

Optimierte Kühlung für Halbleiter

Die richtige Auslegung der Kühlung verlängert die Lebensdauer der Halbleiter und spart Kosten.

Für eine lange Lebensdauer und eine zuverlässige Funktionsweise der Elektronik muss die Halbleiter-Temperatur bestimmt werden. In vielen Fällen wird ein Kühlkörper zur Kühlung eingesetzt. Für die Bestimmung der Halbleiter Temperatur muss die Temperatur des Kühlkörpers bekannt sein. Die Wärmequellen sind in der Regel nicht homogen über die Oberfläche des Kühlkörpers verteilt. Somit muss die Wärmeverteilung in Abhängigkeit der Position der Wärmequellen berechnet werden.

Von Tobias Hofer

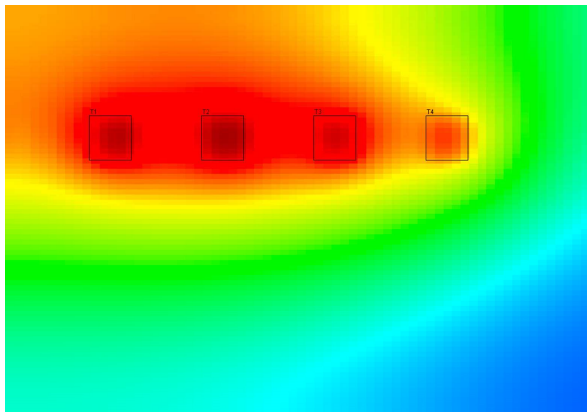


Bild1: Kühlung nicht optimiert

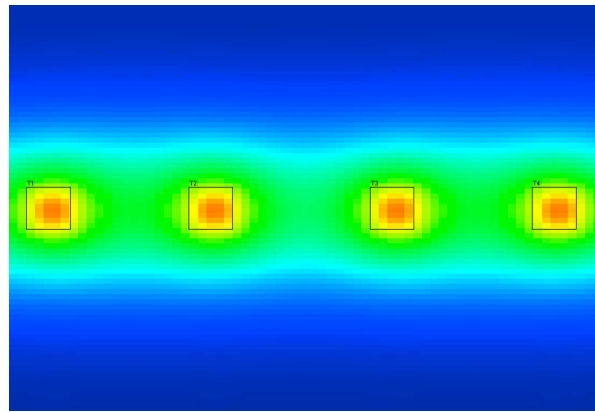


Bild2: Kühlung optimiert

Zur Kühlung werden die Halbleiter auf einen Kühlkörper montiert. In der Regel werden die Bauteile direkt auf einer Seite des Kühlkörpers befestigt. Die gegenüber liegende Seite dient der Wärmeabfuhr. Die Wärmeabfuhr kann durch natürliche oder aktive Konvektion erfolgen. Für ein kosten effizientes Design muss der Kühlkörper möglichst klein sein. Durch die richtige Positionierung der Halbleiter auf dem Kühlkörper kann die maximale Halbleiter Temperatur reduziert werden und/oder es kann ein kleinerer Kühlkörper benutzt werden.

Wärmeleitgleichung zur Bestimmung der Temperaturverteilung

Für die Berechnung der Wärmeverteilung gibt es keine exakte analytische Methode. Ein Ansatz zur analytischen Berechnung der Wärmeverteilung ist die Annahme, dass der Kühlkörper eine Platte ist. Die eine Seite wird gekühlt durch Konvektion auf der anderen Seite sind die Wärmequellen platziert. Die Seite mit den Wärmequellen ist thermisch isoliert. Eine weitere Annahme ist, dass alle Wärmequellen rechteckig sind. Mit diesen Vereinfachungen ist es möglich die Wärmeverteilung analytisch zu berechnen.

Die Fouriersche-Differentialgleichung der Wärmeleitung beschreibt das instationäre dreidimensionale Temperaturfeld mit Wärmequellen und Senken. Für den Fall einer konstanten Wärmeleitfähigkeit des Materials gilt:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

mit

$$a = \text{Temperaturleitfähigkeit in } \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{q} = \text{Wärmestrom pro Volumen in } \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$$

Für die Berechnung der maximalen Halbleiter-Temperatur genügt es in der Regel die stationäre Temperatur des Kühlkörpers zu berechnen. Dies gilt insbesondere dann wenn der Kühlkörper gegenüber dem Halbleiter eine sehr hohe Thermische Impedanz aufweist. In diesem Fall vereinfacht sich die Fouriersche-Wärmeleitgleichung und geht in die Folgende Form über (Poisson-Gleichung):

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = 0$$

Der Term Wärmestrom pro Volumen hat zwei Teile, einer repräsentiert die Wärmequelle und einer die Wärmeabfuhr durch Konvektion. Der erste Teil ist nur aktiv innerhalb den Abmessungen der Wärmequelle. Für die Berechnung der Wärmeverteilung sind Kenntnisse der Randbedingungen auf der Oberfläche erforderlich. In unserem Fall wird die Temperatur vom Kühlkörper Rand gleich der Umgebungstemperatur angenommen. Die Poisson-Gleichung kann basierend auf einer zweifachen Fourier-Reihe gelöst werden.

