

# PREN 1, TEAM 32

Yves Studer  
Thomas Wiss  
Livio Kunz  
Niklaus Manser  
Matteo Trachsel  
Güdel Manuel  
Pascal Roth

## Dokumentation

Hochschule Luzern - Technik & Architektur  
PREN 1

Horw, Hochschule Luzern - T&A, 9. Dezember 2014

# PREN 1, TEAM 32

Yves Studer  
Dorfstrasse 28  
6264 Pfaffnau  
+41 79 705 48 88  
yves.studer@stud.hslu.ch

Thomas Wiss  
Bachhüsliweg 4a  
6042 Dietwil  
+41 79 604 93 61  
thomas.wiss@stud.hslu.ch

Livio Kunz  
Hubelmatt 7  
6206 Neuenkirch  
+41 79 811 53 03  
livio.kunz@stud.hslu.ch

Niklaus Manser  
Brunnmattstrasse 11  
6010 Kriens  
+41 77 405 58 56  
niklaus.manser@stud.hslu.ch

Matteo Trachsel  
Ogimatte 7  
3713 Reichenbach  
+41 79 511 57 88  
matteo.trachsel@stud.hslu.ch

Manuel Güdel  
Riedtalstrasse 4  
4800 Zofingen  
+41 79 774 41 40  
manuel.guedel@stud.hslu.ch

Pascal Roth  
Dorfstrasse 18  
6275 Ballwil  
+41 79 717 68 94  
pascal.roth@stud.hslu.ch

## Dokumentation

Dozent: Markus Thalmann

Hochschule Luzern - Technik & Architektur  
Interdisziplinäre Projektarbeit 2014

Horw, Hochschule Luzern - T&A, 9. Dezember 2014

## Management Summary

Blabla blabla

# Inhalt

<b>Management Summary</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Verschiedene Varianten</b>	<b>6</b>
<b>3 Lösungskonzept</b>	<b>7</b>
3.1 Funktionsbeschreibung . . . . .	7
3.2 Geräteübersicht . . . . .	8
3.2.1 Startgerät . . . . .	8
3.2.2 Smartphone als Master . . . . .	8
3.2.3 Controller . . . . .	9
3.2.4 Grundaufbau Mechanik . . . . .	10
3.2.5 Stelleinheit . . . . .	10
3.2.6 Förderband . . . . .	10
3.2.7 Schwungräder . . . . .	10
3.3 Versorgungskonzept . . . . .	10
3.4 Hardware . . . . .	10
3.5 Software-Architektur . . . . .	11
3.5.1 Systemübersicht . . . . .	11
3.5.2 Komponenten-Spezifikation . . . . .	11
3.5.3 Schnittstellen-Spezifikation . . . . .	11
3.5.4 Funktionale Sicht . . . . .	12
<b>4 Tests</b>	<b>12</b>
4.1 Zylinder-Test . . . . .	12
4.2 Schwungrad-Test . . . . .	12
4.3 Drehzahl-Test . . . . .	12
4.4 Brushless-Motor-Test . . . . .	13
4.5 Brushless Motoransteuerung . . . . .	13
4.5.1 Theorie der Ansteuerung . . . . .	13
4.5.2 Neuer Ansatz . . . . .	14
4.5.3 Aufbaubeschreibung . . . . .	15
4.5.4 Messmittel . . . . .	15
4.6 Fallback . . . . .	16
4.6.1 Konzeptbeschreibung . . . . .	17
4.7 Encoder & Drehzahlgeber . . . . .	17
4.7.1 Magnetischer Drehzahlgeber . . . . .	18
4.8 Acrylglas-Test . . . . .	19
<b>5 Projektplanung /-Management</b>	<b>20</b>
5.1 Kosten . . . . .	20
5.2 Zeit . . . . .	21
<b>6 Schlussdiskussion</b>	<b>24</b>
6.1 Rückblick . . . . .	24
6.2 Ausblick . . . . .	24

<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>25</b>
<b>A Anhang</b>	<b>I</b>
A.1 Berechnung . . . . .	I

## **Abstract**

Abstract blablabla

## 1 Einleitung

Im heutigen Arbeitsumfeld ist es unerlässlich, dass man in der Lage ist in einem Team, das meist aus mehreren Spezialisten verschiedener Fachgebiete zusammengesetzt ist, zu arbeiten. An diesem Punkt setzt die Hochschule Luzern Technik & Architektur mit dem Modul „Produktentwicklung“ (PREN) an. Das Ziel dieses Moduls ist, anhand einer Aufgabenstellung einen Entwicklungsprozess durchzuführen und in einem interdisziplinären Team eine Lösung zu erarbeiten und umzusetzen. Die Teams bestehen aus Studierenden aus den Studiengängen Elektrotechnik, Informatik und Maschinenbau. Dieses Modul ist in zwei Teile aufgeteilt und erstreckt sich über zwei Semester. Im PREN 1 wird anhand der Aufgabenstellung ein Lösungskonzept entwickelt und erarbeitet. Dieses Konzept wird im anschließenden Semester im PREN 2 umgesetzt.

