

## Die Berechnung der Stromtragfähigkeit auf Leiterplatten

Von Dipl.-Ing. Oberender, Häusermann, Gars am Kamp, Österreich

Die Realisierung hoher Ströme auf minimalem Platz stellt an die Berechnung der Stromtragfähigkeit von Leiterbahnen besondere Herausforderungen. Herkömmliche Berechnungsmethoden ignorieren oft wesentliche Einflussfaktoren wie zum Beispiel die Entwärmung und liefern daher sehr unbefriedigende Ergebnisse. Die mangelhaften Berechnungsmöglichkeiten führen derzeit zu einer Vielzahl von Fehlkalkulationen der Stromtragfähigkeit. Um eine genaue Voraussage der Stromtragfähigkeit von Leitungsgeometrien zu ermöglichen, müssen neue Wege der Berechnung auf Basis empirisch ermittelter Daten gefunden werden.

Der Wunsch nach realitätsnahen Berechnungsgrundlagen für die Strombelastbarkeit von Kupferstrukturen auf Leiterplatten ist so alt, wie die Leiterplatte selbst. Heutzutage, wo Ströme auf Leiterplatten in unterschiedlicher Höhe realisiert werden, sind die Kupferstrukturen aus Platzgründen bei vielen Anwendungen grenzwertig und die Anforderungen an die Berechnung bezüglich der Genauigkeit entsprechend hoch.

In der Vergangenheit gab es erste vielversprechende Ansätze, die jedoch den Nachteil hatten, dass ausschließlich über den Spannungsabfall gemessen und kalkuliert wurde. Der Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur wurde dabei kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Dies hatte zur Folge, dass in die angewendeten Kurven zu viel Sicherheit eingebaut und die stromtragenden Leiter somit überdimensioniert wurden.

### Berechnungsgrundlagen

Betrachtet man die Anwendungen, bei denen hohe Ströme realisiert werden, kann man feststellen, dass die Berechnung der Stromtragfähigkeit vielfach nicht unter Zugrundelegung der Physik vorgenommen wird. Vielmehr wird meist auf vorhandene Stromtragfähigkeitskurven zurückgegriffen, die jedoch aus folgenden Gründen nur eingeschränkt dazu geeignet sind, eine einigermaßen genaue Festlegung der Geometrien zu gewährleisten:

- Die Strombelastungskurven aus der IPC 2221A genügen bei weitem nicht den Anforderungen und führen teilweise zu Fehleinschätzungen.
- Da den Einflüssen der Entwärmung zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird, kommt der Geometrie der Aufbauten von Leiterplatten ein viel zu geringer Stellenwert zu.

Elektrotechnik (elektrischer Widerstand)		
Elektrischer Widerstand bei 20 °C	$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega]$	Elektrischer Widerstand bei $t_{\text{real}} - 20 \text{ °C}$
Elektrischer Widerstand eines Leiters bei 20 °C	$R_{20} = \frac{\rho \cdot \ell}{A} \quad [\Omega]$	Elektrischer Widerstand eines Leiters bei 20 °C
		$R_{20} = \frac{\ell}{\sigma \cdot A} \quad [\Omega]$
$\rho$ = spez. Widerstand [ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ]	$R_{20}$ = Widerstand bei 20°C [ $\Omega$ ]	U = Spannung [V]
$\sigma$ = Leitfähigkeit [ $\text{m}/\text{mm}^2 \Omega$ ]	A = Querschnitt [ $\text{mm}^2$ ]	I = Strom [A]
$\ell$ = Leiterlänge [m]	$R_t$ = Widerst. bei realer Temp. [ $\Omega$ ]	$\alpha$ = elektr. Temp.-Koeff. [ $\text{K}^{-1}$ ]
$t_{\text{real}}$ = Temperatur [°C]		

Abb. 1: Das Ohmsche Gesetz und der Einfluss der Temperatur

Neben dem Widerstand  $R$ , der Stromstärke  $I$  und der Spannung  $U$  kommt hier die vierte Dimension, nämlich der Temperatur  $t$ , ins Spiel. In *Abb. 1* sind die Zusammenhänge des ohmschen Gesetzes inklusive der Temperatur dargestellt.

## Gesamtwiderstandes eines Leiters als Reihenschaltung

Bei der Analyse einer Reihe von Geometrien auf Leiterplatten konnte festgestellt werden, dass selbst die einfachsten Regeln aus der Physik nicht beachtet wurden und werden. So wird häufig der einfache Umstand, dass bei Leiterbahnverjüngungen der Gesamtwiderstand die Summe aller Einzelwiderstände ist, ignoriert. Dies ist in *Abb. 2* dargestellt.

