

# Modelle zur Auslegung von Bändchen-Bondverbindungen

Ivanov, Artem; Faber, Christian; Kleimaier, Alexander

Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Landshut

## Kurzfassung

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Vermessung und Modellierung des Temperaturverhaltens von Bändchenbondverbindungen in der Leistungselektronik. Betrachtet werden u.a. Schmelzstrom und Parallelschaltung. Für Temperaturverteilung und Schmelzstrom werden analytische Berechnungs- bzw. Approximationsformeln angegeben und ein numerisches Simulationsmodell vorgestellt. Die so ermittelten Modelldaten werden mit Messungen verglichen.

## 1. Einführung

Das Heavy Ribbon Bonding ist eine relativ neue Verbindungstechnologie, die seit einigen Jahren zunehmend für den Aufbau von Halbleitermodulen in der Leistungselektronik eingesetzt wird. Sie besitzt einige Vorteile im Vergleich zum Dickdrahtbonden; u.a. lassen sich größere Querschnitte erzielen. Darüber hinaus wird diskutiert, diese Verbindungstechnik zur Realisierung einer niederohmigen Kontaktierung von Li-Ion-Zellen in Batteriestacks zu verwenden.

In der Literatur war bislang wenig über die elektrischen und thermischen Eigenschaften von Bändchenbonds zu finden. Für die Auslegung der Bondverbindungen sind aber Daten zu Strombelastbarkeit und Verlustleistung wichtig. Die Hersteller liefern z.T. Angaben über den Schmelzstrom von konventionellen Bonddrähten; die entsprechenden Daten für Bändchen sind jedoch nicht verfügbar.

Ziel unserer Arbeit war es, eine Basis für die praktische Dimensionierung von Bändchen-Bondverbindungen zu schaffen. Durch theoretische Betrachtungen und experimentelle Untersuchungen wurden Modelle aufgestellt, die es erlauben, Vorhersagen zu Temperatur und elektrischem Widerstand von Bändchen-Bondverbindungen beliebiger Länge für einen vorgegebenen Strom zu treffen. Außerdem können der Schmelzstrom und die Stromverteilung in mehreren parallel gesetzten Bändchen bestimmt werden.

## 2. Theoretische Betrachtung

Die Abschätzung des Schmelzstromes einer Draht-Bondverbindung kann nach Preece erfolgen [1]. Diese reicht aber nicht aus, wenn die Eigenschaften der Verbindung im Betrieb, wie Temperatur oder Widerstand, bestimmt werden müssen.

Die Prozesse in einem stromführenden Draht sind in allgemeiner Form extensiv in [2] behandelt.

Die Grundlage der Betrachtungen bildet der Leistungseintrag durch ohmsche Wärme  $\frac{dP_{el}}{dV} = \frac{j^2}{\sigma} = \frac{d\dot{Q}}{dV}$  bei einer elektrischen Stromdichte  $j$ , einer volumetrischen Wärmestromdichte  $\frac{d\dot{Q}}{dV}$  und einer elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$ . Ziel der analytischen Beschreibung ist hier nun nicht wie in [2], sämtliche Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung, Wärmeübertragung / Konvektion und Wärmestrahlung) zu erfassen – selbst bei einem Potenzreihenansatz der entstehenden nichtlinearen Differentialgleichung führt dies rasch zu schwer handhabbaren elliptischen Integralen. Aufgabe des analytischen Ansatzes ist es vielmehr, eine Verifikationsmöglichkeit für das unten dargestellte numerische Simulationsmodell bereitzustellen, sowie die numerische Berechnung durch Verwendung analytischer Teil-Lösungen geeignet zu beschleunigen.

Betrachtet man daher als Wärmetransportmechanismus für die analytische Behandlung ausschließlich die *Wärmeleitung nach Fourier*  $\frac{d\dot{Q}}{dA} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$  mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , so führt dies unmittelbar auf die Diffusionsgleichung

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{j^2(t)}{c \cdot \rho \cdot \sigma(x, t)} \quad (1)$$

mit der Diffusionskonstanten  $D = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = 97,03 \frac{m^2}{s}$  für Aluminium ( $c$ =spezifische Wärmekapazität). Für den stationären Fall  $\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = 0$  erhält man direkt eine gewöhnliche inhomogene Differentialgleichung 2. Ordnung, die durch den Ansatz

$$\frac{1}{\sigma(x, t)} = \rho_{el}(x, t) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T(x, t) - T_0) + \beta \cdot (T(x, t) - T_0)^2) \quad (2)$$

für die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands im Fall  $\beta=0$  linear wird.

