

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 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:

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

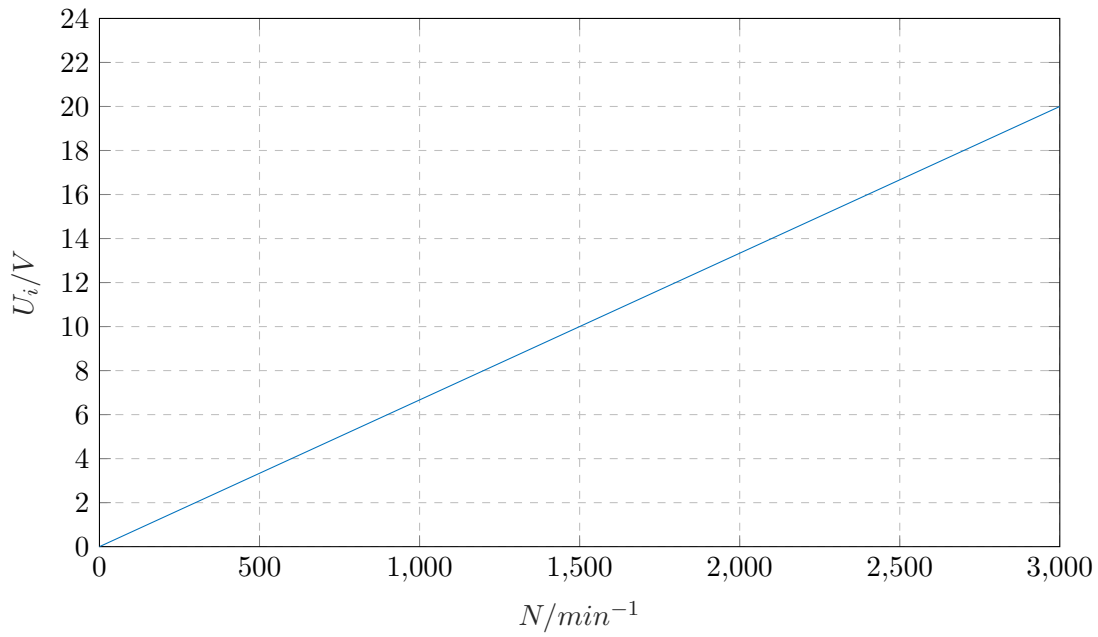


Abbildung 1.1: Leerlaufspannung der Belastungsmaschine

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.

