

Grundlagen für ein universelles Berechnungstool der Stromtragfähigkeit auf Leiterplatten

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

Der hohe Miniaturisierungsgrad von Baugruppen erfordert heutzutage oft ein grenzwertiges Auslegen der Geometrien auf Leiterplatten. Die Miniaturisierung macht auch bei der Realisierung hoher Ströme nicht halt, zumal auf Leiterplatten heute Ströme im mittleren dreistelligen Bereich zu realisieren sind. Dass die bisher eingesetzten Instrumente zur Berechnung der Stromtragfähigkeit mangelhaft sind und zum Teil falsche Ergebnisse liefern, wurde bereits an anderer Stelle ausgeführt (PLUS 5/2008, S. 930). In diesem Beitrag werden die Ergebnisse eines auf empirischen Messungen basierenden Berechnungstools dargestellt. Des Weiteren wird auf die bei der Kalkulation der Stromtragfähigkeit von Kupferstrukturen zu berücksichtigenden Einflussgrößen eingegangen.

Wie in zahlreichen Publikationen aus der Vergangenheit ausgeführt, gibt es bis dato kaum brauchbare Berechnungsgrundlagen für die Kalkulation der Stromtragfähigkeit von Kupferstrukturen auf Leiterplattenebene. Aufgrund dieses Mangels an vorhandenen Tools wurden in der jüngeren Vergangenheit bei Häusermann eine Reihe von Aufbauten und Geometrien untersucht und in eine Vielzahl von Kurven aufgenommen. Aus diesen Kurven konnten in der Folge Formeln abgeleitet werden, mit welchen die mittels thermographischer Untersuchungen ermittelten Ergebnisse mit hoher Genauigkeit vorausgesagt werden konnten.

Studien bezüglich der Beeinflussung der Geometrie selbst und der in diesen Geometrien eingesetzten Materialzusammensetzungen und Aufbauten zeigen, dass mehr als 100 unterschiedliche Aufbauten notwendig sind, um den angestrebten endgültigen Formeln mit entsprechenden Aufbaufaktoren eine gewisse Universalität zu verleihen.

Die Ergebnisse zu den bisher untersuchten Aufbauten haben bestätigt, dass alle angewandten Kurven und Formeln aus der IPC 2221 A und der DIN IEC 326 mehr oder weniger falsch sind. Im Nachfolgenden sollen die grundsätzlichen Ergebnisse in einigen Kurvendiskussionen näher beleuchtet werden.

Darstellung von Ergebnissen

Leiterbahn

Dass das FR4 wegen seiner 1000mal schlechteren thermischen Leitfähigkeit gegenüber Kupfer keinen

Beitrag zur Entwärmung leisten soll, ist ein Trugschluss. Weil man auf das FR4 als Dielektrikum nicht verzichten kann, gilt es, dieses gegenüber Luft und anderen Medien in seinen geometrischen Abmessungen so effektiv wie möglich einzusetzen. Das kann heißen, FR4 so dünn wie möglich gegenüber dem entwärmenden Kupferstrukturen auszulegen. Wie in der *Abb. 1* gezeigt, wird ein zwischen zwei Kupferlagen eingefügter FR4-Kern eine bessere Entwärmung herbeiführen, als wenn diese Fläche sozusagen in Luft belassen wäre. Der Temperaturunterschied (bei gleicher Stromstärke) ΔT_3 ist kleiner als $\Delta T_{1,2}$, während die maximal zulässige Stromstärke (bei vorgegebener Temperaturerhöhung) I_3 größer als $I_{1,2}$ ist.

