

# PRODUKTENTWICKLUNG 1

HOCHSCHULE LUZERN

TECHNIK & ARCHITEKTUR

---

## Brushless DC Treiber

Konzeptbeschreibung

---

*Autoren:*

Yves STUDER  
Daniel WINZ  
Ervin MAZLAGIĆ

*Projektgruppe:*  
PREN-ET

Horw  
6. Januar 2015

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Fachgruppe Elektrotechnik</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Brushless Motoransteuerung</b>	<b>2</b>
2.1	Theorie der Ansteuerung . . . . .	2
2.2	Neuer Ansatz . . . . .	3
2.3	Ansteuerungshardware . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Prinziptest</b>	<b>5</b>
3.1	Messmittel . . . . .	5
3.2	Resultat . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Fallback</b>	<b>7</b>
4.1	Konzeptbeschreibung . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Encoder &amp; Drehzahlgeber</b>	<b>8</b>
5.1	Magnetischer Drehzahlgeber . . . . .	8
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>10</b>

# 1 Fachgruppe Elektrotechnik

Elektrotechnik-Studierenden aus mehreren Gruppen haben sich zusammengeschlossen um gemeinsame Probleme anzugehen. Dabei handelt es sich um die benötigte Hard- und Software, um Motoren anzusteuern und gegebenenfalls zu regeln. In diesem Zusammenschluss werden drei Gruppen gebildet, um Lösungen für DC-, Stepper- und Brushless-Motoren auszuarbeiten. Die Idee besteht darin, dass nicht jede Gruppe für dasselbe Problem wo möglich denselben Lösungsansatz verfolgt, sondern die Ressourcen kombiniert, Synergien nutzt, um eine bessere Lösung zu erarbeiten. Auf diese Weise kann das teamübergreifende Arbeiten im Rahmen des PREN erlernt und geübt werden. Somit wird Idee der Interdisziplinarität im erweiterten Sinn Rechnung getragen. Die Gruppen und deren Mitglieder sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Projekt	Team
DC Motoren	19, 33, 39
Schrittmotor	27, 33, 38
BLDC Motor	27, 32

Tabelle 1: Übersicht der PREN-ET Projektgruppen

## 2 Brushless Motoransteuerung

### 2.1 Theorie der Ansteuerung

Brushless-Motoren (BLDC-Motoren) sind Synchron-Drehstrom-Motoren. Das bedeutet, sie werden mittels eines kontinuierlichen magnetischen Drehfeldes in Bewegung gesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Läufer dem Drehfeld synchron folgen kann, daher auch die Namensbezeichnung des Motors. Falls der Läufer dem Drehfeld nicht folgen kann, wird keine Spannung vom Rotor in die Statorwicklung induziert, die der Erregerspannung entgegenwirkt. Daraus folgt, dass ein immenser Strom fliesst, der nur von der Wicklungsimpedanz des Motors begrenzt wird. Das Drehmoment ist abhängig vom Polradwinkel und erreicht sein Maximum bei einem Polradwinkel von  $90^\circ$ . Die Kommutierung wird entweder als Sinuskommutierung oder als Blockkommutierung ausgeführt. Die Sinuskommutierung bildet die Sinusform eines dreiphasigen Netzes nach. Die Sinusform kann auch mit einem Rechtecksignal angenähert werden. Dabei spricht man von einer Blockkommutierung. Diese ist einfacher zu realisieren, aber erreicht nicht das selbe Drehmoment wie eine Sinuskommutierung. In diesem Projekt wird aufgrund der einfacheren Implementierung eine Blockkommutierung realisiert.