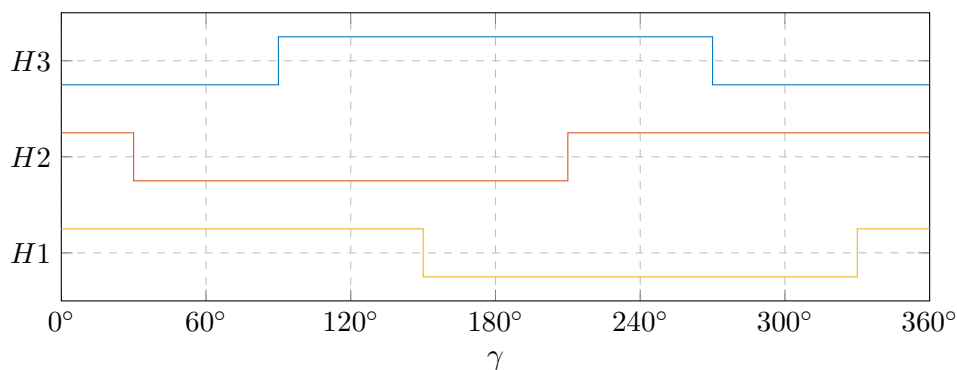


Abbildung 2.1: Signale der Hallsensoren im Rechtslauf

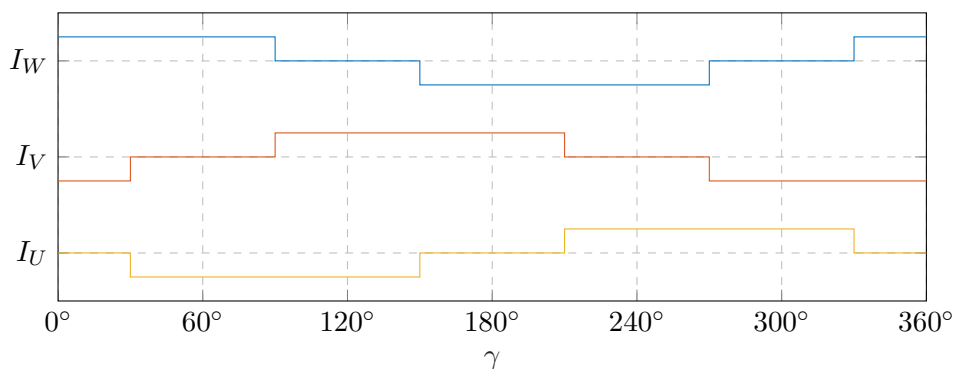


Abbildung 2.2: Stromverläufe im Rechtslauf

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.

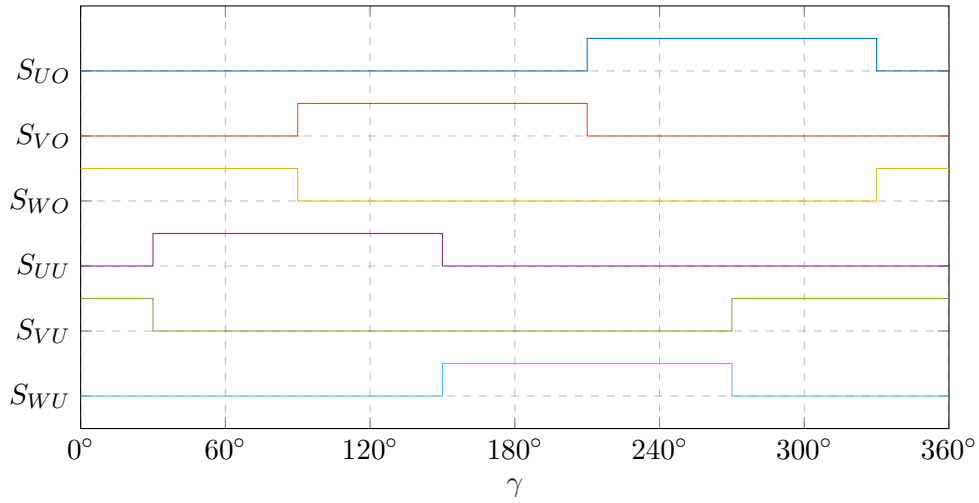


Abbildung 2.3: Ansteuersignale im Rechtslauf

c) Die Ansteuerung des BLDCs soll nun auf Linkslauf geändert werden. Damit ein Richtungswechsel stattfindet, müssen sich die Wicklungsströme umpolen. Hierfür werden die Ansteuerungssignale der Transistorpaare (Oben und Unten) der einzelnen Stränge U, V, W vertauscht. Genauer gesagt, die Paare S_{UO} & S_{UU} , S_{VO} & S_{VU} und S_{WO} & S_{WU} werden getauscht. Die daraus resultierenden Signale sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