Als Lösung ergibt sich analog zu [2] für einen Draht der Länge  $L$  mit  $T(0) = T(L) = T_0$  der sinusförmige Temperaturverlauf

$$T(x) = a \cdot \sin(\sqrt{k} \cdot x) + b \cdot \cos(\sqrt{k} \cdot x) + (T_0 - 1/\alpha) \quad (3)$$

Mit  $k := \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{j^2}{\sigma_0} \cdot \alpha$ ,  $a = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1 - \cos(\sqrt{k} \cdot L)}{\sin(\sqrt{k} \cdot L)}$  und  $b = \frac{1}{\alpha}$ . Die Maximaltemperatur als Funktion der Bondlänge ergibt sich damit zu

$$T_{max}(L) = T\left(\frac{L}{2}\right) = T_0 + \frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{1}{\cos(\sqrt{k} \cdot \frac{L}{2})} - 1 \right) \quad (4)$$

Setzt man diese gleich der Schmelztemperatur  $T_{melt} = 659^\circ\text{C}$  für Aluminium, so erhält man den *bondlängenabhängigen Maximal- bzw. Schmelzstrom* zu

$$I_{fuse}(L) = \sqrt{\frac{\sigma_0 \cdot \lambda}{\alpha} \cdot \frac{A}{L} \cdot 2 \cdot \text{acos}\left(\frac{1}{\alpha \cdot (T_{melt} - T_0) + 1}\right)} \quad (5)$$

Man beachte, dass dieser durch die Vernachlässigung des quadratischen Temperaturkoeffizienten  $\beta$  für kurze Bondlängen z.T. deutlich überschätzt wird – für die Praxis sollte daher eher Gleichung (7) verwendet werden (vgl. Abbildung 4).

### 3. Numerisches Simulationsmodell

Parallel zu den praktischen und analytischen Untersuchungen des Temperaturverhaltens wurde ein numerisches Simulationsmodell erstellt. Dieses ermöglicht einerseits relativ einfach die schrittweise Erweiterung des Modells um zusätzliche Systemeigenschaften, andererseits die Abbildung des Zeitverhaltens, d.h. des kompletten Aufheizvorgangs. Darüber hinaus ermöglichte die parallele Bearbeitung einen laufenden, gegenseitigen Abgleich der Modelle sowie eine Validierung der Ergebnisse.

Die Grundstruktur des Modells inklusive der grundlegenden Beziehungen ist in Abbildung 1 dargestellt: Das Bändchen wird in Längsrichtung in einzelne Volumenelemente zerlegt, für die jeweils der ohmsche Wärmeeintrag, die Wärmeströme längs des Bändchens sowie der Wärmeübergang zur Umgebung berücksichtigt werden. Die Zustandsgleichungen der Volumenelemente liefern schließlich die zeitliche und räumliche Temperaturverteilung. Da die Wärmeströme an den Schnittstellen direkt durch Temperaturdifferenzen bestimmt werden, genügt es, die Elemente allein mit ihren Temperaturen zu koppeln. Als Vorgabe für das Modell dienen lediglich die Bändchengeometrie, die Parameter für Wärmeübergänge und Stoffeigenschaften sowie als Randwerte die Temperaturen der Umgebung und der beiden Bondpads. Für die Anfangswerte genügt es, alle Elemente auf Umgebungstemperatur zu setzen. Das Modell wurde als Matlabskript realisiert. Die Zustandsgleichungen der Volumenelemente werden für jeden Zeitschritt sukzessive für  $n=2..m-1$  anhand der bestehenden Temperaturverteilung durch Integration gelöst. Mit einer Schrittweite von 0.1ms und mit  $dx = 0.2\text{mm}$  kann die Temperaturverteilung für den Beharrungszustand bereits in guter Übereinstimmung mit den Messergebnissen berechnet werden.

