

## Aufgabe 1

In dieser Aufgabe wird der bürstenlose Gleichstrommotor (BLDC) mit der Spannung  $U_{AP}$  und dem Strom  $I_{AP}$  betrieben. Der BLDC ist starr über eine Welle mit dem Gleichstrommotor (GM) verbunden. Der GM dient hierbei als Last für den BLDC. Der GM fungiert als Generator und wird durch den Antrieb des BLDC in Bewegung versetzt und erzeugt somit eine Spannung  $U_{AL}$ , welche dann einen Strom  $I_{AL}$  verursacht. Wir wollen diesen Strom  $I_{AL}$  messen. Zu beachten ist, dass  $U_{AL}$  nur Werte im Bereich [0V bis 24V] annehmen kann.

Vom Hersteller sind für die Belastungsmaschine folgende Daten gegeben:

$$R_{AL} = 0,4\Omega \quad C_E \Psi_{PML} = 0,4Vs$$

a) *Skizzieren Sie die Leerlaufspannung der Belastungsmaschine in Abhängigkeit von der Drehzahl  $N_P$  des bürstenlosen Gleichstrommotors im Bereich  $0-3000 \text{ min}^{-1}$ .*

Zur Ermittlung der Kennlinie ziehen wir folgende Formel heran:

$$U_i = C_E \Psi N \quad (1.1)$$

Die Drehzahl wird von  $\text{min}^{-1}$  auf  $s^{-1}$  umgerechnet ( $3000 \text{ min}^{-1} = 50 s^{-1}$ ). Wir setzen nun die beiden Drehzahlen in die Formel 1.1 ein. Einmal berechnen wir den Wert, wenn der Motor stillsteht (0 Umdrehungen pro Sekunde), sowie ein weiteres Mal, wenn der Motor 50 Umdrehungen pro Sekunde macht, (also der maximal geforderten Drehzahl). Da wir in den Berechnungen der beiden Werte nur  $N$  ändern ist die Änderung des Ergebnisses proportional, also direkt abhängig von der eingesetzten Drehzahl. Dies bedeutet es handelt sich bei dem in Abbildung 1.1 zu skizzierenden Graphen um eine Gerade.

| $N$         | $U_i$ |
|-------------|-------|
| 0           | 0     |
| $50 s^{-1}$ | 20V   |

b) *Für die Belastung des BLDC wird an die Ankerklemmen des konventionellen Gleichstrommotors anstelle einer Spannungsquelle ein veränderlicher Widerstand  $R_L$  angeschlossen. Welchen Wert muss dieser Widerstand haben, um bei einer Drehzahl von  $N_P = 2000 \text{ min}^{-1}$  des BLDC ein Lastmoment von  $M_L = 0,25 \text{ Nm}$  zu erzeugen?*

Zur Ermittlung des Wertes des Widerstands ziehen wir folgende Formel zur Bestimmung des Lastmomentes heran

$$M_L = C_M \Psi_{PML} I_A \quad (1.2)$$

Da der BLDC starr gekoppelt ist mit dem GM gilt: Lastmoment ( $M_L$ ) = Inneres Motormoment ( $M_{Mi}$ ). Aufgrund dieser Erkenntnis gilt:

$$M_{Mi} = M_L = C_M \Psi_{PML} I_A = C_M \Psi_{PML} \frac{U_i}{R_{AL} + R_L} = \frac{C_E}{2\pi} \Psi_{PML} \frac{U_i}{R_{AL} + R_L} \quad (1.3)$$

Formel 1.3 wird nach  $R_L$  umgestellt, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$R_L = \frac{C_E \Psi_{PML} U_i}{2\pi M_L} - R_{AL} \quad (1.4)$$