In den bisher angewendeten Strombelastungskurven geht das Verhältnis zwischen der Leiterbahnbreite und deren Höhe bei gleichem Querschnitt nicht in die Berechnung ein. Die empirisch ermittelten Formeln tragen diesem Verhältnis Rechnung. In *Abb. 2* sind bei einem Querschnitt von 1 mm^2 die deutlichen Abweichungen mit der Geometrie der Breite von 10 mm bis 100 mm bei einer Dicke von $100 \text{ }\mu\text{m}$ und $10 \text{ }\mu\text{m}$ bzw. der Breite von 1 mm bis 10 mm bei einer Dicke von $1000 \text{ }\mu\text{m}$ und $100 \text{ }\mu\text{m}$ mit einem deutlichen Unterschied der Stromtragfähigkeit dargestellt. Zusätzlich sieht man, dass die Stromtragfähigkeit bei einer Erhöhung des Verhältnisses der Leiterbreite b zu deren Höhe h die Stromtragfähigkeit nichtlinear ansteigt. Die Ähnlichkeit zu einer liegenden Parabel ist erkennbar.

Die Gegenüberstellung der Tabellen in *Abb. 3* zeigt, dass die Werte aus der Berechnungsformel der

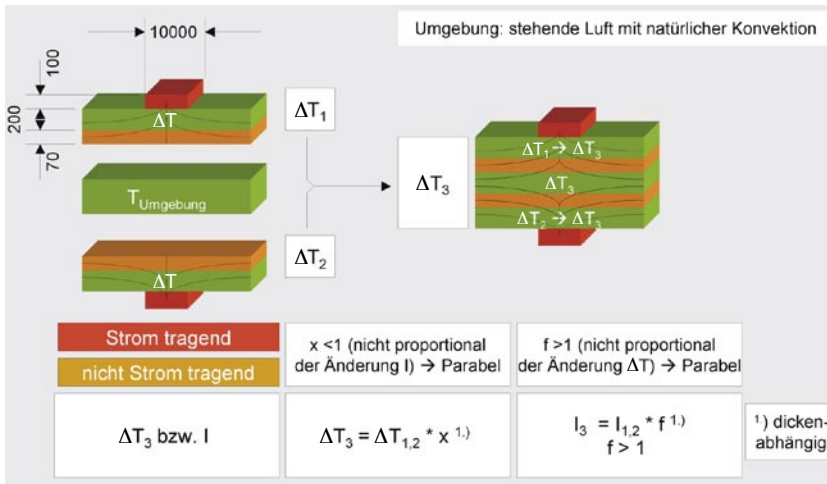


Abb. 1: Vergleich zweier Strompfade aus Kupfer auf den Außenlagen, innen gegen Luft (links) und FR4 (rechts)

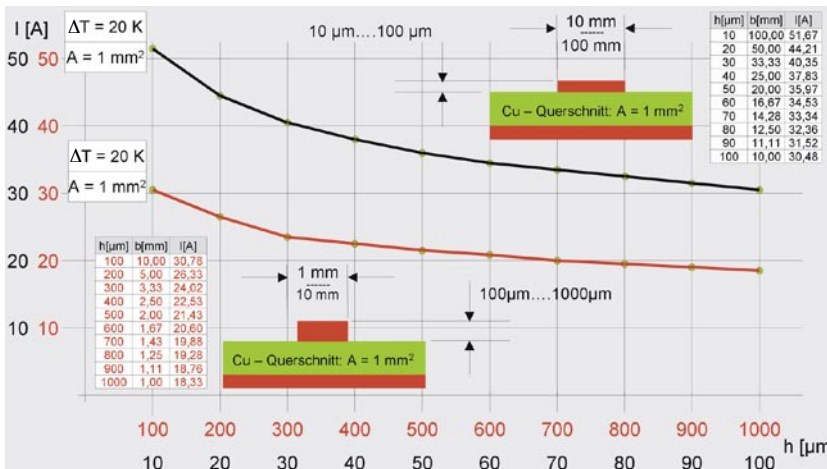


Abb. 2: Vergleich der Strombelastungskurven bei gleichem Querschnitt mit unterschiedlichem Verhältnis der Leiterbreite zu -höhe (nach Typ 2 HSMtec, vergl. PLUS 10/08, S. 932)

IPC 2221 A keine Unterschiede bezüglich des Verhältnisses der Leiterbreite zu der -höhe ($b:h$) aufweisen. Wie oben beschrieben, entsprechen diese Ergebnisse jedoch nicht der Realität.