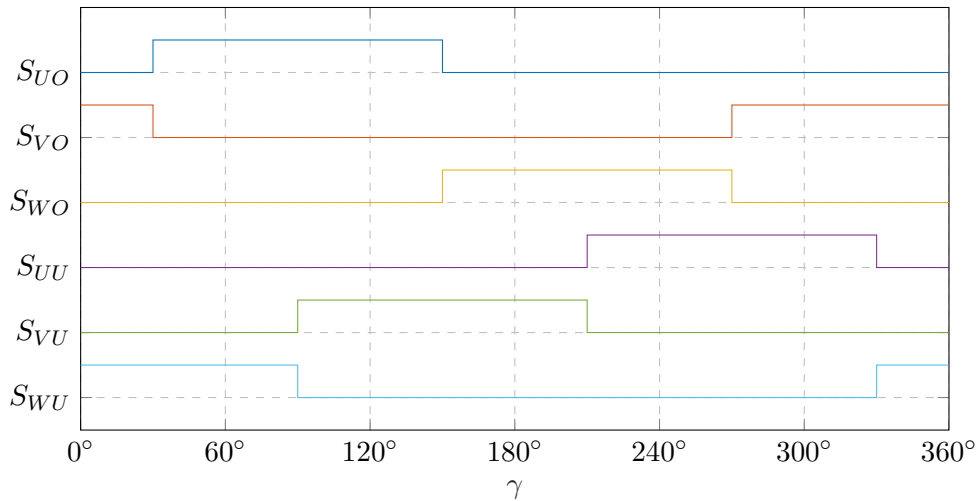


Abbildung 2.4: Ansteuersignale im Linkslauf

d) Für den unseren BLDC sind folgende Parameter gegeben:

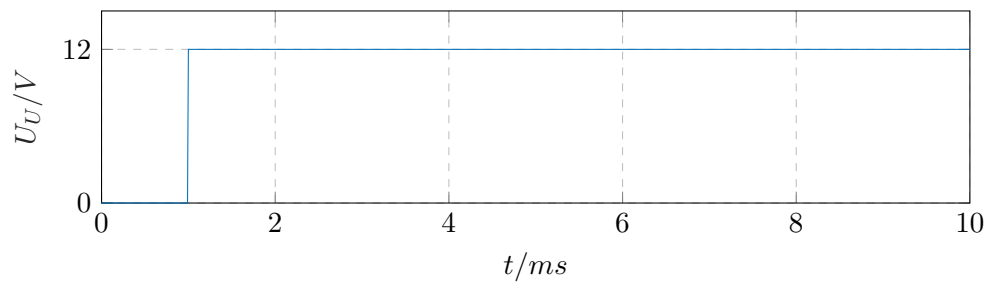
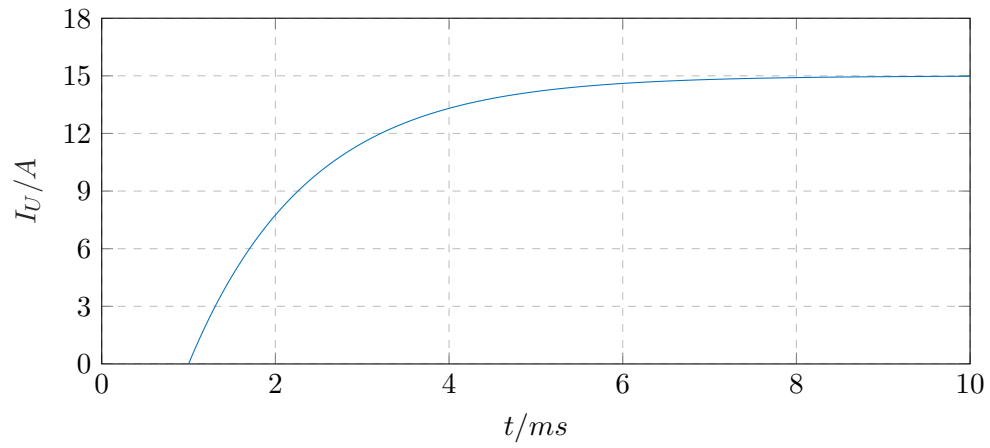
$$R_{AP} = 0,8\Omega \quad L_{AP} = 1,1mH$$

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.