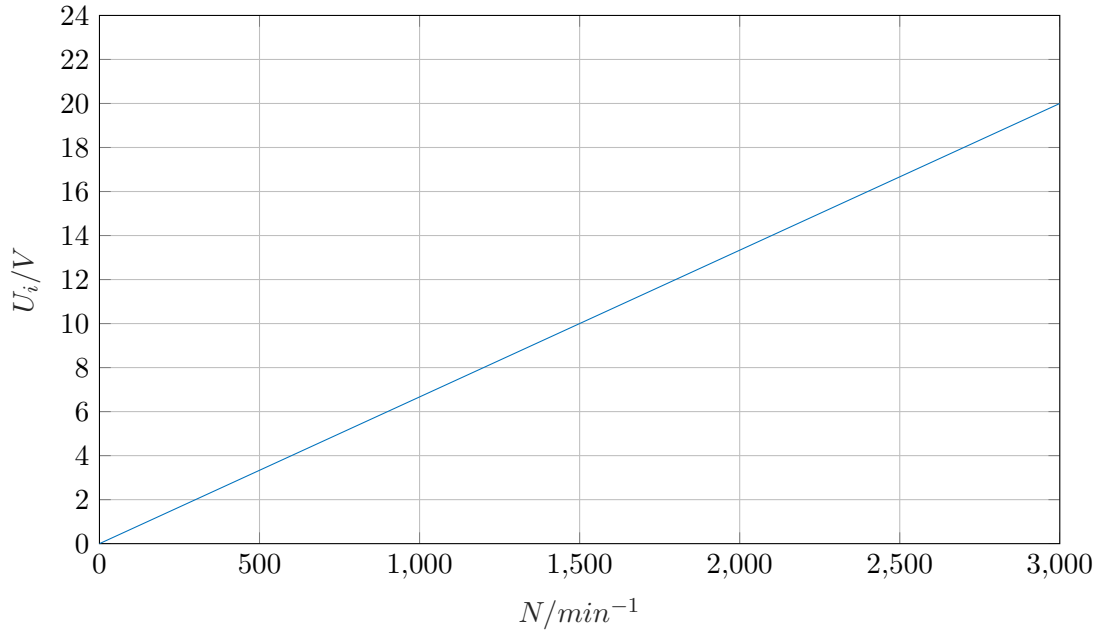


Abbildung 1.1: Leerlaufspannung der Belastungsmaschine

Damit wir  $R_L$  bestimmen können, müssen wir zuerst über Formel 1.1  $U_i$  ermitteln. Hierdurch ergibt sich  $R_L = 8,07\Omega$ . Zum Schluss dieser Berechnung haben wir eine Einheitenprüfung durchgeführt, die erhaltene Einheit soweit plausibel.

c) *Bestimmen Sie den Zusammenhang  $N_P(M_L)$  für einen fest vorgegebenen Lastwiderstand  $R_L$ .* Die Gleichung 1.1 aus Aufgabenteil a) wird im Folgenden mit einbezogen. Wir ersetzen  $U_i$  durch diese Formel. Daraus ergibt sich für  $R_L$  nun folgender Zusammenhang:

$$R_L = \frac{C_E \Psi_{PML} C_E \Psi_{PML} N_P}{2\pi M_L} - R_{AL} \quad (1.5)$$

Nach entsprechender Umstellung der Formel ergibt sich für  $N_P$ :

$$N_P(M_L) = \frac{2\pi(R_{AL} + R_L)M_L}{C_E^2 \Psi_{PML}^2} \quad (1.6)$$

## Aufgabe 2

In dieser Aufgabe sind die Signale der Hallsensoren, sowie die idealisierten Stromverläufe des BLDC im Linkslauf gegeben.

a) *Skizzieren Sie die entsprechenden Signale der Hallsensoren und die idealisierten Stromverläufe bei Rechtslauf.*

In den Abbildungen 2.1 und 2.2 kann man die Hallsensorsignale erkennen, sowie die dazugehörigen Stromverläufe der jeweiligen Wicklungen U, V und W. Sie sind hier im Rechtslauf dargestellt. Wenn man die Motorwelle von vorne betrachtet, dann sieht man, dass sie sich im Rechtslauf befindet (dies bedeutet, er dreht sich im Uhrzeigersinn). Wenn sich der Motor im linkslauf befindet, so dreht dieser sich gegen den Uhrzeigersinn.