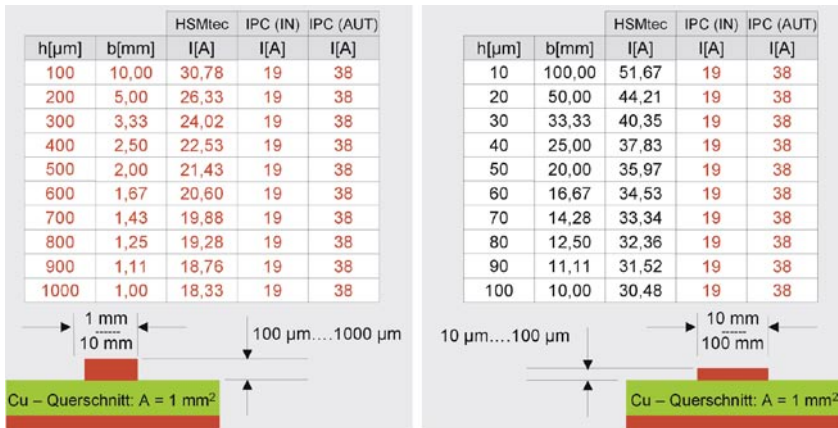
Die thermographischen Auswertungen haben die mit den empirischen Formeln berechneten Stromtragfähigkeitskurven bestätigt.

Erreicht das Verhältnis $b:h$ extreme Werte, kommt der Fehler durch die Vernachlässigung der Abhän-

gigkeit der Strombelastbarkeit von eben diesem Verhältnis besonders stark zum Tragen (Abb. 5). Natürlich verlieren die empirischen Näherungsformeln in den Randbereichen – wenn die Steigung der Parabel gegen Null oder gegen Unendlich geht – ihre Gültigkeit.

Durchkontaktierung

Neben den lateralen Strukturen bezüglich der Stromtragfähigkeit auf Leiterplatten müssen auch



Das Verhältnis zwischen der Leiterbreite und der Leiterhöhe findet bei der Berechnung nach der IPC keine Berücksichtigung: → Das ist falsch!

Abb. 3: Gegenüberstellung der mittels der empirischen Formel ermittelten Stromtragfähigkeiten mit jenen aus der IPC bei einem ΔT von 20 K

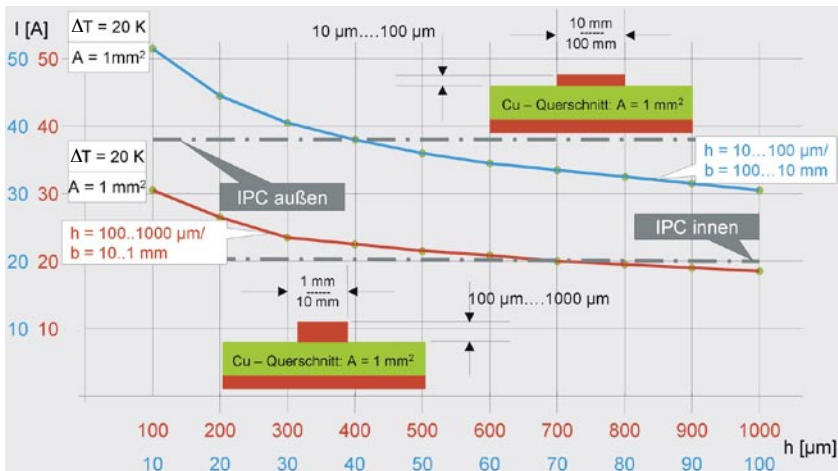


Abb. 4: Kurven zu der Tabelle aus Abb. 3

die Hülsengeometrien in die Berechnung einbezogen werden. Hier wird die Hülse häufig separat gerechnet, wobei vergessen wird, dass jede Hülse eine Zu- und Ableitung aufweist. Das heißt, die Mechanismen der Entwärmung kommen auch bei der Hülse als Gesamtgeometrie zum Tragen. Es ist hier sowohl elektrisch (R) als auch thermisch (R_{th}) mit dem Gesamtwiderstand zu rechnen.

