

ASIM-Workshop STS/GMMS 2014

Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen:

Simulation technischer Systeme

Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation

**20. bis 21. Februar 2014 in
Reutlingen-Rommelsbach**

Tagungsband

Jürgen Scheible (Hrsg.)

Ingrid Bausch-Gall (Hrsg.)

Christina Deatcu (Hrsg.)



Arbeitsgemeinschaft Simulation ASIM in der Gesellschaft für Informatik GI



Hochschule Reutlingen
Reutlingen University



Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik

Hochschule Reutlingen • Universität Stuttgart • Robert Bosch GmbH

ARGESIM Reports

Published by **ARGESIM** and **ASIM**, Arbeitsgemeinschaft Simulation,
Fachausschuss 4.5 der GI

Series Editor:

Felix Breitenecker (ARGESIM / ASIM)
Div. Simulation, Vienna University of Technology
Wiedner Hauptstrasse 8 - 10, A - 1040 Vienna
Tel: +43-1-58801-10115, Fax: +43-1-58801-10199
Email: Felix.Breitenecker@tuwien.ac.at

ARGESIM Report 42 ASIM Mitteilung AM 149

Titel: ASIM-Workshop STS/GMMS 2014
Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen:
Simulation technischer Systeme
Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation

Herausgeber: Jürgen Scheible
Ingrid Bausch-Gall
Christina Deatcu
Email: christina.deatcu@hs-wismar.de

ISBN 978-3-901608-42-1

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© by ARGESIM / ASIM, Wien, 2014 – Hochschule Reutlingen

ARGE Simulation News (ARGESIM)
c/o F. Breitenecker, Div. Simulation, Vienna Univ. of Technology
Wiedner Hauptstrasse 8-10, A-1040 Vienna, Austria
Tel.: +43-1-58801-10115, Fax: +43-1-58801-10199
Email: info@argesim.org; WWW: <http://www.argesim.org>

Druck:

WENZEL GmbH druck . kopie . media
München

Thermische Simulation von Bonddrähten in verpackten Chips unter Berücksichtigung der Draht-Package-Interaktion

Carl Christoph Jung ¹, Christian Silber ², Jürgen Scheible ¹

¹ Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik, Hochschule Reutlingen, Reutlingen, Deutschland

² Robert Bosch GmbH, Reutlingen, Deutschland

Carl_Christoph.Jung@Reutlingen-University.de

In der Mikroelektronik werden Chips häufig in Mold-Gehäusen verpackt. Die elektrischen Verbindungen vom Chip zu den Anschlussbeinchen des Gehäuses werden mit Bonddrähten realisiert. Für die Berechnung der Gleichgewichtstemperatur in einem Bonddraht bei konstantem Strom sowie von Temperaturverläufen bei transienten Strömen ist die herkömmliche FEM-Methode langsam und unhandlich. Daher wurde der Bondrechner entwickelt, der ein zylindersymmetrisches Ersatz-Modell für das Package in geeigneten mathematischen Gleichungen abbildet.

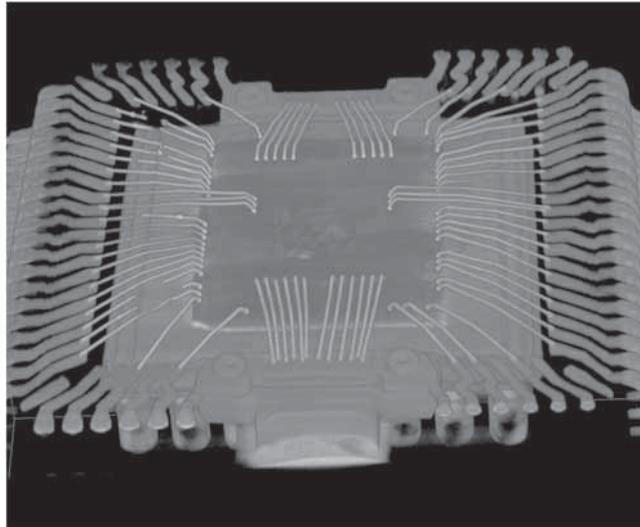
Im Gegensatz zum Bondrechner der ersten Generation [1], der auf den Gleichungen von [2] basiert, bietet ein neuer mathematischer Ansatz die Möglichkeit, eine endliche effektive Package-Größe, sowie einen endlichen Wärmeübergang zwischen Bonddraht und Mold-Masse zu berücksichtigen. Ebenso wurde die Berechnung der Interaktion von mehreren benachbarten Drähten verfeinert. Die Berechnung von beliebigen transienten Pulsformen mittlerer Länge wurde ebenfalls verbessert. Eine quadratische Komponente in der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes des Drahtmaterials kann jetzt ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse wurden erfolgreich mit FEM-Berechnungen verglichen und die Geschwindigkeit der Berechnung ist um Größenordnungen schneller als mit kommerziellen FEM-Programmen.