Im diesem Rahmen erhalten interdisziplinäre Teams die Aufgabe, einen autonomen Ballwerfer zu erarbeiten. Das Ziel besteht darin, möglichst alle der fünf Tennisbälle, in möglichst kurzer Zeit, in einen Korb zu befördern. Als weiteres Bewertungskriterium gilt das Gewicht des Produkts, welches ab zwei Kilogramm ein stufenweiser Punkteabzug zur Folge hat. Der Korb befindet sich in einem Spielfeld - welches seitlich und in der Höhe begrenzt ist - am hinteren Ende an einer Wand und ist horizontal verschiebbar. Die endgültige Position des Korbes wird kurz vor der Abgabe des Startsignals durch einen Dozent festgelegt, und ist somit nicht bekannt. Die Übermittlung des Startsignals muss drahtlos erfolgen, nach Ausführen der Aufgabe, muss das Endsignal akustisch oder optisch erzeugt werden.

Das Ziel der Arbeit ist, die Aufgabenstellung erfolgreich in einem Apparat umzusetzen. Dabei hat sich unser Team eigene Ziele gesetzt und gewichtet. Diese sind:

1. Treffgenauigkeit
2. Geschwindigkeit
3. Gewicht

## 2 Verschiedene Varianten

Um Eckpfeiler für die zu Beginn des Projekts benötigten Recherchen zu erhalten, musste das Problem grob in seine Einzelteile zerlegt werden. Die Aufteilung erfolgte in den Bereich der Kommunikation zwischen elektronischen Geräten, Möglichkeiten zur Objekterkennung und Objektverfolgung, diverse Flugobjekte und Fahrtriebe, Arten eines Drehmechanismus und Wurfmechanismus sowie das Versorgungskonzept. Nach der Recherche folgte als nächster Schritt das Erstellen einer Funktionsskizze, um daraus die einzelnen Teilprobleme zu eruieren. Auf Grundlage der Recherche konnte zu jedem Teilproblem eine

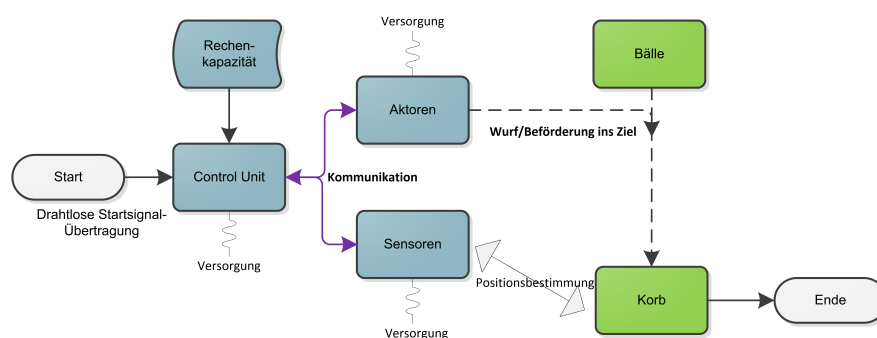


Abb. 1: Funktionsskizze

Anzahl Lösungsansätze genannt werden. In einem nächsten Schritt erfolgte die Beurteilung jedes einzelnen Lösungsansatzes mittels möglichst einheitlichen Bewertungskriterien. Jedem Lösungsansatz ist schlussendlich eine Prozentzahl zugeordnet, in wie fern die Lösung die Höchstanforderung des jeweiligen Teilproblems erfüllt. Um diese Werte sinnvoll als Entscheidungshilfe einsetzen zu können, führt man alle Teilprobleme, unterteilt in die möglichen Lösungsansätze, in einem Dokument (Grobkonzept) zusammen.

Das Grobkonzept erlaubt es grafisch verschiedene Kombinationsmöglichkeiten aufzuzeigen. Um möglichst vielen differenzierten Ansätzen Rechnung zu tragen, wurden vier Varianten während einer Diskussionsrunde festgelegt.

!!!! Achtung: wenn Grobkonzept mit Bild im Text, Variantennummern in Farben umbenennen. !!!!

Eine Variante ist die Kombination aller Lösungsansätze mit der höchsten Prozentzahl. Eine zweite Variante basiert auf der Idee, die Bälle in eine Kugel einzuschliessen, das Gerät parallel zur Spielfeldwand zu verschieben und den Kübel mit einer Smartphone-Kamera zu erkennen. Der Ballwerfer soll durch einen Akkumulator mit Energie versorgt werden. Die dritte Variante hat als Ausgangspunkt die Bälle in einem Drehkranz und befördert diese einzeln in den Korb, die restlichen Kriterien werden Kongruent zur zweiten Variante ausgeführt. In der vierten Variante befördert der Ballwerfer die Bälle aus der Startposition in bogenförmiger Kurve in den Korb. Die Ausgabe der Bälle erfolgt einzeln, die übrigen Teilprobleme verwenden wiederum, Kongruent zur zweiten Variante, eine Smartphone-Kamera zur Korberkennung und ein Akkumulator als Energieversorgung.



