

# Praktische Anwendung einer elektrischen und thermischen Simulation einer Platine zur Ansteuerung eines BLDC-Motors

Christian Schmid

Hochschule Augsburg, Fakultät für Elektrotechnik, Augsburg, Deutschland, Christian.Schmid1@Hs-Augsburg.de

## Zusammenfassung

Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand.

## Abstract

Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand. Dies ist ein normaler Text in 10 pt Schriftgröße und 12 pt Zeilenabstand.

## 1 Grundlagen

### 1.1 Wärmefluss

Es gibt 3 Möglichkeiten wie sich Wärme ausbreiten kann. Durch Strahlung, Konvektion und Konduktion [1]. Alle 3 Ausbreitungsmöglichkeiten treten in unsren Fall auf.

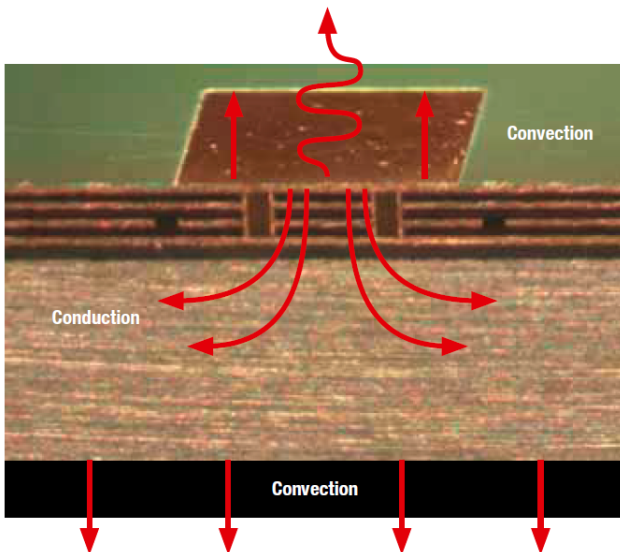


Abbildung 1: Wärmefluss auf einer Platine, [1]

### 1.2 Thermische Auslegung

Elektrische Komponenten haben einen Temperaturbereich. Bauteile werden von dem Hersteller getestet und haben in diesem Temperaturbereich einen von Hersteller angegebenen Lebenszyklus. Bei Überschreiten der Temperatur kann die Lebenszeit der Bauteile rapide abnehmen. Besonders gefährdet sind Elektrolyt-Kondensatoren. Die maximale Temperatur beträgt meist 105°C. Bei Unterschreiten der maximalen Temperatur um 10K verdoppelt sich die Lebenszeit. Alle 10K weniger verdoppelt sich der Lebenszyklus [3].

Um die Verluste und daraus entstehende Abwärme durch Selbstinduktion und elektrische Widerstände auf der Leiterbahn gering zu halten, wird die Leiterbahn abhängig von der Anwendung unterschiedlich ausgelegt. Eine Versorgungsleitung benötigt eine größere Leiterbahnfläche als eine Messleitung, da die Versorgungsleitung einen höheren Strom führt.

### 1.3 BLDC-Motor Aussteuerung

Der Brushless DC Motor ist eine Synchronmaschine. Eine Synchronmaschine braucht 3 zueinander versetzte Phasen mit Spannungen, die einen Sinus darstellen. Um die Funktionsweise zu erhalten wird das Stellglied getaktet an und abgeschaltet. Die Schaltfrequenz ist 100 - 10.000 so groß wie die gewünschte Winkelgeschwindigkeit. Die Schaltfrequenz ist zu groß für das System. (vgl. Abbildung 2) Es stellt sich eine mittlere Spannung ein, die sich über der Zeit nur langsam verändert. Das System folgt dem Sollsignal.