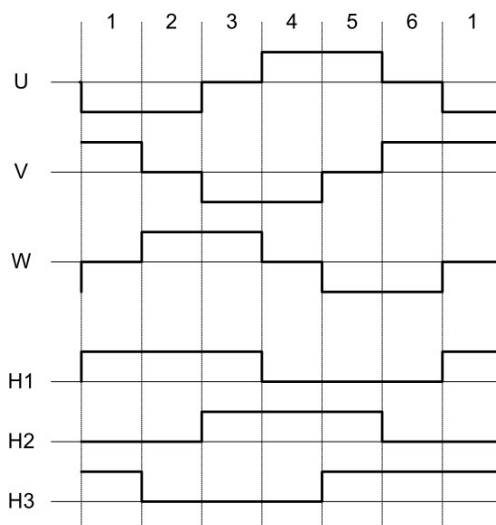


Abbildung 1: Zeitliche Darstellung der Ansteuerung mit Hall-Sensoren (Atmel Corporation, 2013)

Es gibt hauptsächlich drei Methoden, das Drehfeld zu generieren und zu regeln. Die einfachste Methode ist die

Zwangskommutierung: Dabei wird ein Drehfeld erzeugt und dem Motor aufgezwungen. Der Läufer muss dem Drehfeld folgen, der maximal zulässige Winkel von  $90^\circ$  zwischen dem Feld und dem Läufer muss eingehalten werden. Wird dieser Winkel überschritten, kommt der Motor zum Stillstand.

Die zweite Methode zur Regelung des Motors verwendet drei Hallsensoren, die im Motor integriert sind. Dies macht den Motor aufwändiger und dementsprechend teurer. Die Regelung mit Hallsensoren ist verhältnismässig einfach, da nach den Signalen die einzelnen Spulen direkt angesteuert werden können. Der Zusammenhang zwischen der Ansteuerung und den Hallsensor-Signalen ist in Abbildung 1 ersichtlich. Dabei stehen  $U$ ,  $V$  und  $W$  für die Phasenströme und  $H_1$ ,  $H_2$  und  $H_3$  für die entsprechenden Signale der Hallsensoren. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass wenn ein Hallsensor eine Änderung anzeigt, ein Nulldurchgang im entsprechenden Stromverlauf stattgefunden hat. Dies ist der Zeitpunkt, zu dem die Kommutierung durchgeführt werden muss.

Für die dritte Möglichkeit bildet man einen virtuellen Sternpunkt und detektiert mit Komparatoren die Sternpunktdurchgänge. In der Controller-Logik muss der Zeitunterschied der Kommutierung bis zum Durchschreiten des Sternpunktes gemessen werden. Diese Zeit muss noch einmal abgewartet werden, bevor die Kommutierung durchgeführt wird. Falls der Motor über einen Anschluss für den Sternpunkt verfügt, kann auch dieser verwendet werden. Da die Position des Rotors auf diese Weise beim Stillstand nicht ermittelt werden kann, muss der Motor mit einer Zwangskommutierung gestartet werden.

## 2.2 Neuer Ansatz

In einem modifizierten Ansatz wird versucht, die Hallsensor-Signale aus den Ansteuerungen des Motors zu gewinnen. Hierzu wird eine Schaltung pro Phase benötigt, um die Nulldurchgänge beim virtuellen Sternpunkt detektieren zu können. Die Abbildung 2 zeigt die Schaltung, mit der dieser Ansatz realisiert werden kann. Mit

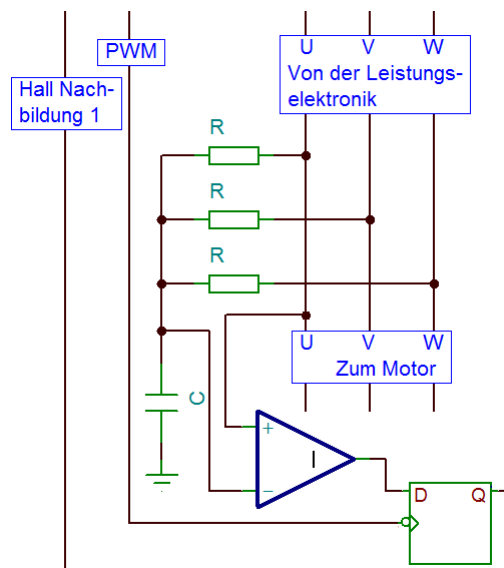


Abbildung 2: Schema des Rekonstruktionsprinzips (Tobias Plüss, 2014)