Die Entscheidung fiel auf die vierte Variante, diese bietet als gesamtes Konzept die erfolgversprechendste und effizienteste Lösung, bezüglich der in der Team-Charta oder Zielsetzung // Verweis definierten Ziele.

Nach der Entscheidung für eine Variante folgt die Detaillierung dieses Konzeptes in ein Feinkonzept. Die ursprünglich sieben Teilprobleme wurden in 19 Subteilprobleme aufgesplittet. Zu jedem Subteilproblemen existieren wiederum Lösungsvarianten, im Unterschied zum Grobkonzept erfolgt die Bewertung nicht mit Prozentzahlen, die Lösungsvarianten werden miteinander verglichen und nach aktuellem Wissenstand eine oder eventuell auch mehrere Lösungsvarianten ausgewählt.

### **3 Lösungskonzept**

Der Hauptteil der Arbeit umfasst die Konzeption, diverse Funktionsmuster und grundlegende Berechnungen für den autonomen Ballwerfer „Flywheel“.

#### **3.1 Funktionsbeschreibung**

Der Ballwerfer befindet sich in der Ausgangsposition in der Startfeldmitte. Nach einer drahtlosen Übermittlung des Startsignals beginnt das Smartphone auf dem Ballwerfer mit der Korberkennung. Zeitgleich werden die Schwungräder auf ihre Nenndrehzahl beschleunigt. Durch die Auswertung des fotografierten Bildes wird die Position des Korbes ermittelt und aus dieser ein Winkel für die Justierung der Abwurfseinheit des Ballwerfers berechnet. Nach der Übermittlung des Winkels an den Controller richtet der Stellantrieb die Abwurfseinheit in die gewünschte Wurfposition aus. Ein Förderband befördert anschliessend die Bälle zu den Schwungrädern, wo diese auf ihre Abwurfgeschwindigkeit beschleunigt werden. Die Bälle verlassen nacheinander das Gerät und fliegen in einer Wurfparabel direkt in den Korb. Sobald sich alle Bälle im Korb befinden (zeitabhängig), wird das akustische Endsignal auf dem Smartphone ausgegeben. Die Grafik stellt den schematischen Ablauf der oben erwähnten Funktionen dar. Einige Teilschritte des Ablaufes, wie zum Beispiel das Beschleunigen der Schwungräder werden je nach zeitlicher Dauer oder möglich auftretenden Störungen (in Form von Vibrationen) verschoben.