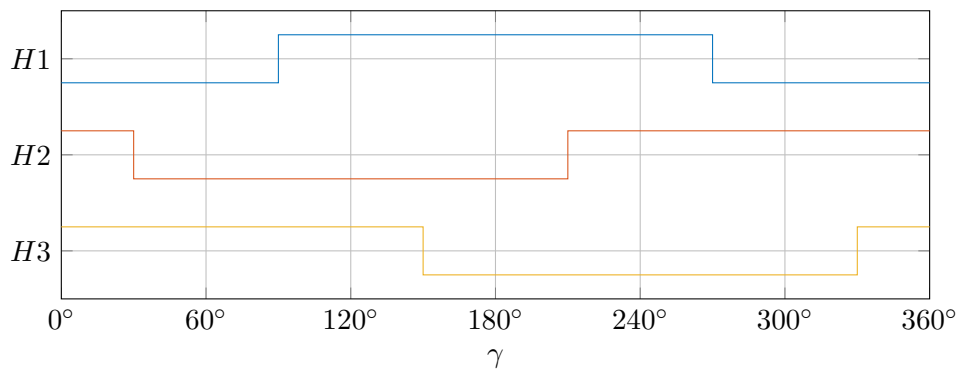


Abbildung 2.1: Signale der Hallsensoren im Rechtslauf

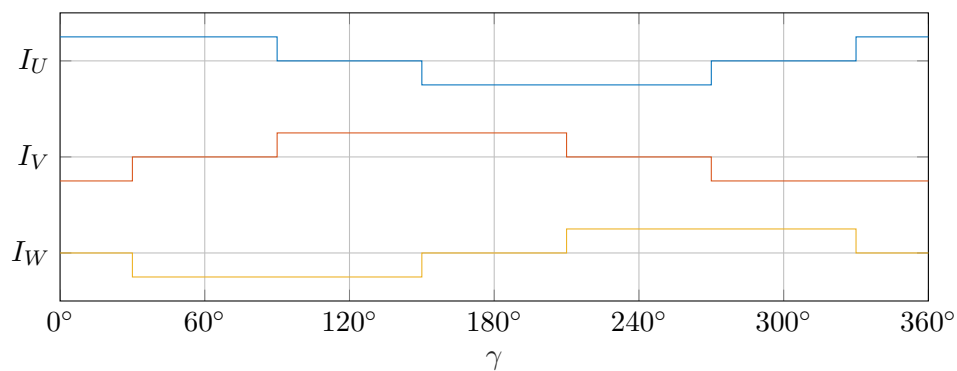


Abbildung 2.2: Stromverläufe im Rechtslauf

b) In diesem Aufgabenteil sollen nun zu den rechtsläufigen Stromverläufen aus Aufgabenteil a) die entsprechenden binären Ansteuersignale der sechs Transistoren in einem Diagramm dargestellt werden. Ist der Transistor leitend, so entspricht dies einem positiven Ansteuersignal mit dem Wert 1. Wenn der Transistor sperrt, so entspricht dies dem binären Wert 0. Abbildung 2.3 zeigt die Ansteuerung der sechs Transistoren für den Stromverlauf.

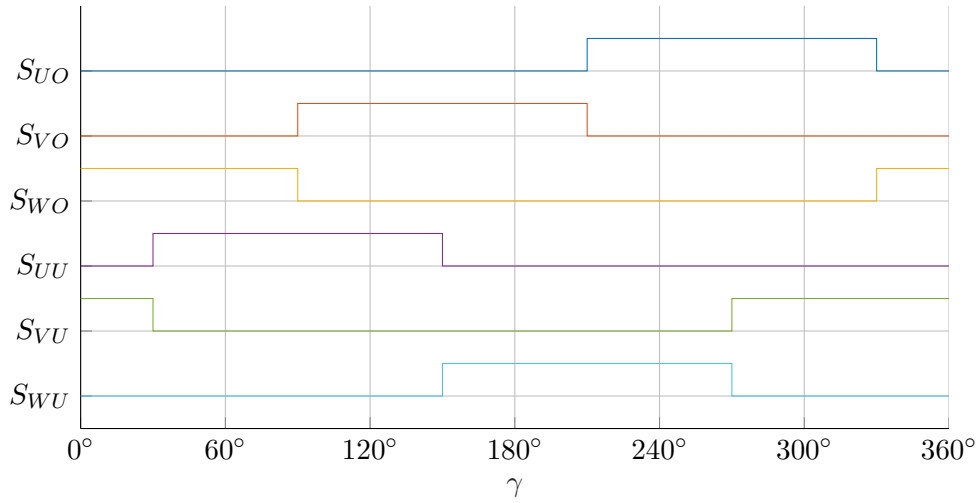


Abbildung 2.3: Ansteuersignale im Rechtslauf

c) Für den Linkslauf des BLDCs sollen jetzt die Ansteuersignale geändert werden. Damit der Motor in den Linkslauf wechselt, müssen jeweils die Steuersignale zweier Transistoren eines Strangs miteinander getauscht werden:  $S_{VO} + S_{UU}$ ,  $S_{VO} + S_{VU}$  und  $S_{WO} + S_{WU}$ . Dieser Tausch ist in Abbildung 2.4 nachzuvollziehen.

