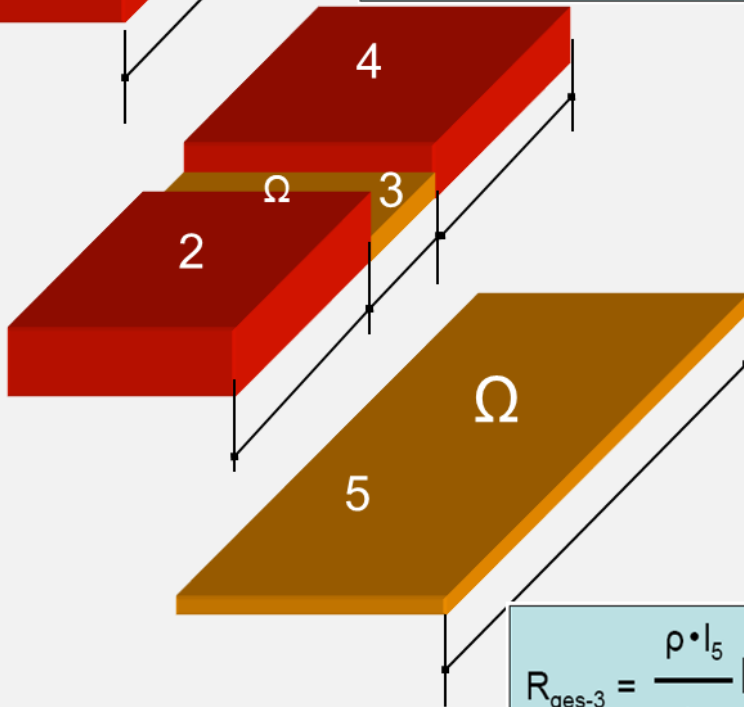
Einfluss der Verjüngung eines Leiters in der Dicke

$$\rho = 0,0172[\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$$

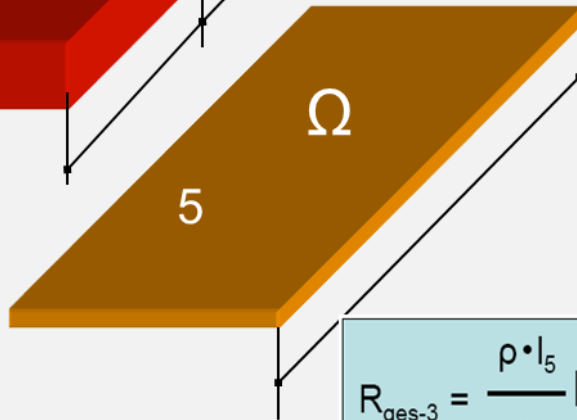
$$R_{\text{ges-1}} = \frac{\rho \cdot l_1}{A_1} [\Omega]$$



$$R_{\text{ges-2}} = \rho \left(\frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} + \frac{l_4}{A_4} \right) [\Omega]$$



$$R_{\text{ges-3}} = \frac{\rho \cdot l_5}{A_5} [\Omega]$$



Grundregeln Berechnung Strombelastbarkeit

Die Temperatur t ist neben R , U und I sozusagen die vierte Dimension

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$$

Für die Stromtragfähigkeit eines Leiters ist der elektrische Widerstand des gesamten Strompfades verantwortlich.

Die zu erwartende „Temperatur“ eines dimensionierten Leiters ist im Grenzfall zu berechnen → Gesetze des Thermischen Widerstandes

R_t = Widerst. bei realer Temp. $[\Omega]$

ρ = spez. Widerstand $[\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$

A = Querschnitt $[\text{mm}^2]$

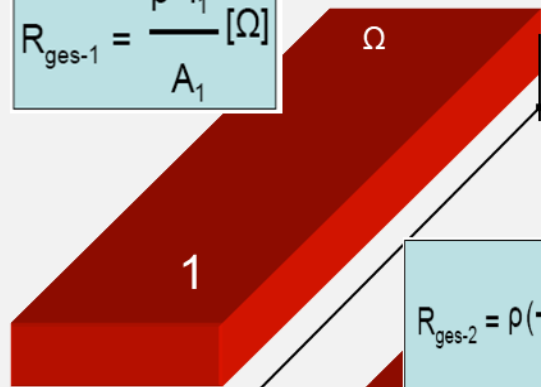
α = elektr. Temp.-Koeff. $[\text{°C}^{-1}]$

R_{20} = Widerstand bei 20°C $[\Omega]$

l = Leiterlänge $[\text{m}]$

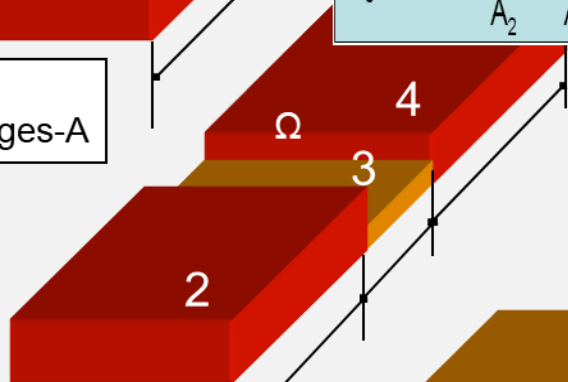
t_{real} = Temperatur $[\text{°C}]$

$$R_{\text{ges-1}} = \frac{\rho \cdot l_1}{A_1} [\Omega]$$



$R_{\text{ges-A}}$

$$R_{\text{ges-2}} = \rho \left(\frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} + \frac{l_4}{A_4} \right) [\Omega]$$



$R_{\text{ges-B}}$



$R_{\text{ges-C}}$

$$R_{\text{ges-3}} = \frac{\rho \cdot l_5}{A_5} [\Omega]$$

$l = 200\text{mm}$

$A = 4\text{mm}^2$

$\rho = 0,0172$

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$$

$R_A = 0,86 \text{ m}\Omega$

100%
Strom

$l_2 = 99\text{mm}$

$l_3 = 2\text{mm}$

$l_4 = 99\text{mm}$

$A_2 = 4\text{mm}^2$

$A_3 = 0,4\text{mm}^2$

$A_4 = 4\text{mm}^2$

$\rho = 0,0172$

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$$

$R_B = 0,94 \text{ m}\Omega$

90%
Strom

$l_5 = 200\text{mm}$

$A_5 = 0,4\text{mm}^2$

$\rho = 0,0172$

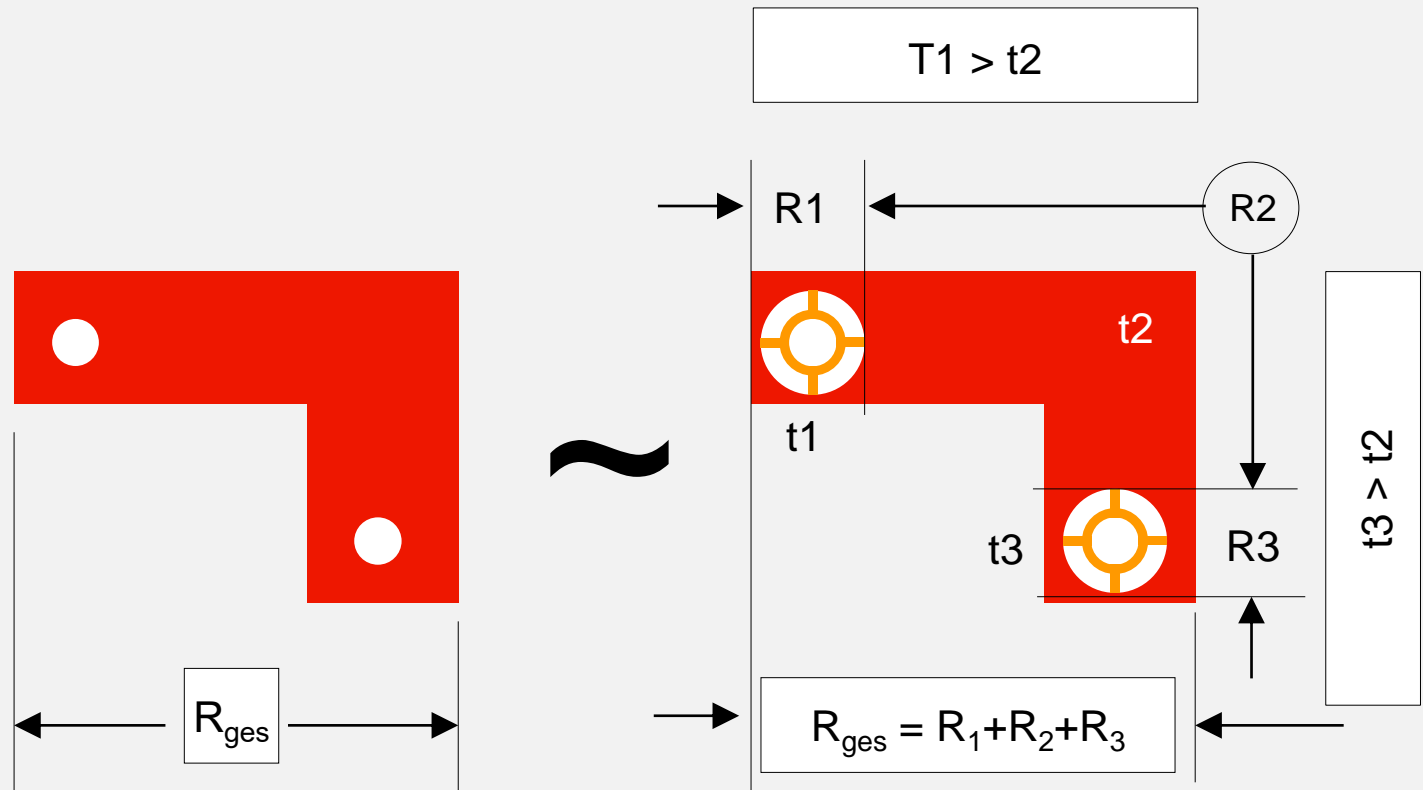
$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$$

$R_C = 8,60 \text{ m}\Omega$

10%

Strom |

Das Prinzip der Wärmefalle



Für die Stromtragfähigkeit eines Leiters
ist der elektrische Widerstand des gesamten
Strompfades verantwortlich.

Die Temperatur t ist neben R , U und I
sozusagen die vierte Dimension

Strombelastbarkeit von Layouts – Design, Simulation und Messung Current Carrying Capacity of Layouts – Design, Simulation and Experiment

Dr. Johannes Adam, ADAM Research, Theodor-Heuss-Str. 12, D-69181 Leimen, Germany

Marc Mitchell, Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Str. 2, D-71701 Schwieberdingen, Germany

4.2 Layout-Testfälle

Gerade ausgerichtete und einzeln auftretende Leiterbahnen sind nicht realistisch. Deshalb wurde bei Bosch schon früher eine Reihe von Testleiterplatten verwirklicht und von einem der Autoren (MM) mit der Thermokamera untersucht. Einige von diesen wurden diesen neuen Simulationstests unterzogen. Weitere Simulationsbeispiele mit Platten, die bereits im Handel sind, zeigen wir in der mündlichen Präsentation.

4.2.1 Unregelmäßige Flächen

Bild 4 zeigt einen Ausschnitt aus einer der Testplatten mit einer besonders irregulären Form. Die Testleiterplatte ist 2-lagig. Als Besonderheit ist die *Wärmefalle* am rechten unteren Ende hervorzuheben. Die Hülsen und Bohrungen sind plattiert, haben aber keinen Kontakt zur Bottom-Fläche. Einen Vergleich in Zahlen gibt Tab. 1. Die Übereinstimmung liegt im 10% Bereich.

Basismaterial	T_{\max} (°C)	U (mV)
<i>Messung</i> I=20 A, $T_U=21.4$ °C		
FR4	ca. 52	66
R1566 (mit Füllstoff)	ca. 51	72.6
<i>Simulation</i>		
FR4	51	60
R1566	49	60
R1566 ohne Wärmefalle	42	54

Tabelle 1 Vergleich Messung und Simulation zu Bild 4.

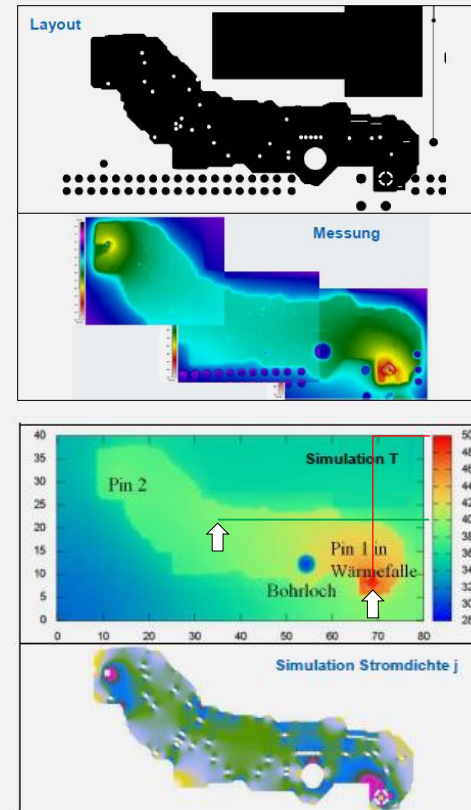
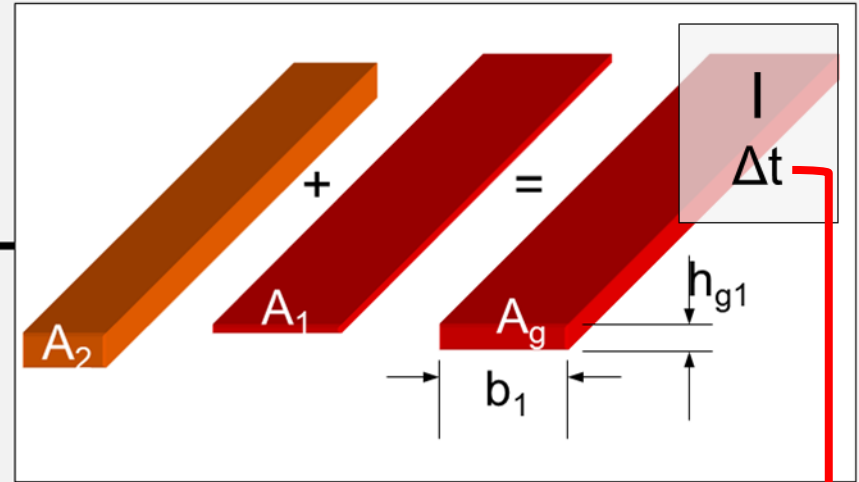
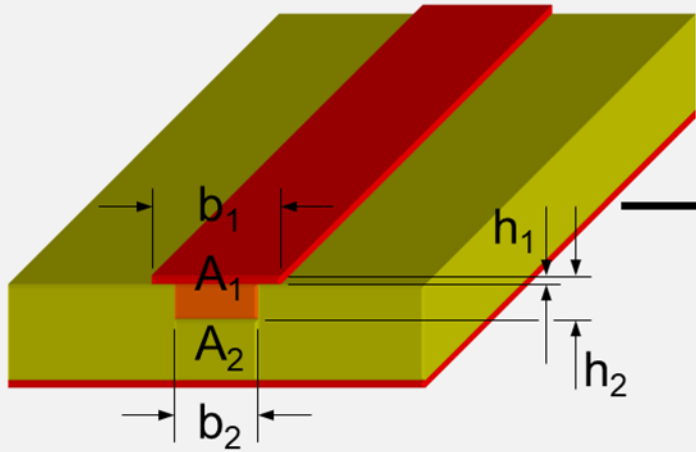


Bild 4 Ausschnitt aus dem Layout einer Testleiterplatte, Thermogramm und Simulationsergebnis (s.a. Tabelle 1).

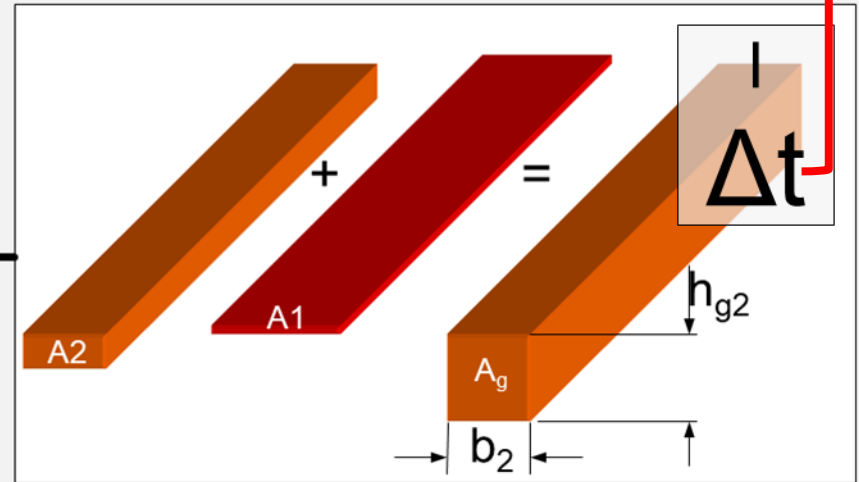
Die Wärmefalle trägt hier mit ca. 10 K zum Hotspot bei. Pin 2 ist in der Simulation ohne elektrischen Kontaktwiderstand und daher ohne erkennbare Zusatzheizung.



=

→

Δt bei gleichem Strom →



$$A_1 = b_1 \cdot h_1$$

$$h_{g1} = \frac{b_1 \cdot h_1 + b_2 \cdot h_2}{b_1}$$

$$A_2 = b_2 \cdot h_2$$

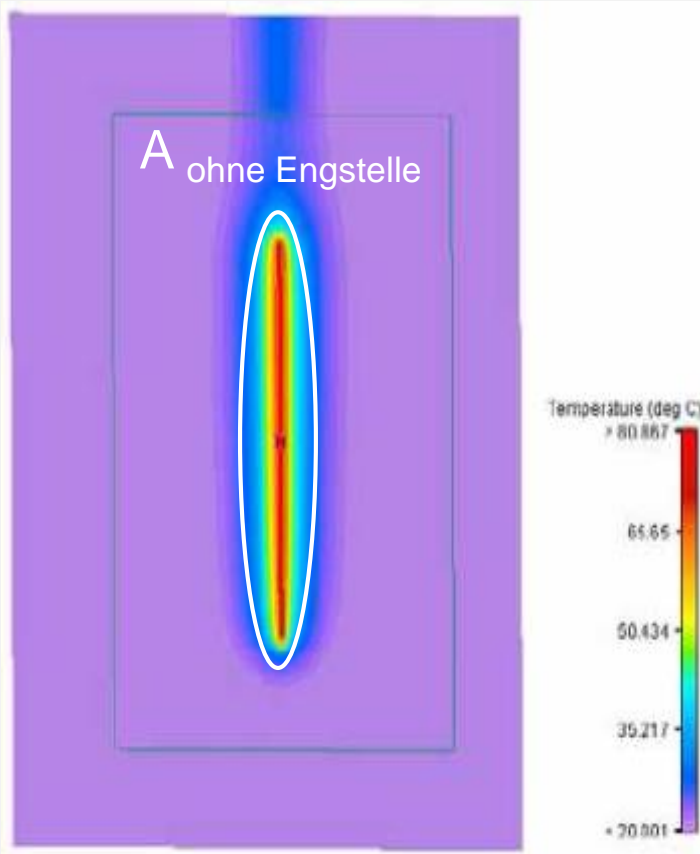
$$A_g = A_1 + A_2$$

$$h_{g2} = \frac{b_1 \cdot h_1 + b_2 \cdot h_2}{b_2}$$

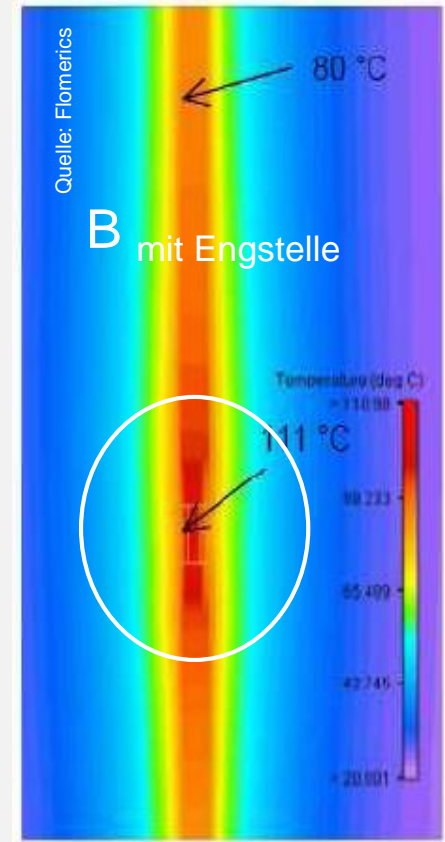
$$I_1 > I_2$$

Δt

Aufbautyp

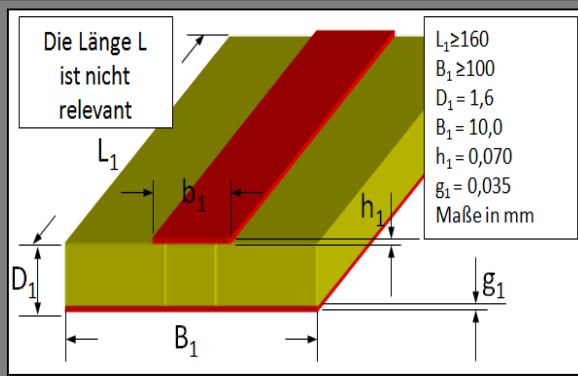
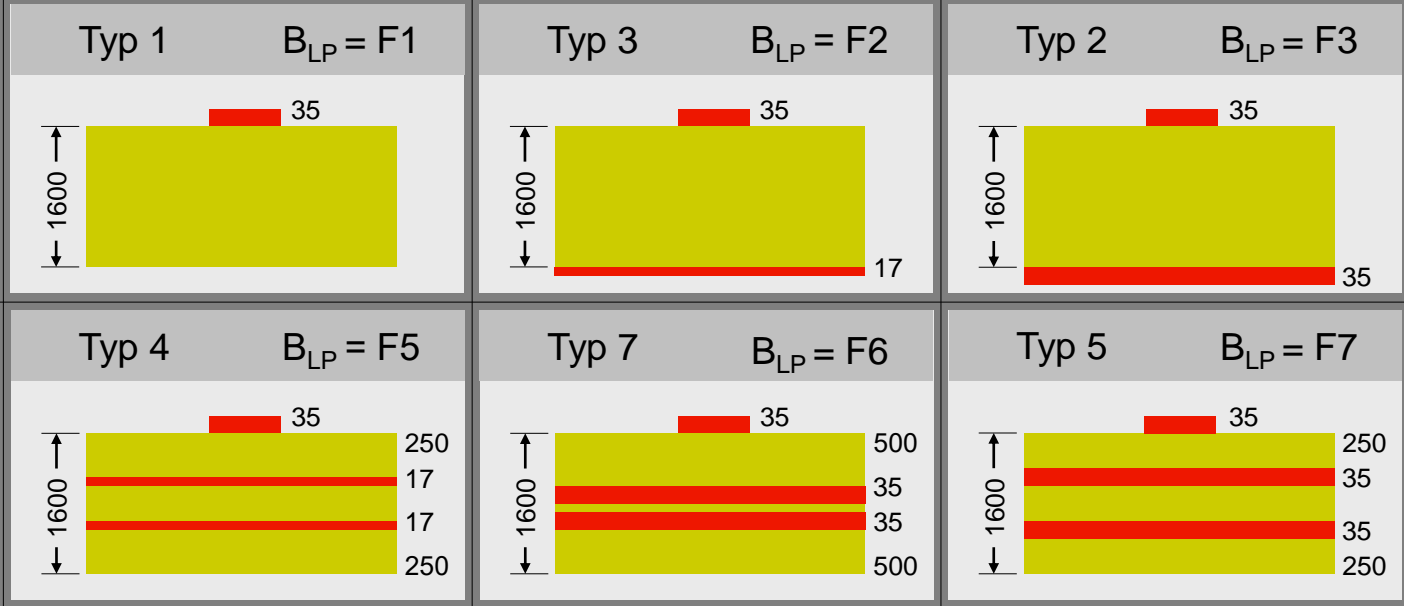


Würde die Engstelle separat gerechnet, käme eine Temperaturerhöhung gegenüber Umgebungstemperatur auf 210°C heraus, der davor und dahinter Liegende größere Querschnitt stellt eine Temperatur von nur 111°C an der Engstelle ein.