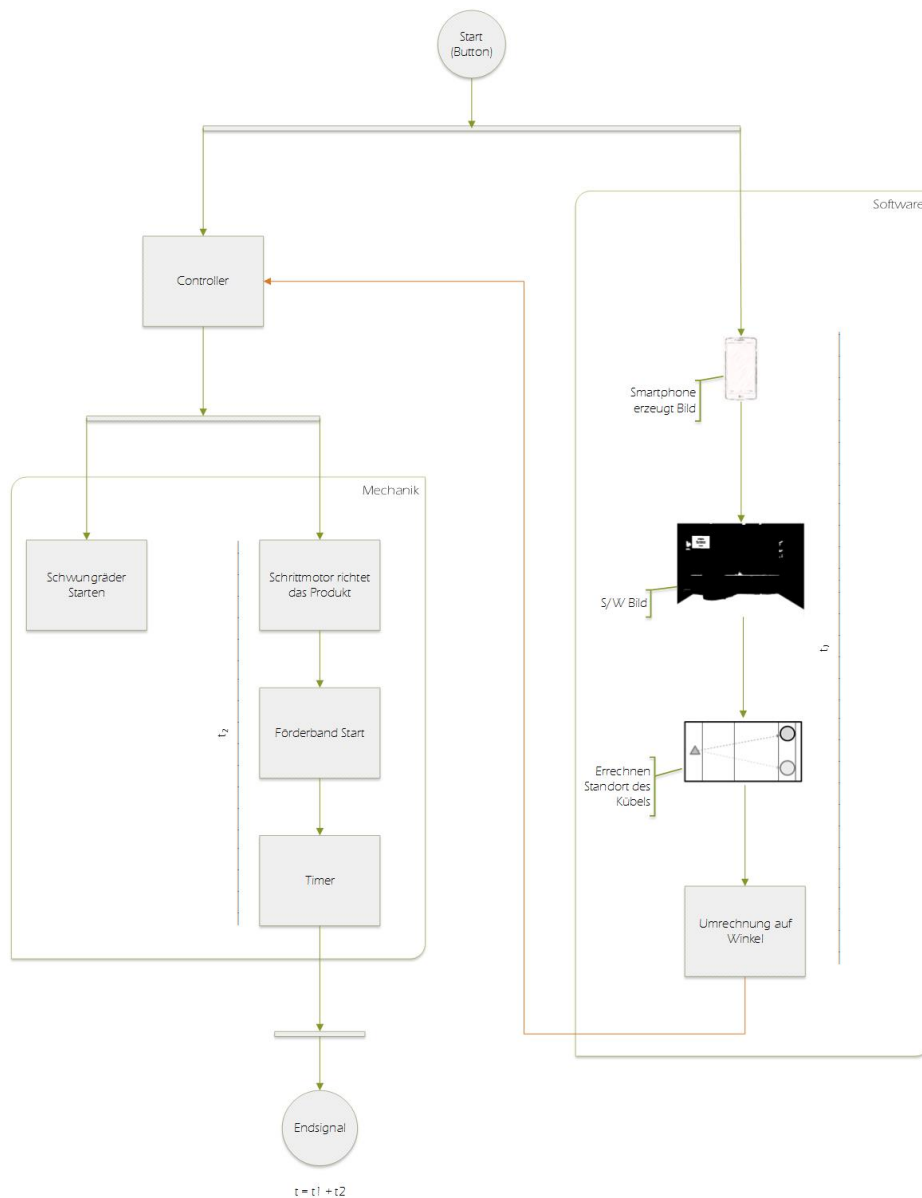


Abb. 2: Funktionsskizze

## 3.2 Geräteübersicht

### 3.2.1 Startgerät

### 3.2.2 Smartphone als Master

**Korberkennung** Im nachfolgenden Ablaufdiagramm ist die Funktionsweise des Systems zur Korberkennung dargestellt. Erwähnenswert hierbei ist vor allem, dass zur Identifikation des Korbes im Bild kein gegebenes Framework wie etwa OpenCV verwendet wird.

Für die Bestimmung der Position des Korbes wurde ein Algorithmus entwickelt und in Java implementiert. Dieser bedient sich des Umstandes, dass der Korb deutlich dunkler als der Hintergrund ist. Um mit dem von der Kamera zuvor aufgenommenen Bild arbeiten zu können, müssen die Ränder abgeschnitten werden (vor allem links und rechts geht der Bildbereich über das Spielfeld hinaus, was das Resultat verfälschen könnte). Als zweiter Schritt wird über sämtliche Pixel des Bildes iteriert. Dabei wird für jedes Pixel die Helligkeit bestimmt anhand einer vordefinierten Schwelle entschieden, ob es zum Hintergrund (heller) oder zum Korb (dunkel) gehört. Anschliessend wird der Schwerpunkt der dunklen Pixel bestimmt und anhand des gefundenen Schwerpunktes entweder von links oder von rechts her in einem bestimmten horizontalen Bereich (der Korb befindet sich immer auf der selben Höhe) über die Pixel iteriert um dabei eine feste Kontur zu finden. Diese feste Kontur wird dabei definiert durch eine bestimmte Anzahl weisse Pixel, auf welche wiederum eine Menge schwarzer Pixel folgen muss. Da dieser Prozess immer in derselben horizontalen Ebene stattfindet kann durch eine abschliessende Berechnung der Mittelpunkt des Korbes und der damit verbundene Winkel des Ballwerfers zum Korb trigonometrisch bestimmt werden.

### 3.2.3 Controller

Die Controller-Hardware steuert die Motoren der Ballzuführung, der Stepper für die Ausrichtung der Apparatur und die Motoren zur Beschleunigung der Bälle. Sobald der Controller das Startsignal vom Master erhält, wird dieser den Motor zur Ballbeschleunigung aktivieren und hoch drehen lassen. Weiter erhält der Controller vom Master die Angabe, in welchem Winkel sich der Korb befindet. Anhand dieser wird die benötigten Schritte berechnen und die resultierenden Befehle an die Motorsteuerung absetzen. Sobald die Apparatur die richtige Ausrichtung eingenommen hat, wird die Ballzuführung aktiviert, um die Bälle in den Korb zu befördern. Mittels eines kleinen Sensors werden die Bälle gezählt und wenn der letzte Ball abgefeuert wurde, wird dies dem Master signalisiert.

Die Abbildung 3 zeigt auf, wie die Controller-Hardware aufgebaut sein wird. Die BLDC- und Stepper-Ansteuerung wird auf separaten Boards realisiert, wobei die Stepper-Hardware durch die PREN-ET entwickelt und in dieser Gruppe eingesetzt wird. Als Schnittstelle zwischen den Boards und dem Controller wird SPI eingesetzt, da ein Hauptchip der Stepper-Ansteuerung nur über SPI angesprochen werden kann. Die Kommunikation mit dem Master wird über UART stattfinden, das über den FTDI-Chip auf USB emuliert wird. Die Ansteuerung des DC-Motors wird mittels PWM und über einen Transistor realisiert. Die Abbildung 4 zeigt, wie Ansteuerung des DC-Motors umgesetzt werden wird.