dem Flip-Flop aus Abbildung 2 kann die PWM aus dem Sensorsignal unterdrückt werden. Diese rekonstruierten Hallsensor-Signale können direkt logisch verknüpft und genutzt werden, um den Motor mit einer Dreiphasen-H-Brücke anzusteuern (Tobias Plüss, 2014). Anhand des zeitlichen Verlaufs, der aus Abbildung 1 zu entnehmen ist und der Ansteuerung einer H-Brücke, ergibt sich die Wahrheitstabelle, die in Tabelle 2 ersichtlich ist. Das Signal  $U_h$  symbolisiert den Highside<sup>1</sup>-Transistor der Phase U auf der H-Brücke und die Spalte  $U_l$  entspricht dem Lowside-Transistor.

<sup>1</sup>Transistor, der gegen die Versorgungsspannung schaltet. Typischerweise aufwendiger anzusteuern, da am Gate eine Spannung von einigen Volt über der Versorgungsspannung angelegt werden muss.

$H_1$	$H_2$	$H_3$	$U_h$	$U_l$	$V_h$	$V_l$	$W_h$	$W_l$	Illegal
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1

Tabelle 2: Wahrheitstabelle der Ansteuerung

$$\begin{aligned}
 U_h &= H_1 \wedge \bar{H}_2 & V_h &= H_2 \wedge \bar{H}_3 & W_h &= \bar{H}_1 \wedge H_3 \\
 U_l &= \bar{H}_1 \wedge H_2 & V_l &= \bar{H}_2 \wedge H_3 & W_l &= H_1 \wedge \bar{H}_3
 \end{aligned}$$

Die Tabelle in Abbildung 2 kann pro Signal zu folgenden logischen Verknüpfung vereinfacht werden.

### 2.3 Ansteuerungshardware

In Kapitel 3.2 zeigten sich einige Punkte, die für ein eigenes Board für die Brushless-Motoransteuerung sprechen. Auf diesem Board wird ein eigener Controller eingesetzt, der als Kommunikationsschnittstelle SPI verwendet. Die benötigten Pins sind in der Tabelle 3 ersichtlich. Der Controller wird benötigt, um eine Zwangskommütierung vorzunehmen, um den Motor in eine Initialdrehung zu versetzen. Sobald der Motor dreht, kann der neue Ansatz funktionieren. Weiter wird auf dem Controller eine Regelung implementiert, um die Drehzahl des Motors zu regeln. Zusätzlich kann der Winkel zwischen Detektion und Kommutierung angepasst werden, wenn dies notwendig ist.

Die Kommunikation mit dem Controller soll über SPI geschehen. Darüber sollen die Solldrehzahl und gegebenenfalls Parameter eingestellt werden können. Alle weiteren Schritte, wie die benötigte Zwangskommütierung am Anfang und die Regelung, werden eigenständig vom Boardcontroller vorgenommen.

Pin	Funktion
SCK	Bustakt
MISO	Master in Slave out
MOSI	Master out Slave in
CS	Chip select
Int	Interrupt
Reset	Reset

Tabelle 3: Schnittstelle des Brushless-Boards

### 3 Prinziptest

Das Schema des Gesamtaufbaus des Tests ist in der Abbildung 3 ersichtlich. Die 3-Phasen H-Brücke im oberen grünen Rechteck wird direkt vom FPGA<sup>2</sup> angesteuert. Die Hardware dieser Brücke ermöglicht eine voll galvanisch getrennte Ansteuerung mit 3.3V Logikpegeln. Diese Brücke wurde zur Verfügung gestellt und direkt verwendet. Die Rekonstruktion der Hallsensoren-Signale findet im rot markierten Teil des Aufbaus statt. Dieser Part wird auf einer Laborplatte aufgebaut und gelötet. Die so generierten Signale  $U_{Hall\,sensor}$ ,  $V_{Hall\,sensor}$ ,  $W_{Hall\,sensor}$  werden einem FPGA geliefert. Anhand dieser Signale steuert das FPGA die H-Brücken-Transistoren mit den Signalen  $U_h$ ,  $U_l$ ,  $V_h$ ,  $V_l$ ,  $W_h$ ,  $W_l$ . Die im FPGA enthaltene Konfiguration besteht aus simplen AND-Verknüpfungen, die die anliegenden Signale sehr schnell und effizient verarbeiten können. Auf diese Weise ist es möglich, den Motor sehr schnell anzusteuern. In der Abbildung 4 ist der gesamte Aufbau abgebildet. Man beachte die markierten Felder.