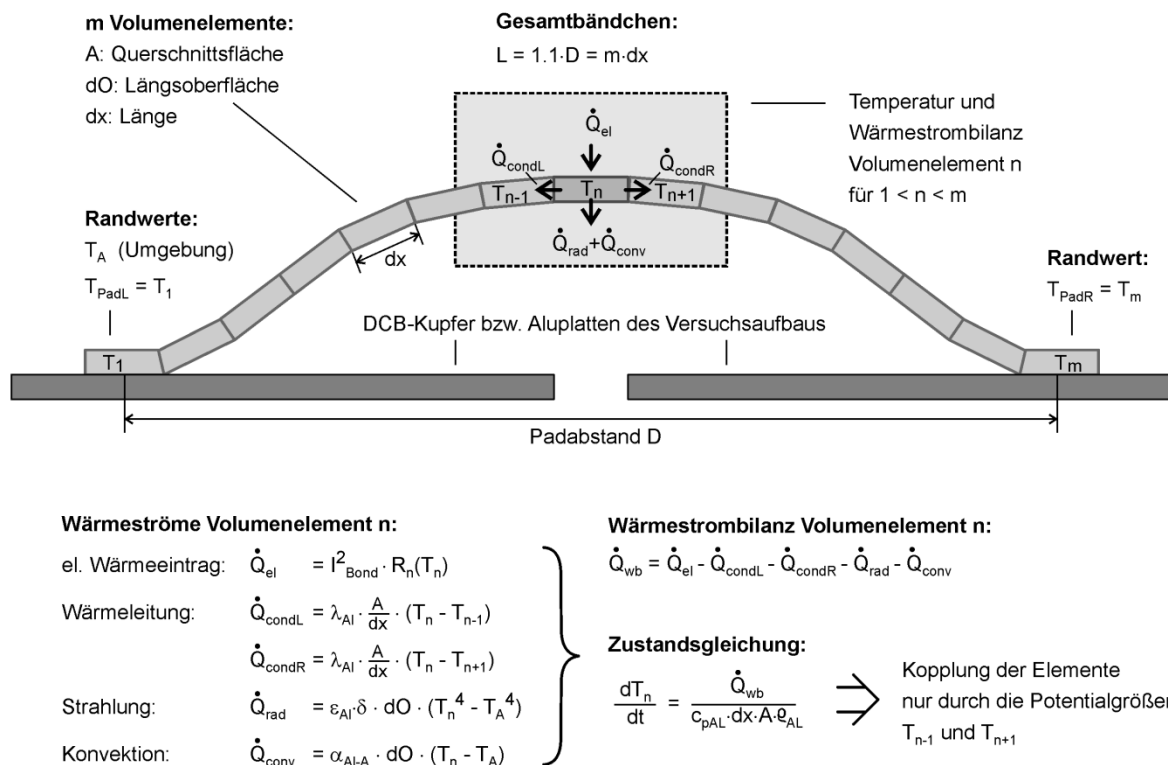


Abb. 1 Numerische Modellierung des Temperaturverhaltens: Segmentierung des Bändchens in einzelne, über die Temperatur gekoppelte Volumenelemente

## 4. Experimentelle Messungen der Parameter von Bändchen-Bondverbindungen

Im Experiment wurden die Bondverbindungen mit dem Aluminium-Bändchen des Querschnitts  $2000 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  untersucht (Hersteller: Heraeus). Variiert wurden dabei die Länge des Bändchens und der Strom durch die Verbindung. Die Bändchen wurden direkt auf stromführende Aluminiumschienen (Querschnitt  $90 \text{mm}^2$ ) gebondet, die sich bei der Messung auf Raumtemperatur befanden. Die Bondverbindung wurde nicht gekapselt bzw. vergossen. Die Variation der Bändchenlänge  $L$  erfolgte durch Einstellung des Padabstandes  $D$  am Bonder; für die Umrechnung vom  $D$  zu  $L$  hat sich die Beziehung  $L = 1,1 \cdot D$  als hinreichend genau erwiesen.

Der eingeprägte Gleichstrom wurde in 10 A Schritten auf 120 A erhöht, dabei wurden die Spannung an der Verbindung und die Temperatur der Anordnung vermessen. Um die Messung nicht zu verfälschen, wurde eine kontaktlose Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera eingesetzt. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurden die zu messenden Stellen mit einem Graphitlack beschichtet, dessen Emissionswert  $\varepsilon = 0,765$  über eine Kalibrierung ermittelt wurde. Eine Kontrolle zeigte, dass der Lack nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperatur des Bändchens hat.

## 5. Diskussion der Ergebnisse

### 5.1. Parametrisierung der Modelle

Für das analytische Modell müssen keine Parameter ermittelt werden – die Materialeigenschaften sind Tabellenwerte aus [3] und [4]. Der Querschnitt des Bändchens wurde durch Messungen bestimmt; er ist mit  $A = 0,38 \text{mm}^2$  etwas kleiner als aus den Geometriedaten des Datenblattes folgen würde.

Der Parameter, der für die beste Übereinstimmung der numerischen Simulation mit den experimentellen Daten optimiert wurde, ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha \approx 7 \text{W/m}^2\text{K}$  für die Konvektion Bändchen - Umgebungsluft, vgl. z.B. [4].

### 5.2. Temperaturverteilung im Bändchen

Ein typisches Temperaturprofil entlang des Bändchens im Beharrungszustand ist mit Abb. 2 gegeben. Es zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen den beiden Modellen sowie den Messdaten. Es ist offensichtlich, dass das Maximum der Temperatur bei gleichen Pad-Temperaturen genau in der Mitte des Bändchens erreicht wird.