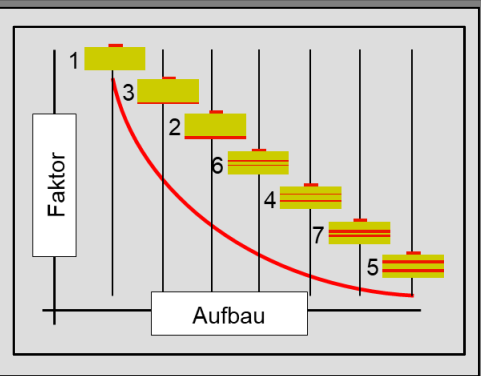
Beispiel aus einer empirischen Untersuchung mit unterschiedlichem geometrischen Umfeld gegenüber dem Strom tragenden Leiter.

Aufbauten und deren Faktoren
Quelle: Flomerics



Legende für die aus der Kurve entwickelte Näherungsformel

I	= Strom [A]
Δt	= Temperaturdif. zur Umgebung [C °]
B_{LP}	= Faktor Leiterplattenaufbau [-]
b	= Leiterbreite [mm]
h	= Leiterhöhe [μ m]
A	= $b \cdot h$ [mm^2]



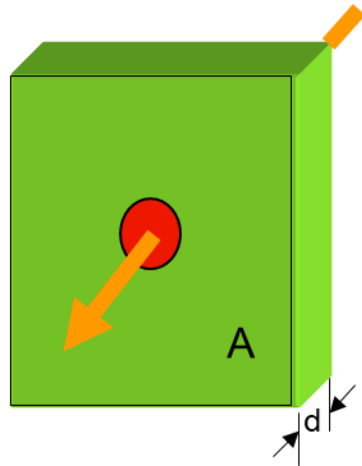
Der Thermische Widerstand

(zusammengefasst aus einer Gesamtpräsentation)

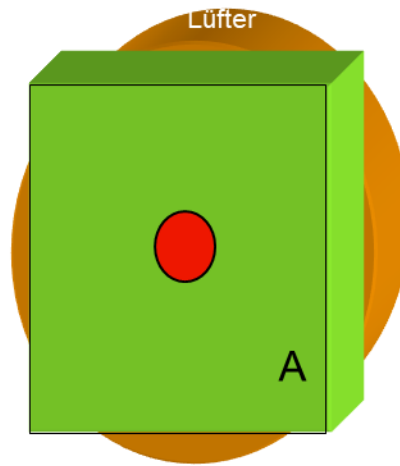
Quelle: Firma Häusermann GmbH *

Verfasser: Lothar Oberender/Johann Hackl**

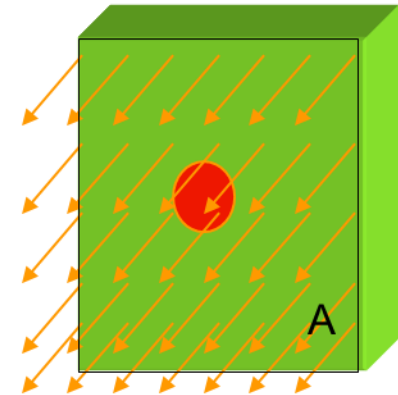
Wärmeleitung



Konvektion



Wärmestrahlung



$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \quad [\text{K/W}]$$

$$R_{th} = \frac{1}{\delta \cdot A} \quad [\text{K/W}]$$

$$R_{th} = \frac{1}{\varphi \cdot A} \quad [\text{K/W}]$$

R_{th} = therm. Widerst. [K/W]

Q = Wärmrmenge [kcal]

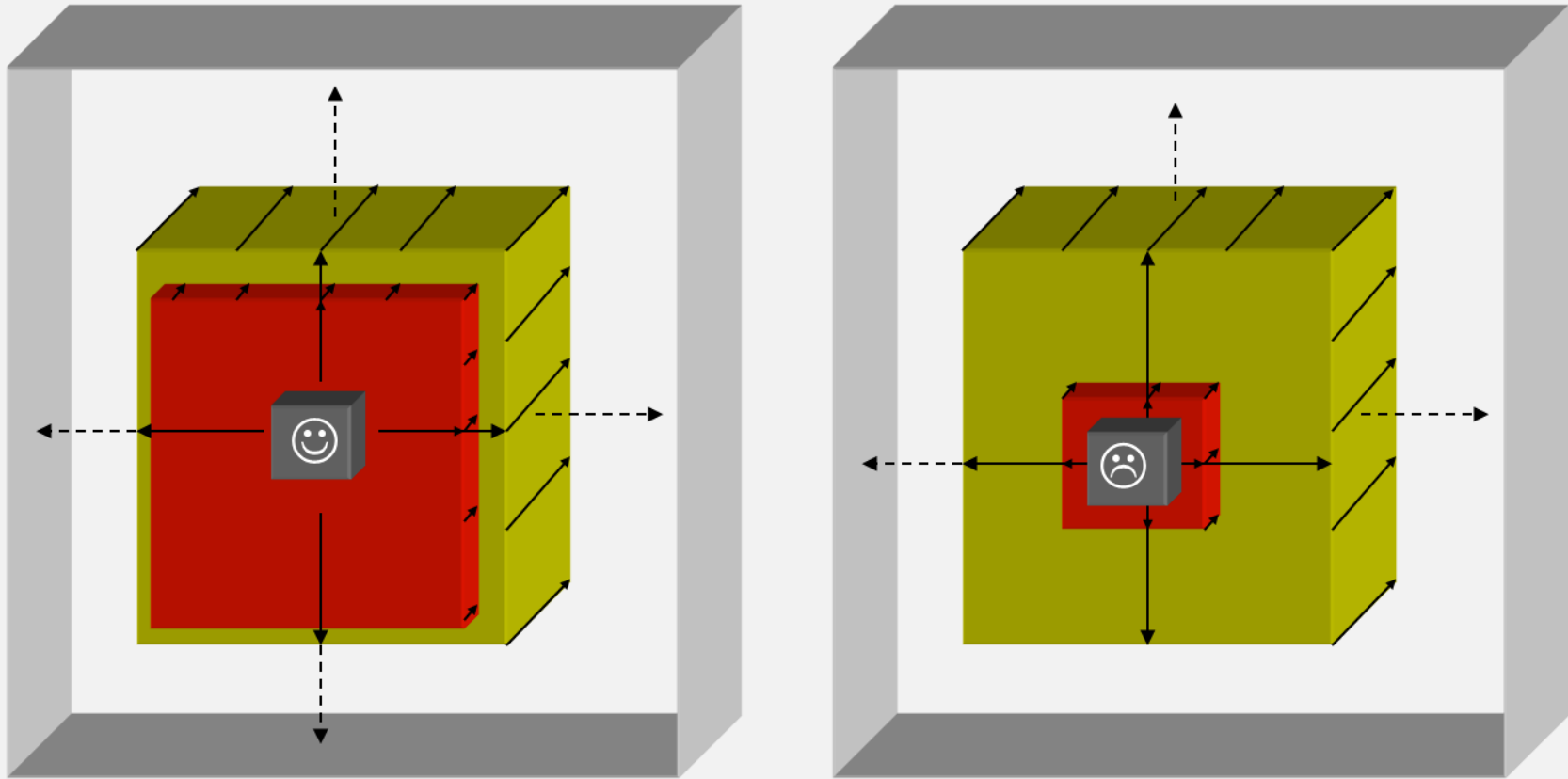
φ = Wärmerübergangszahl [W/m²K]




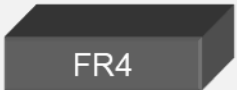
d = Dicke [μm]

λ = Wärmeleitzahl [W/mK]

A = Fläche [mm²]

δ = Wärmeübergangszahl [W/m²K]



$\lambda = 0,025\text{W/mK}^*$	$\lambda = 300\text{W/mK}$	$\lambda = 0,25\text{W/mK}$	Q (Bauteil)
 Luft	 Kupfer	 FR4	 FR4

*Stehende Luft

Material	λ [W/mK]	Hinweis
Silber	418	
Kupfer, techn.	300	Meist gering legiert
Aluminium, techn.	150	Kühlkörper von „außen“, nicht in der Leiterplatte
Lötzinn	51	Bestimmt durch den Anteil Sn
Keramik	24	Als Substratmaterial mit sehr gutem λ
Edelstahl	15	Hat konstruktiv für die Entwärmung keine Relevanz
Invar	11	Sehr teuer, als Legierung schlechtes λ
Leitkleber	5	ca. 80% silbergefüllt
Wärmeleitlack	2	Baugruppenbezogen
Polysiloxan	1,5	Al ₂ O ₃ und Glasgewebe in Silikonmatrix
Glas	1	λ durch Glas im FR4 höher gegenüber Harz
Porzellan	1	
Transferkleber	0,43	λ um ca. Faktor 2 bis 3 besser als Acryl/Epoxy
FR4	0,25	λ durch Glas im FR4 höher gegenüber Harz
Polyimid	0,15	
Acrylkleber	0,15	
Luft, unbewegt	0,026	Bewegte Luft (Lüfter) um Faktor >10 höher

Alles Standard

Wärmeleitpaste

Basismaterial mit besserer Wärmeleitung

Das sind keine Alternativen!

Keine weiteren Vorkehrungen, um den thermischen Pfad zu verbessern

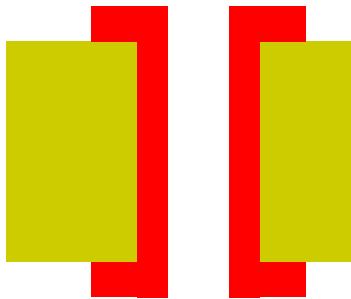
- Ag-Leitpaste teuer
- Wenig effektiv
- Teurer Prozess
- Wenig verfügbar

- Teuer
- Wenig effektiv
- Eigenschaften abweichend
- Geringe Verfügbarkeit

1. Ag Gefüllte Vias
2. Modifiziertes Material

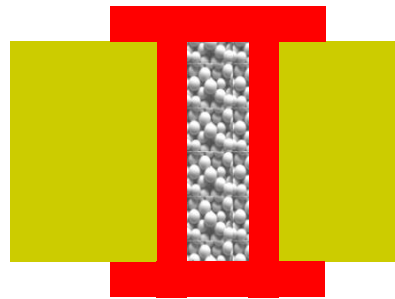
Wenn, dann gleich so

Standard:
Material FR4
25µm Cu in der Hülse



R_{TH}

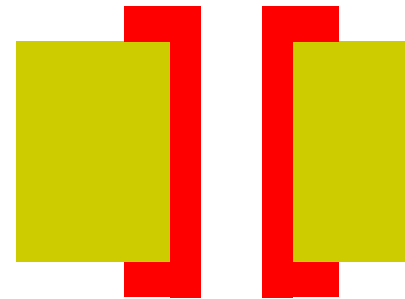
Via gefüllt (80% Ag)



R_{TH}



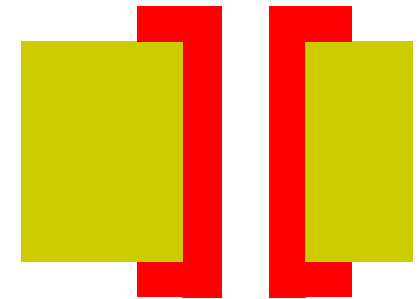
Sondermaterial
4W/mK



R_{TH}

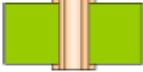
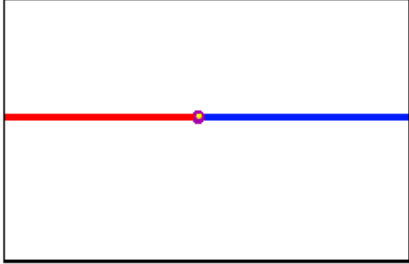
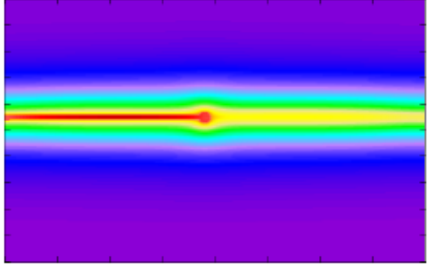

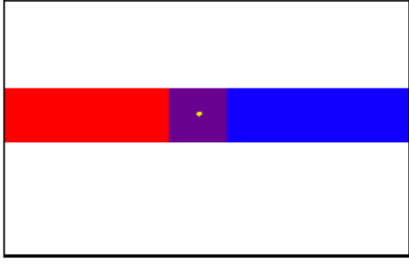
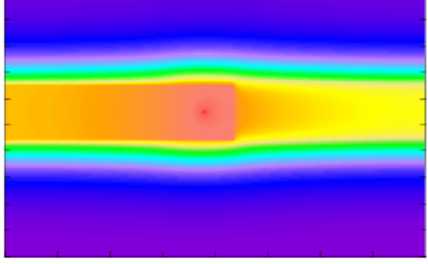

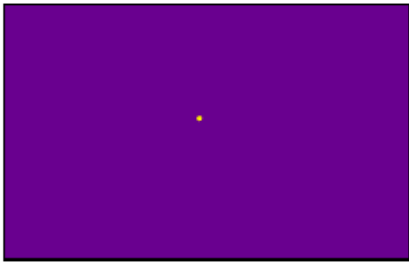
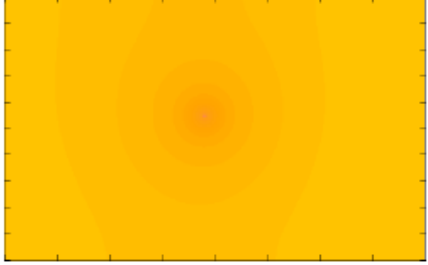


+2µmCu
Material:FR4
27µm Cu in der Hülse



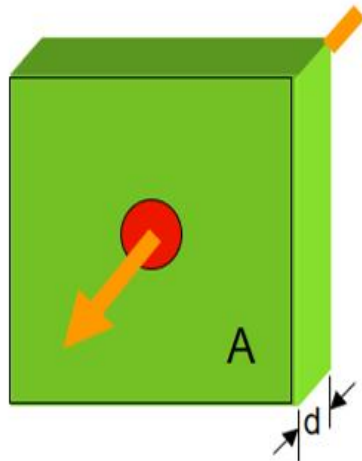
R_{TH}



Leiterplattengröße: 80x50mm Viadurchmesser: 1mm Hülse: 25µm $T_U = 20^\circ\text{C}$ $T_{\text{max}} = 85^\circ\text{C}$		Variante		Leiterbild / Aufbau	Ergebnis	
		Variante 1: 		Kupferfolien: 35 µm Leiterbreiten: 1 mm Lagenabstand: 1,6 mm		$I_{\text{max}} = 4 \text{ A}$ 
		Variante 2: 		Kupferfolien: 105 µm Leiterbreiten: 10 mm Lagenabstand: 1,6 mm		$I_{\text{max}} = 29 \text{ A}$ 
		Variante 3: 		Kupferinlays: 1 mm Leiterbreiten: vollflächig Lagenabstand: 0,4 mm		$I_{\text{max}} = 90 \text{ A}$ 

Rahmenbedingungen

Wärmeleitung



$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \text{ [K/W]}$$

Kupfer
 $\lambda = 300 \text{ W/mK}$
 $d = 200 \mu\text{m}$
 $A = 100 \text{ mm}^2$

10 mm

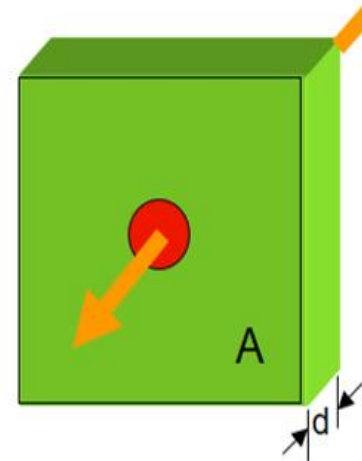
10 mm

Faktor (R_{th}):

1

$$R_{th} = 0,0067 \text{ [K/W]}$$

Wärmeleitung



$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \text{ [K/W]}$$

FR4
 $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$
 $d = 200 \mu\text{m}$
 $A = 100 \text{ mm}^2$

10 mm

10 mm

Faktor (R_{th}):

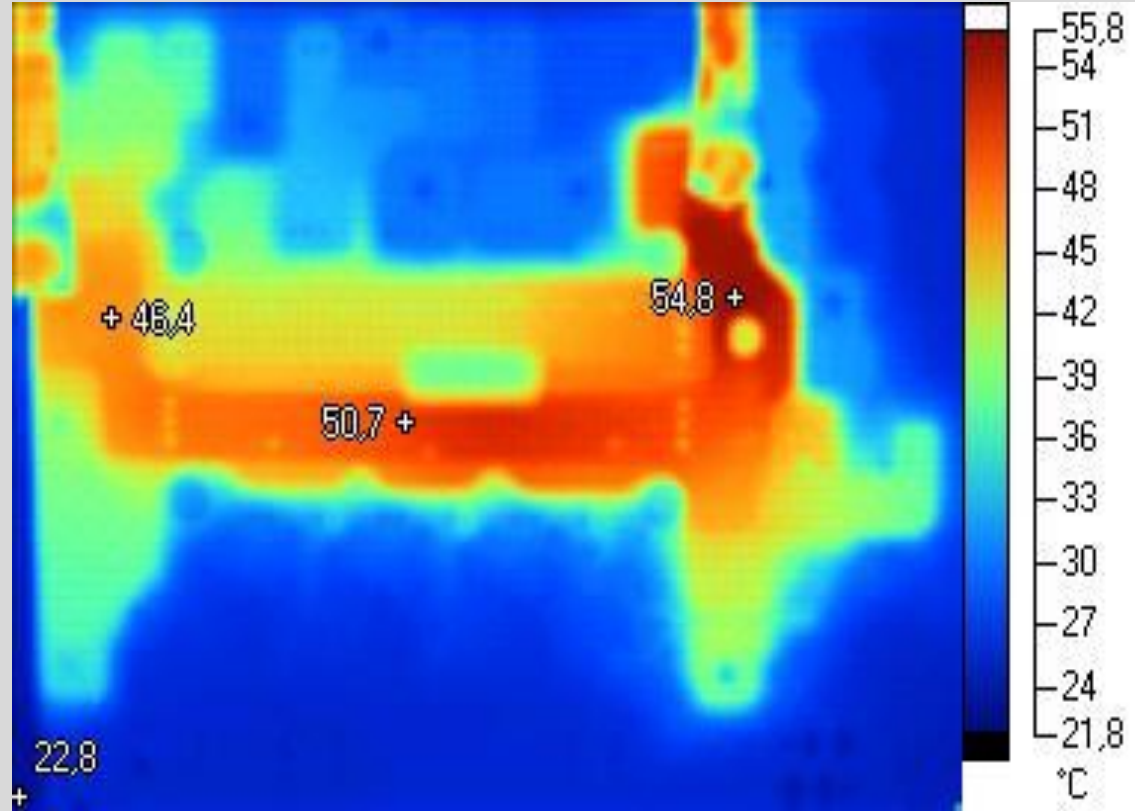
1194

$$R_{th} = 8,0 \text{ [K/W]}$$

Inhalt

- Grundlagen
- **Strom und Entwärmung**
- Die Praxis und Beispiele
- Welche Ressourcen gibt es

Erkennen thermisches Flächenverhalten einer Leiterplatte durch stromtragende Leiter und praxisnahe Darstellung.



Zusammenhang der verschiedenen Einflussfaktoren bezüglich Strombelastbarkeit und Erwärmung von Leiterplatten ist gut untersucht.

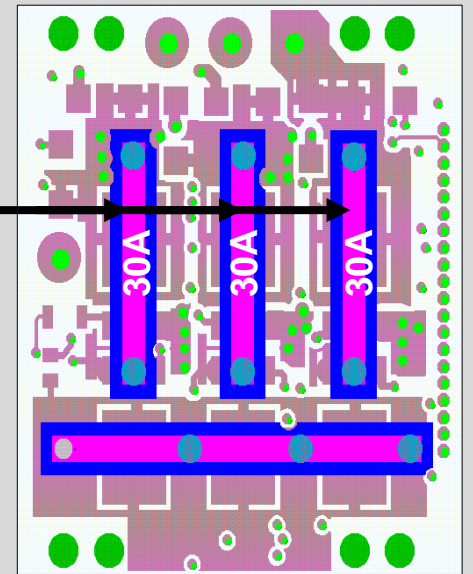
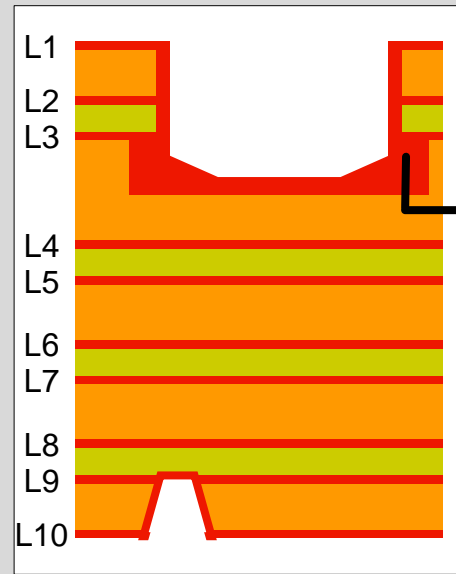
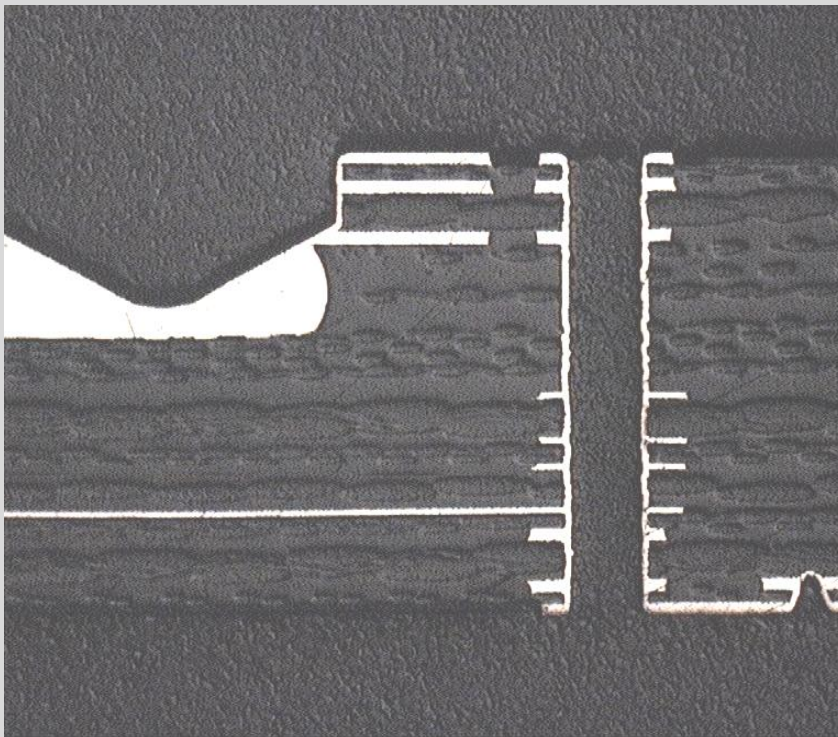
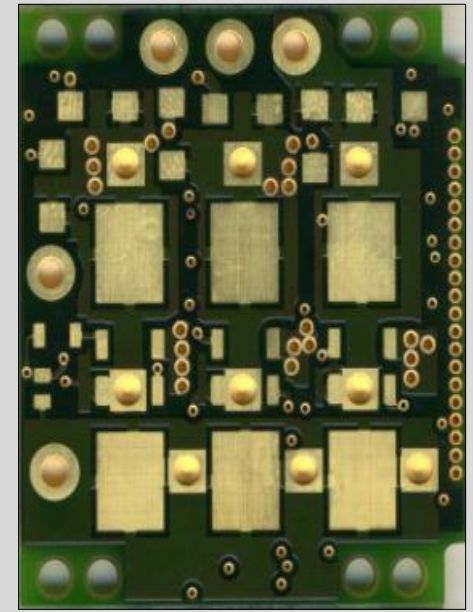
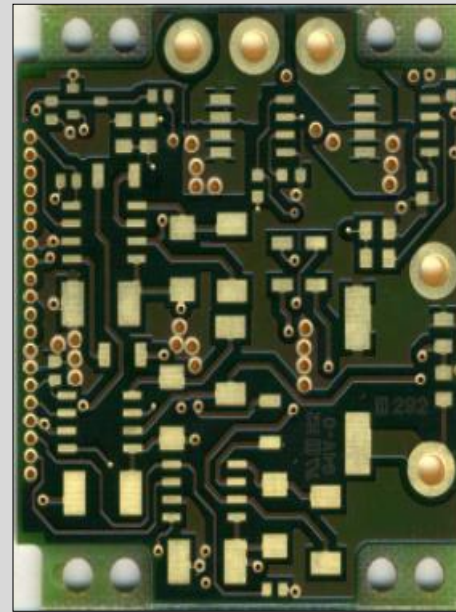
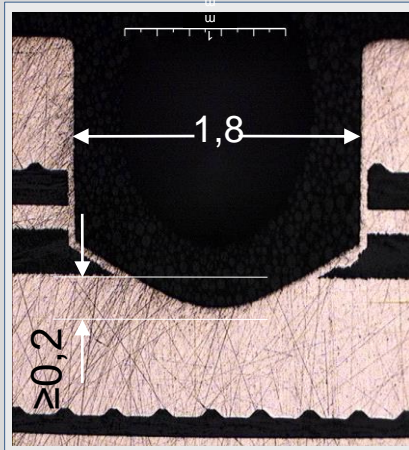
Die drei notwendigen Schritte

Einflussfaktoren erkennen

Festlegung der Leiterplattentechnologie und der Geometrie

Ziel:
Reales Ergebnis in der Prototypenphase

Realisierung von drei Antriebsphasen von je 30A inklusive der Steuerung auf einem Substrat.