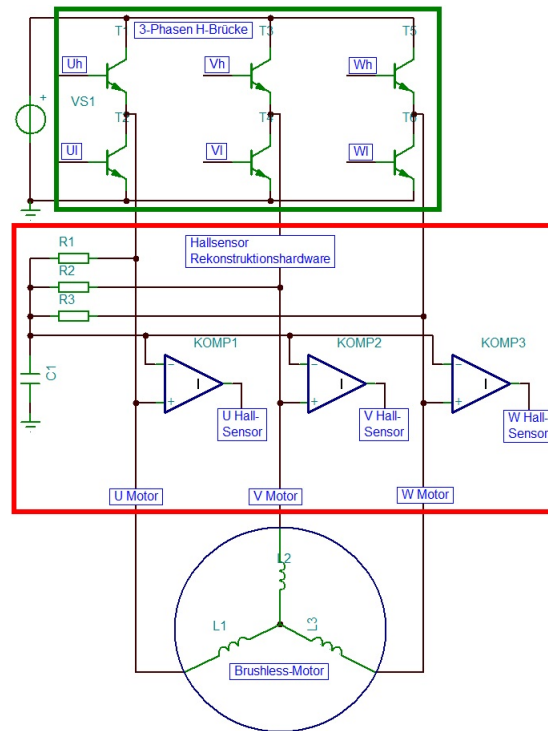


Abbildung 3: Schema des Brushless-Versuchsaufbaus

Am linken unteren Rand ist der Motor befestigt. In der Mitte des Bildes ist die Hardware zur Rekonstruktion der Hallsensoren-Signale. Die generierten Signale werden dem FPGA in der unteren rechten Ecke zugeführt. Diese Signale werden logisch verknüpft und danach die sechs Signale generiert, um die H-Brücke in der rechten oberen Hälfte anzusteuern. Die H-Brücken wiederum treiben den Motor an. Die im FPGA enthaltene Logik basiert auf der Wahrheitstabelle, die in Tabelle 2 abgebildet ist.

#### 3.1 Messmittel

Gerät	Typ	Nummer
Speisegerät	Rohde & Schwarz NGSM 32/10	Inv.-Nr. 009
Oszilloskop	Agilent MSO6052A	Inv.-Nr. 48; S/N: MY44001903
Mainframe	Hameg HM8001-2	SN: 059520046
Speisegerät	Hameg HM8040-3	SN: 015405014
Pulsgenerator	Hameg HM8035	Inv.-Nr. 44