Beispiel aus der Praxis

Für das elektronische Schalten von großen Lasten mittels PWM wurde eine Elektronik mit vier IGBT als Leistungsschalter entwickelt. Die 4 IGBT müssen eine Leistung von total 16kW Schalten. Die daraus resultierende Verlustleistung pro IGBT wurde mit 25W berechnet. Ohne Berücksichtigung der Wärmeverteilung würde der erste Ansatz zur Auslegung des Kühlkörpers wie folgt aussehen:

Parameter:

Verlustleistung pro IGBT

$$PV_{IGBT} = 25W$$

Verlustleistung total

$$PV_{tot} = 100W$$

maximale Umgebungstemperatur

$$\vartheta_{amb} = 40^\circ C$$

Thermischer Widerstand Sperrschicht IGBT zu Kühlkörper

$$Rth_{JH} = 0,8 \frac{K}{W}$$

Der benötigte Kühlkörper für eine maximale Sperrschicht Temperatur von 110°C kann nun wie folgt berechnet werden:

$$R_{t_{HS}} = \frac{T_{j_{\max}} - \vartheta_{amb} - PV_{IGBT} R_{th_{JH}}}{PV_{tot}} = \frac{110^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} - 25\text{W} \times 0,8 \frac{\text{K}}{\text{W}}}{100\text{W}} = 0,5 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Platzierung der Halbleiter

In einem ersten Schritt wurden die Halbleiter so platziert wie es mechanisch und elektrisch am einfachsten zu realisieren war. Bild3 zeigt den Aufbau.

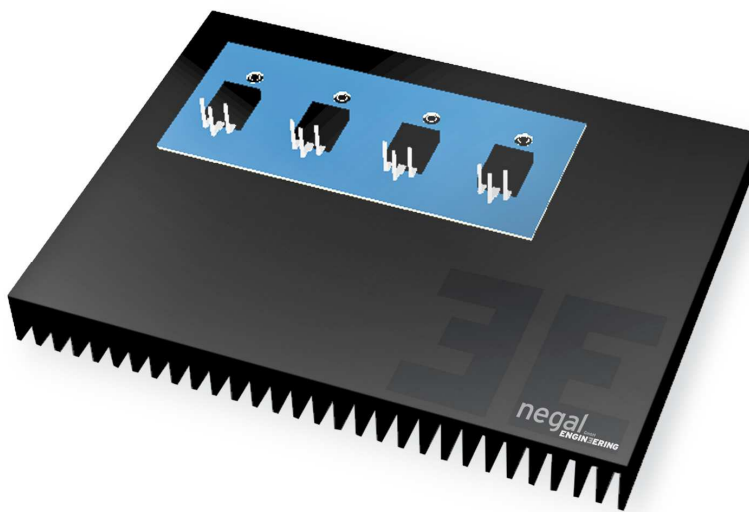


Bild3: Aufbau für die erste Thermische Auslegung

Gewählt wurde ein Kühlkörper mit den Abmessung 250mm x 190mm mit einer 5mm dicken Bodenplatte und einem thermischen Widerstand von 0.5 K/W (Datenblatt Angabe). Zur Überprüfung der Auslegung wurde die Wärmeverteilung simuliert.

Aus der Simulation (Bild1) erkennen wir eine maximale Kühlkörper Temperatur von 110°C. Zu dieser Temperatur addiert sich nun die Temperatur Differenz über dem Thermischen Widerstand zwischen Sperrschicht IGBT und Kühlkörper von 20°C. Daraus resultiert eine maximale Sperrschicht Temperatur von 130°C. Diese Temperatur ist 20K höher als erwartet.

In einem zweiten Durchgang wurde die Wärmeverteilung mitberücksichtigt. Damit konnte die optimale Position der Halbleiter bestimmt werden. Die gefundene Lösung ist vom thermischen Standpunkt aus gesehen nicht die beste. Wie in der Praxis häufiger vorkommt ist die theoretisch beste Lösung nicht immer umsetzbar. In diesem Fall mussten aus Platzgründen die Halbleiter in einer Reihe platziert werden.

Mit der neuen Anordnung (Bild 2) haben wir eine maximale Kühlkörper Temperatur von 93°C. Dazu addieren sich die 20K zwischen IGBT und Kühlkörper. Daraus resultiert eine maximale Sperrschicht Temperatur von 113°C.

Fazit

Unter Berücksichtigung der Wärmeverteilung des Kühlkörpers kann die Kühlung der Halbleiter optimiert werden. Eine optimierte Kühlung hat eine niedrigere Sperrschichttemperatur zur Folge. Dadurch wird die Lebensdauer der Halbleiter erhöht, oder die Kosten für die Kühlung können reduziert werden durch den Einsatz eines kleineren Kühlkörpers. Für die Optimierung ist es von Vorteil ein geeignetes Simulationsprogramm zu haben. Das Programm muss nicht auf ein Grad genau rechnen. Häufig reicht es einen qualitativen Vergleich z.B. der verschiedenen Anordnungen der Halbleiter zu erhalten. Damit lassen sich Optimierungen in einem frühen Stadium der Entwicklung realisieren. Ein entsprechendes Programm findet man auf der Homepage des Autors.

Literatur

- [1] Ellison, Gordon N; Thermal computations for electronic equipment
ISBN 0-442-21923-7
- [2] W. Polifke, J. Kopitz; Wärmeübertragung
ISBN 3-8273-7104-X
- [3] <http://www.frigprim.com/>