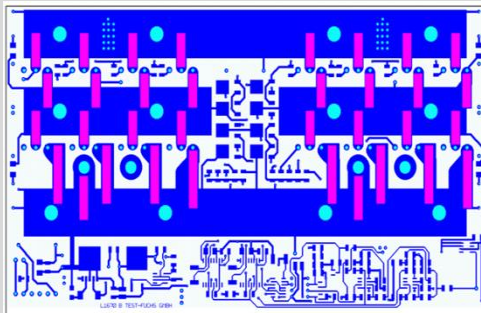


Strom 50A

Zwei Gruppen von je vier
MOSFET's mit je 50A

$$T_{(\text{Umgebung})} = 60^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = 40\text{K}$$



HSMtec:

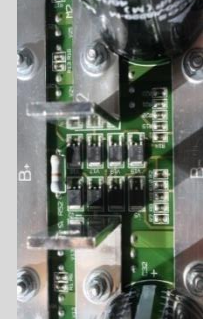
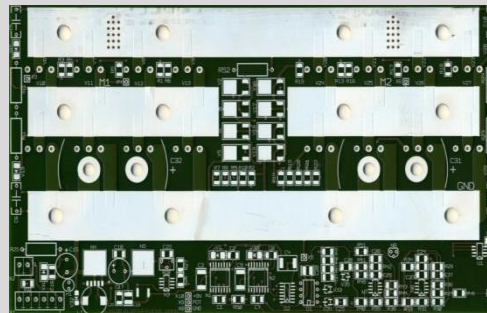
4mm Kupferprofile unter
5mm breiten
Leiterbahnen für
50Ampere an den
Anschlüssen der
MOSFET's



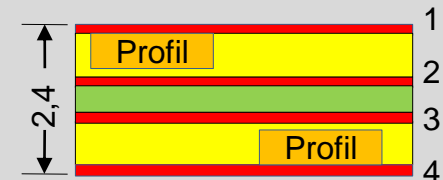
Quelle: Testfuchs

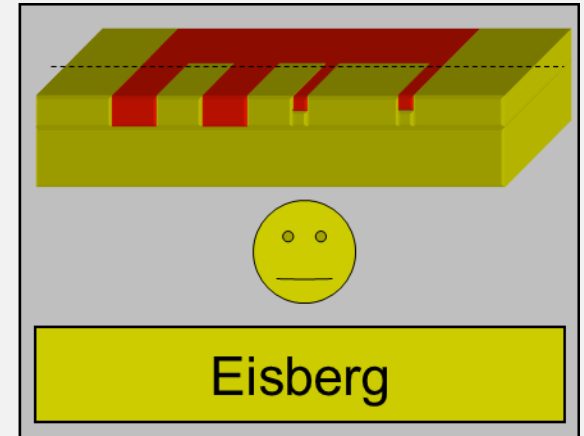
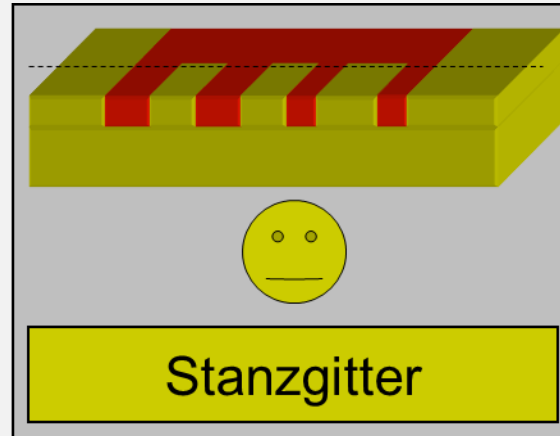
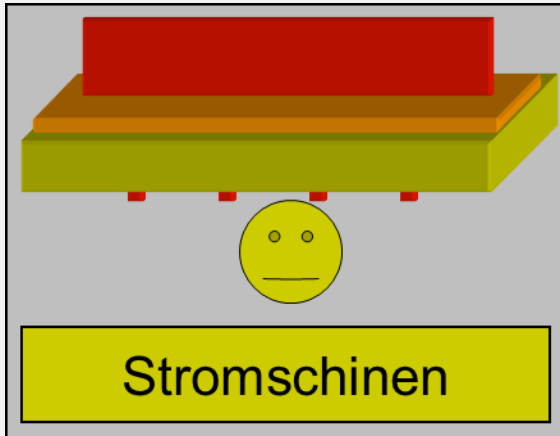
Strom 200A

Gesamtantriebsstrom: 200A
(realisiert über
Stromschienen)

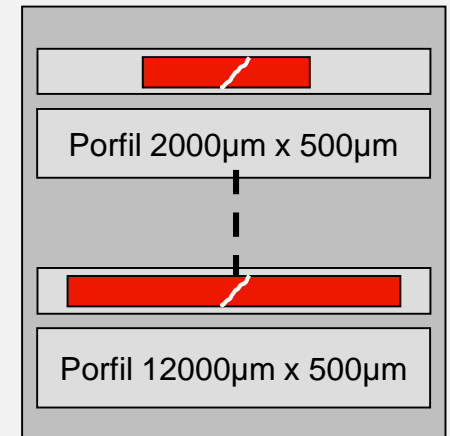
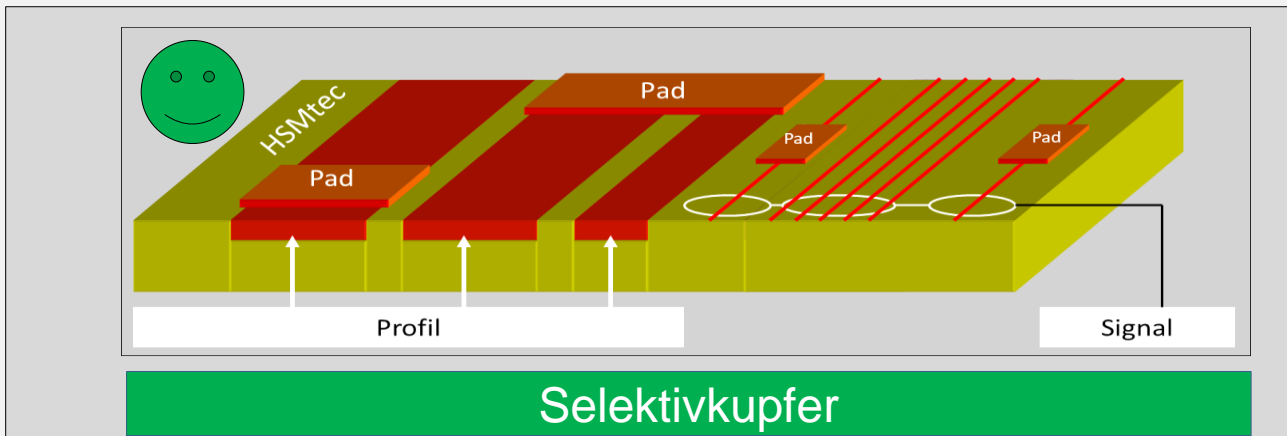


Multilayeraufbau





Bei der Selektiv Kupfertechnik wird durch die Verwendung von Drähten und Profilen aus Kupfer nur so viel Kupfer verwendet, wie wir in der fertigen Leiterplatte wieder finden. Die elektrische Anbindung zu den übrigen Strukturen erfolgt stoffschlüssig, beispielsweise Ultraschall-Verbindungstechnik.



Grundlegendes aus der Praxis Hohe Ströme und Entwärmung

Quelle: Firma Häusermann *

Verfasser: Lothar Oberender/Johann Hackl**

Temperaturschrank



Multimeter



Thermokamera



EDV

Stromgenerator 1 (350Ampere)

Stromgenerator 2 (350Ampere)



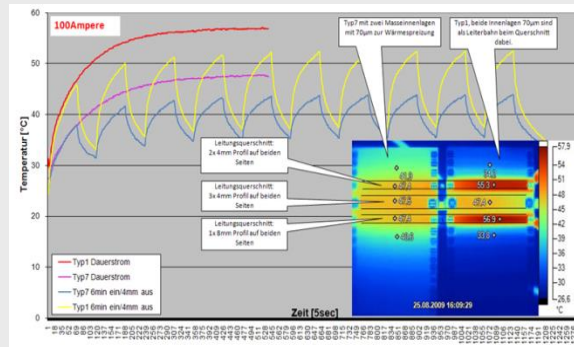
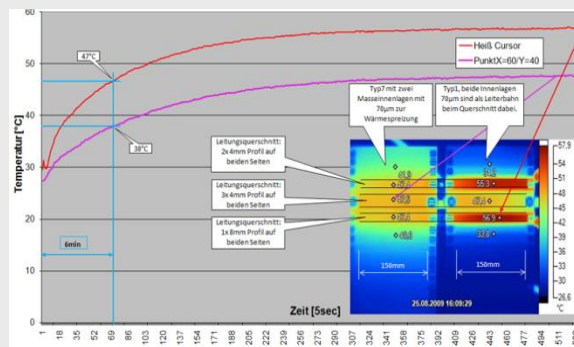
Messtechnik



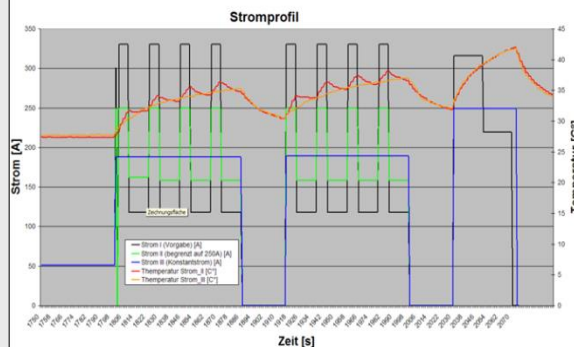
EDV



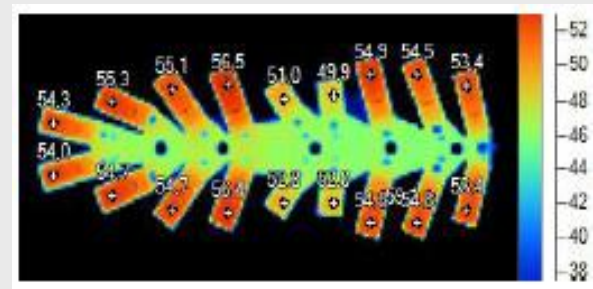
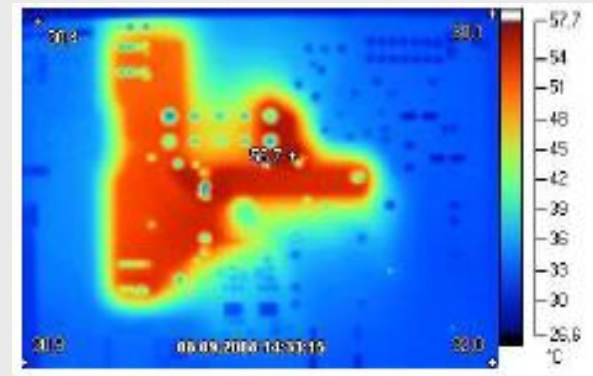
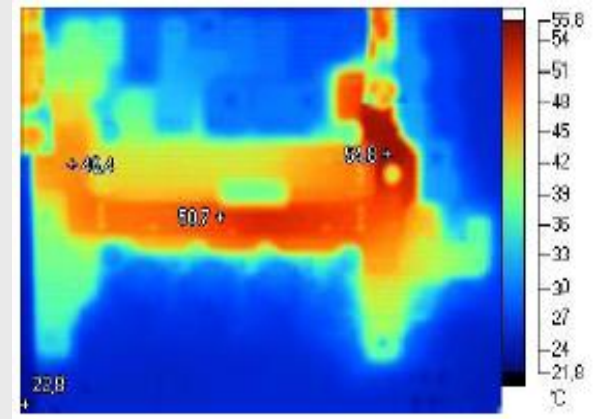
Aufgenommene Thermographie- Kurven



Impulsströme



Thermographie- Ergebnisse



Zusammenspiel von:

Geometrie
Entwärmung
Strom

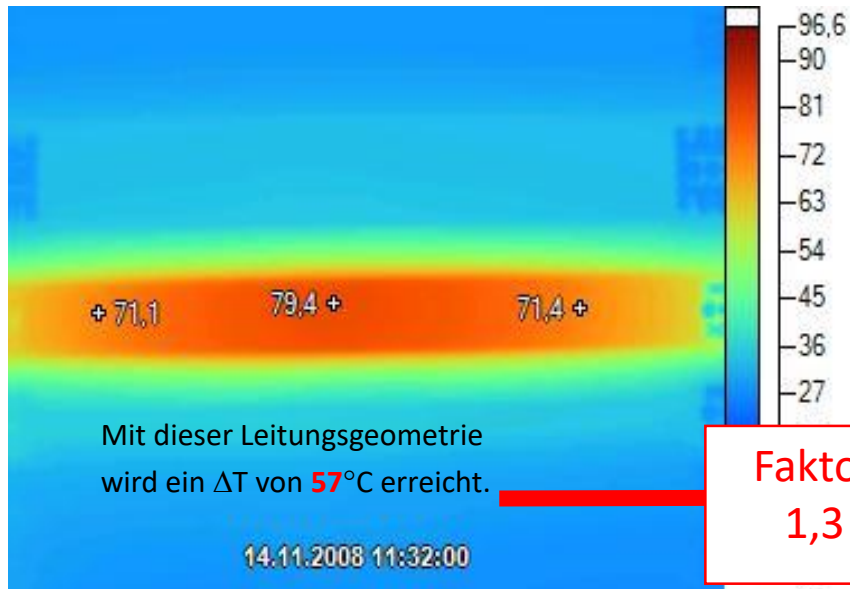
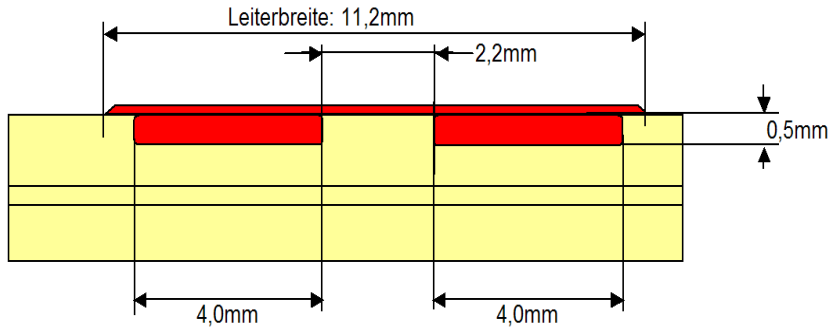
(Auszüge)

Den nachfolgend geometrisch und numerisch dargestellten Ergebnissen liegen empirische Untersuchungen zu Grunde

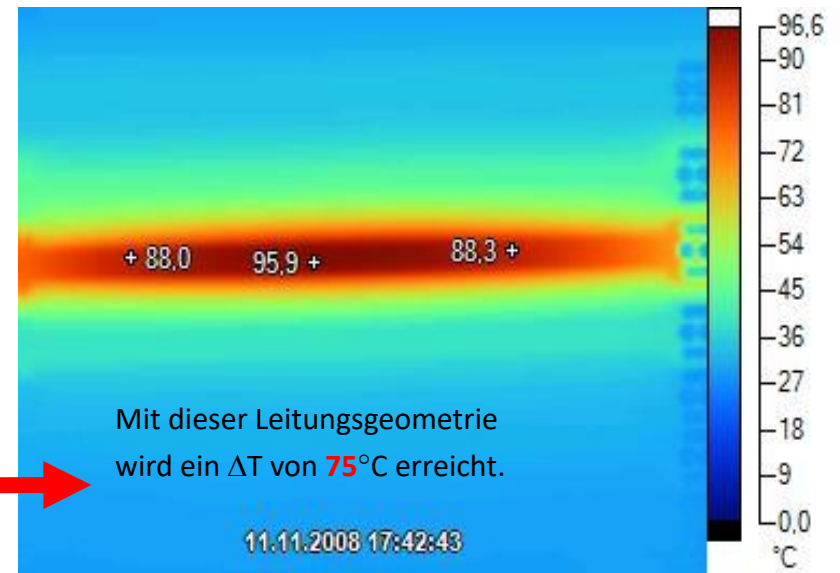
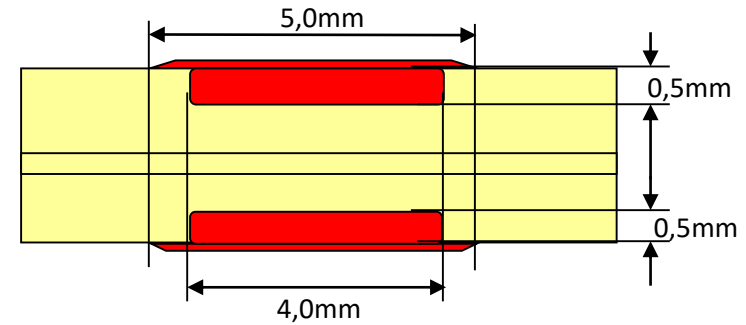
Quelle: Firma Häusermann GmbH *

Verfasser: Lothar Oberender/Johann Hackl**

Leiterbahn auf einer Seite mit zwei
Kupferprofilen für 100Ampere



Leiterbahn auf SA und SB mit jeweils einem
Kupferprofil elektrisch parallel geschaltet für
100Ampere

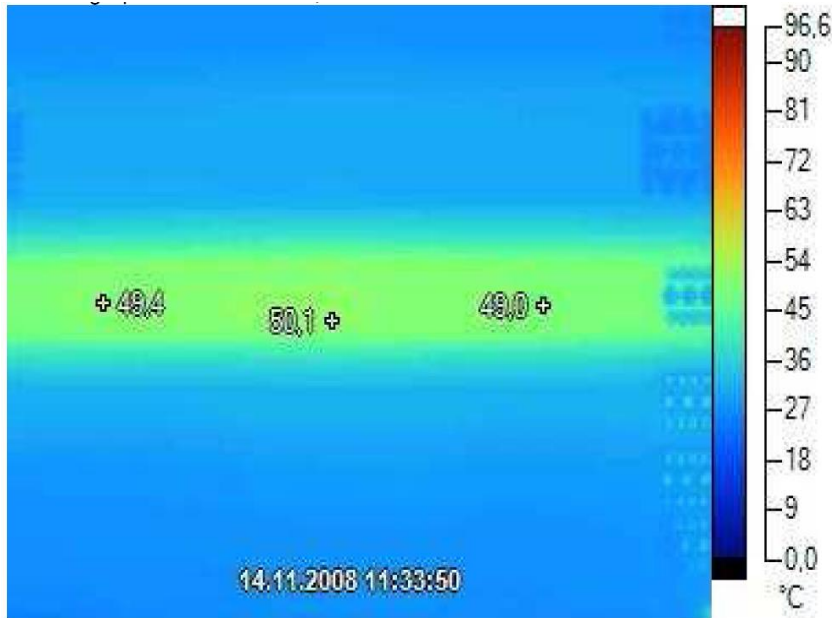
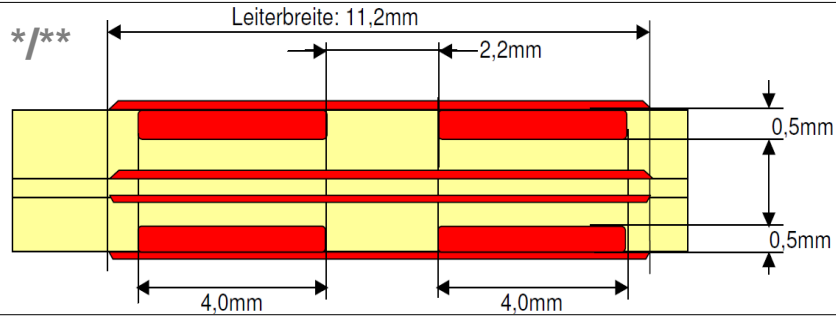


Faktor
1,3

4 x 70μ, 11,2mm breit + 4 x Profil 4mm x 0,5 → 11,1mm²

I = 100A

$T_U = 25^\circ\text{C}/\Delta t = 25\text{K}$ ←



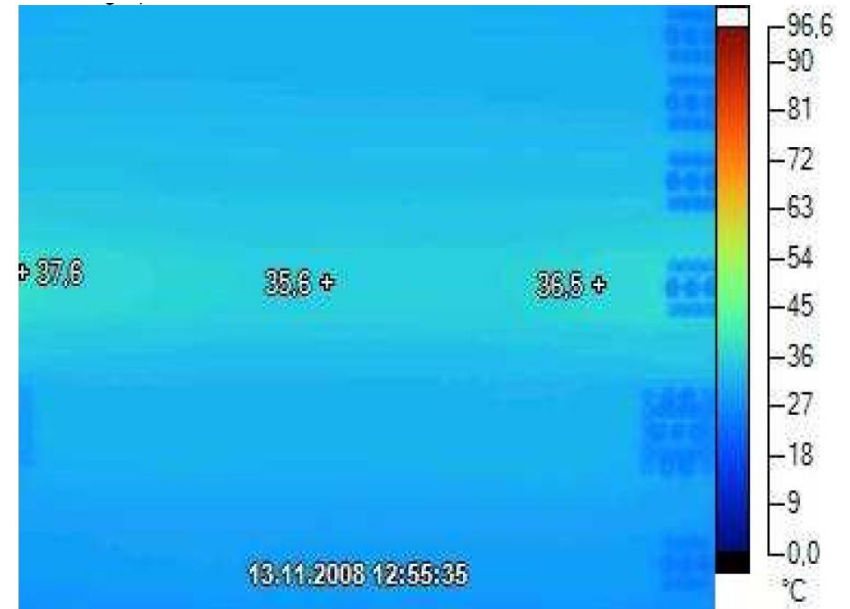
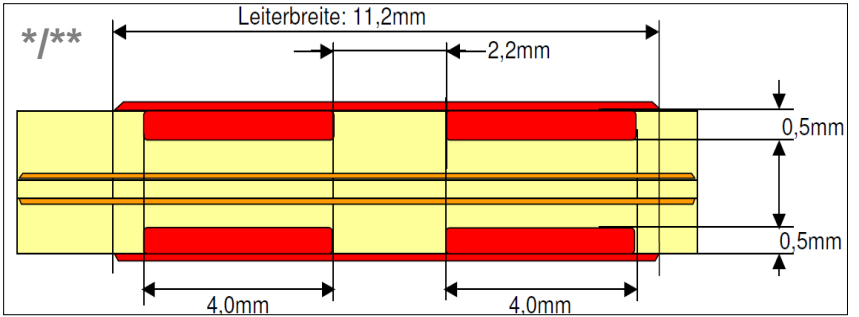
4 x Profil 4mm x 0,5
2 x 11,2 x 0,070