Tabelle 4: Messmittel des Versuchsaufbaus

<sup>2</sup>Field-Programmable Gate Array

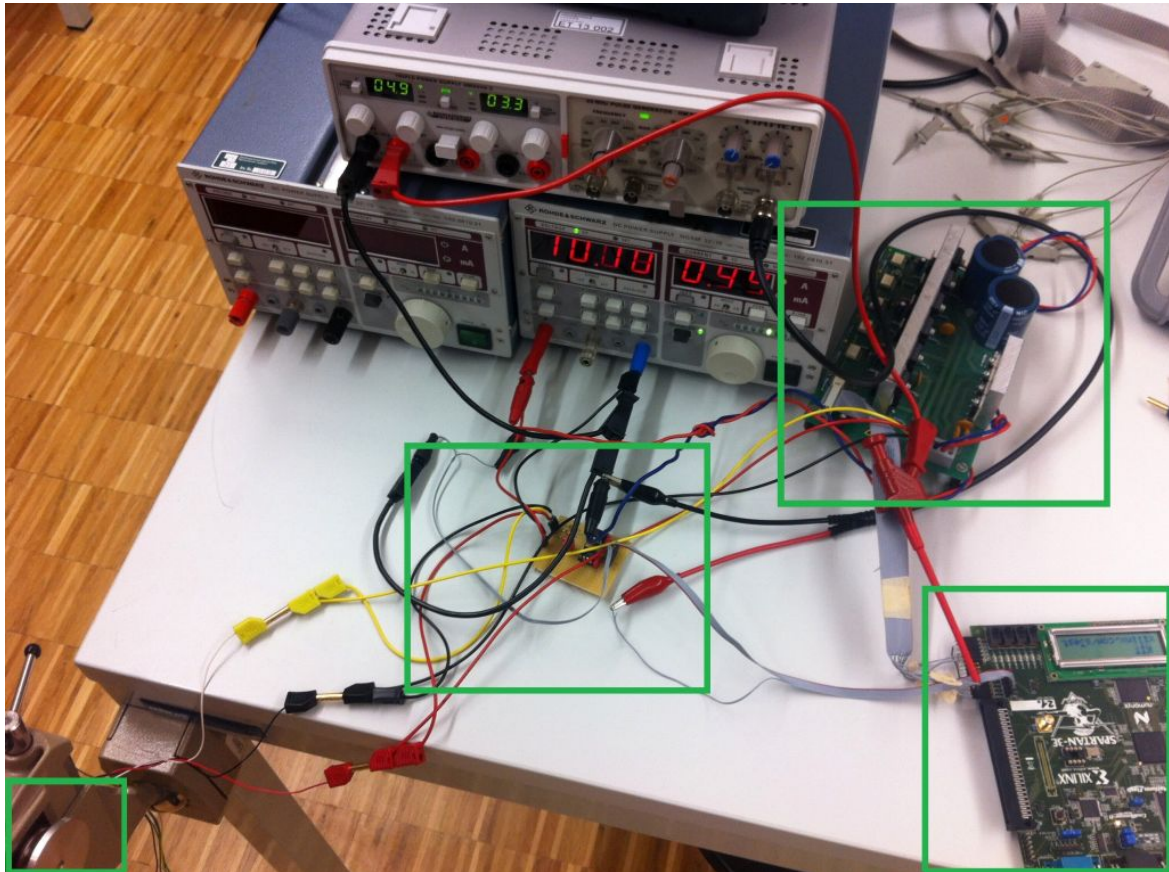


Abbildung 4: Testaufbau

### 3.2 Resultat

Mit dem beschriebenen Aufbau konnte ein BLDC-Motor erfolgreich angesteuert werden. Wie in Abbildung 4 am linken unteren Rand zu erkennen ist, ist an der Motorwelle eine Aluminiumplatte montiert. Mit dieser und einem Magneten konnte der Motor mittels einer Wirbelstrombremse belastet werden. Auf diese Weise konnte rund  $120W$  elektrische Leistung umgesetzt werden. Dabei stellte sich heraus, dass die PWM nachgeregelt werden muss, wenn eine Last getrieben wird. Weiter bietet der Aufbau, so wie er getestet wurde, keine Möglichkeit den Motor ohne äussere Manipulation zu starten.

Diese beiden Tatsachen sprechen dafür, dass das Prinzip grundsätzlich funktioniert. Für die Realisierung würde sich ein eigenes Board anbieten, auf dem ein eigener Controller die Regelung und die Zwangskommütierung beim Starten des Motors übernimmt.

## 4 Fallback

Ist der Einsatz des vorgesehenen BLDC-Treibers nicht möglich, so muss eine alternative Ansteuerung erfolgen. Eine solche kann mit einer handelsüblichen Steuerung aus dem Modellbau erfolgen. Eine solche BLDC-Steuerung ist per PWM angesteuert, wobei die im Modellbau üblichen Signale gelten, wie in der Abbildung 5 dargestellt.