Die analytische Berechnung hier erfolgte nach Abschnitt 2. Darin ist zum einem der Wärmeübergang Bändchen – Luft (Strahlung und Konvektion) nicht modelliert und zum anderem der quadratische Term der Temperaturabhängigkeit des ohmschen Widerstandes ( $\beta_{20}$ ) nicht berücksichtigt. Die beiden Vereinfachungen wirken gegensätzlich und kompensieren sich sogar gegenseitig bei Stromstärken unter ca. 80A, wie die Ergebnisse zeigen. Damit kann für solche Ströme auch die vereinfachte analytische Betrachtung mit Erfolg eingesetzt werden.

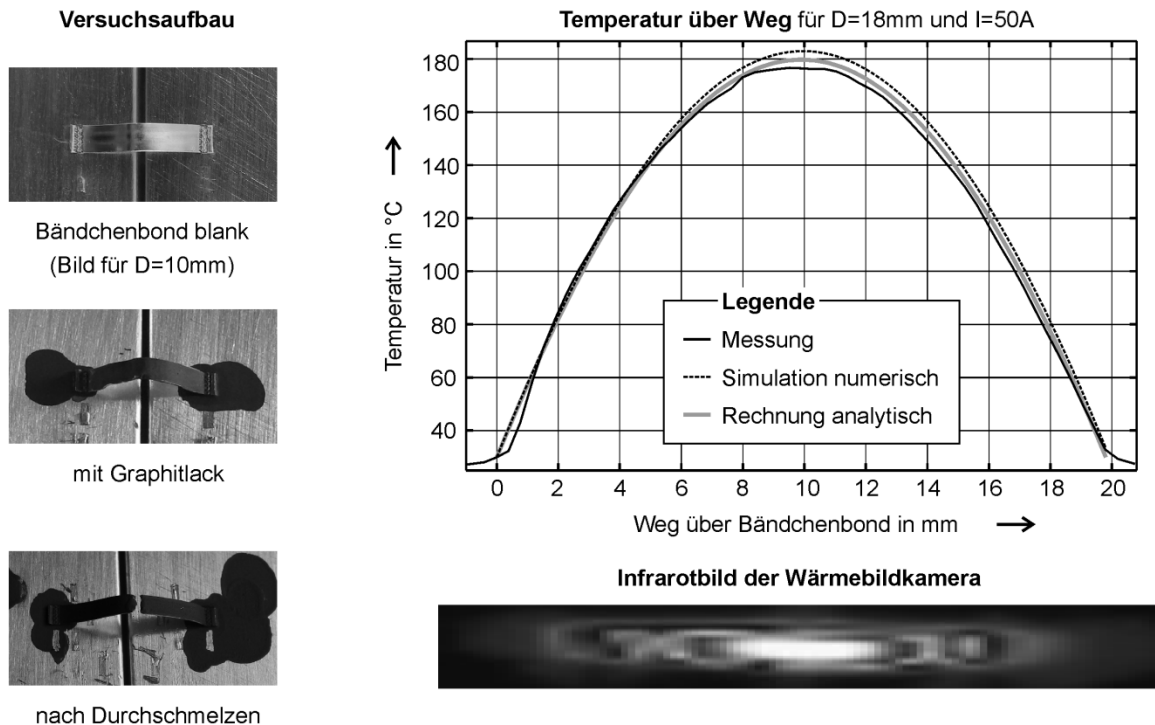


Abb. 2 Temperaturprofil entlang des Bändchens. Padabstand  $D = 18$  mm, Stromstärke  $I = 50$  A, Temperatur der Bondstellen  $T_{pad} = 25^\circ\text{C}$ .

### 5.3. Stromabhängigkeit der Scheiteltemperatur

In Abb. 3 sind die Ergebnisse der analytischen Berechnung und der numerischen Simulation zusammen mit den experimentellen Messdaten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass beide Modelle in einer guten Übereinstimmung mit den Messergebnissen für die Stromstärken unter 80 A sind. Bei höheren Strömen liefert insbesondere die analytische Berechnung eine niedrigere Temperatur als im Experiment. Das bedeutet, dass Wärmeeintrag und Wärmeübergang in den Bondverbindungen auf Basis der angenommenen Vereinfachungen noch nicht ideal beschrieben werden können.

Die gestrichelten Näherungskurven in Abb. 3 liefern eine gute Beschreibung der Messdaten bis hin zu den Schmelzströmen. Diese empirischen Kurven sind durch einfache analytische Funktionen angegeben und sind als Ergebnis eines mehrdimensionalen Fits erstellt worden. Sie können als eine gute Alternative für die praktischen Berechnungen eingesetzt werden; ihre analytische Formel ist:

$$T(I, L) = T_{pad} + \frac{a(L) \cdot I^2}{1 + b(L) \cdot I^2} \quad (6)$$

wobei  $a(L) = 9,18 \cdot 10^{-5} \cdot L^2 + 1,46 \cdot 10^{-4} \cdot L + 6,35 \cdot 10^{-5}$ ,

und  $b(L) = -2,11 \cdot 10^{-7} \cdot L^2 - 3,64 \cdot 10^{-6} \cdot L + 1,27 \cdot 10^{-5}$ ,  $L$  ist die Länge des Bändchens in mm,  $T_{pad}$  ist die Temperatur der Bondstellen in  $^\circ\text{C}$ .