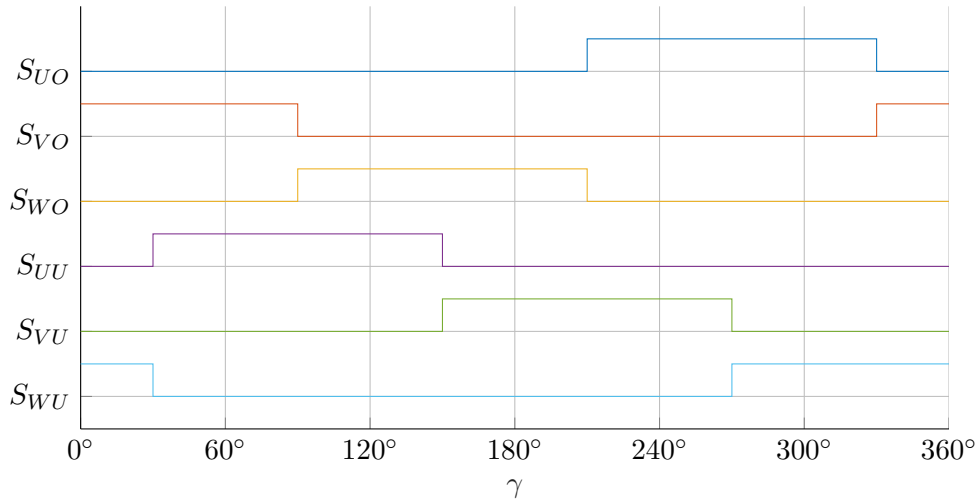


Abbildung 2.4: Ansteuersignale im Linkslauf

d) Für den unseren BLDC sind folgende Parameter gegeben:

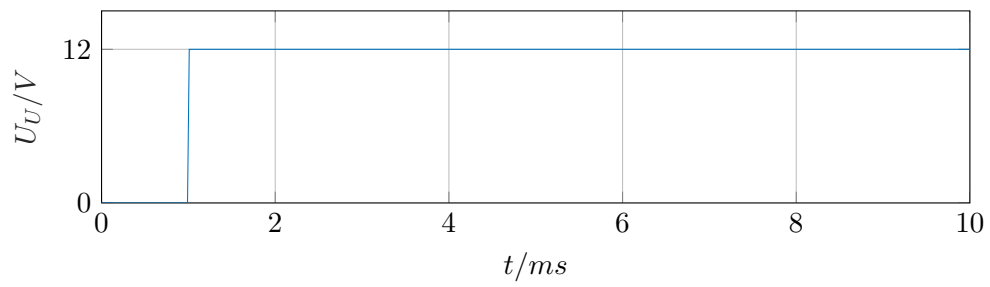
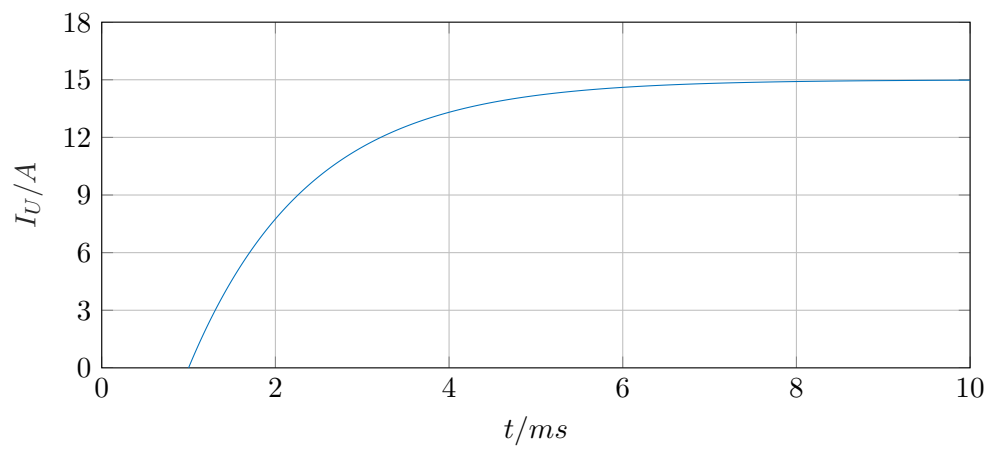
$$R_{AP} = 0,8\Omega \quad L_{AP} = 1,1mH$$