Die Berechnung in *Abb. 2* zeigt, dass die Querschnittsverjüngung zwischen der ursprünglich berechneten Struktur nur eine Widerstandsänderung von +9 % hervorruft.

Für die Stromtragfähigkeit eines Leiters ist der elektrische Widerstand des gesamten Strompfades verantwortlich. Dies gilt ebenso für die Wärmefälle. Auch hier ist der Gesamtwiderstand die Summe aller drei Reihenwiderstände (*Abb. 3*, rechts).

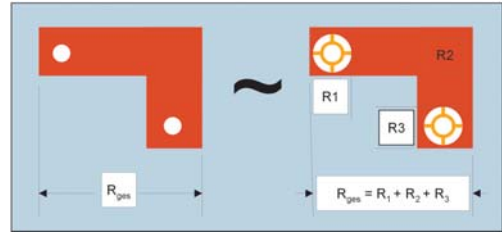


Abb. 3: Die Funktion einer Wärmefalle

## Einfluss des Lagenaufbaus

Als nächstes wird auf die Zusammenhänge zu den Aufbauten der Leiterplattensubstrate eingegangen. Wesentlich ist hier, dass die Gesamtgeometrie inklusive der Aufbauten in Richtung der Schichten einen entscheidenden Einfluss auf die Stromtragfähigkeit eines Leiters hat.

Hier müssen die Komponenten der Entwärmung eines elektrischen Leiters – Wärmeleitung, Wärmeabstrahlung und Konvektion – berücksichtigt werden. Beispielsweise hat die Leiterbahn rechts in *Abb. 4* trotz gleichen Querschnitts eine deutlich höhere Stromtragfähigkeit als die linke.

Berechnung und Simulation	mit $\rho = 0,0172 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ (Cu)		
$R_{\text{ges-1}} = \frac{\rho \cdot l_1}{A_1} [\Omega]$ $R_{\text{ges-2}} = \rho \left( \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} + \frac{l_4}{A_4} \right) [\Omega]$ $R_{\text{ges-3}} = \frac{\rho \cdot l_5}{A_5} [\Omega]$	$l = 200\text{mm}$ $A = 4\text{mm}^2$ $\rho = 0,0172$	$R_A = 0,86 \text{ m}\Omega$  100 % <b>A</b>	
	$l_2 = 99\text{mm}$ $l_3 = 2\text{mm}$ $l_4 = 99\text{mm}$ $A_2 = 4\text{mm}^2$ $A_3 = 0,4\text{mm}^2$ $A_4 = 4\text{mm}^2$ $\rho = 0,0172$	$R_1 = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$ $R_2 = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$	$R_B = 0,94 \text{ m}\Omega$  92 % <b>A</b>
	$l_5 = 200\text{mm}$ $A_5 = 0,4\text{mm}^2$ $\rho = 0,0172$	$R_3 = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{real}} - 20)] [\Omega]$	$R_C = 8,60 \text{ m}\Omega$  10 % <b>A</b>

Abb. 2: Widerstandsrechnung einer Querschnittsverjüngung

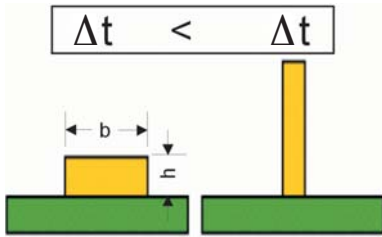


Abb. 4: Leiterbahnen gleichen Querschnitts aber unterschiedlicher Stromtragfähigkeit

Auch zusätzliche Kupferlagen beeinflussen die Stromtragfähigkeit erheblich. Die in *Abb. 5* dargestellten Aufbauten wurden von der Firma *Flomerics* analysiert und – daraus abgeleitet – die dargestellten Kurven ermittelt. Aus diesen Kurven resultierende Aufbaukonstanten gestatten, die Stromtragfähigkeit in Abhängigkeit des jeweiligen Aufbaus über eine Formel zu berechnen. Nun kann nur der „geübte“ Konstrukteur Korrelationen zu anderen Aufbauten herstellen. Wie eingangs erwähnt, hat es in der Vergangenheit genügend Ungenauigkeiten bei der Kalkulation von Stromtragfähigkeiten gegeben. Diese Fehler sollten nicht wiederholt werden.