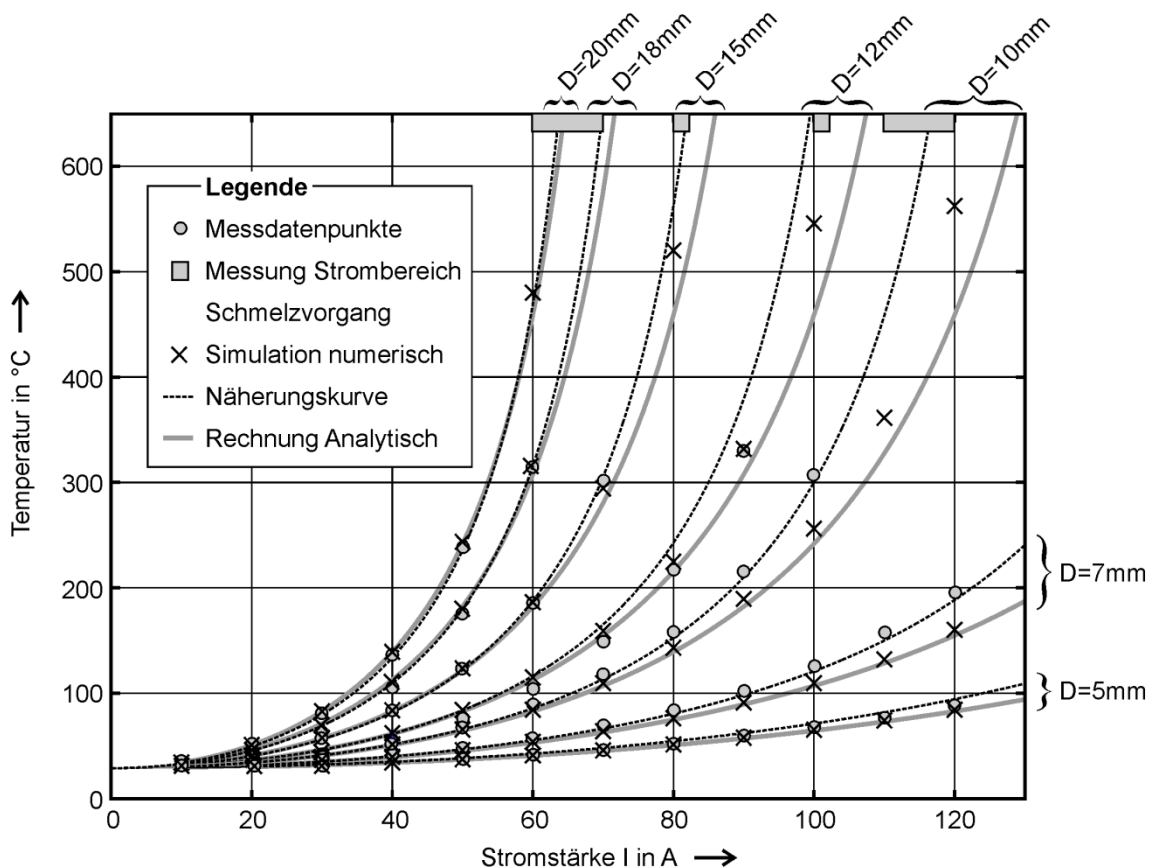


Abb. 3 Temperatur in der Mitte der Bondverbindung für unterschiedliche Padabstände  $D$  und Stromstärken  $I$ .

### 5.4. Schmelzstrom

Die Abhängigkeit des Schmelzstromes  $I_{fuse}$  von der Bändchenlänge  $L$  ist in Abb. 4 gegeben. Neben den experimentellen Messdaten ist die empirische Näherungskurve dargestellt. Die Formel dafür kann aus Gleichung (6) für  $T(I,L)=T_{melt}=659^{\circ}\text{C}$  hergeleitet werden:

$$I_{fuse} = \frac{1}{\sqrt{\frac{a(L)}{T_{melt} - T_{pad}} - b(L)}} \quad (7)$$

### 5.5. Widerstand der Bondverbindung

Der Widerstand der Bondverbindung steigt bei der Erhöhung des eingepprägten Stromes bedingt durch den Temperaturanstieg im Material. Dieser experimentell ermittelte Verlauf ist in Abb. 5 zusammen mit den Ergebnissen der numerischen Simulation gezeigt. Zu den Simulationsergebnissen sollte noch der Kontaktwiderstand addiert werden, der anhand der Auswertung der Kaltwiderstände mit ca.  $30 \mu\Omega$  pro Kontaktstelle angenommen werden kann.