Es soll nun für den Spannungsverlauf  $U_U$  der Verlauf des Ankerstroms im Strang  $U$  skizziert werden, siehe Abbildung d. Für die Berechnung nehmen wir an, dass die innere Spannung gleich Null ist. Für die Berechnung der Zeitkonstante benutzen wir diese Formel:

$$\tau = \frac{L_{AP}}{R_{AP}} = \frac{1,1mH}{0,8\Omega} = 1,375ms \quad (2.1)$$

Den maximalen Strangstrom berechnen wir wie folgt:

$$I_{max} = \frac{U_U}{R_{LAP}} = \frac{12V}{0,8\Omega} = 15A \quad (2.2)$$

(a) Spannung im Strang  $U$ (b) Stromverlauf im Strang  $U$ Abbildung 2.5: Sprungantwort des Stromes  $I_U$  im Strang  $U$

### Aufgabe 3

In der bisherigen Darstellung gingen wir von einem bürstenlosen Gleichstrommotor mit der Polpaarzahl  $Z_P = 1$  aus. Häufig werden jedoch Motoren mit höheren Polpaarzahlen verwendet. In dieser Aufgabe betrachten wir nun den Fall einer höheren Polpaarzahl, d.h.  $Z_P > 1$ .

a) Es soll nun als erstes der Verlauf der digitalen Hallsensorsignale mit einer Polpaarzahl  $Z_P = 2$  in einem Diagramm für eine volle Umdrehung des Rotors dargestellt werden. Die Abbildung 3.1 zeigt ein Impulsdiagramm, welches nun die Hallsensorsignale für einen BLDC mit der Polpaarzahl  $Z_P = 2$  dargestellt, ebenfalls bei einer vollen Umdrehung des Rotors im Rechtslauf.

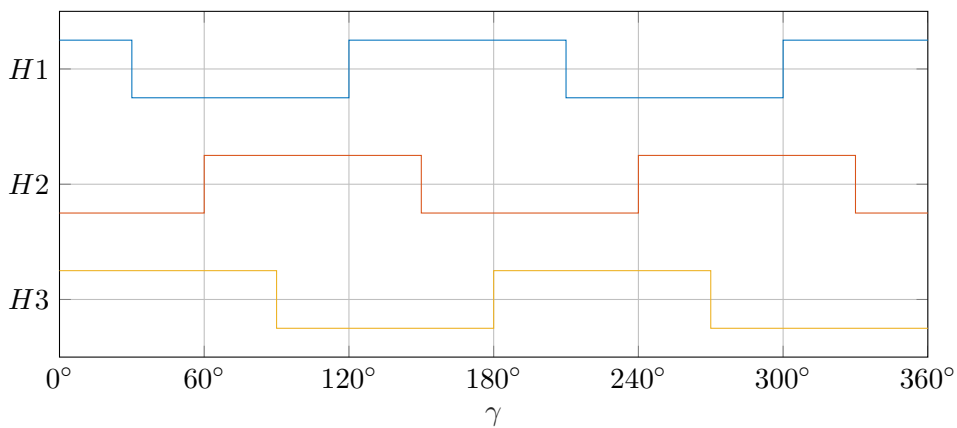


Abbildung 3.1: Signale der Hallsensoren bei  $Z_P = 2$

b) Gesucht ist nun ein Verfahren, mit dem man die Polpaarzahl eines BLDC bestimmen kann. Um die Polpaarzahl zu erhalten, können wir auch die positiven Flanken des Signals eines Hallsensors während einer Umdrehung des Rotors zählen.

## Aufgabe 4

Ab hier folgt der praktische Laborversuch.

a) *Bestimmen Sie für diesen Motor mit Hilfe Ihrer Überlegungen aus der Aufgabe 3 die Polpaarzahl  $Z_P$ .*

Wie wir in Abbildung 4.1 erkennen können, befinden sich 2 fallende Flanken in einer Rotorumdrehung. Daraus können wir Schlussfolgern, dass die gesuchte Polpaarzahl des BLDC  $Z_P = 2$  beträgt.

b) *Aufgabe ist es eine Ansteuerung für den Motor zu entwerfen, welche aus den gemessenen Hall-sensorsignalen die Ansteuersignale für die Halbbrücken der Leistungselektronik liefert. Stellen Sie unter Verwendung Ihrer Überlegungen aus Aufgabe 2, eben jenen Zusammenhang in einer Tabelle dar.*

