

Entwicklung eines BLDC-Motorcontrollers

Studienarbeit II (T3_3200)

des Studienganges Elektrotechnik

an der Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe

von

Pascal Lauer

Abgabedatum:	09.04.2026
Bearbeitungszeitraum:	12 Wochen
Matrikelnummer, Kurs:	5558179, TEL23B1
Dualer Partner:	ARKU Maschinenbau GmbH
	76532 Baden-Baden
Betreuer der Dualen Hochschule:	Prof. Dr. Markus Bell

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema: „Entwicklung eines BLDC-Motorcontrollers“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Baden-Baden, 4. Februar 2026

Ort, Datum

Unterschrift

Gender-Disclaimer

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich gleichermaßen auf weibliche, männliche und diverse Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnung wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.¹

KI-Disclaimer

Zur sprachlichen Überarbeitung einzelner Abschnitte wurde das Sprachmodell Gemini von Google verwendet. Die inhaltliche Verantwortung liegt vollständig beim Verfasser. Es wurden ausschließlich vorhandene, selbst verfasste Inhalte überarbeitet, nicht generiert.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Abgrenzung	1
2 Theoretische Grundlagen der Ansteuerung	3
2.1 Der bürstenlose Gleichstrommotor (BLDC)	3
2.2 Topologie des B6-Wechselrichters	3
2.3 Raumzeigermodulation (SVPWM)	3
3 Hardware-Entwurf und Dimensionierung	5
3.1 Auswahl der Leistungshalbleiter	5
3.1.1 Berechnung der Leitendverluste	5
3.1.2 Schaltverluste	5
3.2 Gate-Treiber und Bootstrap-Dimensionierung	6
3.2.1 Berechnung des Bootstrap-Kondensators	6
3.3 Zwischenkreis (DC-Link)	6
4 Thermisches Management	7
4.1 Thermisches Ersatzschaltbild	7
4.2 Auslegung des Kühlkörpers	7
5 PCB-Design und Layout	9
5.1 Masseführung	9
5.2 Strompfade	9
6 Software-Implementierung und Validierung	11
6.1 STM32 Konfiguration	11
6.2 Messergebnisse	11
7 Fazit und Ausblick	13
7.1 Zusammenfassung	13
7.2 Ausblick	13

1 Einleitung

Zielumfang: ca. 2 Seiten

1.1 Motivation

Beschreiben: Trend zur E-Mobilität, Anforderungen an hochintegrierte Antriebe im E-Kart-Bereich.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer Motorsteuerung für einen 36 V BLDC-Motor. Der Controller soll für einen Dauerphasenstrom von 30 A ausgelegt werden. Als Ansteuerverfahren wird Space Vector PWM (SVPWM) implementiert.

1.3 Abgrenzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird bewusst auf eine feldorientierte Regelung (FOC) verzichtet. Stattdessen liegt der Fokus auf einer ****Open-Loop SVPWM-Ansteuerung****.

Diese Entscheidung wurde getroffen, um:

- einen robusten und sicheren Anlauf des Motors zu gewährleisten,
- die Komplexität der Software (Vermeidung von Park-/Clarke-Transformationen und PID-Reglern) für den ersten Prototypen zu reduzieren,
- den Fokus auf das Hardware-Design und die thermische Auslegung zu legen.

2 Theoretische Grundlagen der Ansteuerung

Zielumfang: ca. 4-5 Seiten. Hier mathematisches Verständnis beweisen!

2.1 Der bürstenlose Gleichstrommotor (BLDC)

Kurz: Statoraufbau, Rotorlageerkennung via Hall-Sensoren. Ersatzschaltbild (R, L, BEMF).

2.2 Topologie des B6-Wechselrichters

Die Ansteuerung erfolgt über eine 3-phägige Brückenschaltung (B6-Topologie).

Erklären: Kommutierungszelle. Was passiert in der Totzeit? (Freilaufdioden-Strom).

2.3 Raumzeigermodulation (SVPWM)

Im Gegensatz zur blockförmigen Kommutierung ermöglicht die SVPWM eine bessere Ausnutzung der Zwischenkreisspannung um den Faktor $2/\sqrt{3} \approx 1,15$.

Das Hexagon-Diagramm einfügen. Sektoren erklären.

Die Einschaltzeiten T_1, T_2 und T_0 (Nullzeiger) für einen Referenzvektor V_{ref} im Sektor 1 berechnen sich trigonometrisch:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_s \cdot |V_{ref}|}{V_{DC}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (2.1)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_s \cdot |V_{ref}|}{V_{DC}} \cdot \sin(\theta) \quad (2.2)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (2.3)$$

3 Hardware-Entwurf und Dimensionierung

KERNSTÜCK (8-10 Seiten). Hier Datenblätter referenzieren!