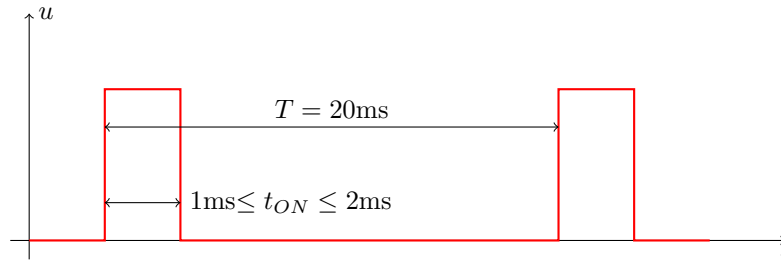


Abbildung 5: Signalverlauf eines typischen Modellbau-PWM Signals

Der Einsatz von Modellbausteuerungen für BLDC-Motoren erfordert ein Feedback der Drehzahl, da diese lediglich eine Steuerung darstellen. Die Drehzahlregelung muss über eine externe Einheit erfolgen, beispielsweise einen Mikrocontroller. Solche BLDC-Steuerungen werden im Modellbau typischerweise als *Regler* bezeichnet und sind auch für hohe Leistungen durchaus preiswert.

### 4.1 Konzeptbeschreibung

Um eine Regelung der Drehzahl des BLDC-Motors zu ermöglichen, bedarf es eines Feedbacks, welches die Drehzahl wiedergibt. Dies ist mit einem Hall-Effekt-Schalter zu realisieren. Dieser reagiert auf die Magnetfelder, welche durch Magnete auf dem Rotationskörper gegeben sind. Aus solch einem Aufbau resultiert ein Feedback, welches mit Impulsen einen Segmentdurchlauf des Rotationskörpers wiedergibt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dieses Feedback wird mittels eines Mikrocontrollers ausgewertet und regelt damit den Input der Steuerung mit