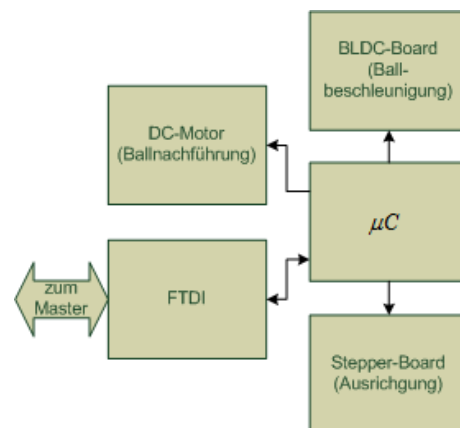


Abb. 3: Blockschaltbild der Controller-Hardware

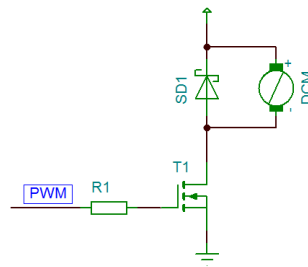


Abb. 4: Schema der DC-Motoransteuerung

### 3.2.4 Grundaufbau Mechanik

### 3.2.5 Stelleinheit

### 3.2.6 Förderband

### 3.2.7 Schwungräder

## 3.3 Versorgungskonzept

Das Smartphone, die Controller-Hardware und die Motoren benötigen jeweils bestimmte Spannungen, die erzeugt werden müssen. Diese werden aus einer Hauptspannung generiert. Je nach Standfestigkeit der Mechanik wird die Umsetzung mittels eines externen Netzteils oder mit Akkumulatoren umgesetzt. Sollte die Standfestigkeit ausreichend sein, wo wird die Hauptversorgung mittels eines externen Netzteils umgesetzt. Falls dies nicht der Fall sein sollte, wird die Spannungsversorgung mittels Akkumulatoren umgesetzt. Dies bietet den Vorteil, dass das Gewicht die Standfestigkeit unterstützt und zum Anderen können die Akkumulatoren während dem Wägen entfernt werden.

## 3.4 Hardware

Die Elektrotechnik-Studierenden aus mehreren Gruppen haben sich zusammengeschlossen um gemeinsame Probleme anzugehen. Dabei handelt es sich um die Ansteuerung, die benötigte Hard- und Software um Motoren anzusteuern und gegebenenfalls zu regeln. In diesem Zusammenschluss wurde 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 Team übergreifende Arbeiten im Rahmen der „PREN“ erlernt und geübt werden. Somit wird die Idee der Interdisziplinarität im erweiterten Sinn Rechnung getragen. Die Gruppen und deren Mitglieder sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

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

Tab. 1: Übersicht der PREN-ET Projektgruppen

## 3.5 Software-Architektur

### 3.5.1 Systemübersicht

Zur Übersicht über den erarbeiteten Lösungsansatz bietet sich die Darstellung durch ein Kontextdiagramm an. Darin zu erkennen sind die fünf Hauptkomponenten DesktopViewer, CoreApp, Detector, MediaCommunication und ControllerCommunication. Weiter enthält das System mindestens drei Schnittstellen, einerseits die Bluetooth Schnittstelle zwischen Startgerät und Ballwerfer, des Weiteren die muss die Kommunikation mit Kamera und Controller gewährleistet sein. Die Schnittstelle zur Kamera sollte, sofern wie geplant ein Smartphone verwendet wird, bereits durch das entsprechende Betriebssystem gegeben sein, weshalb in diesem Dokument nicht weiter auf diese Schnittstelle eingegangen wird.

### 3.5.2 Komponenten-Spezifikation

**DesktopViewer** Über die Viewer-Komponente wird die Konfiguration der Applikation, sowie die Auslösung des Startsignals realisiert. Weiter soll es zu Testzwecken möglich sein, die Resultate der Korberkennung ebenfalls über den DesktopViewer zu betrachten.

**CoreApp** Als Kernbestandteil der Smartphone App umfasst die CoreApp-Komponente auf der einen Seite die Kommunikation mit der Viewer-Komponente, auf der anderen Seite wird hier der Ablauf der Kernfunktionen zur Objekterkennung koordiniert.

**Detector** Dem Detektor muss ein Bild übergeben werden, welches von diesem darauf ausgewertet wird. Dabei sucht der Detektor nach einem dunkeln Objekt im Bild und ist in der Lage, anhand der ermittelten Position den Winkel des Ballwerfers zum Korb bestimmen kann.

**MediaCommunication** In dieser Komponente ist die Kommunikation mit der Kamera des Smartphones umgesetzt. Hauptsächlich geht es darum, ein Foto aufzunehmen, welches wiederum dem Detektor zur Winkelbestimmung übergeben wird.