In Tabelle 4.1 sind die Ansteuersignale der Transistoren dargestellt. Wichtig hierbei zu wissen ist, dass sowohl im Zustand „000“, als auch im Zustand „111“, jegliche Transistoren gesperrt sind. Dadurch haben wir sichergestellt, dass dies jeweils sichere Zustände sind. Besonders zu beachten ist auch, dass keine zwei Transistoren eines Strangs gleichzeitig geschaltet werden, da sonst ein Kurzschluss stattfindet.

| H1 | H2 | H3 | $S_{UO}$ | $S_{UU}$ | $S_{VO}$ | $S_{VU}$ | $S_{WO}$ | $S_{WU}$ |
|----|----|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0  | 0  | 0  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 0  | 0  | 1  | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        |
| 0  | 1  | 0  | 1        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        |
| 0  | 1  | 1  | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        |
| 1  | 0  | 0  | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        | 0        |
| 1  | 0  | 1  | 0        | 1        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| 1  | 1  | 0  | 0        | 0        | 0        | 1        | 1        | 0        |
| 1  | 1  | 1  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

Tabelle 4.1: Wahrheitstabelle zur Ansteuerung der Transistoren

c) Die Ansteuerung des BLDC für den Rechtslauf soll im Folgenden implementiert werden. Dafür haben wir die Schalttable erstellt, dem Programm die neuen Werte übergeben und dieses anschließend auf die Steuerung geladen.

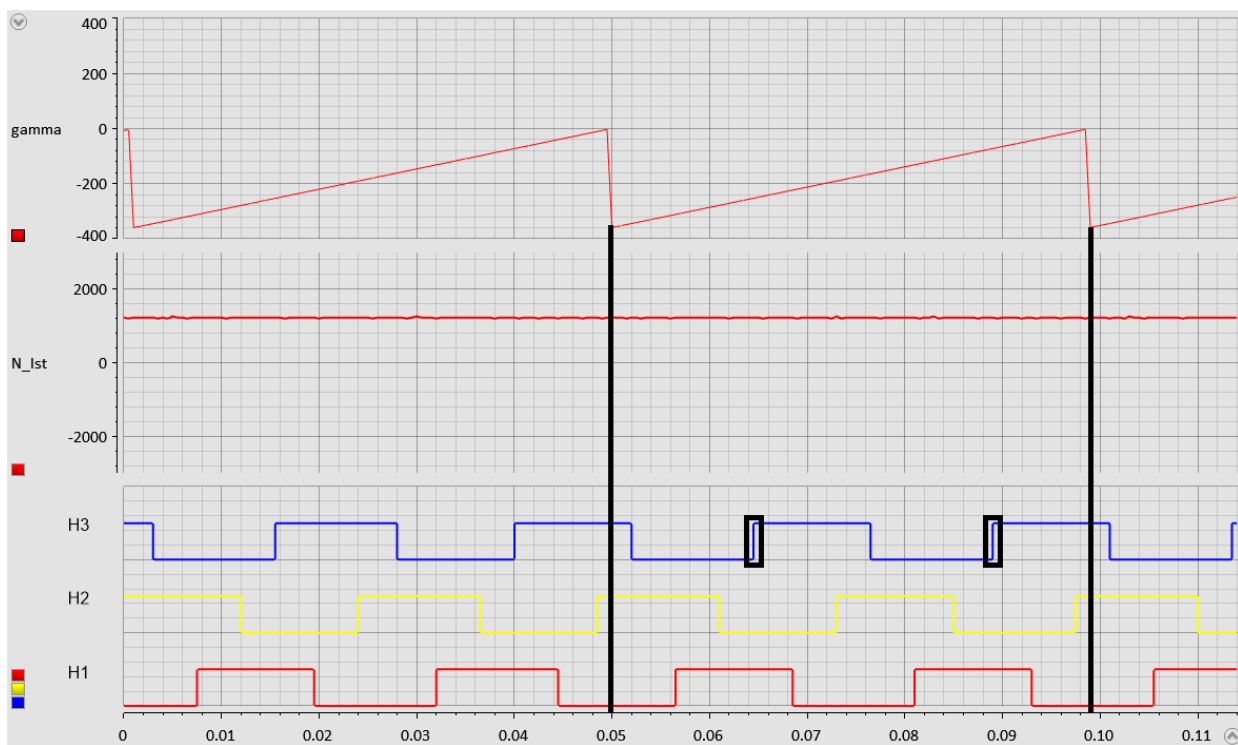


Abbildung 4.1: Messung der Hallsensoren am Prüfstand



## Aufgabe 5

Das Ziel der Aufgabe ist es, die Drehzahl- Drehmomentkennlinie für den BLDC für die Ankerspannungen