Die Hülse ist in die Gesamtgeometrie eingebunden (Abb. 6) und gehorcht bezüglich der Stromtragfähigkeit

auch der gesamten Geometrie (Abb. 7), wie bei lateralen Strukturen auch. Im Grunde gehorcht die Hülse gleichermaßen dem Prinzip der Wärme-falle.

Das Verhältnis der Leiterhöhe h zur Leiterbreite b erzeugt im Beispiel der Abb. 8 unterschiedliche Stromtragfähigkeitskurven. Bei eingeschränkten Platzverhältnissen kann es erforderlich werden, dass der Querschnitt durch Profile – wie bei einem Aufbau entsprechend Abb. 9 dargestellt – vergrößert

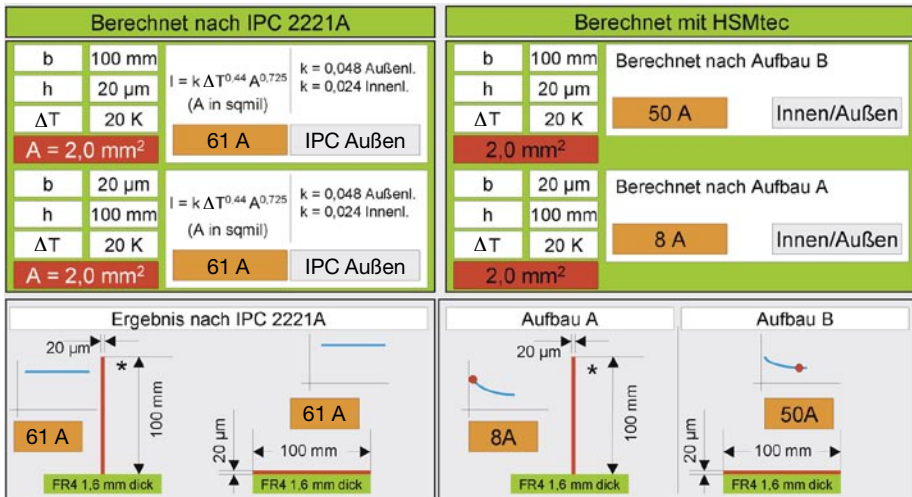


Abb. 5: Gegenüberstellung der Berechnung nach der IPC 2221 A und nach der empirischen Formel mit grenzwertigen Geometrien, die zu dicht am Scheitel bzw. der Horizontalen der Parabel liegen

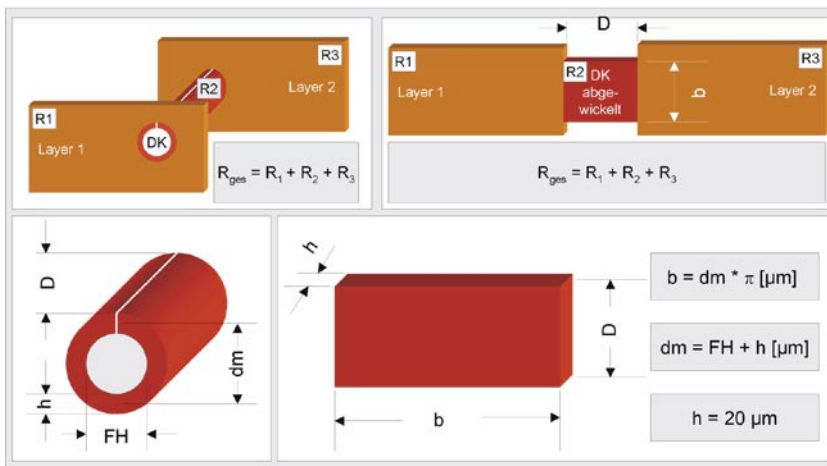


Abb. 6: Hülsengeometrie mit Zu- und Ableitung (FH = Finish Hole)