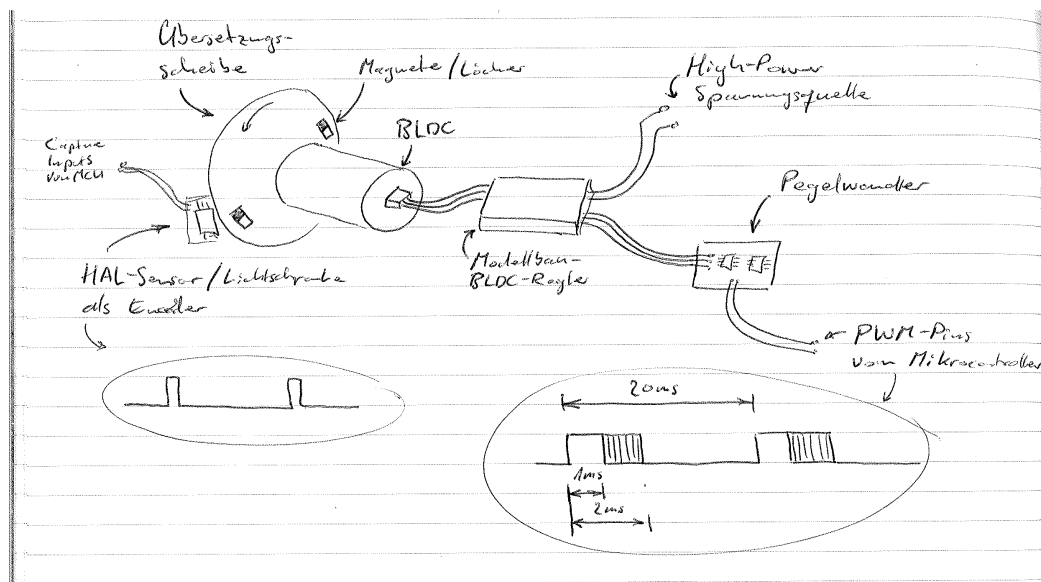


Abbildung 6: Erste Skizze des Fallback-Konzepts

dem PWM-Signal, beziehungsweise der Impulsdauer. Das Einlesen einer Flanke, die Zeitmessung bis zur nächsten Flanke und die Stellung eines PWM-Signals, sind Tasks, welche übliche Mikrocontroller direkt durch ihre Peripherie-Module ausführen können. Dies ermöglicht eine einfache Adaption in ein bestehendes Modell, denn es werden lediglich zwei Timer-IO für diesen Fallback verwendet. Je nach Mikrocontroller ist ein Pegelwandler für die PWM-Signale notwendig.



## 5 Encoder & Drehzahlgeber

Die vorgesehenen Motorfunktionen verlangen lediglich beim Brushlessmotor nach einem Feedback über die Rotation des Motors, da der Schrittmotor definiert und fein granuliert betrieben wird. Der Gleichstrommotor stellt keinerlei Ansprüche, weder an die Drehzahl, noch an die Position.

Encoder sind relativ teuer und der Einsatz des Brushlessmotors verlangt lediglich nach einem Feedback zur Rotation beziehungsweise Winkelgeschwindigkeit. Die absolute oder relative Position ist für die Anwendung nicht von Bedeutung. Somit lässt sich ein einfaches Feedback vorsehen, für die Regelung der Drehzahl mit optischen oder magnetischen Elementen. Als optisches Messinstrument kann eine Lichtschranke mit Reflexionsstreifen

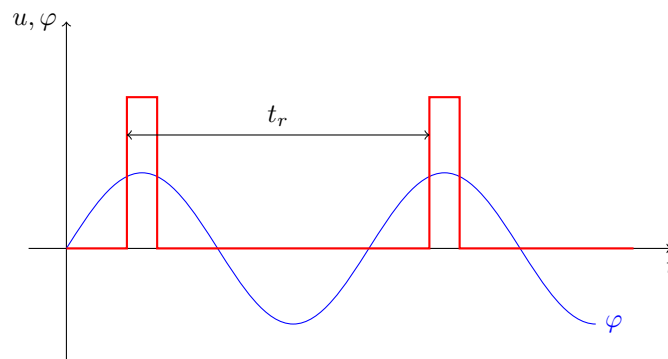


Abbildung 7: Vereinfachtes Puls-Feedback eines Hall-Effekt-Schalters

oder Löchern eingesetzt werden. Diese verlangen nur nach einer geringfügigen Modifikation des rotierenden Körpers und sind relativ günstig. Optische Messtechnik hat den Nachteil, dass Störungen relativ leicht in die Messung einfließen können, was fatale Folgen für die Regelung hat. Magnetische Messinstrumente sind gegenüber Störungen deutlich resistenter, da hierfür starke Magnetfelder benötigt werden, welche so nicht einfach auftreten. Der Einsatz einer solchen Messtechnik verlangt jedoch nach einer Modifikation der Mechanik, da Magnete in den rotierenden Körper eingebaut werden müssen. Dies birgt ein gewisses Risiko für mechanische Unwucht des Rotationskörpers.

### 5.1 Magnetischer Drehzahlgeber

Um einen eigenen magnetischen Drehzahlgeber zu erstellen wird ein sogenannter Hall-Effekt-Schalter eingesetzt. Dieser reagiert mit seinem Ausgang auf ein auftretendes Magnetfeld. Das Gegenstück zum Hall-Effekt-Schalter ist ein Magnet, welcher in das rotierende Objekt eingebaut wird. Aus mechanischen Gründen, wie etwa der Unwucht, werden typischerweise 2 Magnete oder ein Vielfaches davon in den rotierenden Körper eingebaut.