$$U_{AP} = 10V \quad U_{AP} = 15V \quad U_{AP} = 20V$$

zu messen. Die Belastung des Motors erfolgt durch Einstellung eines geeigneten Laststroms  $I_{AL}$  in der Bedienoberfläche am Labor- PC.

a) Es sollen jeweils die Messungen der Drehzahlen für die Drehmomente  $M_L = M_{Mi}$

$$M_L = 0Nm \quad M_L = 0,05Nm \quad M_L = 0,1Nm \quad M_L = 0,15Nm \quad M_L = 0,2Nm$$

durchgeführt werden. Anschließend sind diese grafisch darzustellen. Die Drehmomente sind über den Laststrom  $I_{AL}$  einzustellen, dafür wird Formel 1.2 nach  $I_A$  umgestellt:

$$I_A(M_L) = \frac{M_L}{C_M \Psi_{PML}} = \frac{M_L}{\frac{C_E}{2\pi} \Psi_{PML}} \quad (5.1)$$

Die hierdurch ausgerechneten Werte sind in Tabelle 5.1 zu sehen. Anschließend wird der Prüfstand auf die entsprechenden Umgebungsparameter eingestellt und die resultierenden Drehzahlen protokolliert.

| $M_L$    | $I_A(M_L)$ | $U_{AP} = 20V$ | $U_{AP} = 15V$ | $U_{AP} = 10V$ | $R_L = 1\Omega$ |
|----------|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| $0Nm$    | $0A$       | 3030           | 2270           | 1550           | 0               |
| $0.05Nm$ | $0,79A$    | 2727           | 2025           | 1295           | 164             |
| $0.1Nm$  | $1,57A$    | 2486           | 1806           | 1100           | 330             |
| $0.15Nm$ | $2,36A$    | 2174           | 1530           | 855            | 495             |
| $0.2Nm$  | $3,14A$    | 1906           | 1281           |                | 660             |

Tabelle 5.1: Drehzahl in Abhängigkeit des Lastmoments  $M_L$  und Ankerspannung  $U_{AP}$   
in  $min^{-1}$

b) Es ist die entsprechende Kennlinie in das gemessene Drehzahl-Drehmomentkennlinienfeld für  $R_L = 1\Omega$  einzutragen. Dazu werden die oben genannten Lastmomente in die Formel 1.6 eingesetzt.

c) Warum kann für  $U_{AP} = 10V$  das Lastmoment  $M_L = 0,2Nm$  nicht erreicht werden?

Der BLDC kann bei dieser niedrigen Spannung kein eigenes Drehmoment in dieser Größe mehr erzeugen.

d) Wie ist das Verhalten des Prüfstandes, sowie die Wechselwirkungen zwischen Prüfling und Belastungsmaschine für eine konstante Ankerspannung  $U_{AP}$  bei einer Änderung von  $R_L$ ?

Mit einer Änderung von  $R_L$  folgt eine antiproportionale Änderung des Laststroms  $I_{AL}$ . Da das Lastmoment  $M_L$  abhängig vom Laststrom  $I_{AL}$  ist, hat eine Änderung von  $R_L$  direkten Einfluss auf das Lastmoment. Durch die starre Welle sind Lastmoment und Motormoment unmittelbar voneinander abhängig. Damit die Ankerspannung  $U_{AP}$  konstant bleibt, muss einer Änderung des Drehmoments eine Änderung der Drehzahl folgen.