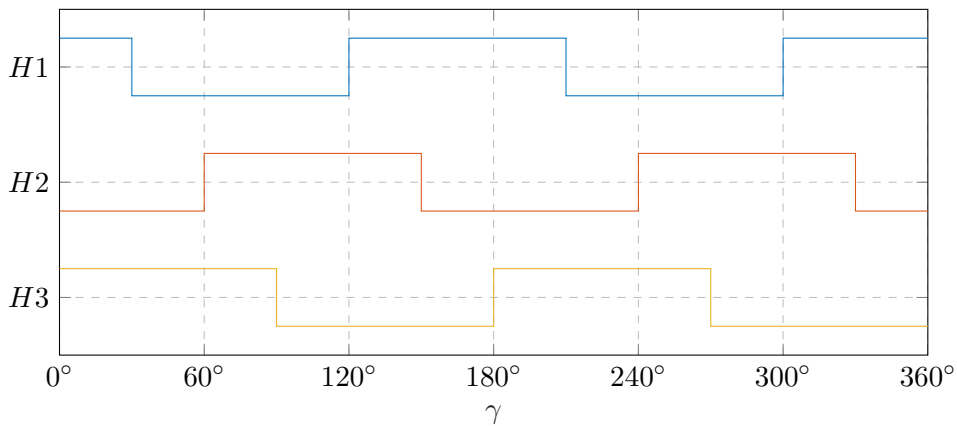


Abbildung 3.1: Signale der Hallsensoren bei $Z_P = 2$

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.