**ControllerCommunication** Wie der Name bereits sagt wird an dieser Stelle die Kommunikation mit dem FTDI-Controller realisiert. Der vom Detektor berechnete Winkel wird hier übertragen um anschliessend Mechanisch umgesetzt zu werden und den Ballwerfer aufs Ziel auszurichten.

### 3.5.3 Schnittstellen-Spezifikation

Als weiteres Hauptelement des entworfenen Systems werden im nachfolgenden Abschnitt die in der Grafik erkennbaren Schnittstellen (Bluetooth und Controller) deklariert.

**Bluetooth** Die Kommunikation vom Startgerät (Notebook) zum Smartphone (Android Device auf dem Ballwerfer) für die Übermittlung des Startsignals findet mit Bluetooth statt. Die Bluetooth-Komponente auf dem Notebook startet nach Aktivierung ein ‚inquiry‘ (Erkundung) nach verfügbaren Bluetooth-Geräten. Anschliessend wird eine Service-Anfrage (RFCOMM, eine COM-Schnittstelle) an ein gewünschtes Bluetooth-Gerät gestartet, bei positiver Rückmeldung werden die zwei Geräte gepaart. Eine uni- oder bidirektionale Kommunikation zwischen den Geräten kann nun jederzeit aufgebaut werden. Das eigentliche Startsignal wird ein primitiver Datentyp sein.

**Controller** Die Verbindung vom Android Smartphone zum FTDI Controller wird mit USB realisiert. Das Smartphone kommuniziert über den bereitgestellten Treiber von FTDI mit dem Controller, die verwendete Schnittstelle ist UART. Die Kommunikation ist soll bidirektional sein, kann also sowohl empfangen als auch senden. Der Vorteil einer solchen Verbindung ist das sie als COM-Schnittstelle angesteuert werden kann was relativ einfach zu implementieren ist. Die Verbindung ist ausfallsicher und einfach aufrechtzuerhalten.

#### 3.5.4 Funktionale Sicht

## 4 Tests

### 4.1 Zylinder-Test

### 4.2 Schwungrad-Test

### 4.3 Drehzahl-Test

## 4.4 Brushless-Motor-Test

## 4.5 Brushless Motoransteuerung

Dieses Kapitel ist eine Zusammenarbeit der Gruppen T27 und T32.

### 4.5.1 Theorie der Ansteuerung

Brushless-Motoren sind Synchron-Drehstrom-Motoren. Das heisst, sie werden mittels eines kontinuierlichen Drehfeldes in Bewegung gesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Läufer dem Drehfeld synchron folgen kann, daher der Name. Falls der Läufer dem Drehfeld aus irgend einem Grund nicht folgen kann, so wird keine Spannung vom Rotor in die Statorwicklungen induziert, die der Erregerspannung entgegenwirkt. Daraus folgt, dass ein immenser Strom fliesst, der nur von der Wicklungsimpedanz des Motors begrenzt wird.

Es gibt hauptsächlich drei Methoden das Drehfeld zu generieren und zu regeln. Die eine und einfache Methode ist die Zwangs-kommutierung. Dabei wird ein Drehfeld erzeugt und dem Motor aufgezwungen. Der Läufer muss dem Drehfeld folgen können. Dabei ist ein maximaler Winkel zwischen dem Feld und dem Läufer von  $90^\circ$  zulässig. Wird dieser Winkel überschritten, wird der Motor zum Stillstand kommen mit den erwähnten Folgen.

Die zweite Methode zur Regelung ist mittels drei Hallsensoren, die im Motor integriert sind. Dies macht den Motor aufwändiger und dementsprechend teurer. Die Regelung mit Hallsensoren ist verhältnismässig einfach, da je nach den Signalen die einzelnen Spulen direkt angesteuert werden können. Der Zusammenhang zwischen der Ansteuerung und den Hall-Sensorsignalen ist in Abbildung 5 ersichtlich. Dabei stehen  $U$ ,  $V$  und  $W$  für die Phasenströme und  $H_1$ ,  $H_2$  und  $H_3$  für die entsprechenden Signale der Hallsensoren. Dieser Darstellung ist zu entnehmen, dass jedesmal, wenn ein Hallsensor eine Änderung anzeigt, ein Nulldurchgang im entsprechenden Stromverlauf stattgefunden hat. Dies ist der Zeitpunkt, zu dem die Kommutierung durchgeführt werden muss.

Die dritte Möglichkeit ist, indem man einen virtuellen Sternpunkt bildet und mittels Komparatoren die Sternpunktdurchgänge detektiert. In der Controller-Logik muss der Zeitunterschied der Kommutierung bis zum durchschreiten des Sternpunktes gemessen werden. Diese Zeit muss nochmal abgewartet werden bevor die Kommutierung durchgeführt werden.