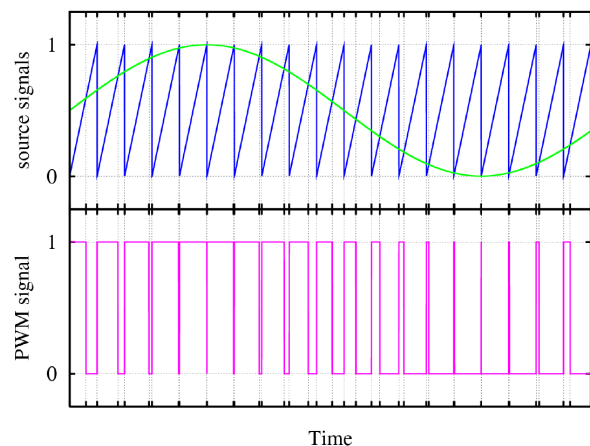


Abbildung 2: Aussteuerung einer Phase, [8]

Die schematische Funktionsweise eines Brushless DC Motors sieht wie folgt aus. Mittels 3 Halbbrücken wer-

den die drei Phasen des Motors getrennt angesteuert und der Motor gesteuert, beziehungsweise geregelt (vgl. Abbildung 3). Die Geschwindigkeit wird vorgegeben, indem die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  eingestellt wird.  $\omega = 2\pi \cdot n = \frac{d\varphi}{dt}$ . Die Spulenspannung wird durch  $u(t) = U \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_U)$  eingestellt.

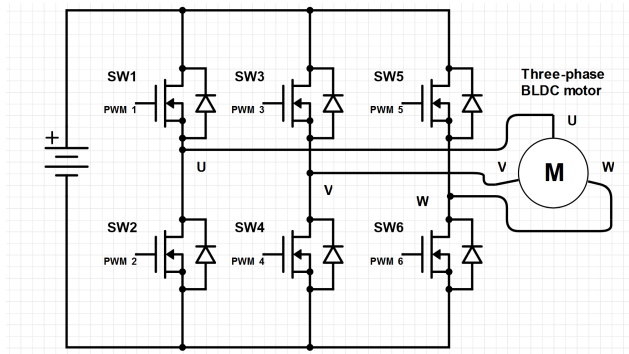


Abbildung 3: Schematische Funktionsweise eines BLDC Motors [4]

### 1.3.1 Folgerung

Da sich der eingestellte Strom sehr schnell verändert und das Thermische System langsamer ist als die Motoransteuerung, kann davon ausgegangen werden, dass in den Leitungen ein konstanter Strom fließt. Es wird angenommen dass bei maximalem Drehmoment ein Strangstrom von bis zu  $I_{Strang} = 5A$  fließt.

## 2 Thermisches Design

Abhängig von dem eingestellten Strom gibt es in der Industrie Vorgaben, wie breit Leiterbahnen sein sollen. Für einen Strom von  $I_{Strang} = 5A$  und einer maximalen Erwärmung von  $10K$  ergibt sich eine Leiterbahnbreite von  $b = 4mm$ .

### Aufbau einer Platine

Der Aufbau einer 2 lagigen Platine ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die mittlere Schicht der Platine besteht aus FR4, einem  $1,5mm$  breiten Dielektrikum [6].

Die Breite der Leiterbahnen betragen  $35\mu m$  auf Ober- und Unterseite [7]. Mittels Vias kann die Wärmeenergie einfacher durch die Platine fließen. Diesen Fall schließen wir jedoch aus. Die Wärme fließt durch das Dielektrikum und auch über die Luft.

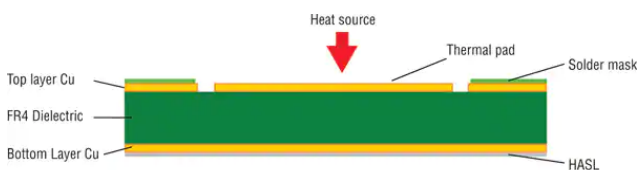


Abbildung 4: Schematische Funktionsweise eines BLDC Motors [6]

Die Abmaße der zu simulierende Platine sind in Abbildung 5 ersichtlich.

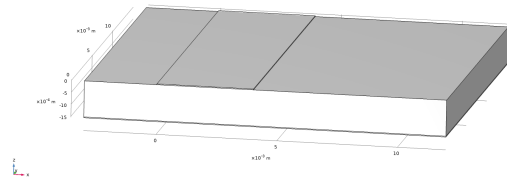


Abbildung 5: Geometrie der verwendeten Platine

## 2.1 Überprüfung des Vorgabewerts

Diese Arbeit widmet sich dem Ausrechnen des Thermischen Widerstands und der Platinenerwärmung durch den eingestellten Strom.