Problemstellung

Problem:
Durchbrennen
eines oder mehrerer
Bonddrähte bei
elektrischer
Überlastung

Gesucht:
Berechnungstool
zur Dimensionierung
der Stromtragfähigkeit



3D X-ray image, copyright Robert Bosch GmbH

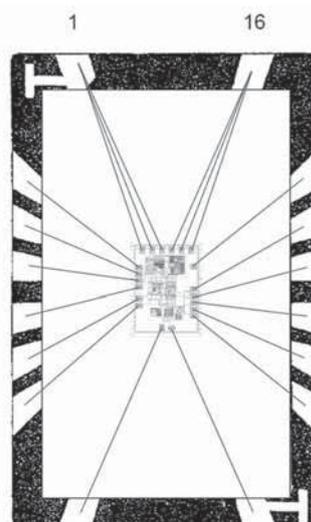


Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Eingangsgrößen

Eingangsgrößen aus
Bondplan:

- > Länge der Bonddrähte
- > Abstand der Bonddrähte
(pitch)
- > Strombelastung pro Draht
- > Grundtemperatur Chip+Lead-
frame



Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Historie des Bondrechners

Anwendung:

Dimensionisierung von Bonddrähten für verpackte Chips
(Bonddrähte sind in Moldmasse eingebettet)

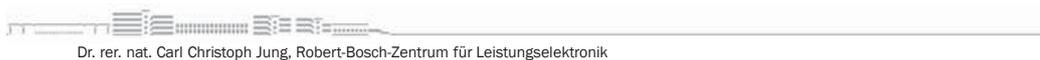
Berechnung der Gleichgewichtstemperatur in einem Bonddraht bei konstantem Strom sowie von Temperaturverläufen bei transienten Strömen: Herkömmliche FEM-Methode langsam und unhandlich.

2000 Theoretischer Ansatz Nöbauer basierend auf zylindersymmetrischem Ersatz-Modell für das Package.

2012 Bondrechner der 1. Generation [A. Gerlach et al., 2012], auf den Gleichungen von [G. T. Nöbauer und H. Moser, 2000] basiert.

2013 Bondrechner der 2. Generation mit neuem mathematischen Ansatz: endliche effektive Package-Größe, endlicher Wärmeübergang zwischen Bonddraht und Mold-Masse. Interaktion von mehreren benachbarten Drähten verfeinert. Beliebige transiente Pulsformen mittlerer Länge verbessert.

Status: Erfolgreicher Vergleich mit FEM-Berechnungen, Geschwindigkeit der Berechnung um Größenordnungen schneller als mit kommerziellen FEM-Programmen.



Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Oberfläche des Tools in Microsoft Excel®

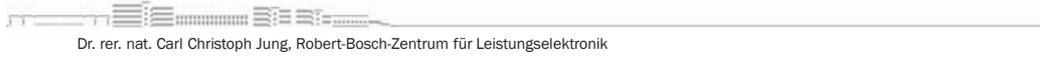
powered by:

Bond Current Calculator

input

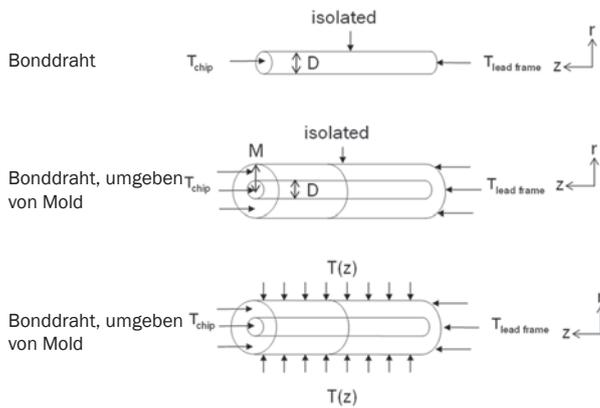
output

| Pin | name | Calculator | Row# | Wire Type | Bond Length [m] | # of wires | T_lead [°C] | T_ambient [°C] | Multiplex | Current from Pulse [A] | Pulse [ns] | duty cycle [%] | Pulse Duration [s] | Pulse Shape | Single Pulse? | Conductivity [S] | Status | Erneuerbar | Info | |
|-----|-------|------------|------|-----------|-----------------|------------|-------------|----------------|-----------|------------------------|------------|----------------|--------------------|-------------|---------------|------------------|---------|------------|----------|----------|
| 1 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 2 | Au-11 | 1.00E-01 | 2 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 3 | Au-11 | 1.00E-01 | 3 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 4 | Au-11 | 1.00E-01 | 4 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 5 | Au-11 | 1.00E-01 | 5 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 6 | Au-11 | 1.00E-01 | 6 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 7 | Au-11 | 1.00E-01 | 7 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 8 | Au-11 | 1.00E-01 | 8 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 9 | Au-11 | 1.00E-01 | 9 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 10 | Au-11 | 1.00E-01 | 10 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 11 | Au-11 | 1.00E-01 | 11 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 12 | Au-11 | 1.00E-01 | 12 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 13 | Au-11 | 1.00E-01 | 13 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 14 | Au-11 | 1.00E-01 | 14 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 15 | Au-11 | 1.00E-01 | 15 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 16 | Au-11 | 1.00E-01 | 16 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 17 | Au-11 | 1.00E-01 | 17 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 18 | Au-11 | 1.00E-01 | 18 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 19 | Au-11 | 1.00E-01 | 19 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 20 | Au-11 | 1.00E-01 | 20 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 21 | Au-11 | 1.00E-01 | 21 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 22 | Au-11 | 1.00E-01 | 22 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 23 | Au-11 | 1.00E-01 | 23 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 24 | Au-11 | 1.00E-01 | 24 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 25 | Au-11 | 1.00E-01 | 25 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 26 | Au-11 | 1.00E-01 | 26 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 27 | Au-11 | 1.00E-01 | 27 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 28 | Au-11 | 1.00E-01 | 28 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 29 | Au-11 | 1.00E-01 | 29 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |
| 30 | Au-11 | 1.00E-01 | 30 | Au-11 | 1.00E-01 | 1 | 20 | 20 | 894.9 | 1.0E-01 | 2.00E-04 | 0.00E-00 | 1.00E-02 | 1.00E-02 | 0 | 0 | 1.7E+04 | OK | 178.3144 | 178.3144 |



Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Zylindersymmetrisches Modell



Modell

Longitudinal in Kontakt mit Wärmebad

verschiedene Spezialfälle:

- ohne Mold, im Vakuum

- Mold radial in Kontakt mit Wärmebad, oder isoliert

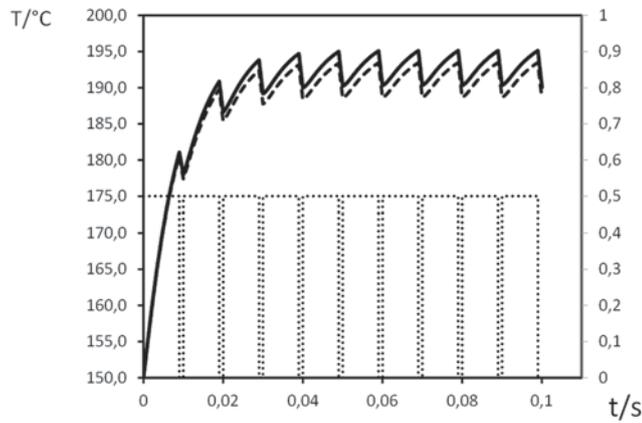
Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Berücksichtigte spezielle Effekte

- Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Drahtmaterials
- Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit des Drahtmaterials
- Thermischer Kontaktwiderstand zwischen Draht und Mold-Material
- Endliches Package mit effektiver Größe M
- Wärmeerzeugung im Draht durch unterschiedliche Stromprofile (Zeitauflösung 1 μ s)
- Mehrere Drähte und deren Interaktion über die Mold-Masse

Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Simulationsergebnis für transienten Input

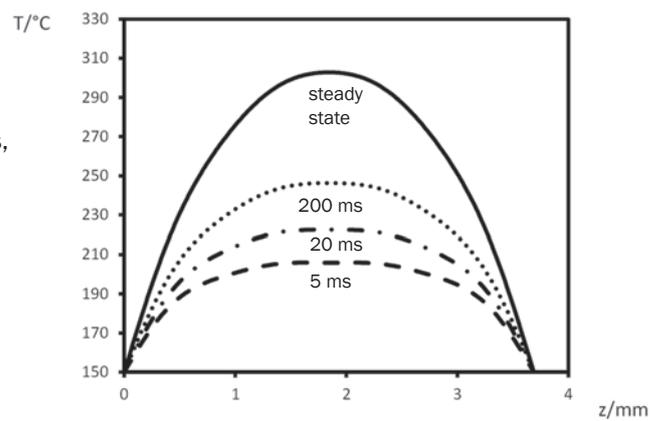


Temperatur-Transienten-
Berechnung möglich unter
Berücksichtigung von
Nichtlinearitäten

: Temperaturkoeffizient der thermischen Leitfähigkeit
Gestrichelt: 0 . Durchgezogen: nicht verschwindend. Gepunktet: Strom.

Temperaturprofil entlang des Drahtes

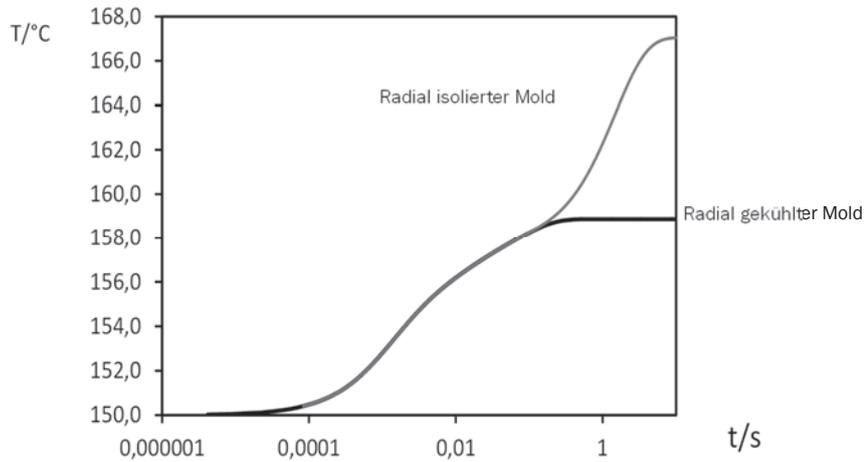
Anregung:
Stromsprung bei $t = 0 \text{ s}$,
Dann konstanter Strom