wird. Wegen der relativ hohen Dicke dieser Profile von 500 μm geht zwar ein Teil des Effektes der Wärmespreizung verloren, die laterale Platzeinsparung bei einem Profil von 4 mm x 0,5 mm gegenüber einer Kupferschichtdicke von 70 μm beträgt aber immerhin noch ca. 20 mm Einsparung in der Breite (hier ist das ungünstigere Breitenverhältnis des Profils bereits von 28 mm auf 20 mm kompensiert).

Thermographie von Leiterplattenaufbauten

Es wird immer wieder die Frage gestellt, warum nicht einfach nach den Gesetzen der Physik und der Mathematik gerechnet wird. Die Antwort liegt im Grad und der Vielfalt der Geometrien, die uns in der Praxis begegnen. Aus einer Vielfalt von Aufbauten und die den Aufbauten zugeordneten Aufbaufaktoren sind Modelle zu entwickeln, die auf möglichst

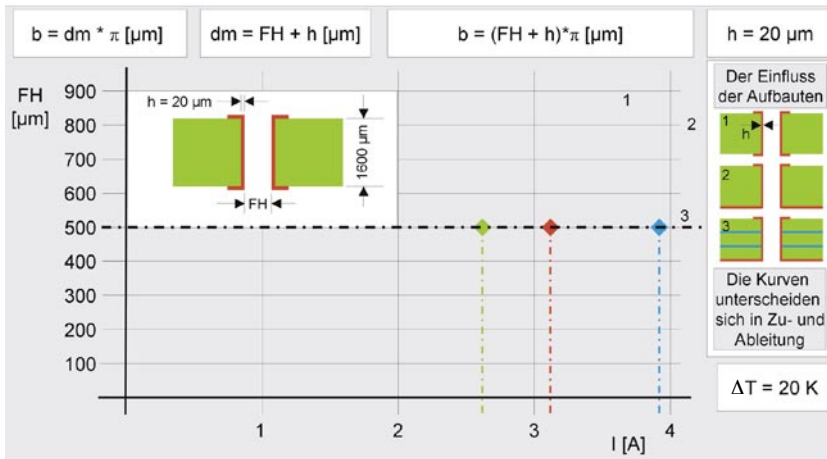


Abb. 7: Berechnung der Stromtragfähigkeit der Hülse bei unterschiedlichen Geometrien unter Berücksichtigung des gesamten Strompfads: Zuleitung, Hülse(n) und Ableitung

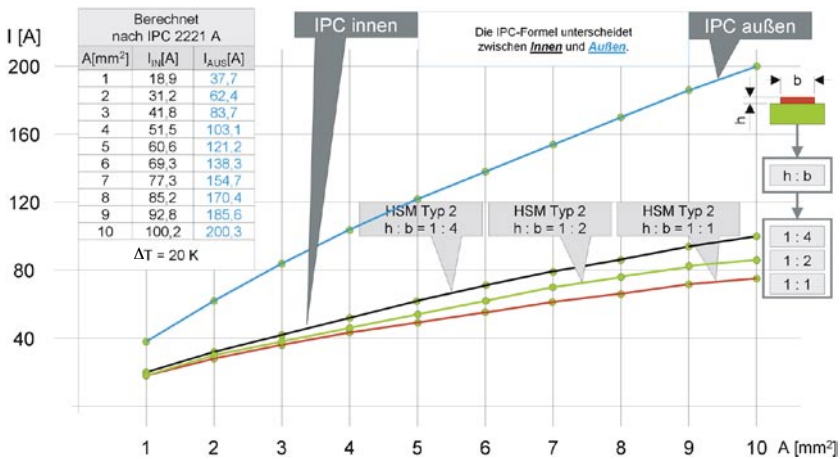


Abb. 8: Gegenüberstellung der Stromtragfähigkeitskurven bei unterschiedlichem Verhältnis der Leiterbreite b zur Leiterhöhe h

kleine Segmente reduziert werden. Das gilt übrigens nicht nur für die Ermittlung der Stromtragfähigkeit, sondern auch für das thermische Management.