## 2.2 Wärmestrom

Der Wärmestrom wird durch den elektrischen Strom durch die Leiterbahn bestimmt.

Die elektrische Leitfähigkeit beträgt:  $\rho = \frac{58.1 \cdot 10^6}{Sm^{-1}}$

Die zu simulierende Länge beträgt:  $l = 15mm$

Die Querschnittsfläche der Leiterbahn beträgt:

$$A = b \cdot h = 4mm \cdot 35\mu m = 140m^{-9} \quad (1)$$

$$R_{Leiter} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{l}{A} = 1,84 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (2)$$

Die elektrische Verlustleistung ergibt sich dadurch mit:

$$P_{elektrisch} = P_{thermisch} = I^2 \cdot R_{Leiter} \quad (3)$$

Es werden  $P_{thermisch} = 5A \cdot 1,84 \cdot 10^{-3} \Omega = 46 \cdot 10^{-3} W$  in das System eingeprägt.

## 2.3 Daumenregel

Eine einfache Näherung um die Erwärmung zu bestimmen lautet:

$$\Theta_{Junction,Ambient} = 10 \frac{K}{W} \quad (4)$$

Die Erwärmung beträgt anhand dieser Regel:

$$\Delta T = P_{thermisch} \cdot \Theta_{Junction,Ambient} \quad (5)$$

$\Delta T = 46 \cdot 10^{-3} W \cdot 10 \frac{K}{W} = 0,46K$  Die Platine erwärmt sich nach der Formel um  $0,46K$ . In dieser Formel gehen keine spezifischen Daten der Anwendung ein. Ausschließlich die Wärmeleistung. Diese Formel ist sehr ungenau, da sie sehr allgemein ist.

## 2.4 Herleitung der Daumenregel

$\Theta_{Junction,Ambient}$  in Abhängigkeit von der Fläche kann mittels Formel 7 berechnet werden.

$$\Theta_{Junction,Ambient} = \frac{1}{h} \quad (6)$$

Der Wärme-Transfer-Koeffizient zwischen Platine und Luft  $h$  wird als  $10 \frac{W}{m^2 K}$  angenommen.

Die Oberseite und Unterseite der Platine betragen:

$$A = 2 \cdot 15mm \cdot 15mm$$

$$\Theta_{Junction,Ambient} = \frac{\frac{1}{10 \cdot \frac{W}{m^2 K}}}{2 \cdot 15mm \cdot 15mm} = 222 \frac{K}{W} \quad (7)$$

Die Platine erwärmt sich nach der Formel um  $\Delta T = 46 \cdot 10^{-3} W \cdot 222 \frac{K}{W} = 10.2 K$ .

## Elektrischer Schaltplan für den Wärmestrom erstellen

Um ein Ersatzschaltbild für Thermische Verläufe abzubilden, müssen die thermischen Widerstände berechnet werden. Das Ersatzschaltbild wird ohne thermische Kapazitäten dargestellt, da uns der statische Zustand interessiert, nicht der transiente. Um das System noch von Hand zu simulieren, wird angenommen, dass der Wärmestrom nur nach oben und nach unten fließt. Der thermische Widerstand wird durch Formel 8 berechnet.

$$\Theta = \frac{h}{A \cdot \lambda} \quad (8)$$

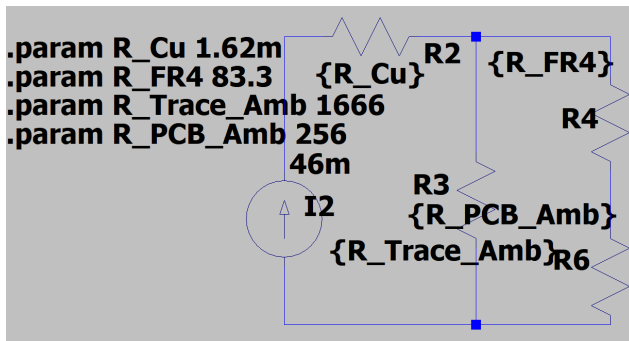


Abbildung 6: Ersatzschaltbild für die Temperatur

Die Leistung in Abbildung 6 stellt den Strom dar. Die Spannung ist die Temperaturerhöhung zur Referenztemperatur. Die Platine erwärmt sich um knapp  $\Delta T = 13 K$ . Die thermische Leitfähigkeit von Kupfer beträgt:

$$\lambda_{Cu} = 360 \frac{W}{mK} \quad [1]$$

Für den spezifischen Fall beträgt der thermische Widerstand von der Leiterbahn:

$$\Theta_{Leiterbahn} = \frac{35\mu m}{4mm \cdot 15mm \cdot 360 \frac{W}{mK}} = 1,62 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Die thermische Leitfähigkeit von FR4 beträgt:

$$\lambda_{FR4} = 0,3 \frac{W}{mK} \quad [1]$$

Für den spezifischen Fall beträgt der thermische Widerstand von dem Dielektrikum:

$$\Theta_{FR4} = \frac{1,5mm}{mm \cdot 15mm \cdot 0,3 \frac{W}{mK}} = 1,62 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Der thermische Widerstand zwischen Leiterbahn und Ambient be-

$$\text{trägt: } \Theta_{Leiterbahn,Ambient} = \frac{\frac{1}{10 \cdot \frac{W}{m^2 K}}}{2 \cdot 15mm \cdot 15mm - 4mm \cdot 15mm} = 256 \frac{K}{W}$$

Der thermische Widerstand zwischen Platine ohne

$$\text{Leiterbahn und Ambient beträgt: } \Theta_{PCB,Ambient} = \frac{\frac{1}{10 \cdot \frac{W}{m^2 K}}}{4mm \cdot 15mm} = 1666 \frac{K}{W}$$

## 3 Simulation

Es wird ein Strom an einem Ende eingepreßt. Die Masse ist am anderen Ende. Die Geometrie ist in Abbildung 5 ersichtlich. Die Vernetzung ist in Abbildung 5. Die Temperatur erhöht sich in der Simulation um 8,6K. Das unterschreitet die händischen Berechnungen. Comsol verwendet andere Werte für die thermische Leitfähigkeiten. Die Formeln, die man händischen löst sollen den Wert überschätzen, damit noch Sicherheit enthalten ist. Die händischen Formeln nehmen eine doppelt so große Fläche an auf der die Wärme abgegeben wird.

Es wird der statische Endwert der Temperatur nach 700s erreicht. Danach ist die abgegebene Leistung = der eingepreßten Leistung

## Literatur

- [1] Wuerth Elektronik eiSos [online], [Zugriff am 22.12.2021] Verfügebar unter: [https://www.wuerthonline.com/web/en/index.php/show/media/04\\_leiterplatte/2011\\_5/heatsink/neu\\_2011/TecReport012011EN-S.pdf](https://www.wuerthonline.com/web/en/index.php/show/media/04_leiterplatte/2011_5/heatsink/neu_2011/TecReport012011EN-S.pdf)
- [2] Prof. Dr. Reddig, Vorlesung Leistungselektronik
- [3] TDK-Lambda Germany GmbH [online], [Zugriff am 22.12.2021] Verfügebar unter: <https://www.emea.lambda.tdk.com/de/KB/Was-Sie-über-die-Lebensdauer-von-Stromversorgungen-wissen-sollten.pdf> Aachen, TDK-Lambda Germany GmbH
- [4] Steven Keeping: An Introduction to Brushless DC Motor Control, Digi-Key Electronics, 27.03.2013, Zugriff am 22.12.2021] Verfügebar unter: <https://www.digikey.de/de/articles/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>
- [5] IPC [online], [Zugriff am 22.12.2021] Verfügebar unter <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221.pdf>, United States, IPC
- [6] Cree, Inc. Optimizing PCB Thermal Performance for Cree XLamp LEDs 22.12.2010, [Zugriff am 22.12.2021] Verfügebar unter <https://www.digikey.de/en/articles/optimizing-pcb-thermal-performance-for-cree-xlamp-leds>
- [7] Aisler B. V. [online], [Zugriff am 22.12.2021] Verfügebar unter <https://aisler.net/help/design-rules-and-specifications/specifications>
- [8] Prof. Dr. Reddig, Vorlesung Leistungselektronik