## Entwicklung eines Berechnungstools

Die *Häusermann GmbH* hat es sich daher zum Ziel gesetzt, ein Berechnungstool für die Kalkulation von Stromtragfähigkeiten von Leiterplatten zu entwickeln, das auf empirisch ermittelten Daten beruht. Dafür wurden bei *Häusermann* unterschiedlichste Geometrien auf und in Leiterplatten entwickelt, gefertigt und geometrisch genau vermessen. Die angewendeten Geometrien stammen aus unterschiedlichsten Anwendungen aus den Bereichen Hochstrom- und Wärmeanwendungen auf der Leiterplatte, wie zum Beispiel *HSMtec* mit Runddrähten und Flachprofilen, Dickkupfer-technik aber auch herkömmlich geätzten Leiterbahnen.

Anschließend wurden diese Leiterplatten mittels einer Konstanzspannungsquelle mit entsprechenden Strömen belastet und thermographiert. Die daraus entstehenden empirischen Kurven können dann zueinander in Relation gesetzt werden und sollen in ein Berechnungssystem zur Kalkulation von Stromtragfähigkeiten einfließen.

Auf Basis der in *Abb. 5* dargestellten Strombelastungskurven und einer daraus entwickelten Formel,

Empirisch ermittelte Werte als Grundlage für die Entwicklung von Konstanten für die Geometrien

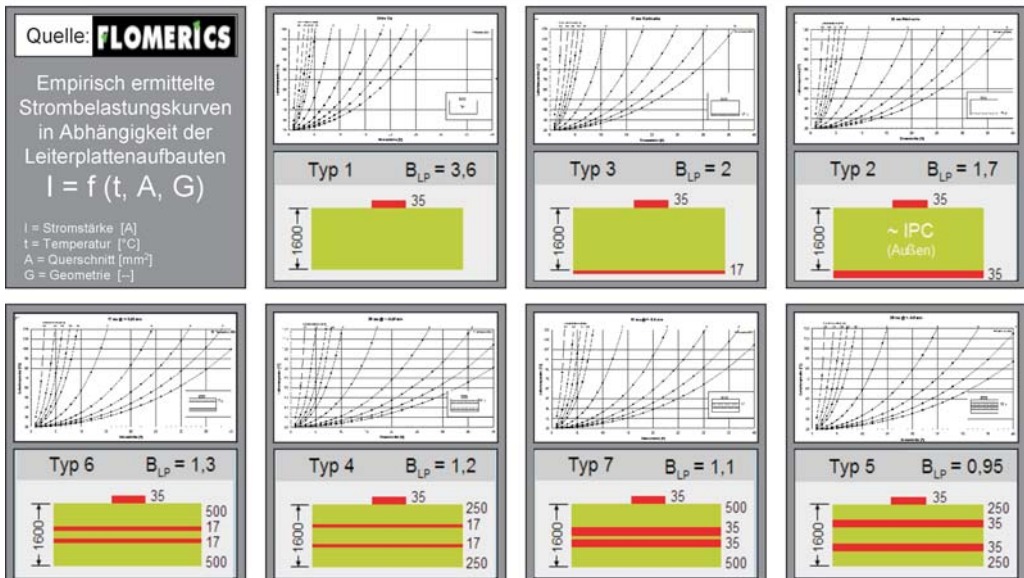


Abb. 5: Empirisch ermittelte Strombelastungskurven der Firma Flomerics

die einen Faktor für verschiedene Lagenaufbauten beinhaltet, wurden eine Reihe von Anwendungen kalkuliert und anschließend analysiert. Die Berechnungen bestätigten ausnahmslos alle Vorauskalkulationen mit einer akzeptablen Toleranz.

## Erste Ergebnisse

Abb. 6 und 7 zeigen Leiterbildstrukturen mit 43 µm Kupferschichtdicke (Außenlage) bzw. 500 µm Drähte und Profile mit 2 mm x 0,5 mm und 4,0 mm x 0,5 mm (ohne zusätzliche Kupferschichten) in tabellarischer Form.

Werden die Aufbauten *Typ 5* und *Typ 2* (Abb. 6) bei gleichen Geometrien miteinander verglichen, findet man einen Unterschied von ca. 30 % in der Strombelastbarkeit. Dass dies häufig in Konstruktionen keinen Niederschlag findet, liegt vor allem an dem mangelnden Wissen um die aufgezeigten Zusammenhänge.

Abb. 8 zeigt den Verlauf der Stromkurven eines Leiters ohne und mit auf der gegenüberliegenden Seite flankiertem Kupfer. Auch hier ist wieder ein eklatanter Unterschied in der Strombelastbarkeit bzw. in der Erwärmung der Leiterbahn festzustellen.