→ 9,6mm²

Plus 2 Wärmespreizlagen

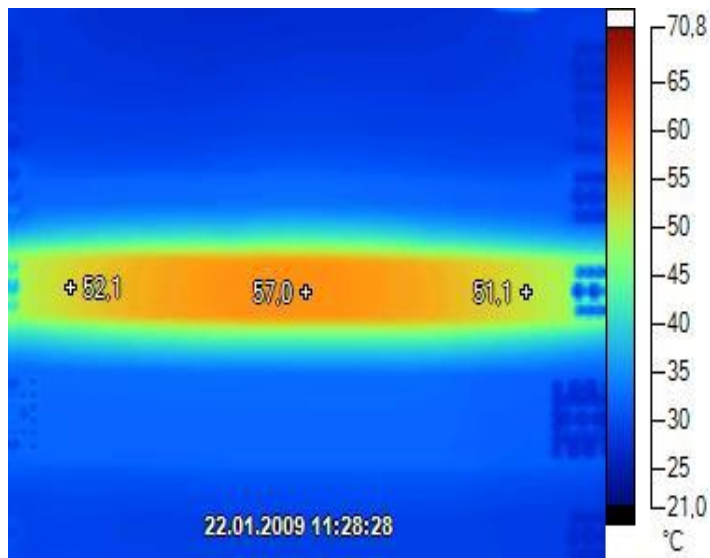
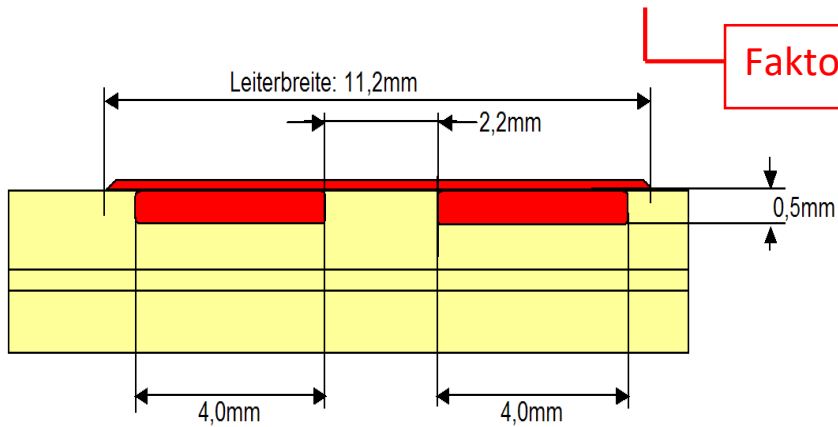
I = 100A

$T_U = 25^\circ\text{C}/\Delta t = 10\text{K}$ ←

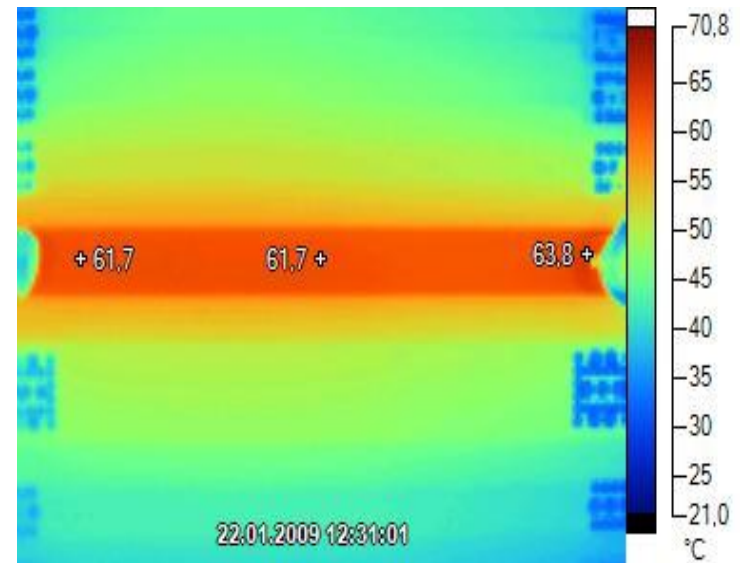
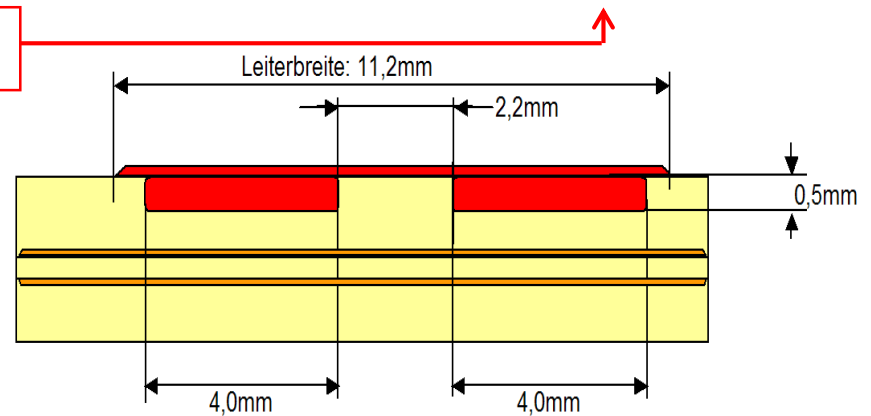


Ergänzende Informationen

Leiterbahn nur auf einer Seite ohne zusätzliche Leiterbahnen auf den Innenlagen für **75 Ampere**.



Gleicher Aufbau mit zwei zusätzlichen Flächeninnenlagen (70µm Kupferhöhe) elektrisch NICHT verbunden für **125 Ampere**..

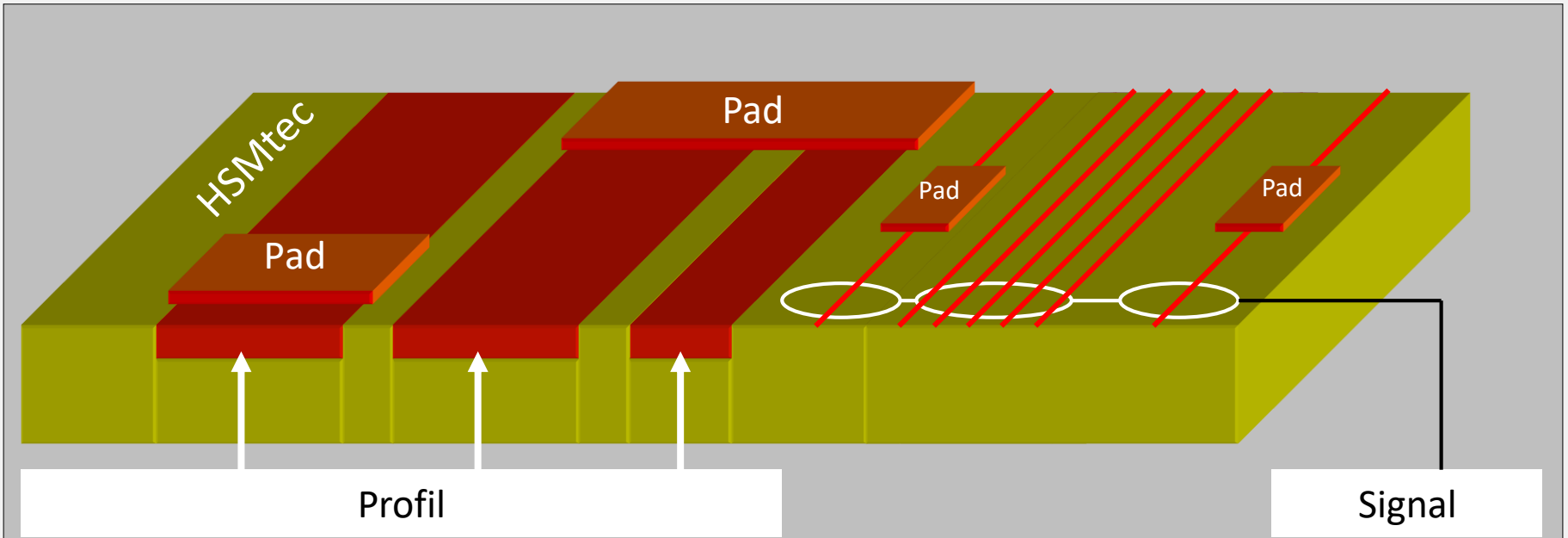






Eine Selektive Kupfertechnologie

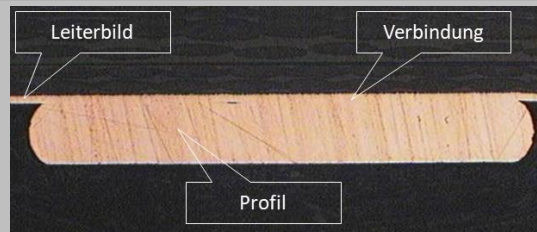
Quelle: Firma Häusermann GmbH *

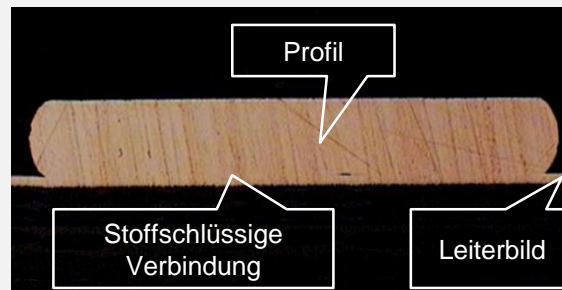
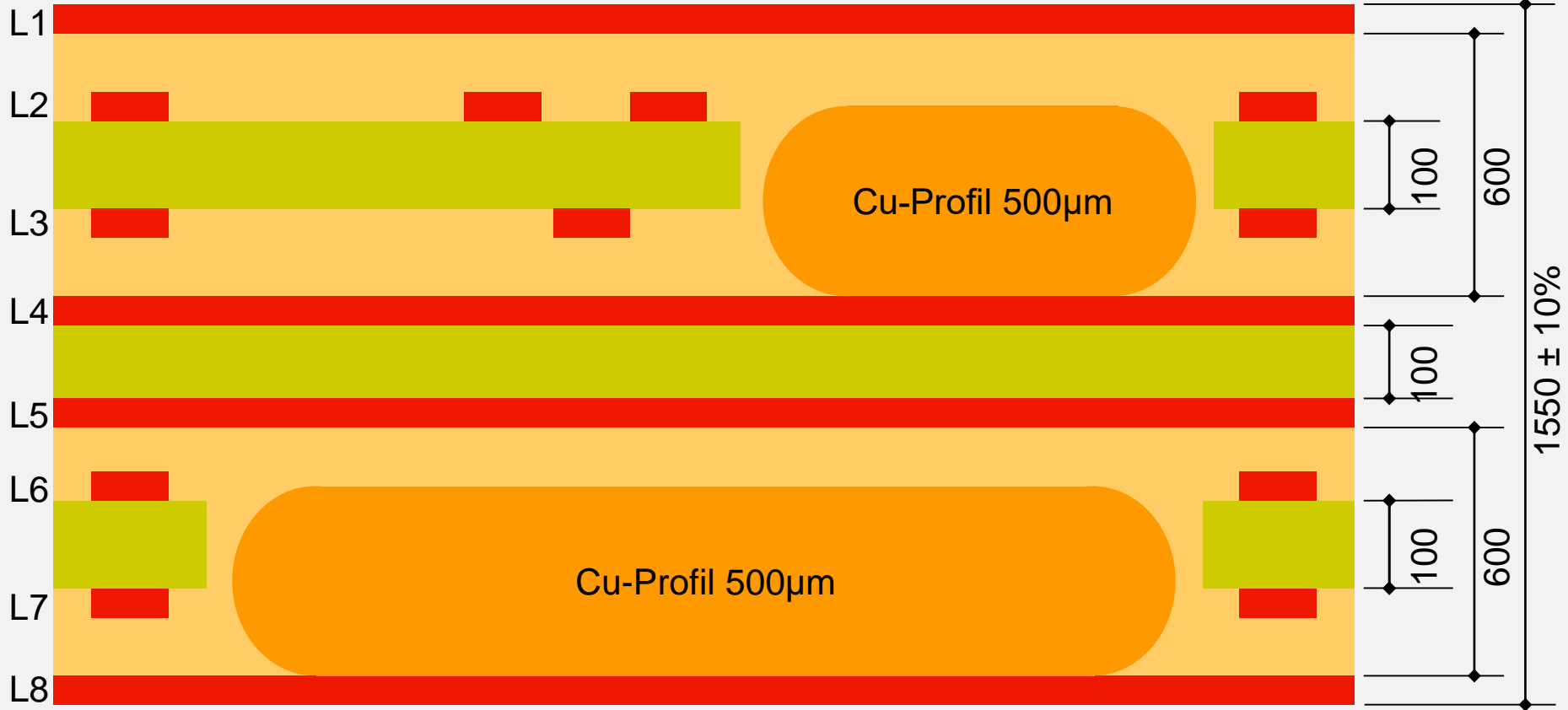
Verfasser: Lothar Oberender/Johann Hackl**

Profile

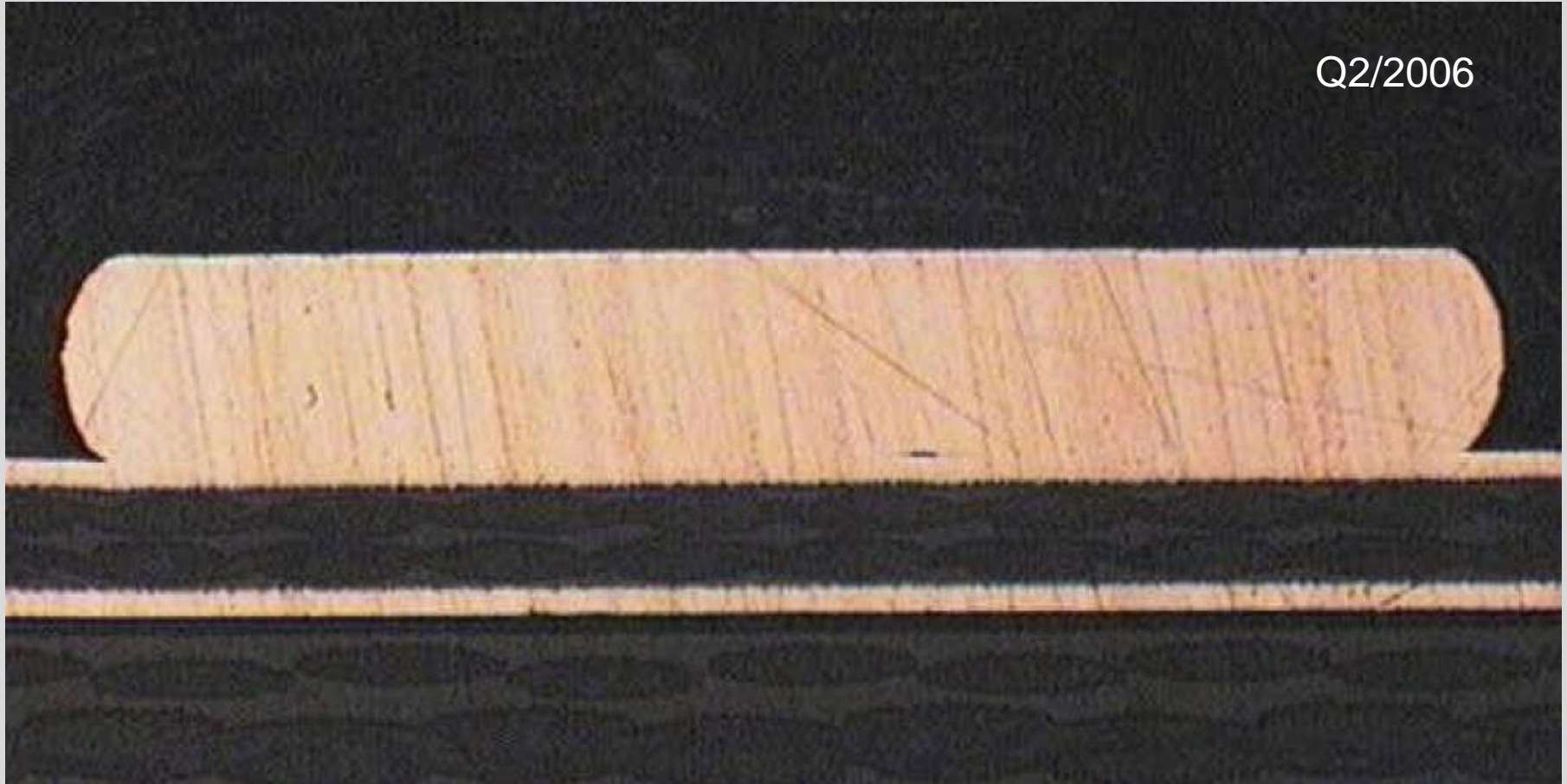


Profil 2 x 0,5	Profil 4 x 0,5	Profil 8 x 0,5	Profil 12 x 0,5
			



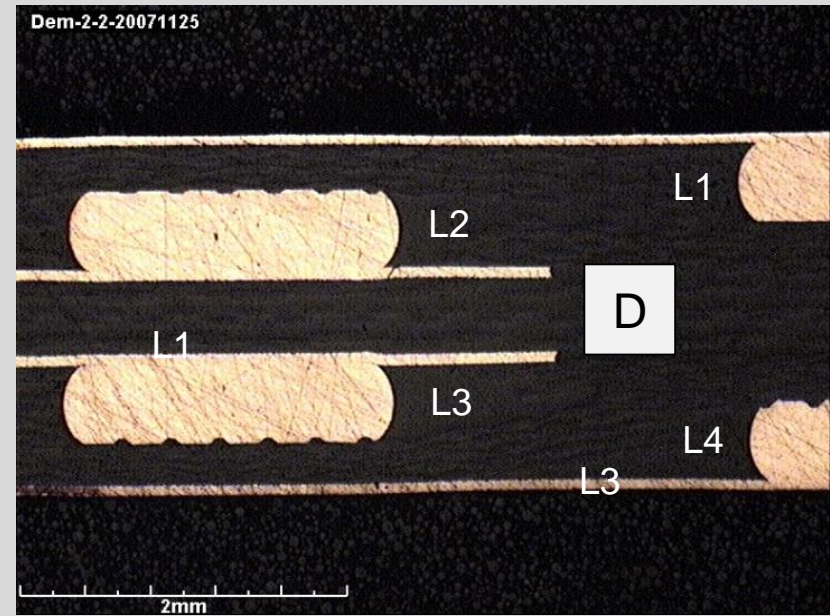
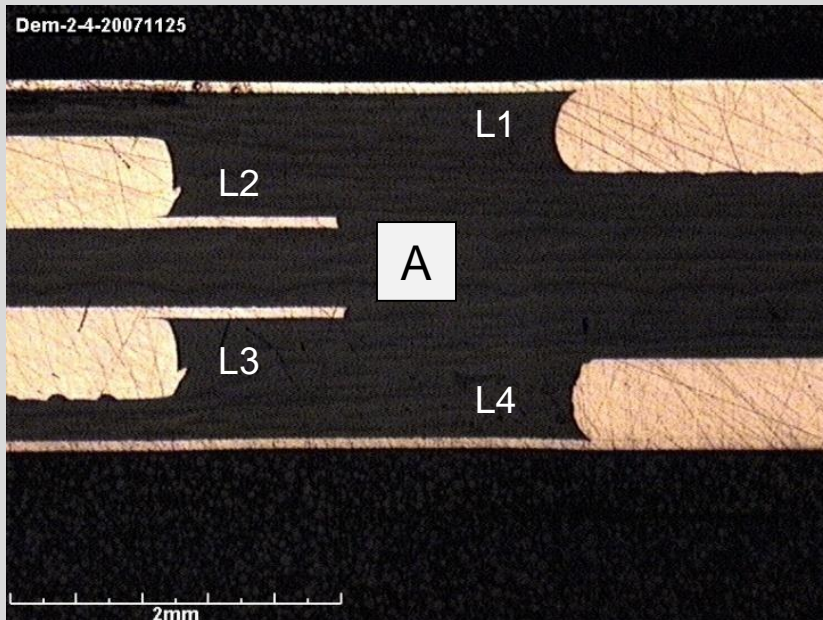
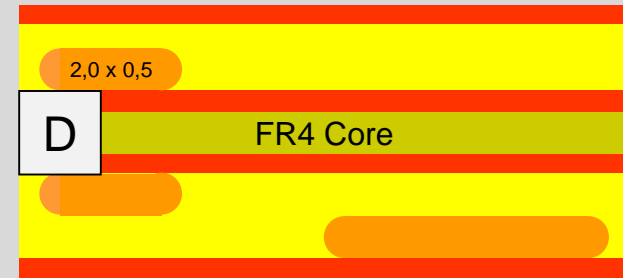
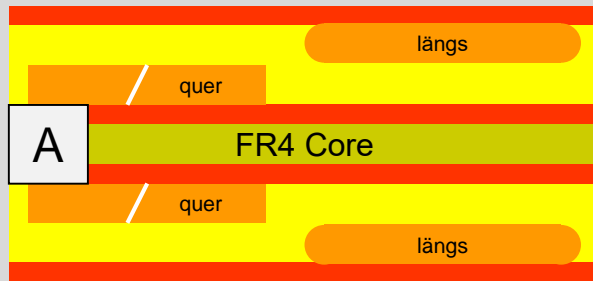