Die Aufbauaktoren, die den Abb. 2 und 7 zu Grunde liegen, sind in einer Reihe von Anwendungen bei kalkulierten Strombelastungen und den zugeordneten Aufbauten thermographiert worden, mit

dem Ergebnis, dass der Gesamtfehler gegenüber der Rechnung in allen Fällen <10 % war.

In Abb. 9 sind vier Strompfade mit je einem Profil 4 mm x 0,5 mm unter 70 µm Kupferflächensegmenten verstärkt. Alle vier Strompfade sind mit 30 A belastet worden. Die maximal zulässige Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebungstemperatur beträgt 30 K.

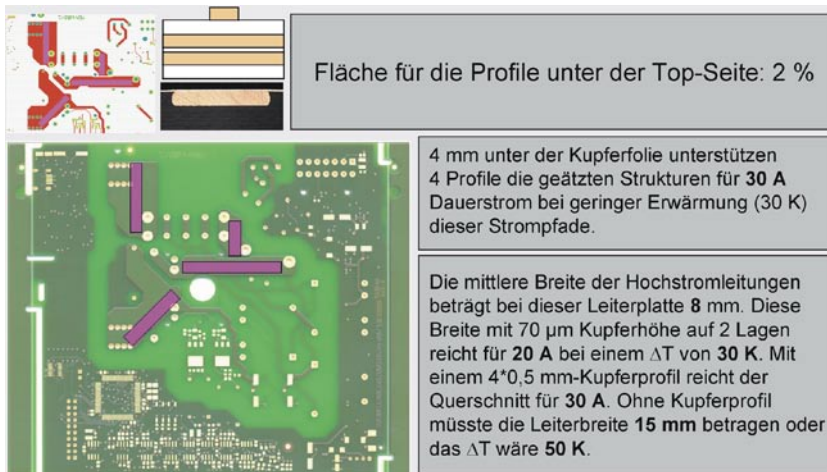


Abb. 9: Aufbau einer HSMtec-Leiterplatte mit vier unabhängigen 30 A-Strompfaden unter der Top-Lage

Die Auswertung der Thermographie zeigt die erwarteten Werte (Abb. 10). Bei der Einzelbelastung der Strompfade 1 bis 4 stellen sich in Abhängigkeit des jeweiligen Kupfervolumens der Profile und des Wärmespreizungspotentials der 70 µm-Struktur unterschiedliche ΔT -Werte ein. So besitzt beispielsweise der Strompfad 2 ein höheres Entwärmungspotenzial als der Strompfad 4. Dementsprechend fällt die Temperaturerhöhung ΔT gegenüber der Umgebungstemperatur bei gleicher Strombelas-

tung von 30 A für Strompfad 2 geringer aus als für Strompfad 4.

Werden alle vier Strompfade gleichzeitig mit je 30 A belastet, dann fällt die Temperaturerhöhung höher aus, weil sich die einzelnen Strompfade gegenseitig thermisch beeinflussen. Das Beispiel zeigt, dass eine gute Kenntnis der Kausalitäten für die richtige Interpretation der Ergebnisse der Thermographie notwendig ist.