Mit einem begrenzten Mold-Durchmesser, radial isoliert

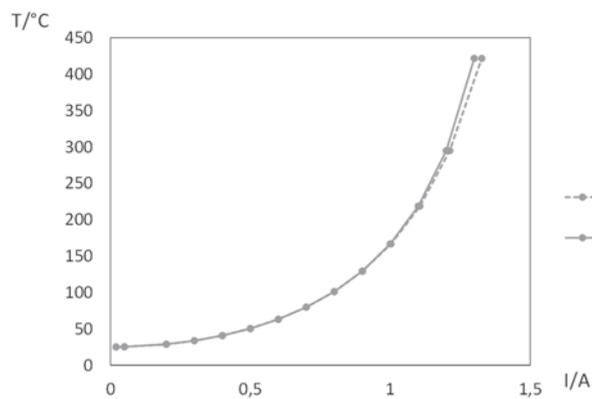
Zeitlicher Anstieg der Temperatur

Maximums-Temperatur im Draht



Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Vergleich Bondrechner 1. Generation/2. Generation



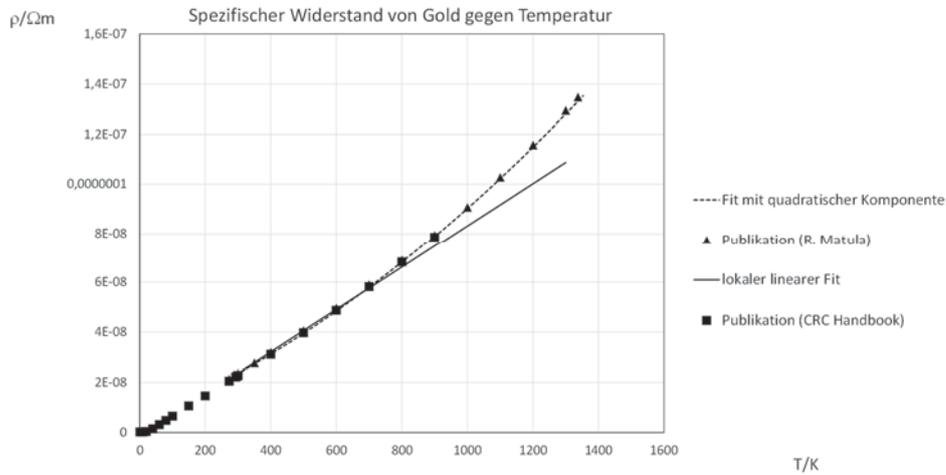
| | 1. Generation | 2. Generation |
|------------------------|---------------|---------------|
| Genauigkeit bis 300 °C | ++ | ++ |
| über 300 °C | + | ++ |
| Rechenzeit | ++ | ++ |

--○-- 1. Generation
—●— 2. Generation

Fazit: für Bond-Draht im Vakuum sehr vergleichbare Resultate. oberhalb 300 °C: 2. Generation genauer

Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Spez. Widerstand von Gold als f(T)



Ab 700 °C quadratische Komponente notwendig

Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

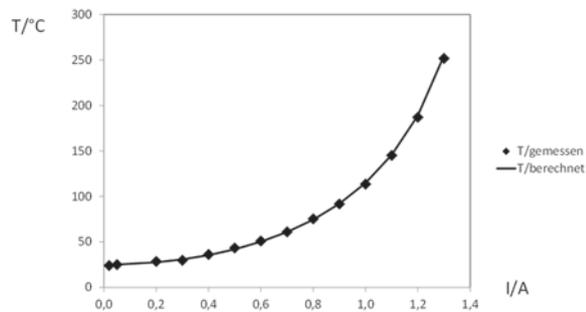
Vergleich mit Messung

Wie groß ist der Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von Gold?

Direkt gemessen (rbz, bis 175°C): 0,0038 1/K; CRC Handbook (lokaler Fit: Bosch): 0,0039 1/K; R. Matula: 0,0037 1/K

Mittlere Temperatur eines bestromten Drahts (Länge 1,54 mm, Durchmesser 25 µm) in Luft verglichen mit theoretischen Werten (therm. Leitfähigkeit Luft: Wert bei 100 °C)

Hieraus indirekt auch Temperaturkoeffizient bestimmbar:

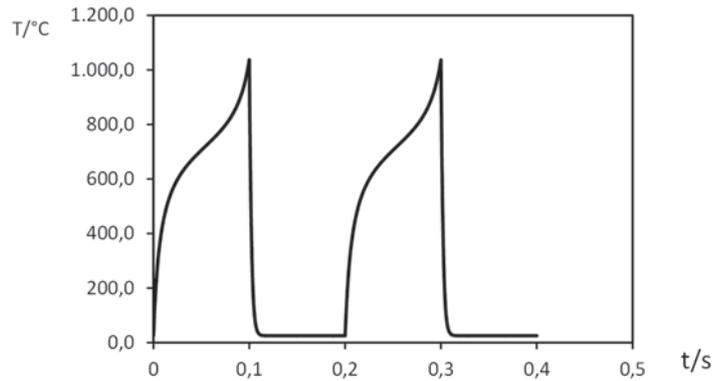


Resultat: lokal linear: 0,0039 1/K, bezogen auf 20°C

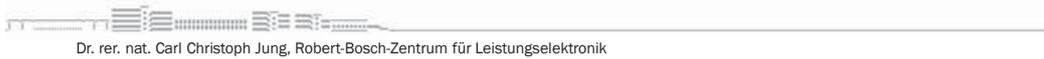
Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Selbstverstärkung der Temperatur

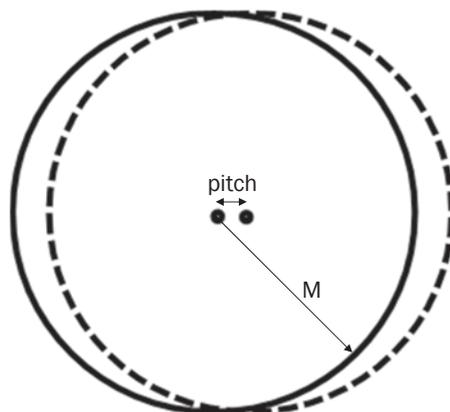
Selbstverstärkung für Bond-Draht im Vakuum bei hohen Temperaturen aufgrund der Temperaturkoeffizienten von spez. Widerstand und thermischer Leitfähigkeit bei Rechteck-Pulsen



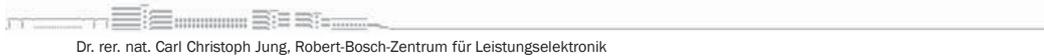
Quadratischer Ansatz bildet thermal runaway besser ab



Parallel bestromte Drähte erwärmen sich gegenseitig

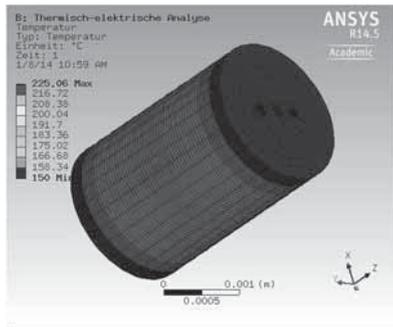


Gegenseitige Erwärmung wird angenähert durch:
Jeweils lineare Superposition der Mold-Temperaturen trotz unterschiedlicher Randbedingungen, wenn $\text{pitch} \ll M$. In den Drähten nichtlineare Superposition.



Vergleich mit FEM

| # | D/ μm | l/mm | T (Chip) / $^{\circ}\text{C}$ | M/mm | h_c | pitch/ μm | l/A | Tmax (Draht) / $^{\circ}\text{C}$ Unsere Simulation | Tmax (Draht) / $^{\circ}\text{C}$ FEM | Berechnungszeit FEM |
|---|------------------|------|-------------------------------|------|-----------------|----------------------|-----|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| 2 | 51 | 3,7 | 20 | 1,5 | ideal | 325 | 3 | 155 | 157 | 6h |
| 2 | 51 | 3,7 | 20 | 1,5 | 1×10^5 | 325 | 3 | 163 | 165 | 7,5h |
| 2 | 51 | 3,7 | 20 | 1,5 | 3×10^4 | 375 | 3 | 175 | 175 | 11h |
| 3 | 33 | 3 | 150 | 0,75 | 3×10^4 | 300 | 1 | 241 | 241 | 1,8h |
| 3 | 33 | 3 | 150 | 1 | 3×10^4 | 300 | 1 | 224 | 225 | 1,5h |
| 3 | 51 | 3,5 | 150 | 0,75 | 3×10^4 | 90 | 0,7 | 163 | 163 | 0,8h |