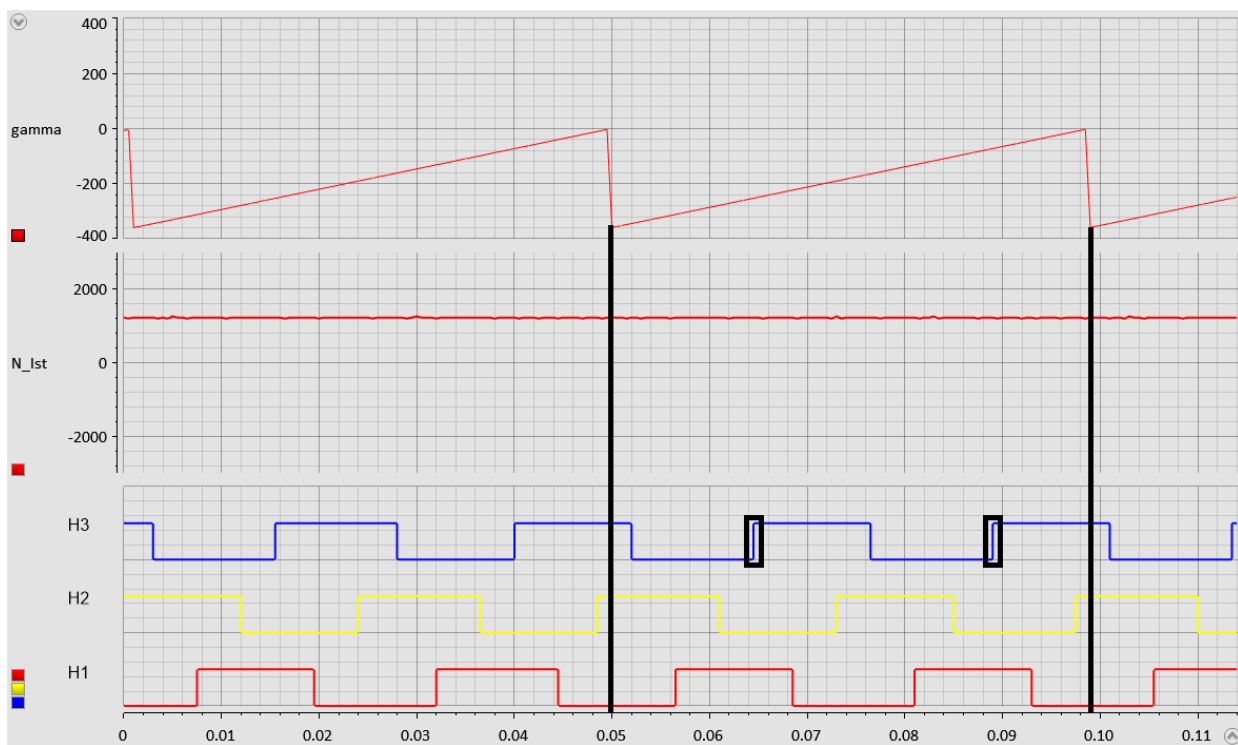


Abbildung 4.1: Messung der Hallsensoren am Prüfstand

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?*

Das Lastmoment M_L kann nicht größer als das Drehmoment des BLDC sein, denn sonst würde die Lastmaschine den BLDC antreiben. Daher können keine höhere Momente als beim Schnittpunkt der 1Ω -Linie und den jeweiligen Kennlinien sowohl auf Erzeuger- als auch auf Lastseite auftreten. Da bei der hier angegebenen Konstellation das Lastmoment höher als das Drehmoment des BLDC sein sollte, konnte der Messwert am Prüfstand auch nicht erreicht werden.

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 ?*

Die komplette Wirkungskette sieht folgendermaßen aus: An der Erzeugermaschine liegt eine Spannung an. Diese Spannung ist die Ursache des fließenden Stroms. Durch den fließenden Strom wird

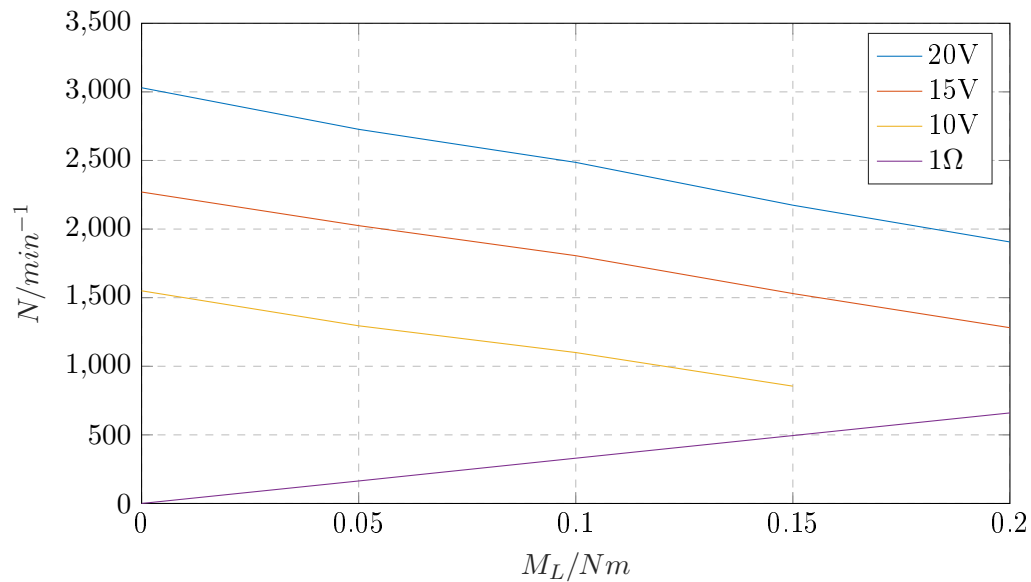


Abbildung 5.1: Drehzahlkennlinien des BLDC unter verschiedenen Spannungen

ein Drehmoment verursacht, welches zu einer Drehzahl auf der Erzeugermaschine führt. Mit dieser Drehzahl wird nun auf der Seite der Last ein Lastmoment verursacht. Dieses wiederum erzeugt einen Strom, welcher wiederum für die Spannung verantwortlich ist, die auf der Lastseite ausgegeben wird. Nehmen wir nun einmal an, dass sich R_L ändert. Im Folgenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass R_L größer wird. Was würde passieren? Dieser Einfluss auf die Wirkungskette ist im folgenden dargelegt. Dies hat ein Absinken des Stromes auf der Seite der Last zur Folge, während dies rückwirkend einen Einfluss auf das Lastmoment hat. Durch den Einfluss auf das Lastmoment steigt nun die Drehzahl.

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 Oszilloskop 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