Q2/2006



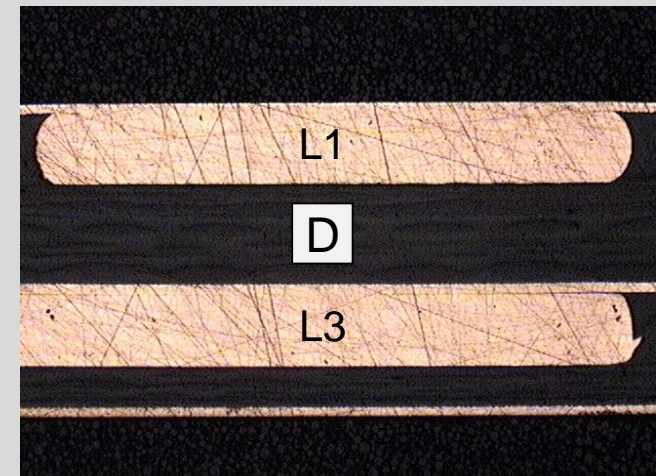
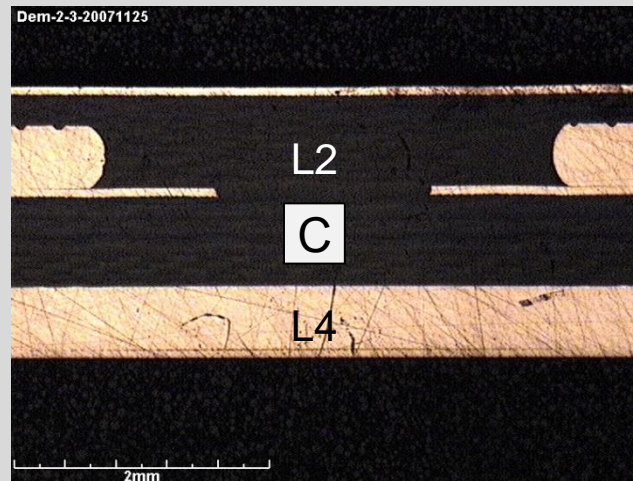
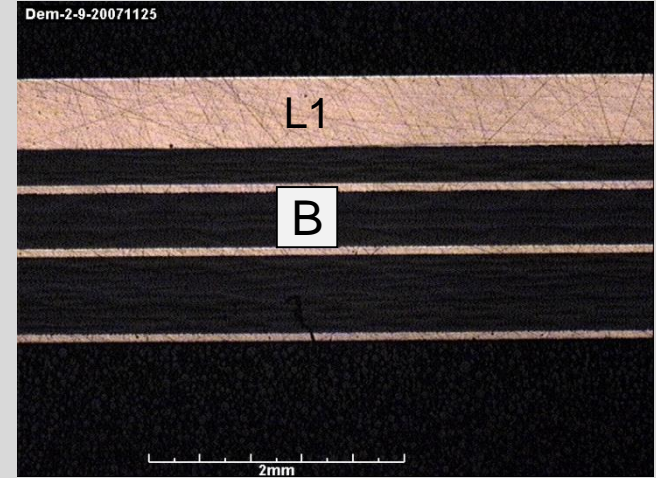
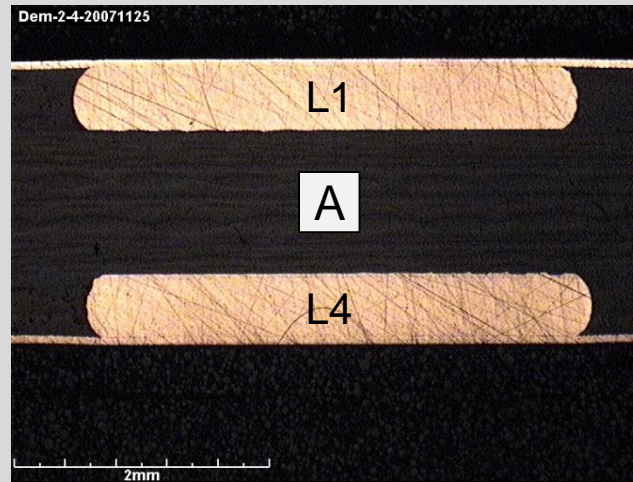
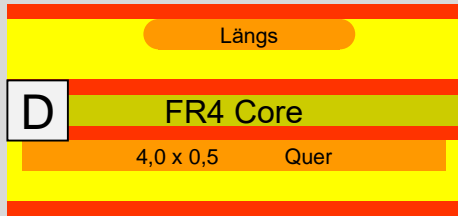
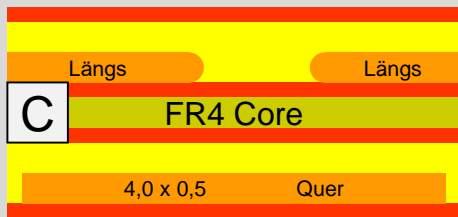
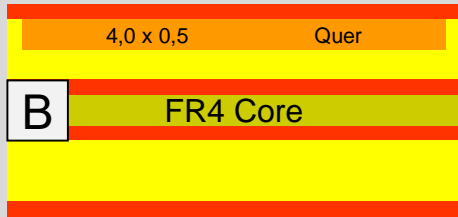
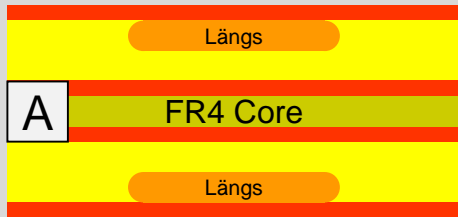
Profil 4mm X 0,5mm über 70µm Cu-Folie

Unterschiedliche Lage von Profilen in einem 4-Lagen Multilayer



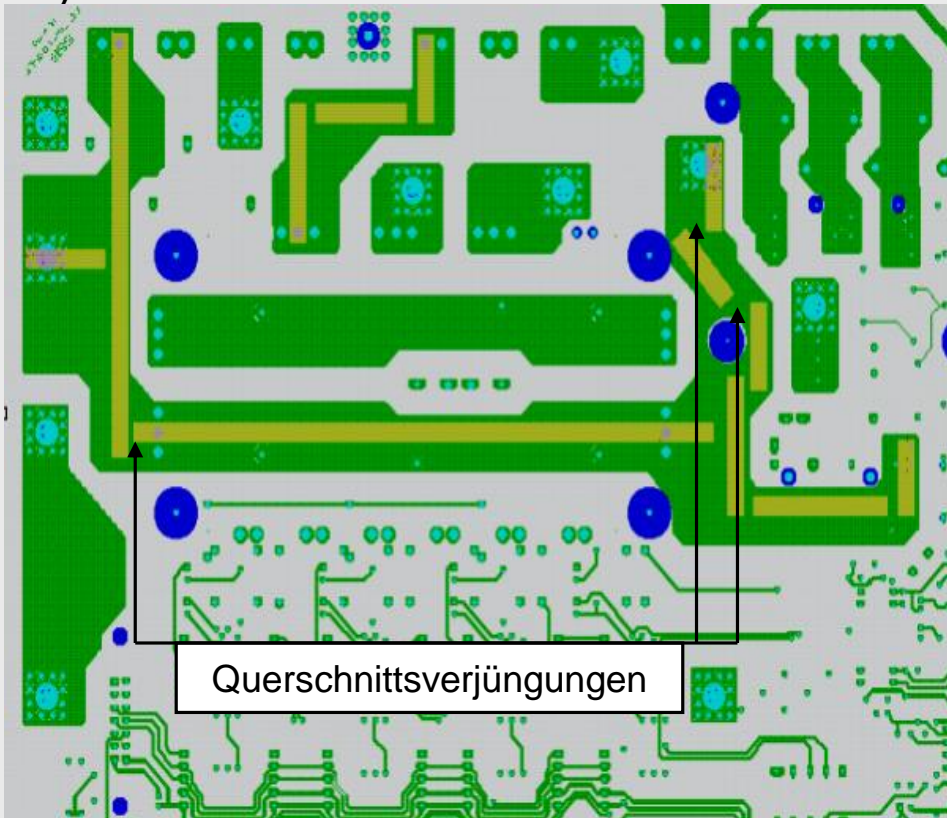
Unterschiedliche Lage von Profilen in einem 4-Lagen Multilayer

*/**



Layout

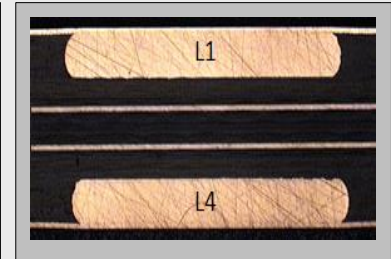
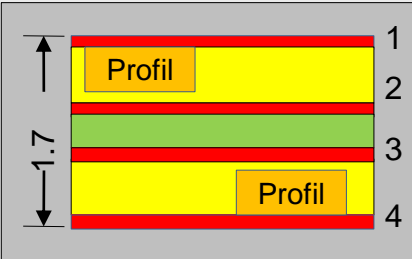
Quelle: SSB/Häusermann GmbH



Profile 4mm unter der Kupferfolie unterstützen die geätzten Strukturen für **70 Ampere** Dauerstrom bei geringer Erwärmung dieser Strompfade.

Multilayeraufbau

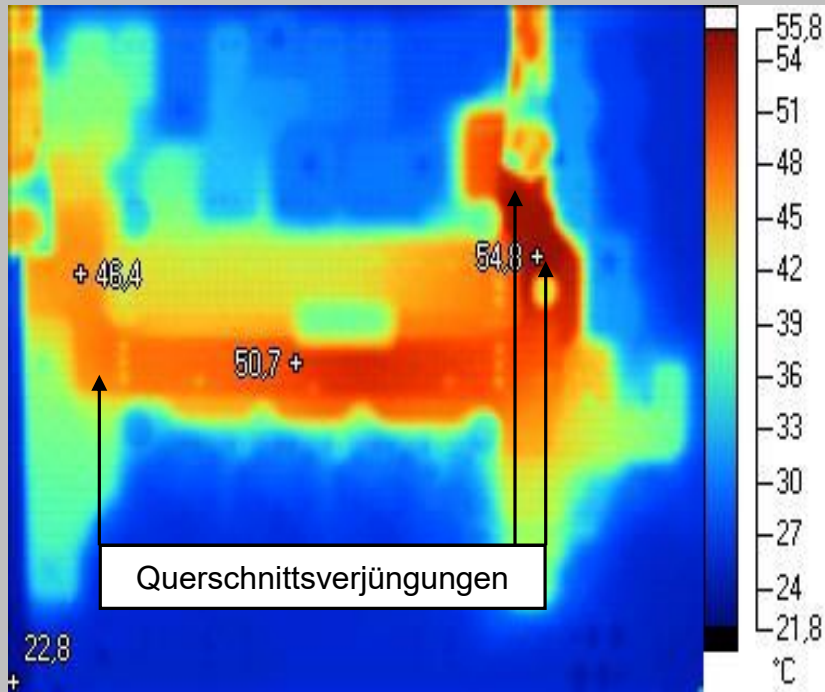
Schliff



Flächenanteil für die Profile:
4%

Die mittlere Breite der Hochstromleitungen beträgt bei dieser Leiterplatte 10mm. Diese Breite mit 70µm Kupferhöhe reicht für 35 Ampere bei einem Delta-T von 30°. Mit einem 4 * 0,5mm Kupferprofil reicht der Querschnitt für 70Ampere. Ohne Kupferprofil müsste die Leiterbreite **35mm** betragen oder das Delta-T wäre **150°C**.

Ergebnis der Thermographie

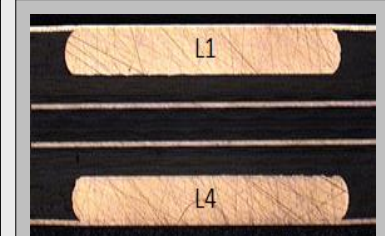


Es ist keine Temperaturerhöhung durch die Querschnittsverjüngungen erkennbar!

Profile 4mm unter der Kupferfolie unterstützen die geätzten Strukturen für 70 Ampere Dauerstrom bei geringer Erwärmung dieser Strompfade.

Multilayeraufbau

Schliff



Flächenanteil für die Profile:
4%

Die mittlere Breite der Hochstromleitungen beträgt bei dieser Leiterplatte 10mm. Diese Breite mit 70µm Kupferhöhe reicht für 35 Ampere bei einem Delta-T von 30°. Mit einem 4 * 0,5mm Kupferprofil reicht der Querschnitt für 70Ampere. Ohne Kupferprofil müsste die Leiterbreite 35mm betragen oder das Delta-T wäre 150°C.

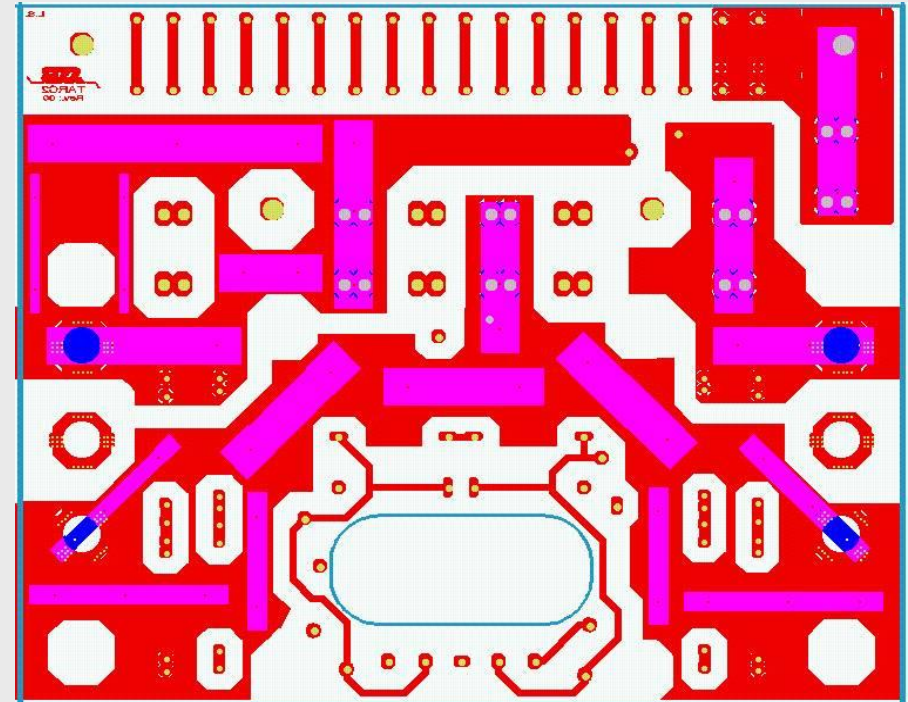
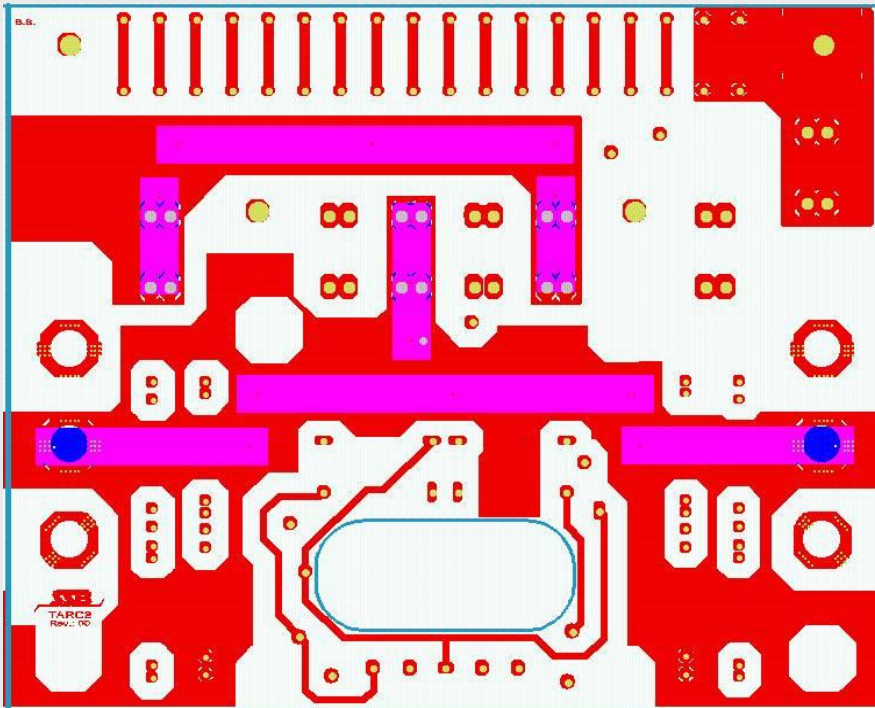
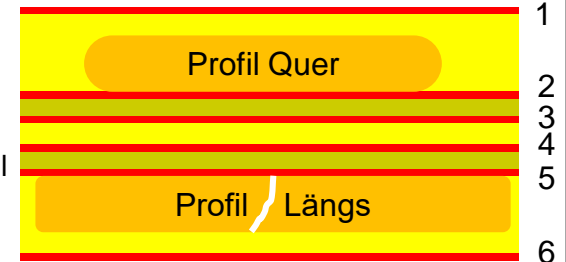
Aufgabenstellung:

I_{1-n}	60A
ΔT_{Max}	40°C
$t_{Umgebung}$	70°C

Es werden mehrere Strompfade gleichzeitig betrieben

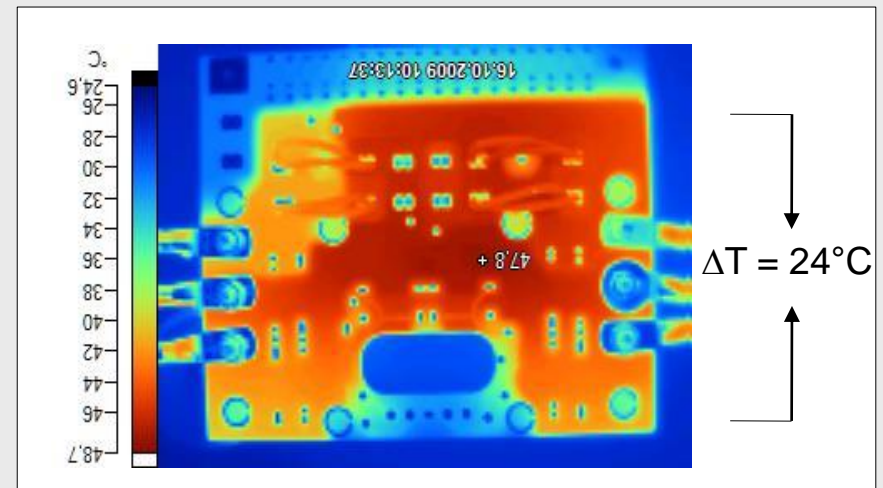
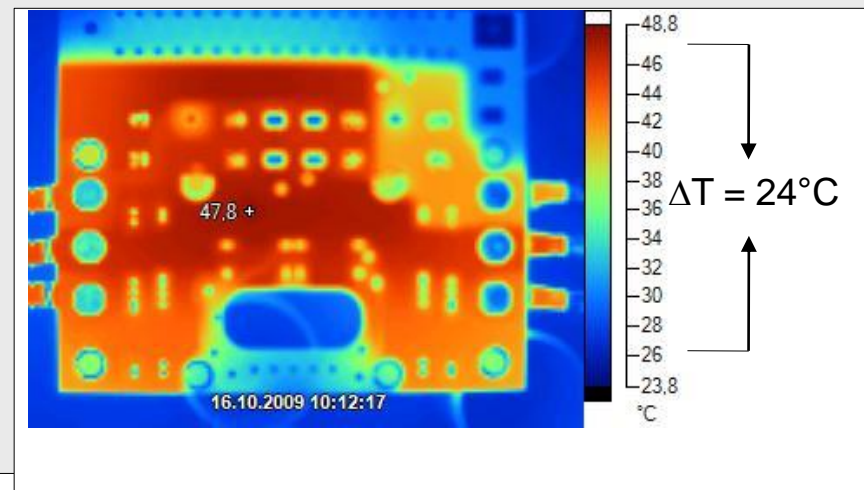
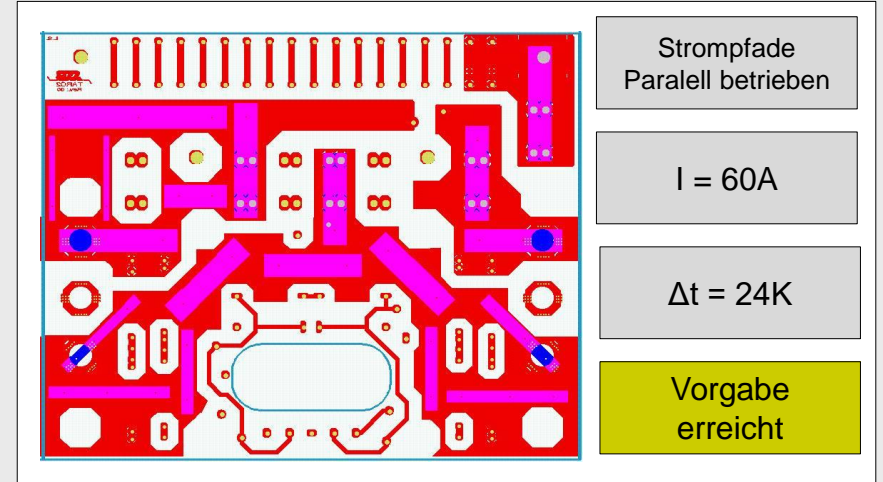
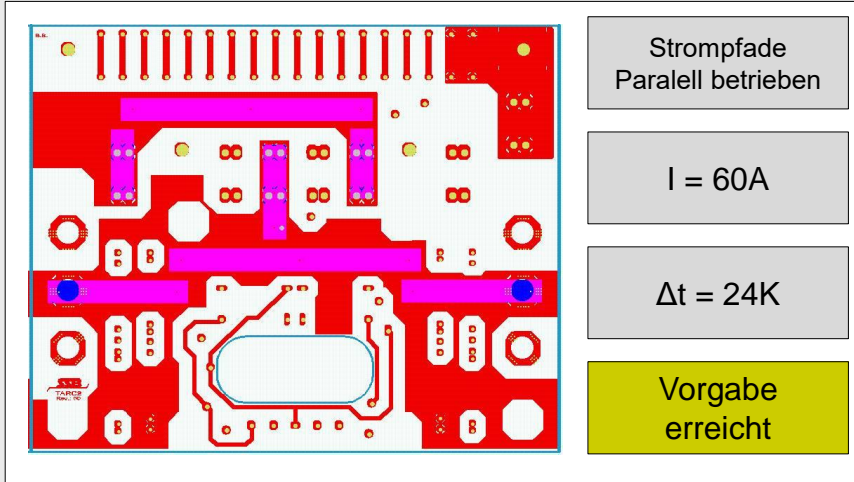
Lagenaufbau:

L2+L3 gleiches Potential
L4+L5 gleiches Potential



Beispiel 60A → Mehrere Strompfade Parallel betrieben

Ergebnis Thermographie ^{*/**}



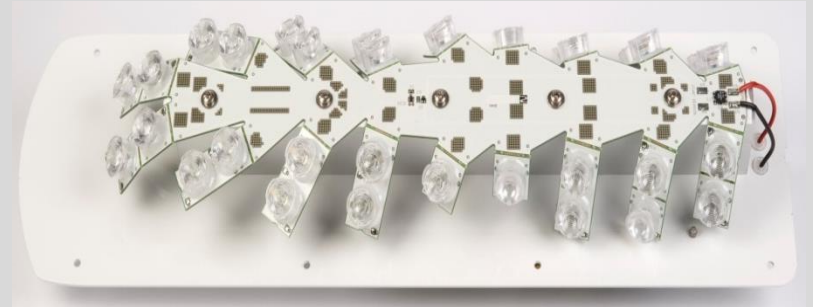
Inhalt

- Grundlagen
- Strom und Entwärmung
- **Die Praxis und Beispiele**
- Welche Ressourcen gibt es

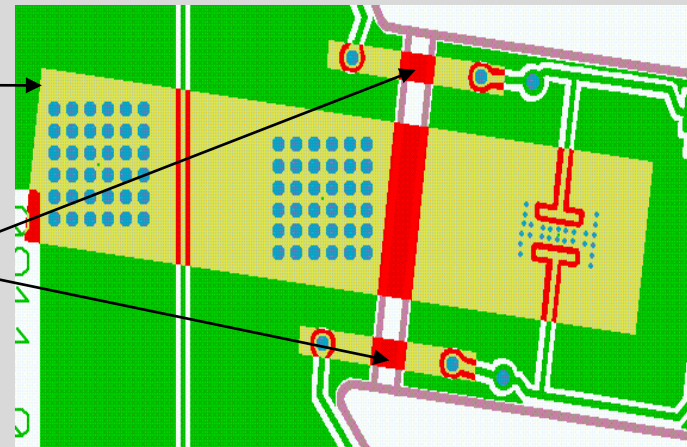
Quelle: Firma Häusermann GmbH *

Verfasser: Lothar Oberender/Johann Hackl**

32 LEDs in Serie: FR4; 4-Lagen; 1,2mm



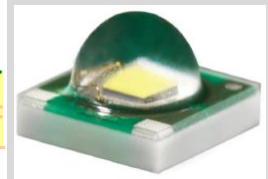
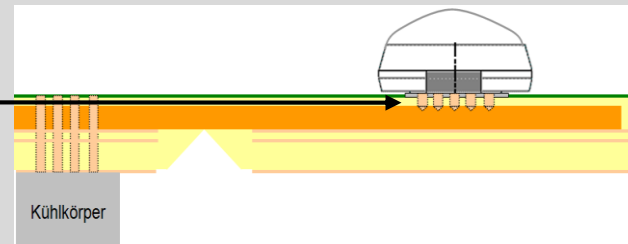
1m 12mm breite Kupferprofile auf einer Innenlage für die Wärmeableitung