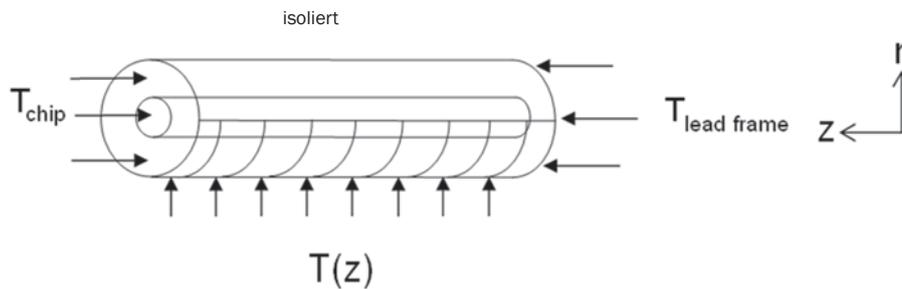


Summarische Berechnungszeit: 37 sec 29 h

Bondrechner 2. Generation ist für mehrere Drähte über drei Größenordnungen schneller als FEM

Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Ausblick: die „Dachrinne“



Ziel: Bessere Abbildung der thermischen Umgebung
unten: Leadframe, oben: Luft

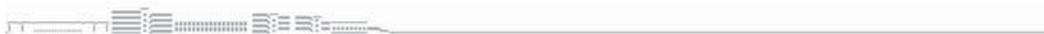
und außerdem: Einfluss des Skin-Effekts

Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Zusammenfassung

Software Tool für die schnelle und exakte Berechnung des Wärmetransfers von einem Bonddraht zu einem zylindrischen endlichen Mold-Package

- Berechnung basierend auf **numerischer Integration von Differential-Gleichungen**
- Erfassung von **nicht-idealem Wärme-Transfer** vom Draht zum Mold
- Erfassung von **beliebigen Bond und Mold-Materialien, Drahtlänge,-durchmesser**
- Erfassung von beliebigen transienten Stromprofilen -> **beliebige Pulsformen**, die industriell relevant sind, **können innerhalb von Sekunden bis Minuten berechnet werden**
- **Erfolgreiche Validierung** des Tools durch Vergleich mit finite-Elemente-Simulationen und Messungen



Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Vielen Dank

für die Aufmerksamkeit

und an

Michael Ebli (rbz) für das Bonden,
Sebastian Buck (rbz) für Messungen,
Daniel Marolt (rbz) für das Adaptieren der Excel-Oberfläche,
sowie Bernhard Wicht (rbz) und Martin Pfost (rbz) für die Benutzung ihrer Labors

Die Entwicklung des Bondrechners wurde in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH, Bereich Automotive Electronics, Reutlingen durchgeführt.



Dr. rer. nat. Carl Christoph Jung, Robert-Bosch-Zentrum für Leistungselektronik

Literaturverzeichnis

- [1] A. Gerlach, D. Marolt und J. Scheible. *Der Bond-Rechner – ein Werkzeug zur Dimensionierung von Bonddrähten*. 6. GMM/GI/ITG-Fachtagung „Zuverlässigkeit und Entwurf“, Bremen, Germany, 25.-27.09.2012, GMM-Fachbericht 73, VDE-Verlag, 2012, ISBN 978-3-8007-3445-0, ISSN 1432-3419, S. 35-38, 2012.
- [2] B G. T. Nöbauer und H. Moser. *Analytical Approach to Temperature Evaluation in Bonding Wires and Calculation of Allowable Current*. IEEE Trans. Adv. Packaging, vol. 23, S. 426-435, 2000.
- [3] R. A. Matula, *Electrical Resistivity of Copper, Gold, Palladium and Silver*. J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 8, S. 1147-1298, 1979.
- [4] Lide, David R. *Handbook of Chemistry and Physics. 75th Edition*. New York: CRC Press, S.11-41, 1996-1997.