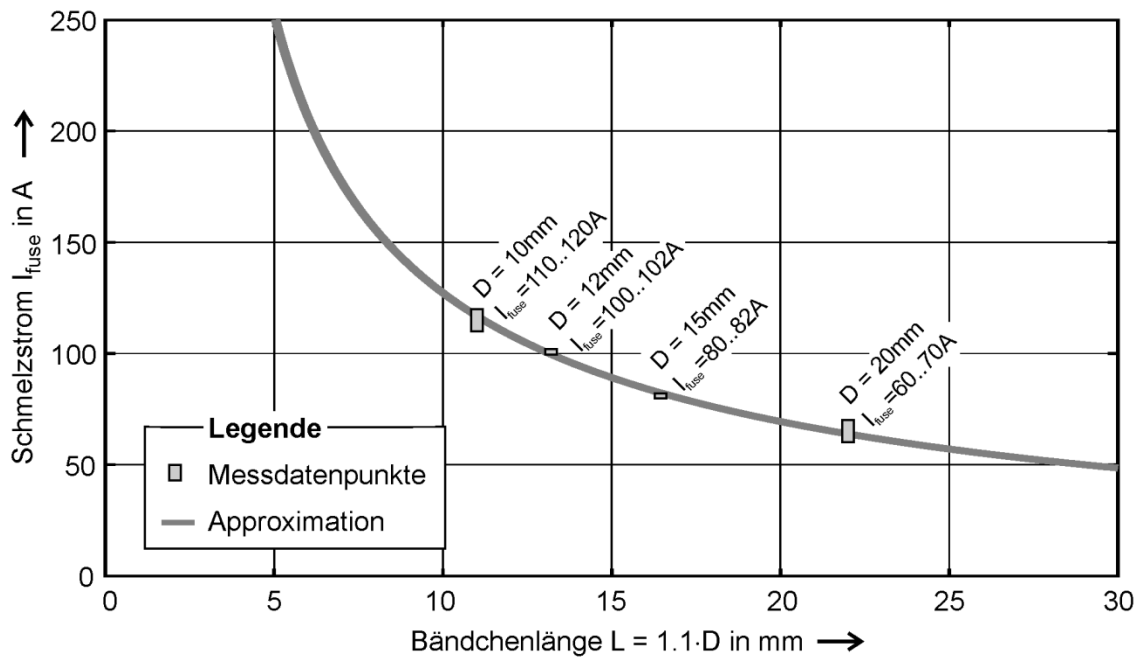


Abb. 4 Analytische Approximation des Schmelzstromes  $I_{fuse}$  in Abhängigkeit von der Bändchenlänge  $L$ .