2mm breite Kupferprofile für die elektrische Verbindung über die Biegestellen



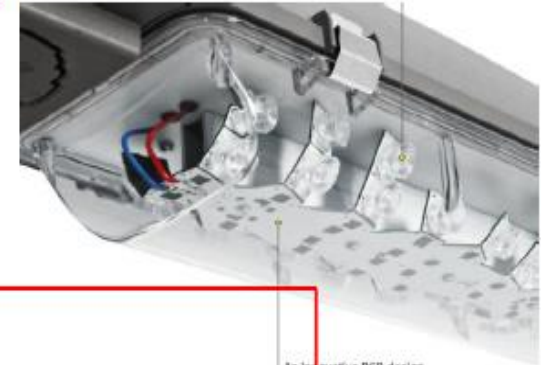
Thermische Ankontaktierung der LEDs über Microvias bzw. Sacklöcher



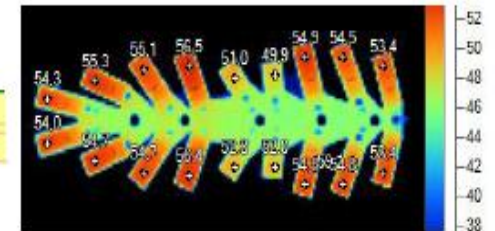
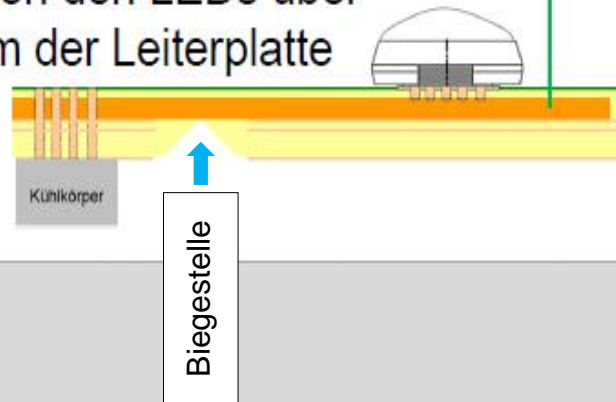
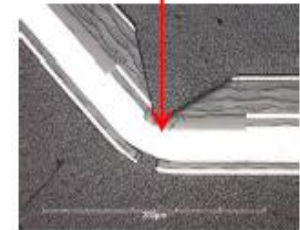
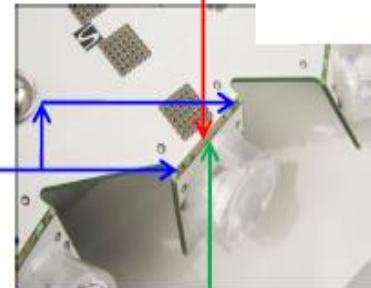
LED-Type: Cree XLamp XP-E

Hier übernimmt die Leiterplatte zusätzlich folgende Funktionen und ermöglicht viele neue Konstruktionsmöglichkeiten und Einsatzmöglichkeiten:

- ☺ räumlich individuelle Ausrichtung der Bauteile (LEDs) durch die Biegemöglichkeit der massiven Kupferprofile
- ☺ selbstständiges Tragen der Bauteile (LEDs) in dieser Position
- ☺ elektrische Ansteuerung der LEDs über die Biegestellen durch 2mm breite Kupferprofile
- ☺ optimale Wärmeableitung von den LEDs über die Biegestellen ins Zentrum der Leiterplatte zur Wärmesenke



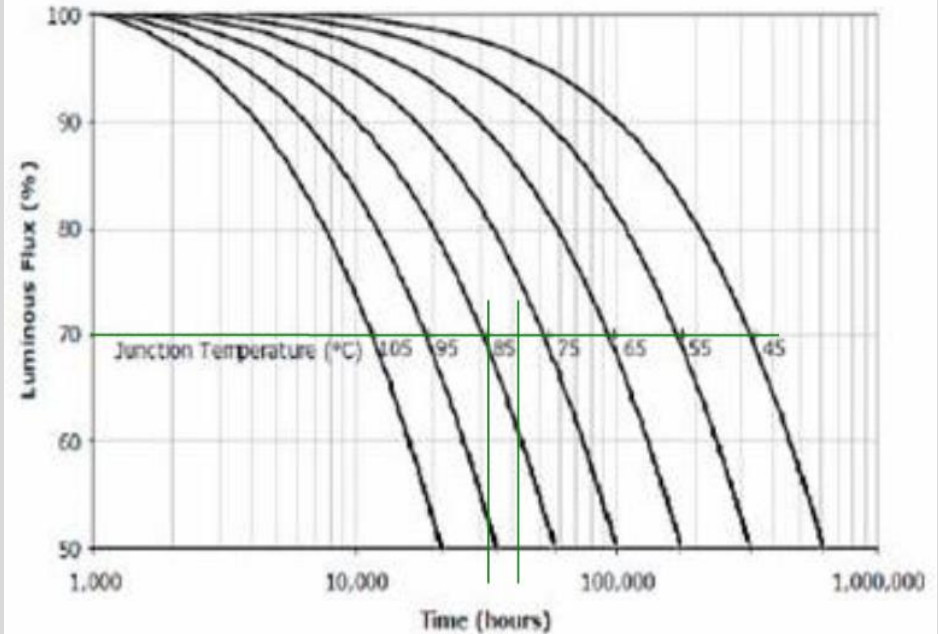
An innovative PCB design allowing individual LED orientation, conductivity and heat dissipation of the LED



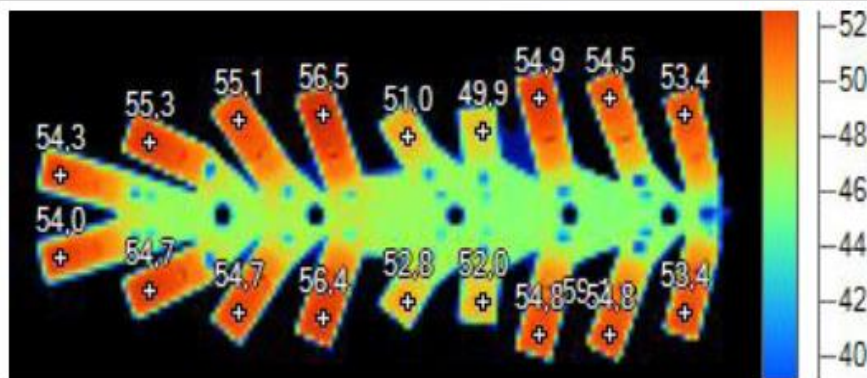
LED Leuchte



Lebensdauerdiagramm



Thermographie



Verlustleistung

25W

Δt von der LED zum Kühlkörper

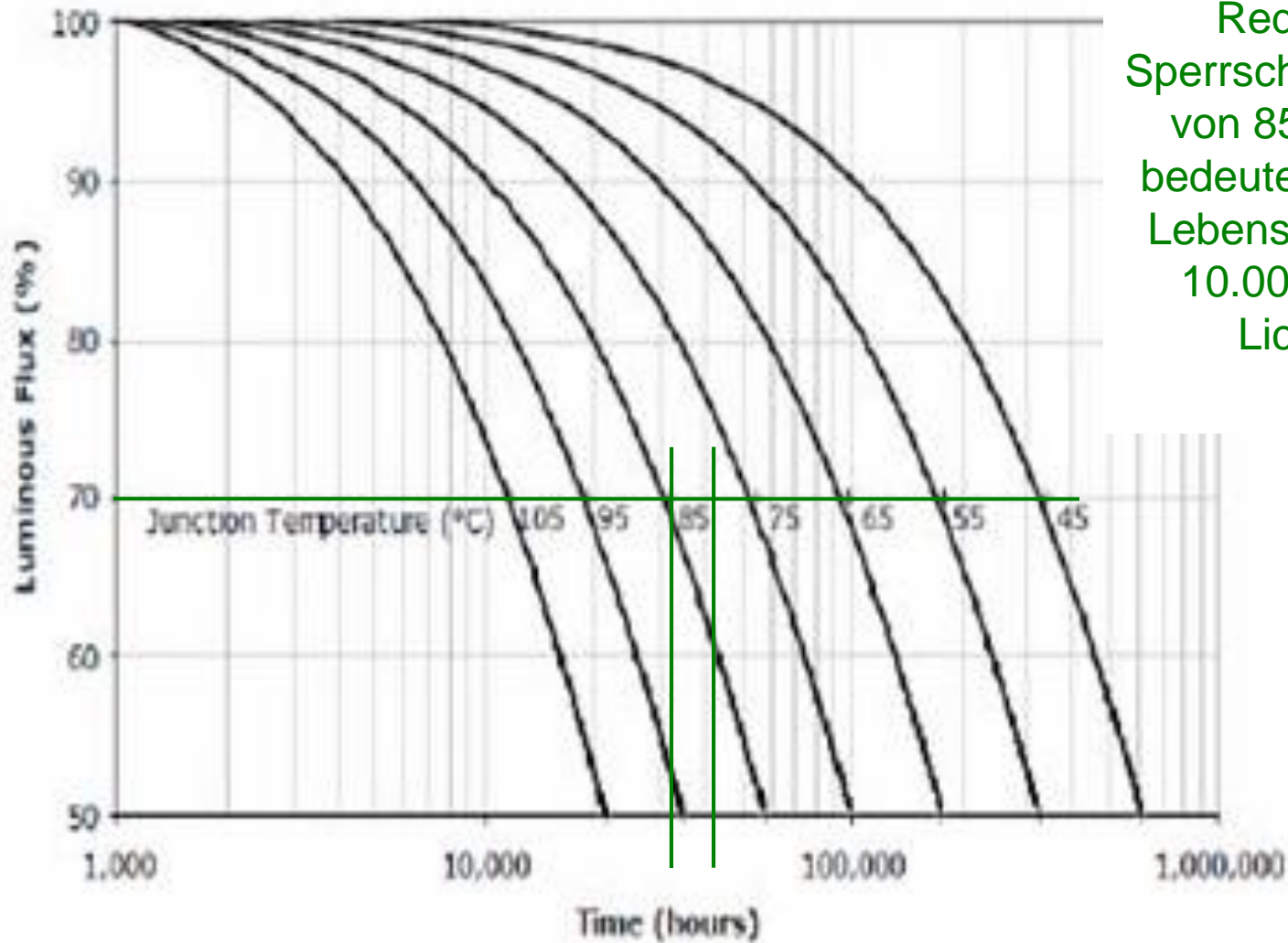
10°C

Reduktion Sperrschichttemperatur von 85°C auf 80°C

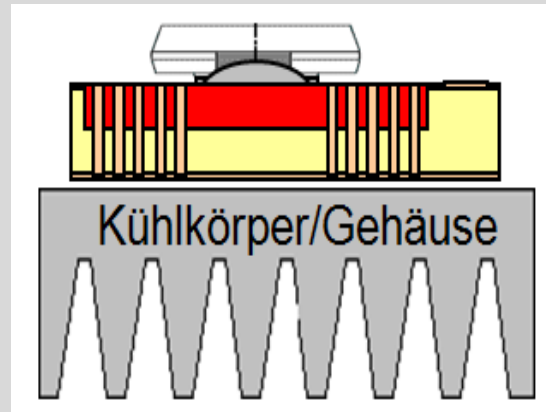
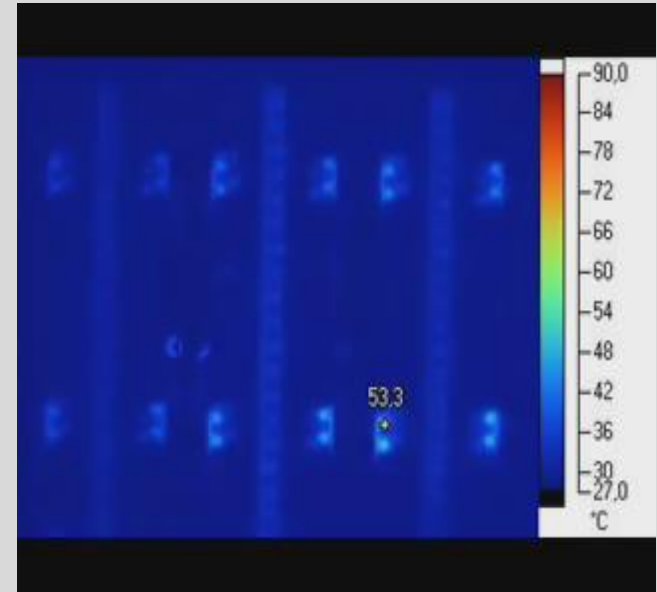
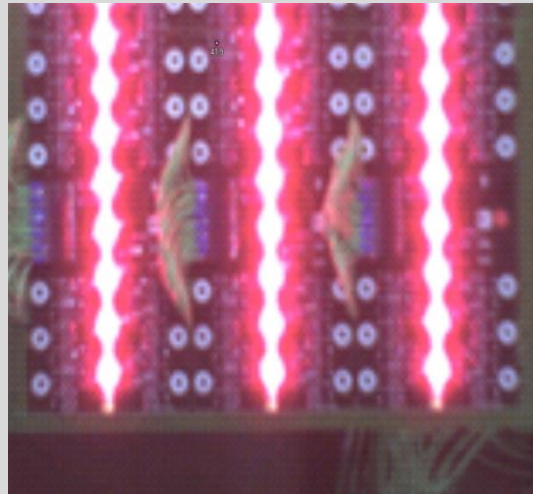
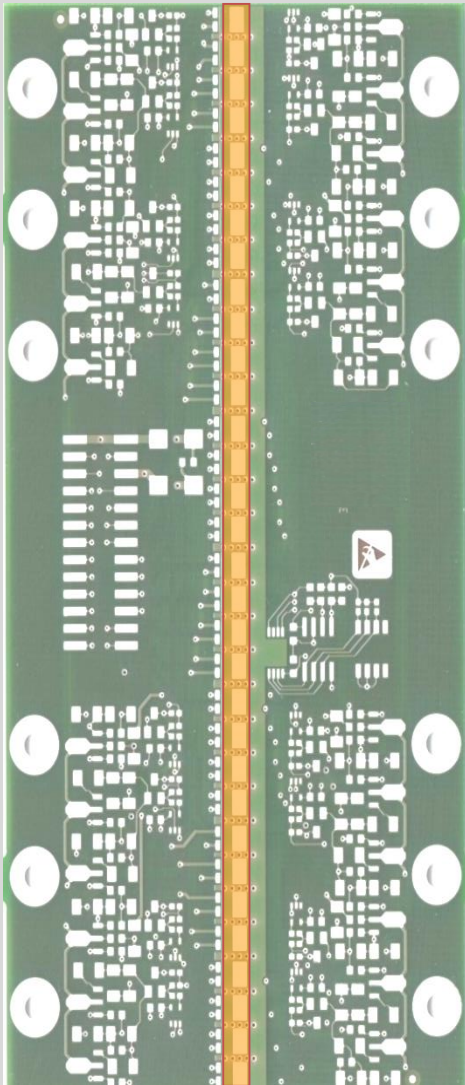
5°C



Das bedeutet bei 70% Lichtstrom eine Verlängerung der Lebensdauer um ca. 10.000h.

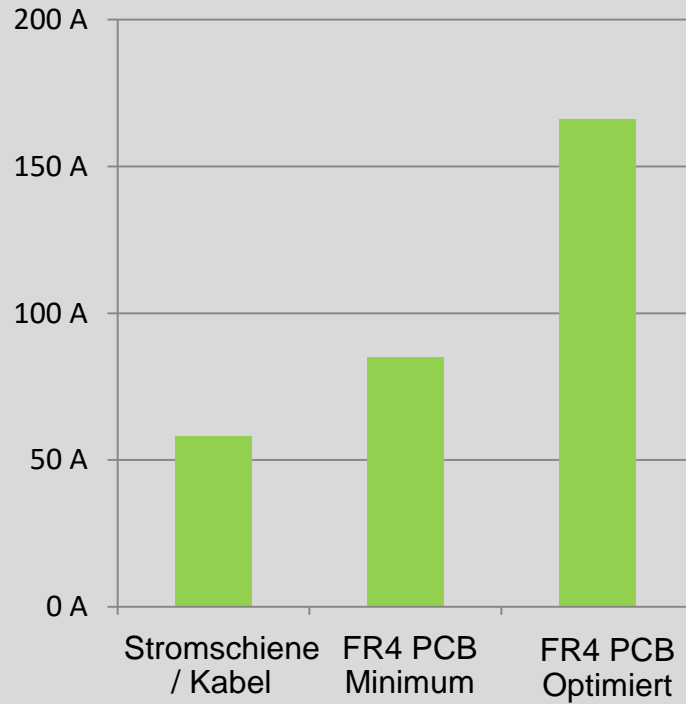


Reduktion der Sperrschichttemperatur von 85°C auf 80°C bedeutet eine längere Lebensdauer von ca. 10.000h (bei 70% Lichtstrom).



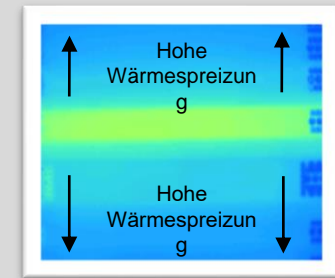
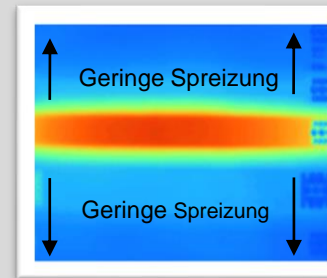
-9,3°C zwischen HSMtec und herkommlicher LP-Technologie!

- Leiterplatten ermöglichen höhere Ströme gegenüber Kabeln / Schienen bei gleichem Querschnitt



- Leiterquerschnitt: **6 mm²**
- Zulässige Temperaturdifferenz: **50 K**

Aufbau	Geringe indirekte Wärmespreizung					Hohe indirekte Wärmespreizung				
	Runddraht 0,5 mm	Cu-Profil 2 mm	Cu-Profil 4 mm	Cu-Profil 8 mm	Cu-Profil 12 mm	Runddraht 0,5 mm	Cu-Profil 2 mm	Cu-Profil 4 mm	Cu-Profil 8 mm	Cu-Profil 12 mm
FR4 160 mm x 100 mm x 1,6 mm										
Delta T [°C]	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere
10	3,9	11,1	18,4	30,4	40,8	7,0	20,1	33,2	54,9	73,7
20	5,5	15,7	26,0	43,0	57,6	10,0	28,4	47,0	77,7	104,3
30	6,7	19,3	31,8	52,6	70,6	12,2	34,8	57,6	95,2	127,7
40	7,8	22,2	36,8	60,7	81,5	14,1	40,2	66,5	109,9	147,4
50	8,7	24,9	41,1	67,9	91,1	15,7	45,0	74,3	122,9	164,9
60	9,5	27,2	45,0	74,4	99,8	17,2	49,3	81,4	134,6	180,6
70	10,3	29,4	48,6	80,4	107,8	18,6	53,2	88,0	145,4	195,1
80	11,0	31,4	52,0	85,9	115,3	19,9	56,9	94,0	155,4	208,5
90	11,7	33,4	55,1	91,1	122,3	21,1	60,3	99,7	164,8	221,2
100	12,3	35,2	58,1	96,0	128,9	22,3	63,6	105,1	173,8	233,1



* Die Tabelle ermöglicht eine ungefähre Schätzung der erwarteten Strombelastbarkeit. Die tatsächliche Strombelastbarkeit hängt von zusätzlichen variablen Faktoren wie Layout, Materialien usw. ab.

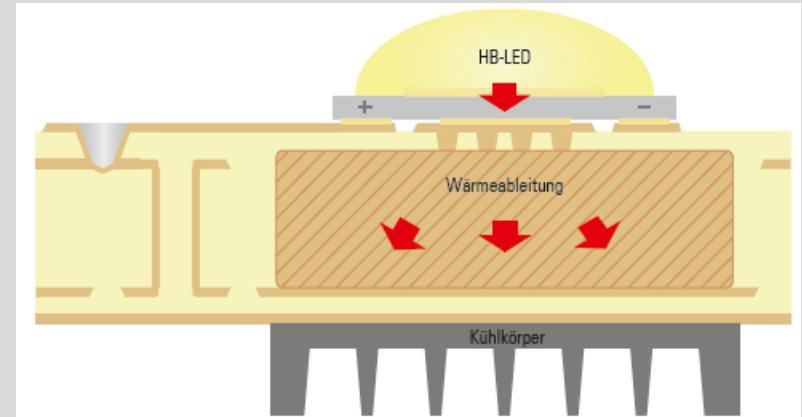
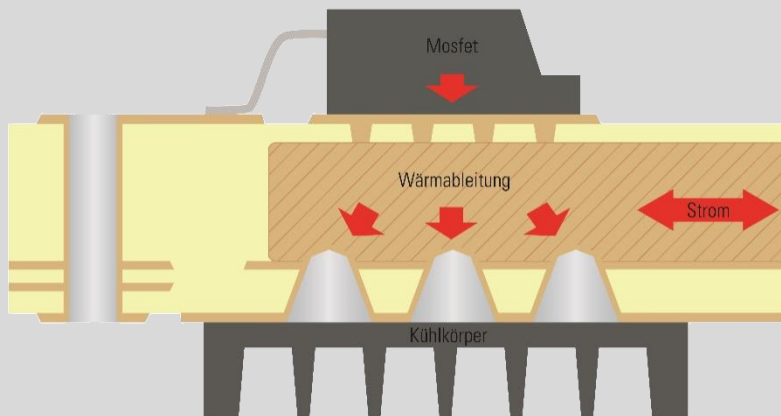
$$R_{th} = \frac{L}{\lambda \cdot A}$$

- L Länge des therm. Pfades [m]
- λ Thermische Leitfähigkeit [W/(m·K)]
- A Querschnitt des Wärmepfades [m²]

Minimaler thermischer Widerstand durch rasche Wärmespreizung direkt unter dem Hotspot

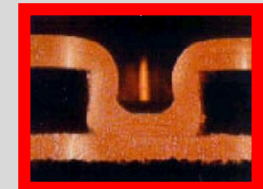
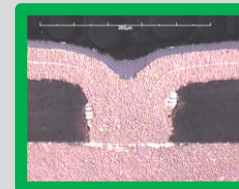
Prinzip-Beispiel: SMD MOSFETs

- Integrierte Hochstromprofile sorgen für rasche Wärmeableitung und Spreizung von Hotspots.
- Microvias ermöglichen Standard-Lötprozesse
- Optional integrierte Spannungsfestigkeit bis >4kV



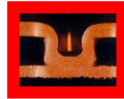
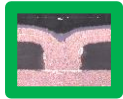
Prinzip-Beispiel: LED Multilayer PCB

- Optimierte Wärmeableitung durch integrierte Dickkupferelemente unter den LEDs.
- Microvias ermöglichen Standard-Lötprozesse
- Optional integrierte Spannungsfestigkeit bis >4kV

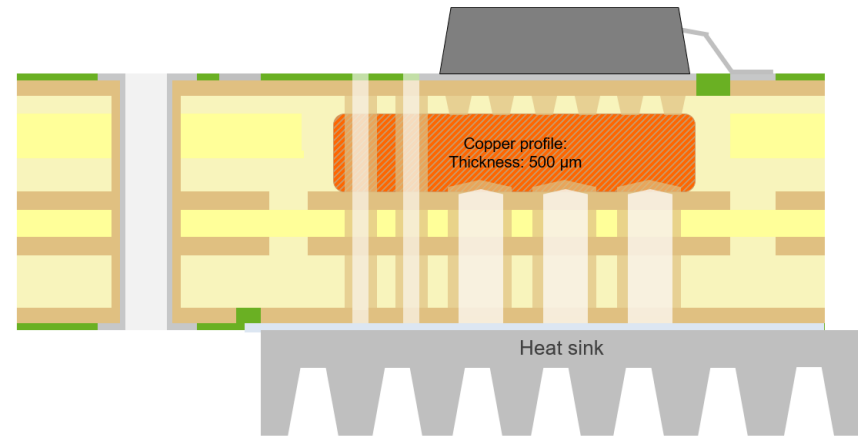


Anforderungen Leiterplatte

- Entwärmung von TO263 MOSFETs (ca. 20W Verlustleistung / Bauteil)
- 100A Dauerstrom
- Hochstrom kombiniert mit Wärmeableitung und Steuerelektronik
- Pressfit Ankontaktierung der PCB



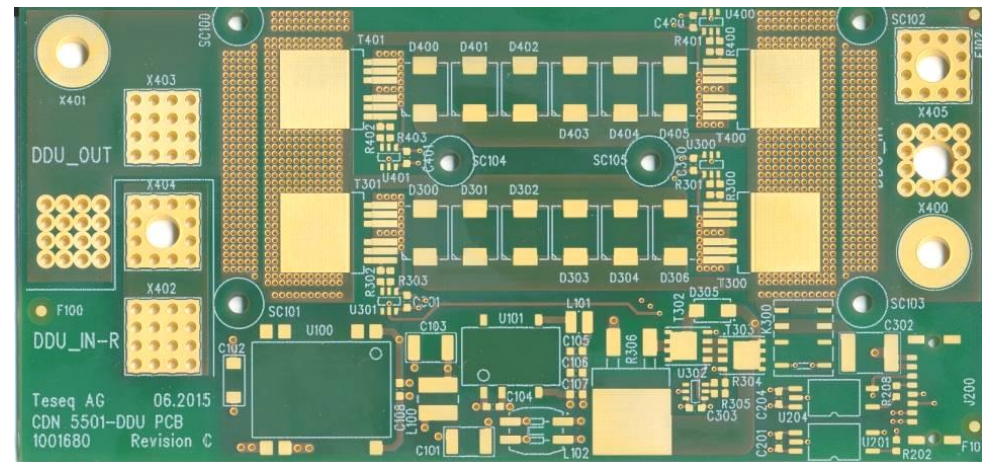
Aufbau



Lösung – HSMtec Multilayer

- 4-Lagen; 70µm Multilayer PCB Basis
- Vollintegrierte 12mm breite 500µm hohe Kupferprofile auf einer Innenlage
- Direkte Ankontaktierung der SMD MOSFETs über Filled Microvias im Pad
- Ergänzung mit Thermovias und Blindvias für optimale Wärmedurchleitung.
- PCB-Dicke: 1,60 mm, Größe: 135 x 64mm

Ergebnis



Inhalt

- Grundlagen
- Strom und Entwärmung
- Die Praxis und Beispiele
- Welche Ressourcen gibt es

Als Ressourcen ist eine Auswahl von vorhandenen Möglichkeiten Genannt.