Bei der Rotation des Körpers entstehen durch das Passieren der Magnete am Hall-Effekt-Schalter Impulse. Aus diesen Impulsen lässt sich mit einer Zeitmessung direkt die Drehzahl bestimmen. Die Abbildung 7 illustriert das Prinzip anhand eines Beispiels mit einem Magneten am Rotationskörper. Ein solches Verfahren lohnt sich bei schnellen Winkelgeschwindigkeiten und ist für diesen Anwendungsfall sehr effizient. Zugehörige Hall-Effekt-Schalter lassen sich einfach montieren und sind gegen Störungen sehr robust. Ein mögliches Modell für einen Hall-Effekt-Schalter ist der AH180N. Dieser bietet einen Open-Drain Ausgang, welcher somit logische Pegel liefert (siehe Abbildung 8). Interessant ist diese Art von Drehzahl-Geber insbesondere durch ihren geringen Preis, denn solche Hall-Effekt-Schalter, wie der AH180N, befinden sich im Preissegment von unter einem Franken.

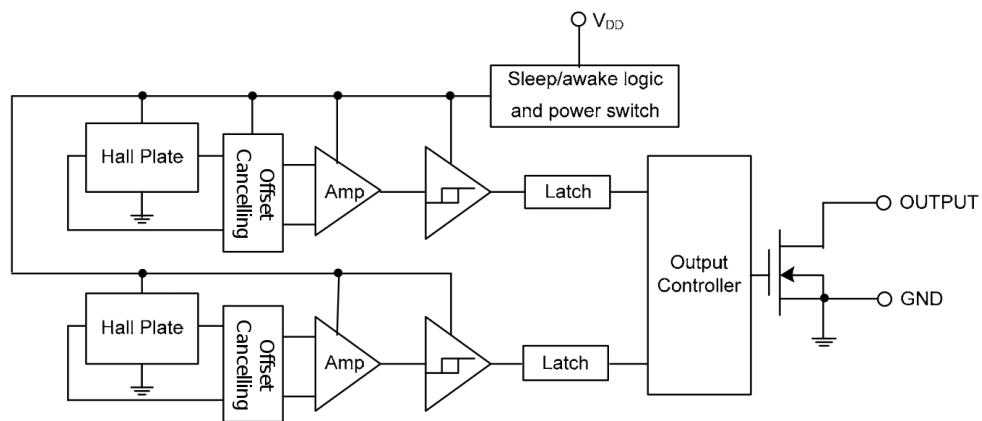


Abbildung 8: Funktionelles Blockschaltbild des Hall-Effekt-Schalters AH180N (Diodes Incorporated, 2012)

## Literatur- und Quellenverzeichnis

Atmel Corporation. (2013). *Atmel AVR443: Sensor-based Control of Three Phase Brushless DC Motor* (App. Note). 1600 Technology Drive, San Jose, CA 95110 USA: Autor. (2596C-AVR-07/2013)

Diodes Incorporated. (2012). *AH180N, MICROPOWER OMNIPOLAR HALL-EFFECT SWITCH* (Datasheet). 4949 Hedgcoxe Road, Suite 200, Plano, TX 75024 USA: Autor.

Tobias Plüss. (2014, November). Hochschule Luzern, Technik und Architektur. (In einem Gespräch)

## Abbildungsverzeichnis

1	Zeitliche Darstellung der Ansteuerung mit Hall-Sensoren . . . . .	2
2	Schema des Rekonstruktionsprinzip (Tobias Plüss, 2014) . . . . .	3
3	Schema des Brushless-Versuchsaufbaus . . . . .	5
4	Testaufbau . . . . .	6
5	Signalverlauf eines typischen Modellbau-PWM Signals . . . . .	7
6	Erste Skizze des Fallback-Konzepts . . . . .	7
7	Vereinfachtes Puls-Feedback eines Hall-Effekt-Schalters . . . . .	8
8	Funktionelles Blockschaltbild des Hall-Effekt-Schalters AH180N . . . . .	9

## Tabellenverzeichnis

1	Übersicht der PREN-ET Projektgruppen . . . . .	2
2	Wahrheitstabelle der Ansteuerung . . . . .	4
3	Schnittstelle des Brushless-Boards . . . . .	4
4	Messmittel des Versuchsaufbaus . . . . .	5