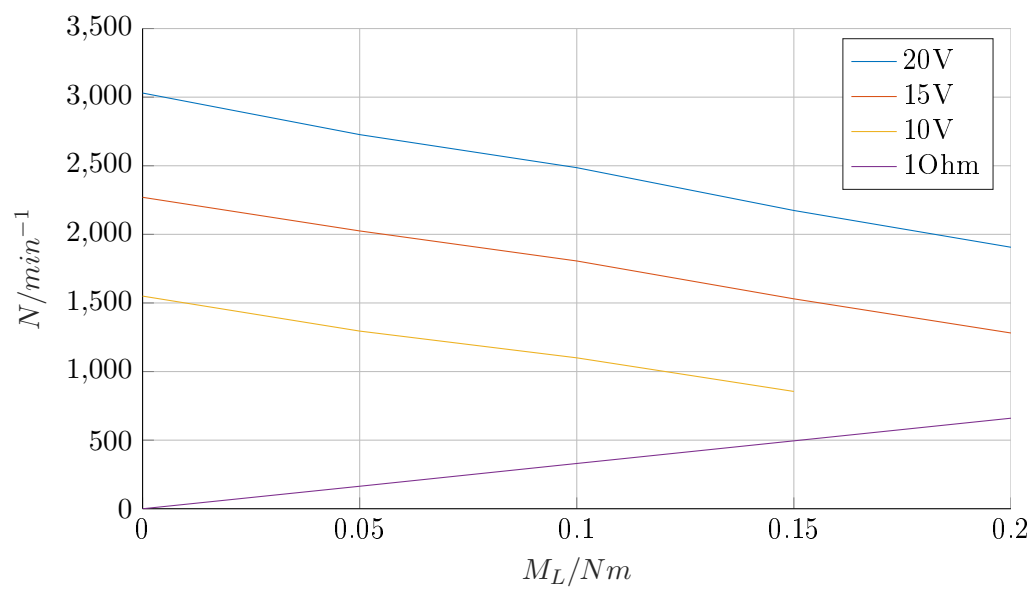


Abbildung 5.1: Drehzahlkennlinien des BLDC unter verschiedenen Spannungen

## Aufgabe 6

a) Im Folgenden soll der Unterschied zu den tatsächlich gemessenen Stromverläufen dargelegt werden.

Im Labor hat sich herausgestellt, dass es einen Unterschied zwischen den idealisierten und den tatsächlichen Stromverläufen gibt. Auf dem Bild (NUMMER) ist zu erkennen, dass wenn W eingeschaltet, V ausgeschaltet wird, es zu einem Einbruch des Stromes U kommt, obwohl die Wicklung konstant von Strom durchflossen wird. Der Einbruch des Stromes erfolgt um den Betrag des Schnittpunktes der ein- bzw. ausgeschalteten Phasenströme.

Begründen lässt sich dieser Effekt dadurch, dass die Wicklungen in Sternschaltung zu einem gemeinsamen Knoten zusammengeführt sind. Es findet eine gegenseitige Beeinflussung der Ströme beim Umschalten zwischen den Spulen statt. Der Auf- bzw. Abbau der Magnetfelder benötigt eine gewisse Zeit. Dies kann zu derartigen Störungen führen. Ebenfalls ist zu bemerken, dass die Ströme nicht sprunghaft, sondern mit PT-1 Verhalten ansteigen, da es sich um Induktivitäten handelt.

b) *Welche Auswirkungen haben diese Stromverläufe auf das Drehmoment?*

Die nicht idealisierten Stromverläufe des Ankerstroms weisen kurze Einbrüche auf. Diese verursachen einen kurzzeitigen Drehmomentverlust.

c) *Mit welcher Maßnahme lässt sich dieses Verhalten verbessern?*

Damit die Stromläufe verbessert werden können, kann man auf eine Kombination aus einem Stromregler und einer Drehzahlregelung zurückgreifen. Dabei wird die Drehzahlregelung dazu benötigt, die Selbstzerstörung der Maschine bei konstantem Strom zu verhindern.

## Abbildungsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Leerlaufspannung der Belastungsmaschine . . . . .                    | 2  |
| 2.1 | Signale der Hallsensoren im Rechtslauf . . . . .                     | 3  |
| 2.2 | Stromverläufe im Rechtslauf . . . . .                                | 3  |
| 2.3 | Ansteuersignale im Rechtslauf . . . . .                              | 4  |
| 2.4 | Ansteuersignale im Linkslauf . . . . .                               | 4  |
| 2.5 | Sprungantwort des Stromes $I_U$ im Strang $U$ . . . . .              | 5  |
| 3.1 | Signale der Hallsensoren bei $Z_P = 2$ . . . . .                     | 6  |
| 4.1 | Messung der Hallsensoren am Prüfstand . . . . .                      | 8  |
| 5.1 | Drehzahlkennlinien des BLDC unter verschiedenen Spannungen . . . . . | 10 |