Der Umgang mit vorhandenen Ressourcen bei Anwendungen mit hohen Stromdichten und hohen Verlustleistungen:

- Der erste Schritt kann eine relativ einfache Abschätzung von Geometrien mit überschaubaren Programmtools sein.
- Nach der Abschätzung die Aufbaumöglichkeiten in die engere Wahl bringen.
- Den Flächenbedarf evaluieren.
- Daraus resultierenden Flächenbedarf fixieren

- Beginn mit der EDA unterstützten Erarbeitung der Detail-Geometrien.

Überprüfung
Ergebnis

Überprüfung durch Simulationssoftware
oder
Überprüfung durch vorhandene Messtechnik.

Überprüfung durch Inanspruchnahme einer Dienstleistung

Die IPC 2152

Quelle: Firma Häusermann

Verfasser: Lothar Oberender/Johann Hackl

Zusammenfassung

Der Ruf nach Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung der Stromtragfähigkeit von Leiterbahnstrukturen auf- und in Leiterplatten ist so alt wie die Leiterplatte selbst. Waren es in den Anfängen Kurven, die mit einfachsten empirischen Untersuchungen ermittelt wurden, kamen in der IPC 2221 Kurven „ins Gespräch“, die aus Anfang der 50er Jahre stammten und sich erstaunlicher Weise bis vor kurzem bezüglich der Benutzung der Selben erhalten blieben- obwohl sich in zunehmenden Maße herausgestellt hat, dass diese falsch sind und nicht in Beziehung zu einer geltenden Geometrie standen.

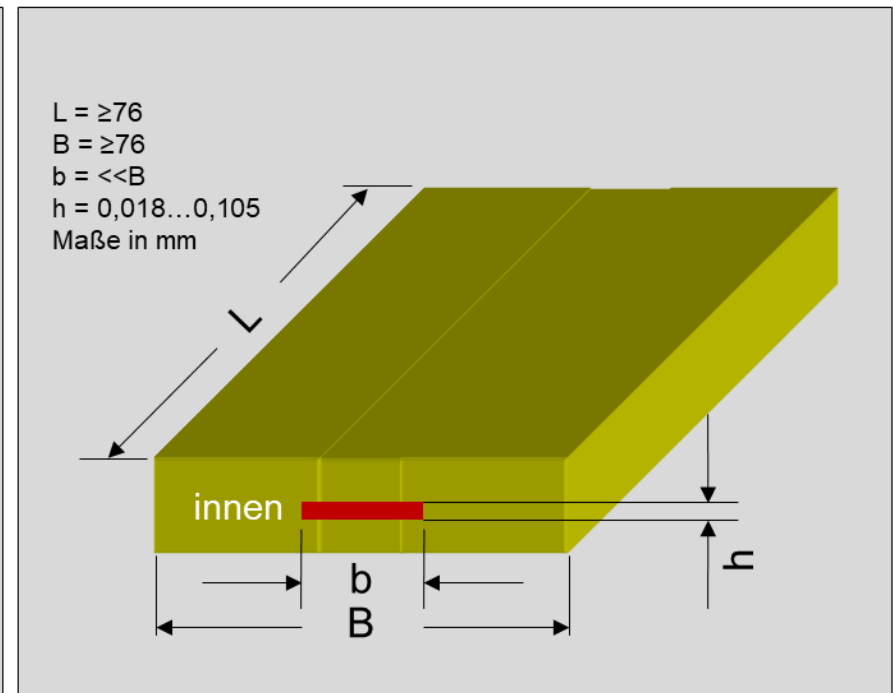
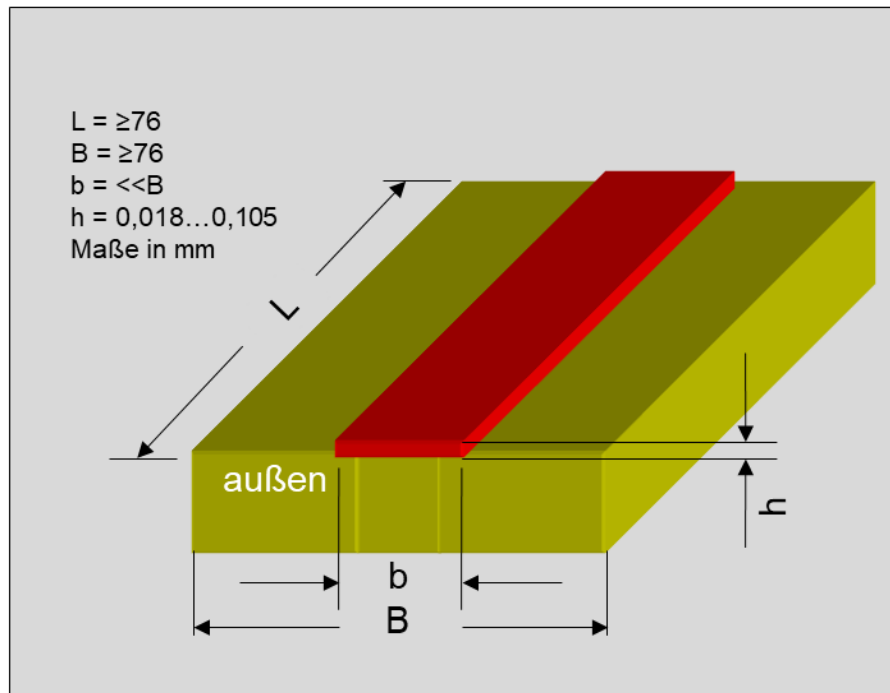
Wir haben heute die neue IPC-2152, die sich im Speziellen um die Stromtragfähigkeit auf und in Leiterplatten befasst. Eine Reihe von Berechnungstools aus Entwicklungs- und Forschungslabors der Industrie mit deren Hilfe heute Kalkulationen von Stromtragfähigkeiten in vielfältigster Weise mit einer Genauigkeit von $\pm 10\%$ vorgenommen werden können, liegen mittlerweile vor. Berechnungen mit solchen Tools genügen fast allen Attributen, die die Stromtragfähigkeit beeinflussen, die da sind: die umgebende Geometrie, Umgebungstemperaturen, die Temperatur gegenüber der Umgebungstemperatur, der Umgang mit Verlustleistungen, Kurzschlussströmen und die Berechnung von Pro Mission Files.

Es gilt:

Wird die IPC 2152 genutzt, ist diese ganzheitlich zu verinnerlichen, Berechnet kann auch mit der IPC 2152 nicht.

Viele Texte in dieser IPC sensibilisieren in vielfältiger Weise.

Für die IPC-2152 sind Kurvenscharen entwickelt worden, die auf Ströme bis 30A ausgelegt sind. Für diese Kurven ist die folgende die den Strom tragenden Leiter umgebende Geometrie in dieser IPC beschrieben:



Die Kurven der IPC 2152 folgen zwar ausschließlich dieser in der Abbildung dargestellten Geometrie, dennoch wird in den ausführlichen Texten auf die vielfältigen Einflussgrößen verwiesen.

Fazit:

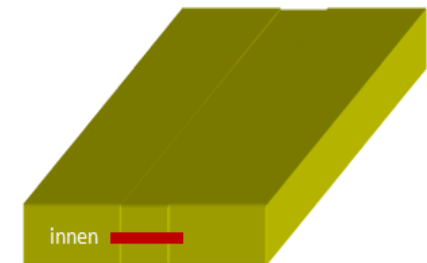
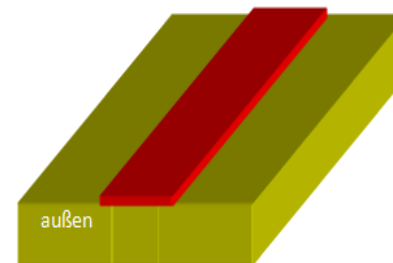
Es lohnt, die IPC 2152 zu nutzen, aber nur dann, wenn diese voll inhaltlich vereinnahmt ist.

Dennoch gilt das Folgende:

- Sofern die Kurven genutzt werden: Diese gelten für Ströme $\leq 30A$
- Eine Berechnungsformel gibt es nicht
- Bezüglich der den Strom tragenden Leiter umgebenden Geometrien werden die Einflüsse nicht quantifiziert und auch nicht berechnet, sondern nur die Tendenzen in Textform aufgezeigt.

Deshalb Gilt:

Die Kurven der IPC 2152 gelten ausschließlich für die rechts abgebildeten Geometrien.



Die IPC 2152 liegt in Deutscher Übersetzung beim FED vor.

Attribute, die die Stromtragfähigkeit des Leiters in und auf Leiterplatten beeinflussen

Basisgeometrie des Leiters

Geometrisches Umfeld des den Strom tragenden Leiter

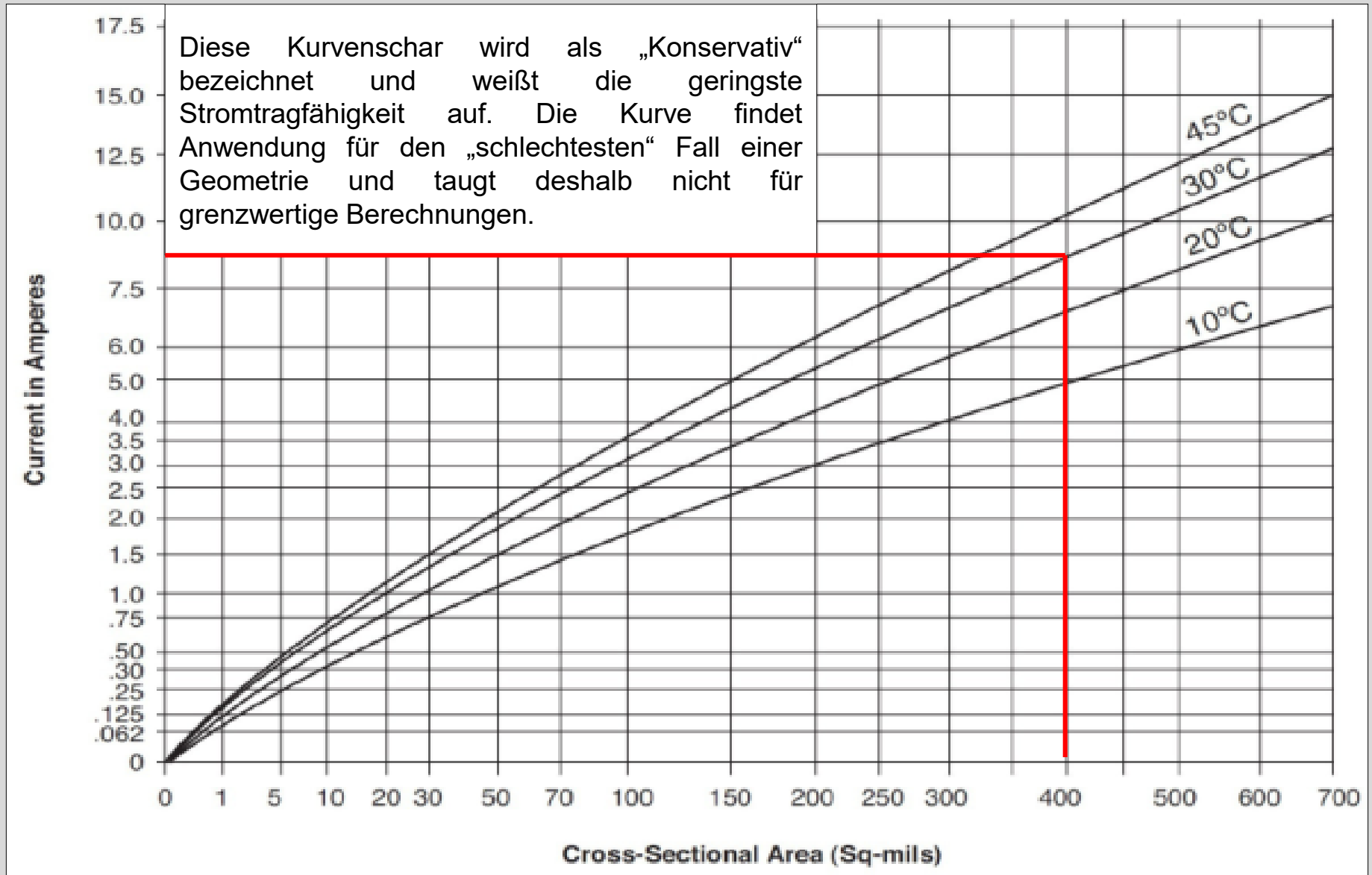
Verhältnis der Breite zur Höhe des Leiters

Wärmespreizung

Konvektion

Umgebungstemperatur

Stromprofil (Strom und Zeitintervall)



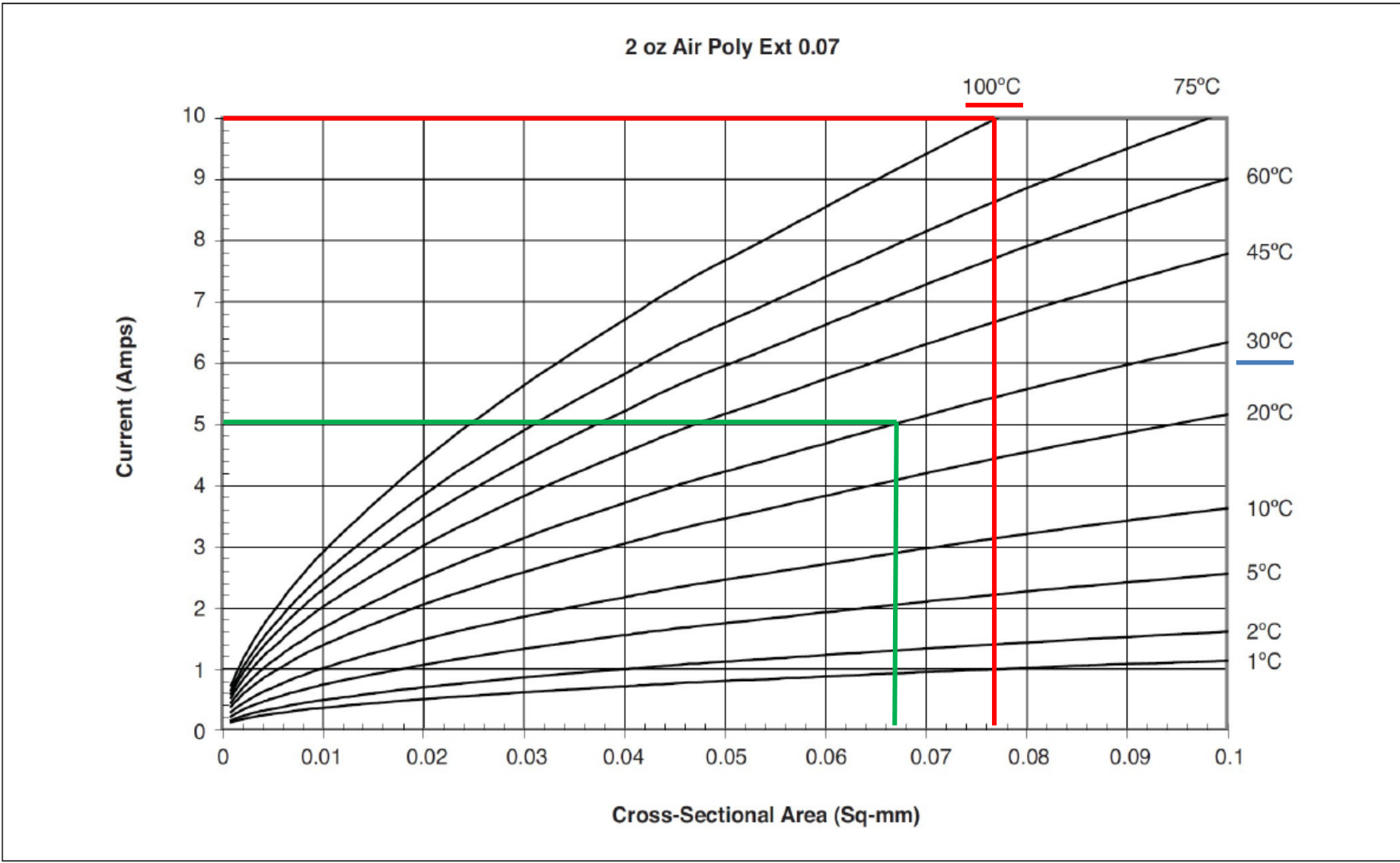
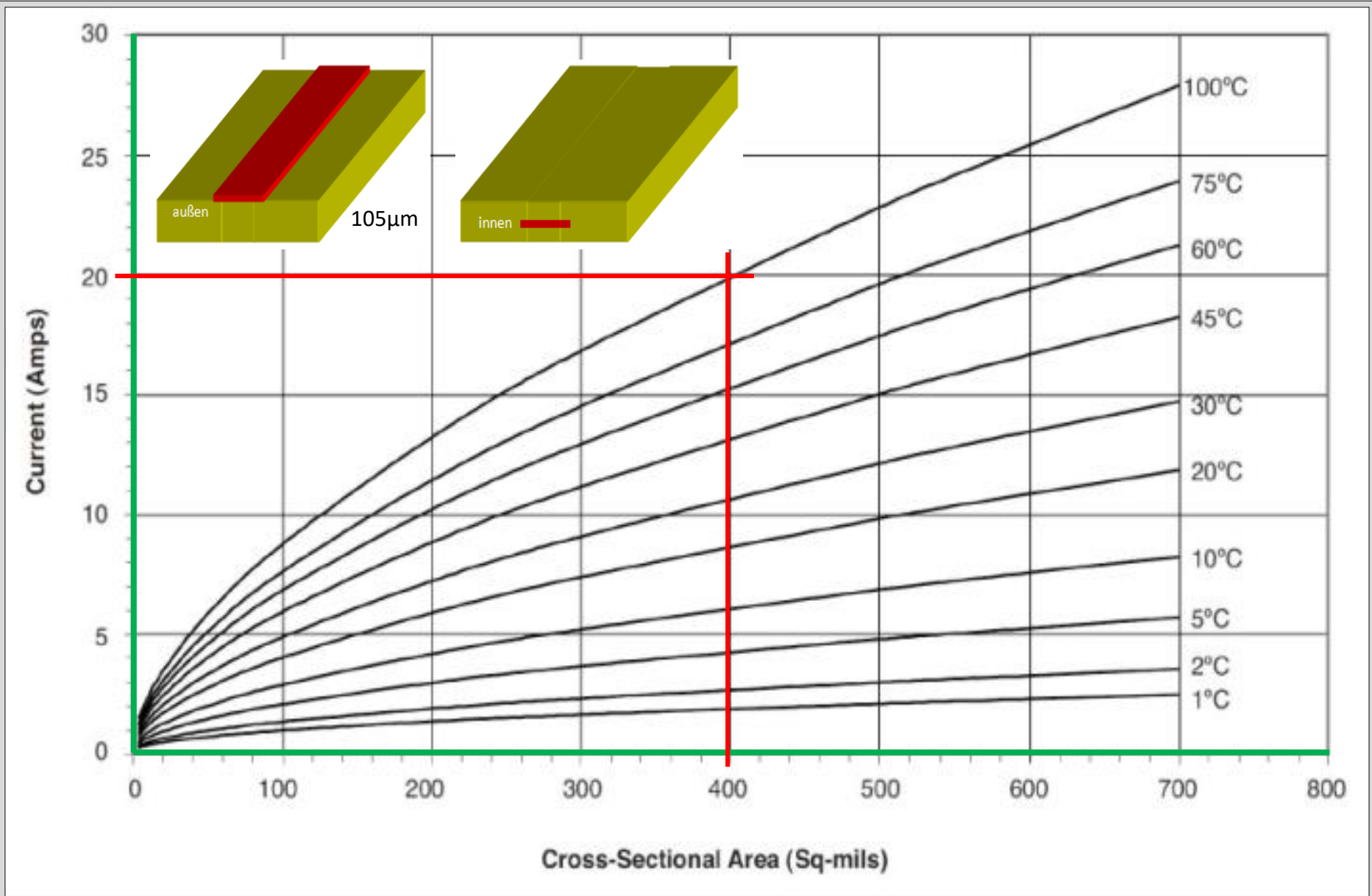
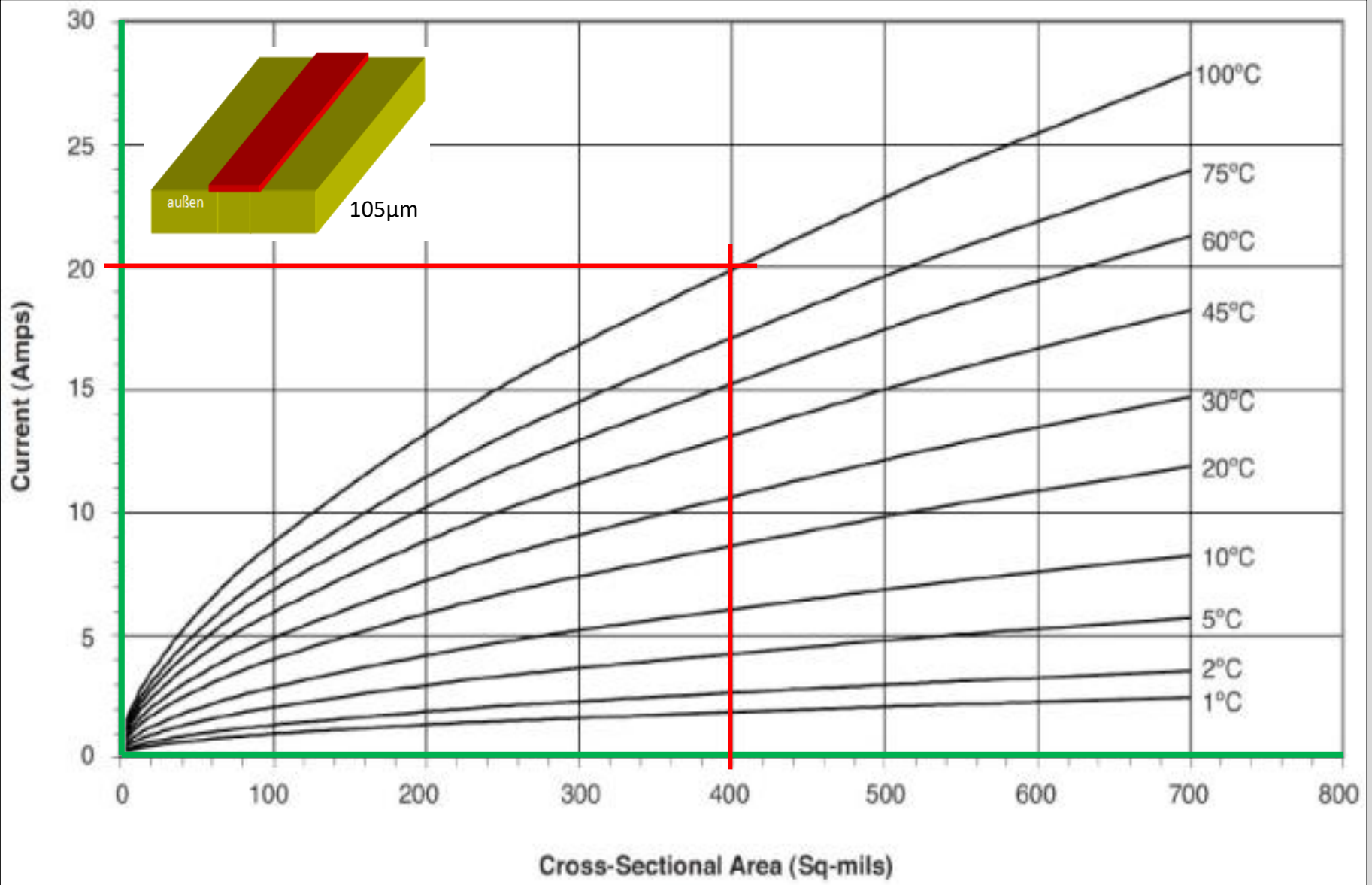