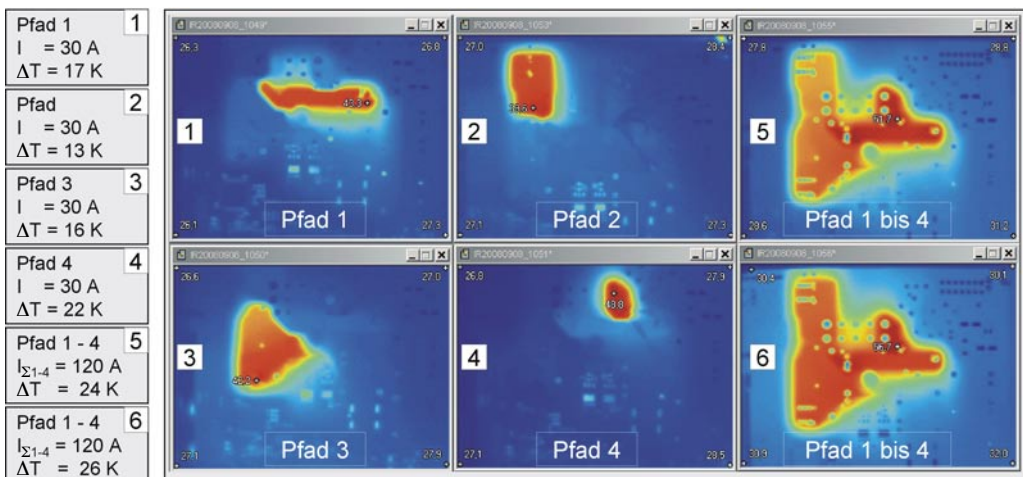


Abb. 10: Thermographie der Leiterplatte aus Abb. 9 mit jeweils 1 Strompfad mit 30 A (Teilbild 1 bis 4) und alle vier Strompfade mit 120 A (Teilbild 5 und 6) belastet

Zusammenfassung

Infolge der immer komplexeren Aufbauten spielen die Entwärmungspotenziale eine immer größere Rolle. Je komplexer die Aufbauten werden, desto eher ist man auf empirische Untersuchungsmethoden angewiesen. Eine wichtige Säule dieser Empirie sind die thermographischen Untersuchungsmethoden.

Die neuesten Erkenntnisse und deren Publikation haben dazu geführt, dass sich die Anzahl der Entwickler und Konstrukteure, die sich falscher Stromtragfähigkeitstabellen- und Kurven bedienen, verringert. Einer der Gründe, warum falsche Auslegungen bisher wenig oder gar nicht aufgefallen sind, liegt darin, dass häufig unbewusst überdimensioniert wurde. Baugruppen weisen bei Unterdimensionierungen im Feld zwar Materialschädigungen auf, welche aber gerade noch nicht zu Ausfällen führen. Dennoch werden diese Baugruppen an der Grenze möglicher Ausfälle betrieben.

Betrachtet man den Miniaturisierungsgrad heutiger Baugruppen, so stellt man fest, dass alle Geometrien grenzwertig ausgelegt werden und werden müssen. Die Miniaturisierung macht auch bei hohen Strömen nicht halt, zumal heute auf Leiterplattenebene Ströme bis zum mittleren dreistelligen Ampere-

Bereich zu realisieren sind. Dementsprechend wichtig ist eine exakte und realitätsnahe Berechnung der Stromtragfähigkeit.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass folgende Einflussgrößen bei der Berechnung der Stromtragfähigkeit von Kupferstrukturen zu berücksichtigen sind:

- Die Temperaturerhöhung des stromtragenden Leiters gegenüber der Umgebungstemperatur
- Der dreidimensionale Aufbau um den stromtragenden Leiter
- Die Geometrie der stromtragenden Kupferstruktur selbst

Die Wege zur Erlangung optimaler neuer Berechnungsformeln und Berechnungstools sind aufgezeigt und die ersten Schritte in diese Richtung getan. Der nächste Schritt wird sein, die Berechnungen und deren Ergebnisse auf eine breitere Basis zu stellen, um somit einen universellen Einsatz dieser Formeln und Tools zu gewährleisten.

Kontaktadresse

Häusermann GmbH, Zitternberg 100, A-3571 Gars am Kamp, Österreich,
www.haeusermann.at
Dipl.-Ing. Lothar Oberender, lothar.oberender@haeusermann.co.at
Mag. Tanja Reiningger, Tel. +43/2985/2141-260, tanja.reiningger@haeusermann.co.at