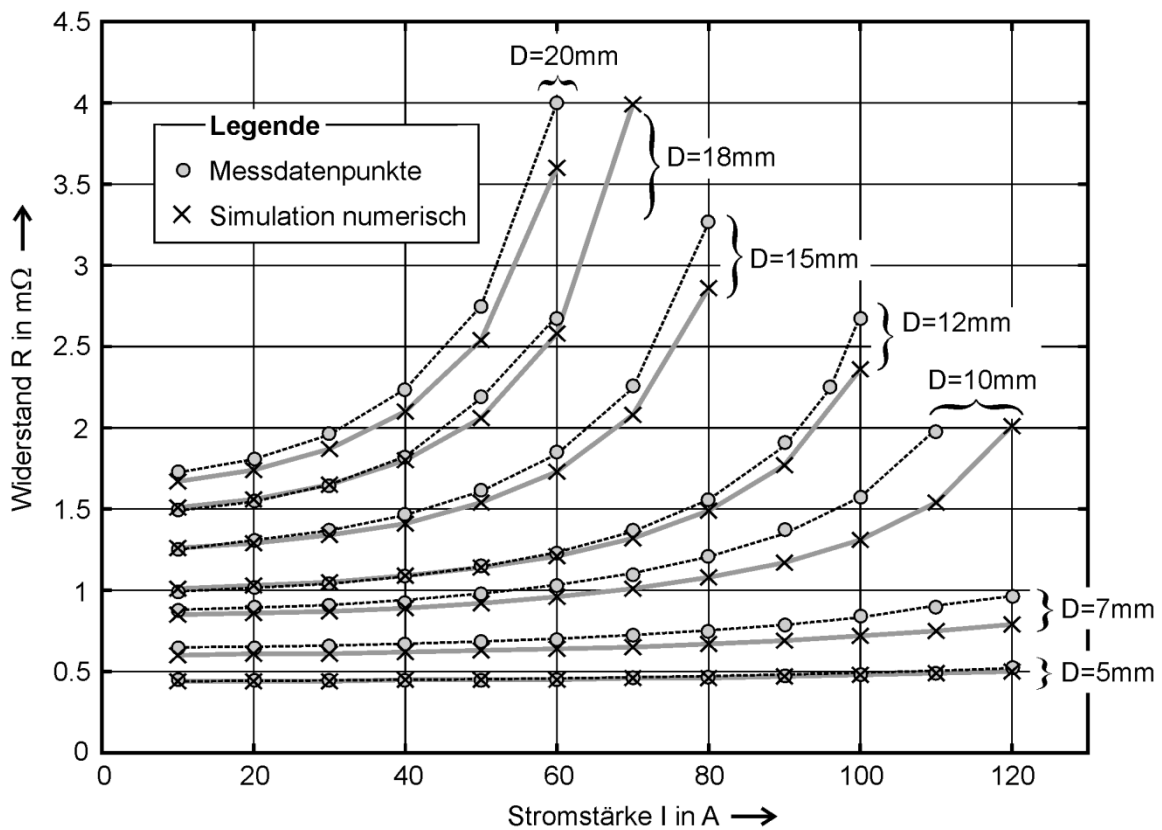


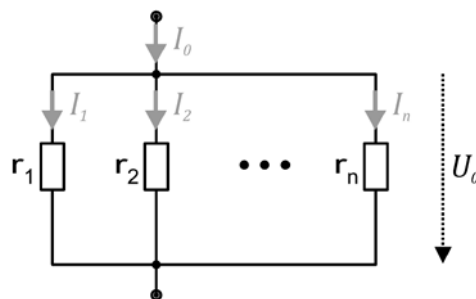
Abb. 5 Abhängigkeit des Widerstandes der Bondverbindung von der Stromstärke für verschiedenen Bändchenlängen.

## 6. Modell zu Berechnung mehrerer parallelgeschalteten Bändchen

Wie man aus dem vorigen Kapitel sieht, liegt der typische Schmelzstrom bei etwa 100 A bei einem Bändchen von 10-15mm Länge. In vielen Leistungsanwendungen ergeben sich natürlich deutlich größere Stromstärken. Auch wird man nicht nahe des Schmelzstromes, sondern deutlich darunter arbeiten. Darüber hinaus sollte sich schon aus Auslegungsgründen kein nennenswerter Wärmeintrag vom Bändchen in den kontaktierten Halbleiter ergeben, um die Junctiontemperatur nicht zusätzlich zu erhöhen.

Typischer Weise ergeben sich also schon für einen einzelnen Leistungshalbleiter die Verbindungen mit mehreren, parallel geschalteten Bändchen mit ggf. unterschiedlicher Länge. Wie teilt sich nun der Strom über die Einzelbändchen auf?

Dazu wurde ein Model für  $n$  parallele Bändchen angesetzt, siehe Skizze. Der Gesamtstrom  $I_0$  der Bondverbindung teilt sich in Teilströme  $I_1$  bis  $I_n$  auf, die durch die Einzelbändchen mit den Widerständen  $r_1$  bis  $r_n$  fließen. Die Widerstände der Bändchen hängen nicht nur von ihren Längen, sondern temperaturbedingt auch von ihrem Zweigstrom  $I_i$  (vgl. auch Abb. 5).



Für den Gesamtstrom  $I_0$  gilt:

$$I_0 = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (8)$$

Aus den experimentell ermittelten Bondspannungen  $U_{kn}$  und Scheiteltemperaturen  $T_{kn}$  für die vermessenen Stromstärken  $I_k$  und Bändchenlängen  $L_n$  können durch Interpolation oder Approximation die kontinuierlichen Funktionen  $I(U, L)$  (9) und  $T(I, L)$  (10) ermittelt werden. Nach dem Einsetzen der Funktion (9) in Gleichung (8)

$$I_0 = I(U_0, L_1) + I(U_0, L_2) + \dots + I(U_0, L_n)$$

kann die Spannung  $U_0$  an der Bondverbindung bestimmt werden. Dann liefern die Formeln (9) und (10) die Stromstärken  $I_i = I(U_0, L_i)$  sowie die Scheiteltemperaturen  $T_i = T(I_i, L_i)$  in den einzelnen Bändchen. Wie die Erfahrung zeigt, können diese Gleichungen nur numerisch gelöst werden, z.B. mit Matlab. Die anspruchsvollste Aufgabe dabei ist das Finden der Abhängigkeiten (9) und (10).