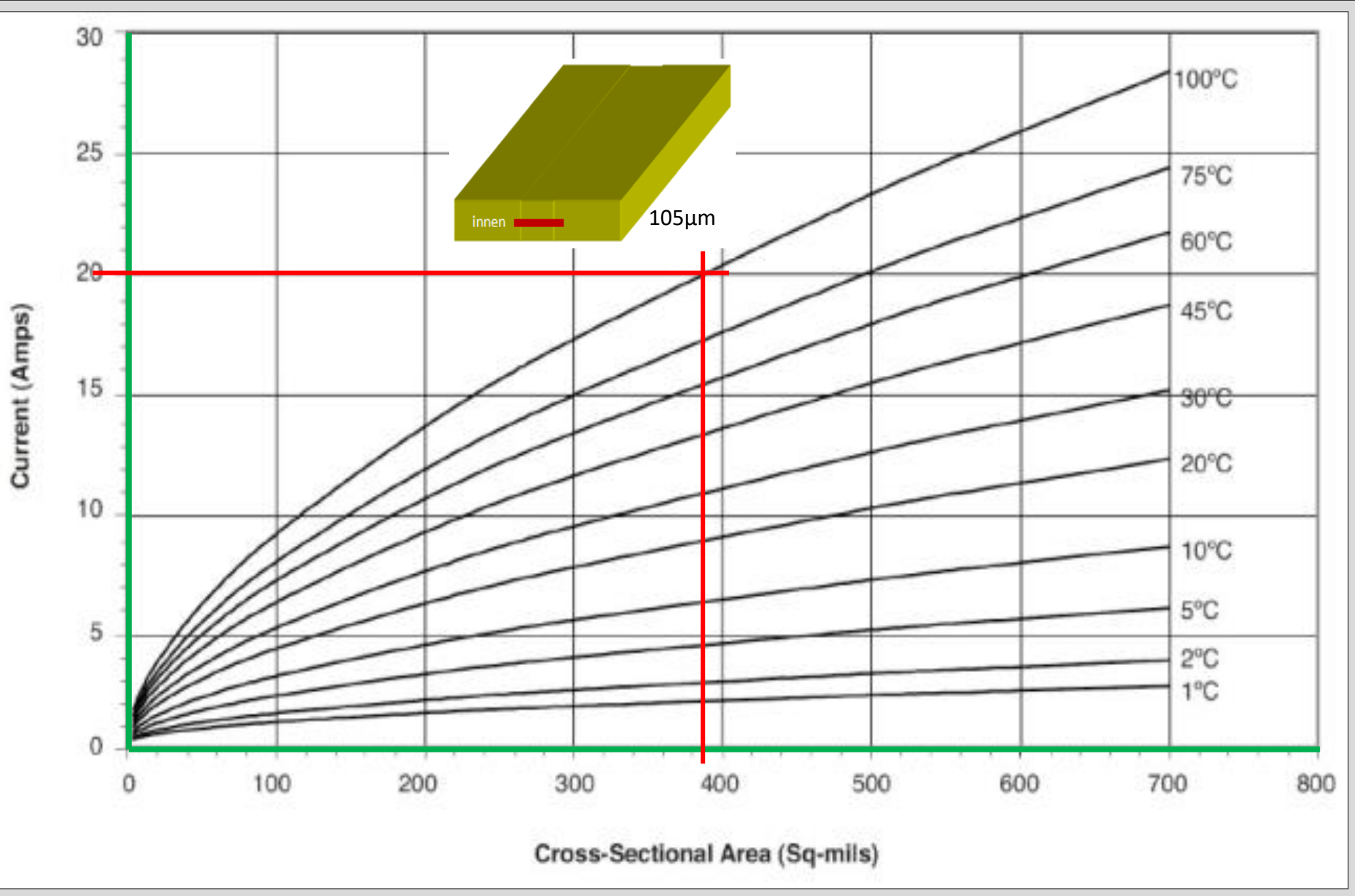
Bild A-49 Leiter mit 2 oz. auf Außenlagen (ruhende Luft) (0 - 0,1 mm²)



Bild A-53 Leiter mit 2 oz. auf Innenlagen (ruhende Luft) (0 - 0,1 mm²)

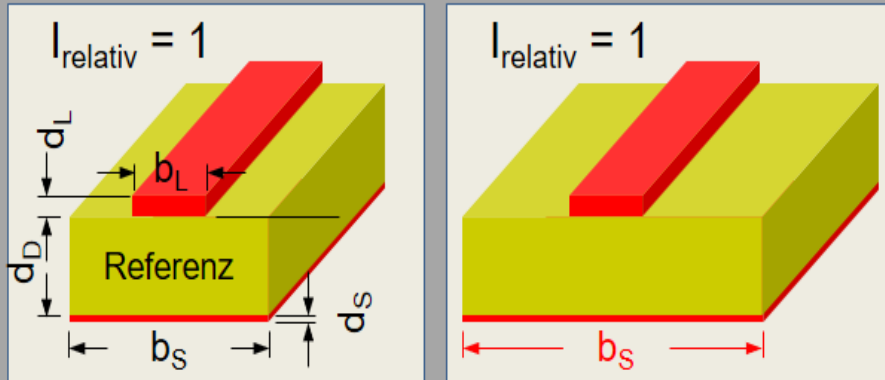






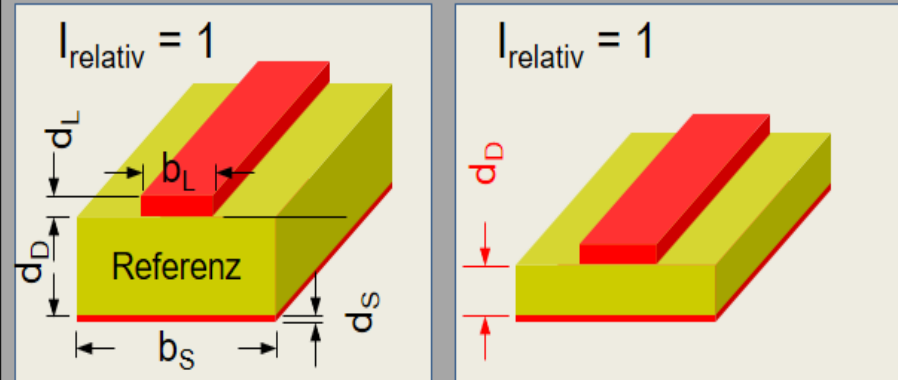
Dem Strom tragenden Leiter Gegenüber liegende Wärmespreizung → Eine Tendenz

b_S wird größer



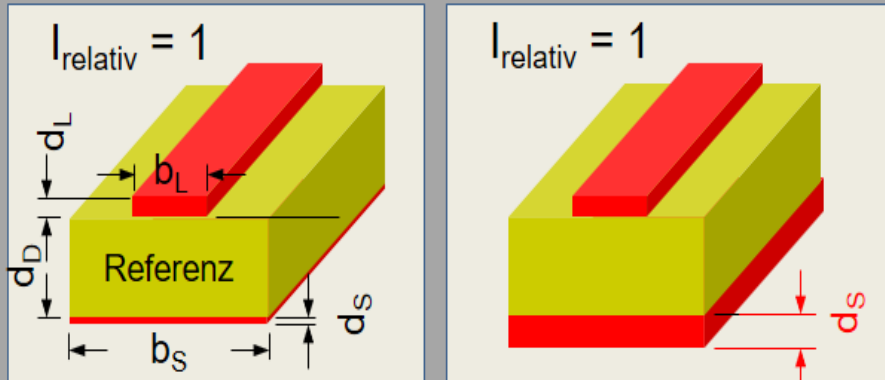
I wird größer

d_D wird kleiner



I wird größer

d_S wird größer



I wird größer

Tendenzielle Verhältnisse

Wird d_D kleiner, steigt die Stromtragfähigkeit

$b_S/b_L > 10$ (Wärmespreizung!)

Wird b_S/b_L größer, steigt die Stromtragfähigkeit

Wird d_S größer, steigt die Stromtragfähigkeit

Parallele Strompfade (X/Y und Z) erhöhen das Δt

Die Länge hat keine Relevanz

Tabelle A-1 Minimale Dicke der Kupferfolien bei Innenlagen (Nur zur Information)

Gewicht	Absolut minimale Kupferstärke (IPC-4562 minus 10%) (µm) [µin]	Maximale, variable Prozesstoleranzreduktion ¹ (µm) [µin]	Minimale Endstärke nach der Bearbeitung (µm) [µin]
½ oz. [5,10]	4,60 [181]	1,50 [59]	3,1 [122]
¼ oz. [8,50]	7,70 [303]	1,50 [59]	6,2 [244]
⅜ oz. [12,00]	10,80 [425]	1,50 [59]	9,3 [366]
½ oz. [17,10]	15,40 [606]	4,00 [157]	11,4 [449]
1 oz. [34,30]	30,90 [1217]	6,00 [236]	24,9 [980]
2 oz. [68,60]	61,70 [2429]	6,00 [236]	55,7 [2193]
3 oz. [102,90]	92,60 [3646]	6,00 [236]	86,6 [3409]
4 oz. [137,20]	123,50 [4862]	6,00 [236]	117,5 [4626]
Über 4 oz. [137,20]	Wert gemäß IPC-4562, abzüglich 10%	6,00 [236]	6 µm [236 µin] unter der um 10% verminderten minimalen Foliendicke gemäß IPC-4562

Die realen Kupferschichtdicken können bei Ausnutzung der unteren zulässigen Kupferdicken geringer ausfallen, als der nominale Wert.

Die Kurven berücksichtigen lediglich eine Verringerung der Kupferschichtdicke von 5%. Für die Kalkulation der Stromtragfähigkeit ist in der Regel dann auch die zulässige untere Grenze des Querschnitts zu berücksichtigen.

Tabelle A-2 Minimale Leiterdicke bei Außenlagen (Nur zur Information)

Gewicht ¹	Absolut minimale Kupferstärke (IPC-4562 minus 10%) (µm) [µin]	Plus minimale Metallisierung bei Klasse 1 und 2 (20 µm) [787 µin] ²	Plus minimale Metallisierung bei Klasse 3 (25µm) [984 µin] ²	Maximale, variable Prozesstoleranzreduktion ³ (µm) [µin]	Minimale Leiterdicke der Außenlagen nach der Bearbeitung (µm) [µin]	
					Klasse 1 und 2	Klasse 3
½ oz.	4,60 [181]	24,60 [967]	29,60 [1165]	1,50 [59]	23,1 [909]	28,1 [1106]
¼ oz.	7,70 [303]	27,70 [1091]	32,70 [1287]	1,50 [59]	26,2 [1031]	31,2 [1228]
⅜ oz.	10,80 [425]	30,80 [1213]	35,80 [1409]	1,50 [59]	29,3 [1154]	34,3 [1350]
½ oz.	15,40 [606]	35,40 [1394]	40,40 [1591]	2,00 [79]	33,4 [1315]	38,4 [1512]
1 oz.	30,90 [1217]	50,90 [2004]	55,90 [2201]	3,00 [118]	47,9 [1886]	52,9 [2083]
2 oz.	61,70 [2429]	81,70 [3217]	86,70 [3413]	3,00 [118]	78,7 [3098]	83,7 [3295]
3 oz.	92,60 [3646]	112,60 [4433]	117,60 [4630]	4,00 [157]	108,6 [4276]	113,6 [4472]
4 oz.	123,50 [4862]	143,50 [5650]	148,50 [5846]	4,00 [157]	139,5 [5492]	144,5 [5689]

In der Praxis wird der Querschnitt eines Leiters wie folgt angegeben:

- mm²
- Mil²

Die Umrechnung:

1Mil = 1/1000 Inch

1µm = 1/1000 mm

1Mil = 25,4µm
1Mil = 0,0254mm

1mm = 0,03937Inch
1mm = 39,37Mil

Gegeben: Mil²

Gesucht: mm²

$$A [\text{mm}^2] = A [\text{Mil}^2] \cdot (25,4 \text{E-}3)^2 [\text{mm}^2/\text{Mil}^2]$$

Gegeben : mm²

Gesucht : Mil²

$$A [\text{Mil}^2] = A [\text{mm}^2] / (25,4 \text{E-}3)^2 [\text{Mil}^2/\text{mm}^2]$$

Gegeben: 100Mil²

Gesucht: mm²

A = 0,0645mm²

Gegeben: 0,0645mm²

Gesucht: Mil²

A = 100Mil²

Ein einfaches Tool zur Abschätzung der Stromtragfähigkeit unter Berücksichtigung von Leiterplattenstärken und Leiterbahnhöhen kann unter info@andus.de angefordert werden. Dieses Tool berechnet aus der Wärmeleitfähigkeit des Materials die Wärmeableitung von der Leiterbahn und daraus deren Entwärmung, ohne auf Näherungsformeln zurückzugreifen.

Microsoft Excel - StrombelastbarkeitGenericAdmin.xls

File Edit View Insert Format Extras Data Window Help Acrobat

ANDUS
ELECTRONIC

Abschätzung der Stromtragfähigkeit von Leitern auf Leiterplatten

Eingaben

Leiterbreite	1	mm
Leiterhöhe	35	µm
Abstand Kontur* links L	60	mm
Abstand Kontur* rechts R	70	mm
Dicke der LP	1,6	mm
Umgebungstemperatur **	60	°C
Strom	3,7	A

Emissionskoeffizient* 0,95 -
Luftbewegung ** 1 1/2/3

* 0,95: Kunststoffoberfläche ** 1: keine Luftbewegung
0,05: blanke Metalloberfläche 2: leichter Luftzug
3: mit Lüfter



Ausgabe

Temperaturerhöhung	32,5	°C
Leitertemperatur	92,5	°C

Leitertemperatur ist i.O.

* Abstand zur Kontur oder halber Abstand zum nächsten gleich bestromten Leiter
** zzgl. Erwärmung durch Leistungsbauteile

Grundlage dieser Kalkulation ist die numerische Simulationen von Wärmeströmen, welche von einem Leiter ausgehen. Die Wärmeverteilung erfolgt durch Wärmeleitung im Substrat, der gleichzeitig stattfindende Wärmeübergang berücksichtigt Konvektion und Strahlung. Die Ergebnisse dienen der Abschätzung von Strombelastbarkeiten auf Leiterplatten. Angaben ohne Gewähr.

© Andus Electronic 09/05

Calculator für Hochstromleiterbahnen

Das Tool bietet Ihnen eine einfache und schnelle Möglichkeit die notwendige Leiterbreite für Hochstrom-Leiterzüge auf einer FR4 Leiterplatte zu berechnen.

Bitte geben sie folgende Werte an:

Maximale Umgebungstemperatur: °C

Maximale Leiterplattentemperatur: °C

Maximaler Dauerstrom: A





Berechnen

Eingabefeld

Beispiel
-Parameter-

Das Ergebnis liefert die empfohlene Designbreite für eine einzelne Hochstromleiterbahn einer „HSMtec“ – Leiterplatte und den Vergleich mit herkömmlicher Leiterplattentechnologie. *)

Empfohlene Leiterbahnbreite

Technologie	Wärmespreizung innerhalb der Leiterplatte			
	Keine	Geringe	Gute	Sehr gute
	 FR4 160 mm x 100 mm x 1,6 mm	 FR4 160 mm x 100 mm x 1,6 mm	 FR4 160 mm x 100 mm x 1,6 mm	 FR4 160 mm x 100 mm x 1,6 mm

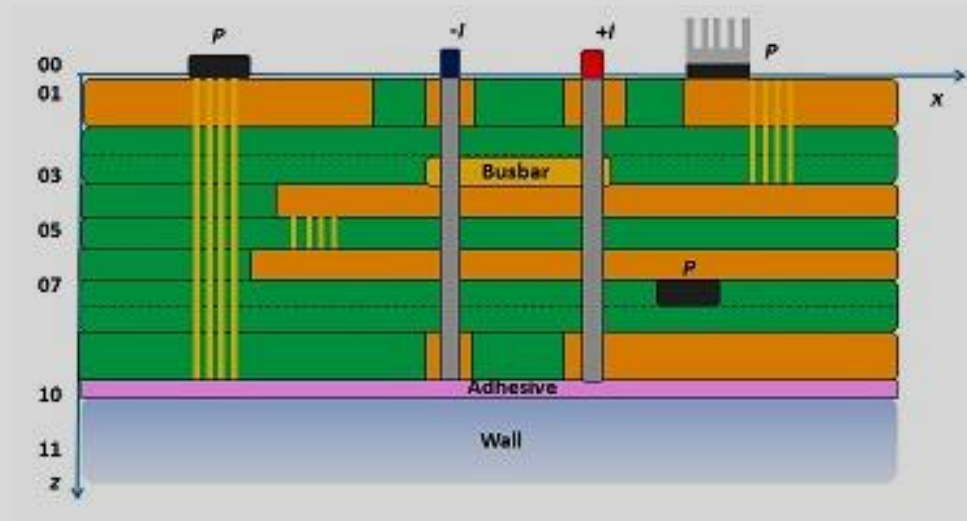
HSMtec	42.4 mm	20.2 mm	14.0 mm	14.0 mm
70µm Endkupfer	93.4 mm	55.7 mm	43.8 mm	37.3 mm
105µm Endkupfer	70.7 mm	42.1 mm	33.1 mm	28.2 mm

Ergebnis

Berechnung
-Berechnete Werte-

Für eine Berechnung der Strombelastbarkeit oder die Temperatursimulation werden gebraucht:

- Lagenaufbau



- Leiterbild der Lagen, z.B. im Gerberformat
- Bohrbild der plattierten und unplattierten Bohrungen, z.B. im Gerber- oder Excellonformat
- Pins/Pads an denen Strom zu- oder abgeführt wird und die Stromstärke
- Bauteile und deren Verlustleistung
- Äußeren Bedingungen , z.B. freie Konvektion oder Lüfter, Vakuum, Wandstrahlung.

Beispiel „Saturn“-Berechnungsfenster (www.saturnpcb.com)

The screenshot shows the Saturn PCB Design software interface. The main window is titled "Saturn PCB Design, Inc. - PCB Toolkit V7.02 - www.saturnpcb.com". The menu bar includes "File", "Program Function", "Tools", and "Help". The toolbar contains various calculation tools like "Conductor Spacing", "Conductor Impedance", "Conversion Data", etc. The "Conductor Properties" window is open, showing the following sections:

- Conductor Characteristics:**
 - Solve For:** Radio buttons for "Amperage" (selected) and "Conductor Width".
 - Plane Present?:** Radio buttons for "No" (selected) and "Yes".
 - Conductor Width:** Input field with "mm" unit.
 - Conductor Length:** Input field with "mm" unit.
 - PCB Thickness:** Input field with "mm" unit.
 - Frequency:** Input field with "MHz" unit and a "DC" checkbox.
 - Distance to Plane:** Input field with "mm" unit.
 - Parallel Conductors?:** Radio buttons for "No" and "Yes".
 - 3D Diagram:** A green rectangular conductor on a blue substrate.
 - IPC-2152 with modifiers mode** and **Etch Factor: 1:1** are indicated.
- Options:**
 - Base Copper Weight:** Radio buttons for 9um, 18um, 35um, 53um, 70um (selected), 88um, 106um, 142um, 178um.
 - Units:** Radio buttons for "Imperial" and "Metric" (selected).
 - Substrate Options:** "Material Selection" dropdown, "Er" and "Tg (°C)" input fields.
 - Plating Thickness:** Radio buttons for "Bare PCB", 18um, 35um, 53um, 70um, 88um, 106um.
 - Plane Thickness:** Radio buttons for 35um and 70um.
 - Conductor Layer:** Radio buttons for "Internal Layer" and "External Layer" (selected).
 - Temp Rise (°C):** Input field with a slider below it.
 - Ambient Temp (°C):** Input field with a slider below it.
 - Buttons:** "Print" and "Solve!"
- Information:**
 - Total Copper Thickness:** 105 um.
 - Conductor Temperature:** Temp in (°C) = 42.0, Temp in (°F) = 107.6.
 - Via Thermal Resistance:** N/A.
 - Via Count:** 10.
 - Via Voltage Drop:** N/A.

At the bottom, there is a logo for "SATURN PCB DESIGN, INC. Turnkey Electronic Engineering Solutions" and social media icons for Facebook, Twitter, LinkedIn, Google+, and YouTube.

Die Software bestimmt die an den Vorgaben orientierte Vorgehensweise beim Ausfüllen der Felder.

Beispiele vorhandener Ressourcen Stromtragfähigkeit auf Leiterplatten

IPC 2152	Bezugsquelle: www.fed.de	Designrichtlinie für die Bestimmung der Stromtragfähigkeit von Leiterplatten
ADAM Research/Thermal Risk Management in Electronics	www.adam-research.de	Berechnung/Simulation/Beratung
Andus Elektronik GmbH	www.andus.de	Leiterplatten (inkl. Hochstrom - Leiterplatten)
KSG GmbH	www.ksg-pcb.com	Leiterplatten (inkl. Hochstrom - Leiterplatten)
KSG Austria GmbH	www.ksg-pcb.com	Leiterplatten (inkl. Hochstrom - Leiterplatten)
Zuken GmbH (European HQ)	Zuken GmbH (European HQ) www.zuken.com	EDA-Systeme (Option Simulation)
Mentor Graphics Corporation	Mentor Graphics (Deutschland) GmbH 80634 München, Arnulfstr.201 www.mentor.com/germany	EDA-Systeme (Option Simulation)
Saturn	www.saturnpcb.com	Kalkulation Design-Vorgaben

Ende