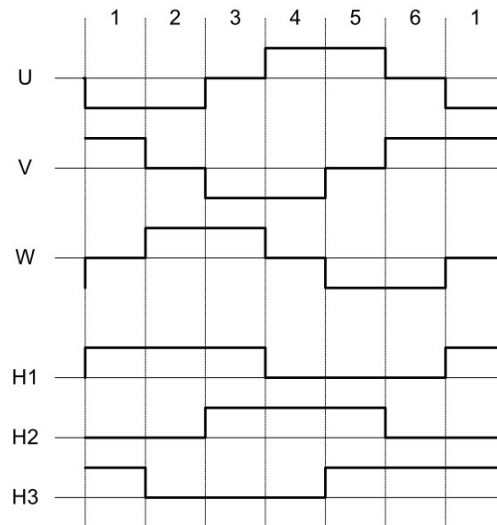


Abb. 5: Zeitliche Darstellung der Ansteuerung mit Hall-Sensoren ("Atmel AVR443: Sensor-based Control of Three Phase Brushless DC Motor", 2013)

#### 4.5.2 Neuer Ansatz

In einem modifizierten Ansatz wird versucht, ob die Hall-Sensorsignale aus den Ansteuerungen des Motors gewonnen werden können. Hierzu wird eine Schaltung[h!] pro Phase benötigt, um die Nulldurchgänge beim virtuellen Sternpunkt detektieren zu können. Die Abbildung 6 zeigt die Schaltung, mit der dies realisiert werden kann. Mit dem Flip-Flop kann die PWM aus dem Sensorsignal unterdrückt werden. Diese rekonstruierten Hall-Sensor-Signale können direkt logischen verknüpft und genutzt werden, um den Motor mittels einer Dreiphasen-H-Brücke anzusteuern (Tobias Plüss, 2014). Anhand des zeitlichen Verlaufs, der aus Abbildung 5 zu entnehmen ist, und der Ansteuerung einer H-Brücke ergibt sich die Wahrheitstabelle, die in Abbildung 7 abgebildet ist. Das Signal  $U_h$  symbolisiert den Highside-Transistor der Phase U auf der H-Brücke und die  $U_l$  entspricht dem Lowside-Transistor.

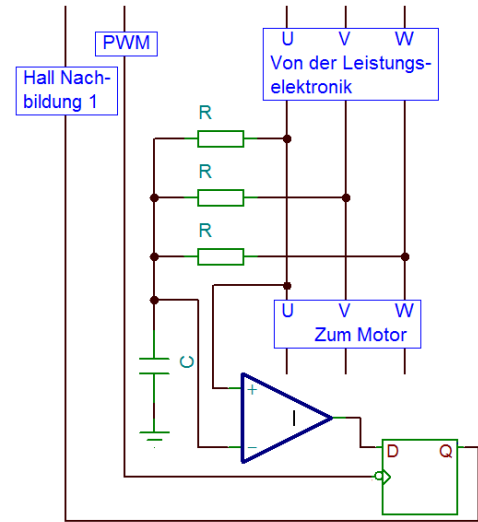


Abb. 6: Schema des Rekonstruktionsprinzips (Tobias Plüss, 2014)

$H_1$	$H_2$	$H_3$	$U_h$	$U_l$	$V_h$	$V_l$	$W_h$	$W_l$	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

Abb. 7: Wahrheitstabelle der Ansteuerung

Die Tabelle in Abbildung 7 kann pro Signal zu folgenden logischen Verknüpfung vereinfacht werden

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



### 4.5.3 Aufbaubeschreibung

Dieses Kapitel ist eine Zusammenarbeit der Gruppen T27 und T32.

Das Schema des gesamten Aufbaus des Tests ist in der Abbildung 8 abgebildet. Die 3-Phasen H-Brücke oben im grünen Rechteck wird direkt vom FPGA angesteuert. Die Hardware dieser Brücke ermöglicht eine voll galvanisch getrennte Ansteuerung mit 3.3V Logikpegeln. Diese Brücke wurde zur Verfügung gestellt und verwendet. Die Rekonstruktion der Hallensoren-Signale findet im rot markierten Teil des Aufbaus statt. Dieser Part wurde auf einer Laborplatte aufgebaut und zusammen gelötet. Die so generierten Signale  $U_{Hallensensor}$ ,  $V_{Hallensensor}$ ,  $W_{Hallensensor}$  werden einem FPGA geliefert. Anhand dieser Signale steuert das FPGA die H-Brücken-Transistoren mittels der Signale  $U_h$ ,  $U_l$ ,  $V_h$ ,  $V_l$ ,  $W_h$ ,  $W_l$ . Die im FPGA enthaltene Konfiguration sind simple AND-Verknüpfungen, die die anliegenden Signale sehr schnell und effizient verarbeiten. Auf diese Weise ist es möglich, den Motor sehr schnell anzusteuern. In der Abbildung 9 ist der gesamte Aufbau abgebildet.