Strombelastung bei Außenlage Leiter 0,2 mm bis 6,0 mm breit

Aufbau	Typ 2								Typ 5									
	43 µm		LZB 0,2 mm	LZB 0,4 mm	LZB 0,6 mm	LZB 0,8 mm	LZB 1,0 mm	LZB 2,0 mm	LZB 4,0 mm	LZB 6,0 mm	LZB 0,2 mm	LZB 0,4 mm	LZB 0,6 mm	LZB 0,8 mm	LZB 1,0 mm	LZB 2,0 mm	LZB 4,0 mm	LZB 6,0 mm
Delta T [K]	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere
10	0,84	1,38	1,86	2,29	2,69	4,44	7,34	9,85	1,12	1,85	2,48	3,06	3,60	5,94	9,82	13,18		
20	1,18	1,96	2,63	3,23	3,80	6,28	10,39	13,94	1,58	2,62	3,51	4,33	5,09	8,41	13,89	18,64		
30	1,45	2,40	3,22	3,96	4,66	7,70	12,72	17,07	1,94	3,21	4,30	5,30	6,23	10,30	17,02	22,83		
40	1,67	2,77	3,71	4,57	5,38	8,89	14,69	19,71	2,24	3,70	4,97	6,12	7,19	11,89	19,65	26,37		
50	1,87	3,09	4,15	5,11	6,01	9,94	16,42	22,04	2,50	4,14	5,55	6,84	8,04	13,29	21,97	29,48		
60	2,05	3,39	4,55	5,60	6,58	10,88	17,99	24,14	2,74	4,53	6,08	7,49	8,81	14,56	24,07	32,29		
70	2,21	3,66	4,91	6,05	7,11	11,76	19,43	26,07	2,96	4,90	6,57	8,09	9,51	15,73	25,99	34,88		
80	2,37	3,91	5,25	6,47	7,60	12,57	20,77	27,87	3,17	5,23	7,02	8,65	10,17	16,81	27,79	37,29		
90	2,51	4,15	5,57	6,86	8,06	13,33	22,03	29,56	3,36	5,55	7,45	9,18	10,79	17,83	29,47	39,55		
100	2,65	4,37	5,87	7,23	8,50	14,05	23,23	31,16	3,54	5,85	7,85	9,67	11,37	18,80	31,07	41,69		
110	2,78	4,59	6,16	7,58	8,92	14,74	24,36	32,68	3,71	6,14	8,24	10,15	11,93	19,71	32,59	43,72		
120	2,90	4,79	6,43	7,92	9,31	15,39	25,44	34,14	3,88	6,41	8,60	10,60	12,46	20,59	34,03	45,67		

Abb. 6: Stromtragfähigkeiten von Leitern einer Außenlage bei unterschiedlichen Aufbauten

Strombelastung Außenlage Draht 0,5; Profil 2,0 mm x 0,5 mm und 4,0 mm x 0,5 mm

Aufbau	Typ 2			Typ 5		
	Runddraht 0,5 mm	Cu-Profil 2 x 0,5 mm	Cu-Profil 4 x 0,5 mm	Runddraht 0,5 mm	Cu-Profil 2 x 0,5 mm	Cu-Profil 4 x 0,5 mm
Delta T [K]	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere	Ampere
10	4,74	15,15	25,04	6,34	20,27	33,50
20	6,71	21,43	35,42	8,97	28,66	47,38
30	8,21	26,24	43,38	10,99	35,11	58,03
40	9,48	30,30	50,09	12,69	40,54	67,01
50	10,60	33,88	56,00	14,18	45,32	74,91
60	11,62	37,11	61,35	15,54	49,65	82,07
70	12,55	40,09	66,26	16,78	53,63	88,64
80	13,41	42,86	70,84	17,94	57,33	94,76
90	14,23	45,46	75,13	19,03	60,81	100,51
100	15,00	47,92	79,20	20,06	64,10	105,95
110	15,73	50,25	83,06	21,04	67,23	111,12
120	16,43	52,49	86,76	21,97	70,21	116,06

Abb. 7: Stromtragfähigkeiten von Drähten und Profilen in Leiterplatten bei unterschiedlichen Aufbauten

## Vergleich mit IPC-Kurven

Wenn man nun beispielsweise die *IPC*-Kurven mit den oben aufgezeigten Aufbaufaktoren und den Ergebnissen aus den gezeigten Strombelastungstabellen vergleicht, fallen eklatante Unterschiede auf, die eindeutig in der mangelnden Einbeziehung der Einflüsse unterschiedlicher Aufbauten in den *IPC*-Kurven begründet sind.