3.1 Auswahl der Leistungshalbleiter

Für die 36 V-Anwendung (max. 42 V Ladespannung) wurde der **Infineon IPP034N08N5** (80 V, TO-220) gewählt.

Begründung: 80V bietet genügend Sicherheitsmarge für induktive Spikes. $R_{DS(on)}$ ist extrem niedrig.

3.1.1 Berechnung der Leitendverluste

Basierend auf der Infineon Application Note AN 2015-05 lassen sich die statischen Verluste P_{Cond} abschätzen. Bei einem Phasenstrom von $I_{rms} \approx 30 \text{ A}$ und $R_{DS(on)} = 3,4 \text{ m}\Omega$ gilt pro MOSFET:

$$P_{Cond} = I_{rms}^2 \cdot R_{DS(on)} = (30 \text{ A})^2 \cdot 0,0034 \Omega = 3,06 \text{ W} \quad (3.1)$$

Diskutieren: 3W sind beherrschbar, erfordern aber Kühlung (siehe Kap 4).

3.1.2 Schaltverluste

Formel für P_{SW} (Switching Losses) aus AN einfügen. Abhängig von Schaltfrequenz f_{sw} und Rise/Fall-Time.

3.2 Gate-Treiber und Bootstrap-Dimensionierung

Als Treiber kommt der **IR2104** zum Einsatz. Die Versorgung der High-Side erfolgt über eine Bootstrap-Schaltung.

3.2.1 Berechnung des Bootstrap-Kondensators

Die benötigte Ladung Q_{Total} muss vom Kondensator C_{BS} bereitgestellt werden.

Hier Ihren bereits verfassten Text einfügen!

3.3 Zwischenkreis (DC-Link)

Auslegung der Elkos für den Ripplestrom. Parallelschaltung von Keramik-Kondensatoren zur Filterung hoher Frequenzen.

4 Thermisches Management

Ingenieurs-Aspekt: Kühlkörperberechnung.

4.1 Thermisches Ersatzschaltbild

Um die Junction-Temperatur T_J unter dem Maximum (175 °C) zu halten, gilt:

$$T_J = P_{tot} \cdot (R_{thJC} + R_{thCH} + R_{thHA}) + T_{Amb} \quad (4.1)$$

Dabei ist:

- R_{thJC} : Wärmewiderstand Chip-Gehäuse (aus Datenblatt: 1,1 K/W).
- R_{thCH} : Wärmewiderstand Gehäuse-Kühlkörper (Isolierscheibe! Glimmer $\approx 0,5$ K/W).
- R_{thHA} : Wärmewiderstand Kühlkörper-Luft (zu berechnen).

4.2 Auslegung des Kühlkörpers

Rechnung: Welchen Rth-Wert muss der Kühlkörper haben, um bei 30A (ca. 4-5W Gesamtverlust pro FET) stabil zu bleiben?

5 PCB-Design und Layout

5.1 Masseführung

Trennung von Power-GND und Signal-GND (Sternpunkt beim Elko).

5.2 Strompfade

Minimierung der Leiterschleifen in der Kommutierungszeile zur Reduktion parasitärer Induktivitäten.

6 Software-Implementierung und Validierung

6.1 STM32 Konfiguration

Timer-Setup: Center-Aligned PWM für SVPWM. ADC-Triggerung in der PWM-Mitte.

6.2 Messergebnisse

Platzhalter für Oszi-Bilder: Gate-Signale, Totzeit-Überprüfung, Phasenstrom.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Studienarbeit wurde erfolgreich ein Motorcontroller für einen 36 V E-Kart-Antrieb entwickelt. Die Hardware wurde für Ströme bis 30 A dimensioniert, wobei besonderer Wert auf die thermische Auslegung und die Dimensionierung der Bootstrap-Schaltung gelegt wurde.

Die Entscheidung für die Ansteuerung mittels SVPWM (statt FOC) hat sich für diesen Anwendungsfall als zielführend erwiesen. Sie ermöglichte eine schnelle Inbetriebnahme und einen zuverlässigen Motoranlauf, ohne die hohe Rechenlast und Reglerkomplexität einer FOC-Lösung.

7.2 Ausblick

Für zukünftige Iterationen des Projekts könnten folgende Erweiterungen betrachtet werden:

- Integration einer Strommessung zur Überlastsicherung (Hardware-Schutz).
- Untersuchung, ob eine FOC-Regelung bei niedrigen Drehzahlen akustische Vorteile bietet (obwohl die SVPWM bereits effizient arbeitet).
- Layout-Optimierung zur weiteren Verkleinerung der Platine.