Eine Beispielrechnung für  $n = 3$  über einen Matlab/Octave Skript ist in Abb. 6 dargestellt: wie deutlich zu sehen, unterscheiden sich die Scheiteltemperaturen in den einzelnen Bändchen nicht stark, sogar bei sehr unterschiedlichen Bändchenlängen (vgl.  $L_1=9$  mm und  $L_2=18$  mm). Dieses Verhalten ist auch durch Messungen bestätigt. Es zeigt, dass die parallel geschalteten Einzelbändchen in der Bondverbindung auch bei großen Längenunterschieden annähernd gleichen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind.



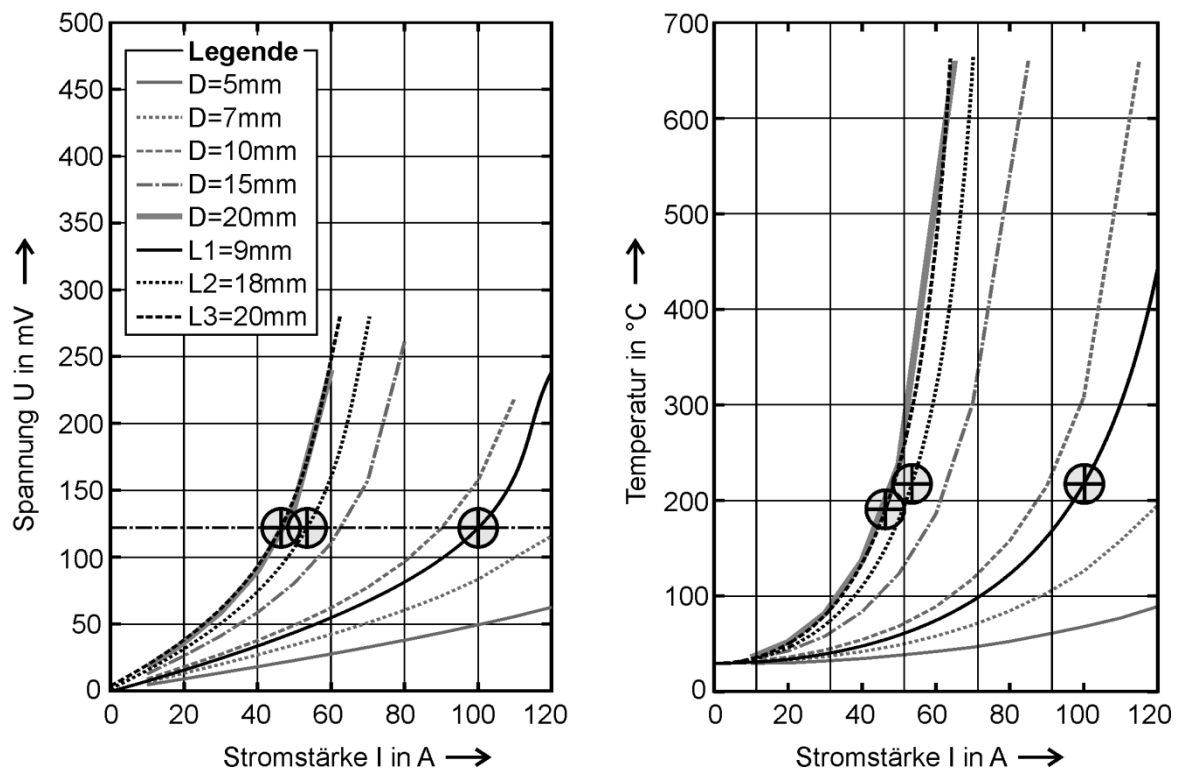


Abb. 6 Berechnung für drei parallel gesetzte Bändchen der Längen:  $L_1 = 9$  mm,  $L_2 = 18$  mm,  $L_3 = 20$  mm. Gesamtstrom:  $I_0 = 200$  A. Ergebnis: Spannung an der Bondverbindung:  $U_0 = 122,0$  mV. Stromverteilung:  $I_1 = 100,1$  A;  $I_2 = 53,5$  A;  $I_3 = 46,4$  A. Temperaturen:  $T_1 = 218,0$  C;  $T_2 = 217,8$  C;  $T_3 = 190,9$  C.

## Literatur

- [1] Preece, William Henry: On the Heating Effects of Electric Currents. Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 36, 1884
- [2] Fischer, Johannes: Die Stationäre Temperatur stromdurchflossener, mäßig langer Drähte. Archiv für Elektrotechnik, XL. Band, 3. Heft, 1951
- [3] Heraeus Materials Technology GmbH & Co. KG: Bonding Wires for Semiconductor Technology. 2011
- [4] VDI-Wärmeatlas. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977

## Kontakt

Prof. Dr. Ivanov, Artem  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Landshut  
Am Lurzenhof 1  
84036 Landshut  
E-Mail: artem.ivanov@haw-landshut.de