Folgendes Zitat aus der neuesten *IPC221A* spricht für sich: „Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der *Änderung A* war eine Überarbeitung der Strombelastbarkeits-Tafeln in Arbeit. In *Anhang B* ist eine Diskussion und Klarstellung zu den vorhandenen Tafeln sowie über die Bemühungen, diese zu überarbeiten, enthalten“. Diese Aussage macht deutlich, dass also immer noch mit den Strombelastungskurven aus den 50er Jahren gearbeitet wird.

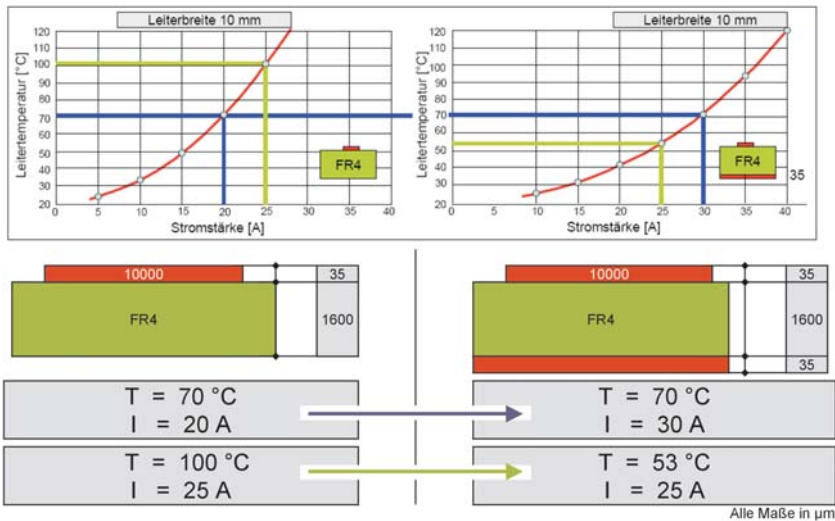


Abb. 8: Erhöhung der Stromtragfähigkeit eines Leiters durch Optimierung der Schichten

## Weiteres Vorgehen

Die aus den dargestellten Aufbauten abgeleiteten Zusammenhänge wurden in der Folge zu einer Formel verdichtet. Die Analyse weiterer Aufbauten soll in einem nächsten Schritt eine universellere Aussage zulassen und die Formel in einem Berechnungstool für die Berechnung der Stromtragfähigkeit von Leiterplatten zur Anwendung kommen.

Bei den beschriebenen Untersuchungen der Aufbauten und Geometrien handelt es sich um erste Schritte in Richtung eines empirisch fundierten Berechnungstools. Nach einer systematischen und vollständigen Analyse der Aufbauten und Geometrien werden erstmals allgemein gültige Voraussagen über die Strombelastbarkeit einer Leiterplatte möglich sein. Der Erfolg eines solchen Unterfangens wird aber auch von der besseren Vereinbarung der Interessen von Anwendern und Wissenschaft abhängen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Einflussgrößen für die Strombelastbarkeit von Leiterstrukturen sind:

- der reale Widerstand
- die reale Temperatur
- die Geometrie in lateraler Richtung
- die Geometrie in Richtung der Schichten

Die mangelhaften Berechnungsmöglichkeiten führen derzeit zu einer Vielzahl von Fehlkalkulationen der Stromtragfähigkeit was für einen großen Teil der Elektronikindustrie zu erheblichen finanziellen und funktionalen Nachteilen führt. Daher ist der Klärung der aktuellen Situation große Bedeutung beizumessen.

Derzeit sind immer noch viele verschiedene Softwaretools im Einsatz, die aufgrund von unterschiedlichen, wenn auch empirisch ermittelten, zugrundeliegenden Faktoren auch stark von einander abweichende Ergebnisse liefern.

Die Konsequenz aus den beschriebenen Defiziten in den derzeitigen Berechnungspraktiken sollte ein bereits vielfach angeregtes Konsortium aus Industrieanwendern und Vertretern der Wissenschaft sein. Unter der Federführung des *IPC* muss das Ziel einer solchen Expertengruppe die Schaffung einheitlicher und allgemeingültiger Kalkulationsgrundlagen und Simulationstools sein, um den seit mehr als 50 Jahren falsch angelegten Stromtragfähigkeitskalkulationen ein Ende zu bereiten.

## Kontaktadresse

Häusermann GmbH, Zitternberg 100, A-3571 Gars am Kamp, Österreich, [www.haeusermann.at](http://www.haeusermann.at)  
 Dipl.-Ing. Lothar Oberender, [lothar.oberender@haeusermann.co.at](mailto:lothar.oberender@haeusermann.co.at)  
 Mag. Tanja Reiningner, Tel. +43/2985/2141-260, [tanja.reiningner@haeusermann.co.at](mailto:tanja.reiningner@haeusermann.co.at)