Man beachte die markierten Felder. Am unteren linken Rand ist der Motor befestigt. In der Mitte des Bildes ist die Hardware, mit welcher die Hallensoren Signale rekonstruiert werden. Die generierten Signale werden dem FPGA in der unteren linken Ecke zugeführt. Diese Signale werden logisch verknüpft und danach werden die sechs Signale generiert um die H-Brücke in der oberen rechten Hälfte anzusteuern. Diese wiederum treiben den Motor an. Die im FPGA enthaltene Logik basiert auf der Wahrheitstabelle, die in Abbildung 7 abgebildet ist.

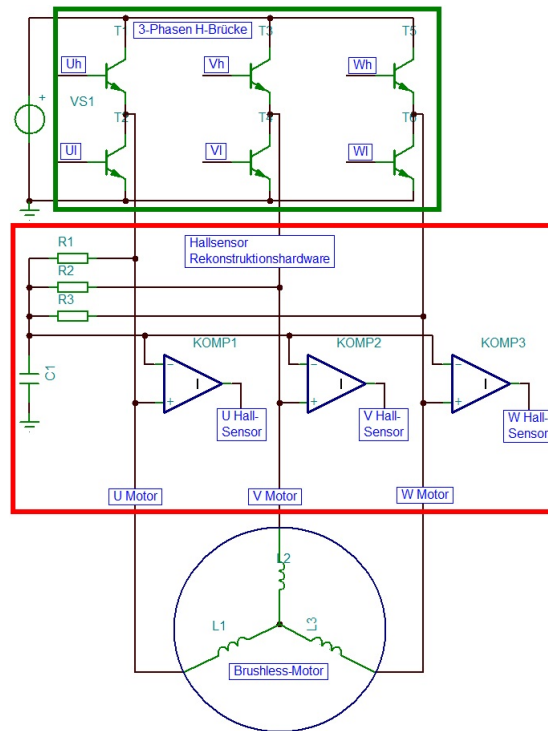


Abb. 8: Schema des Brushless-Versuchsaufbaus

### 4.5.4 Messmittel

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

Tab. 2: Messmittel des Versuchsaufbaus

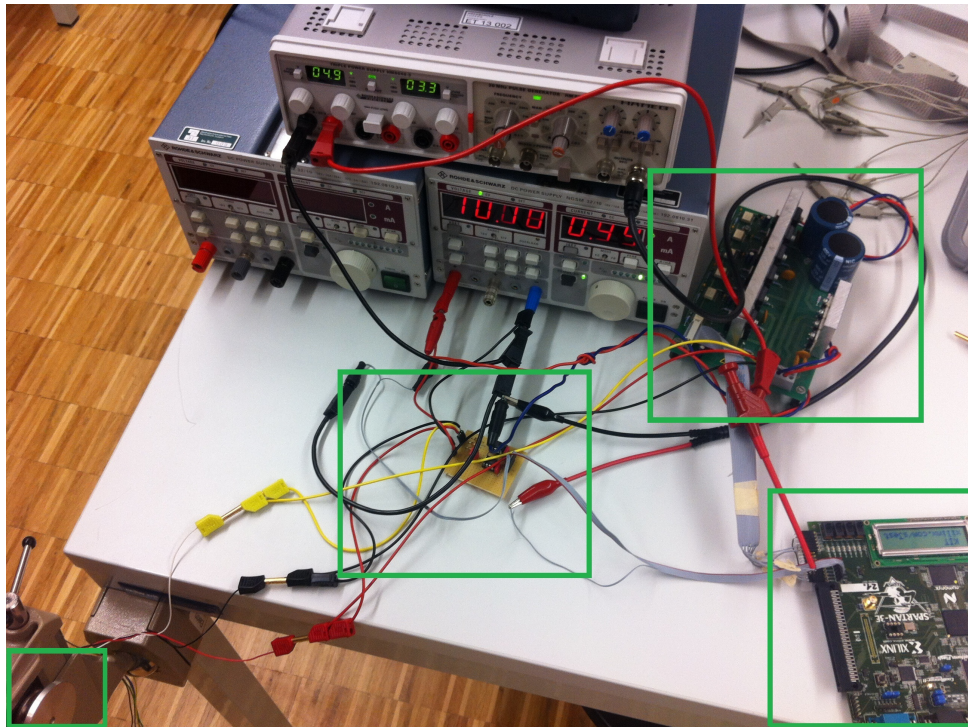


Abb. 9: Testaufbau

#### 4.6 Fallback

Ist der Einsatz des vorgesehenen BLDC-Treibers nicht möglich, so muss eine alternative Ansteuerung erfolgen. Eine solche kann mittels handelsüblicher Steuerungen aus dem Modellbau erfolgen. Eine solche BLDC-Steuerung ist per PWM angesteuert, wobei die im Modellbau üblichen Signale gelten, wie in der Abbildung 10 dargestellt.

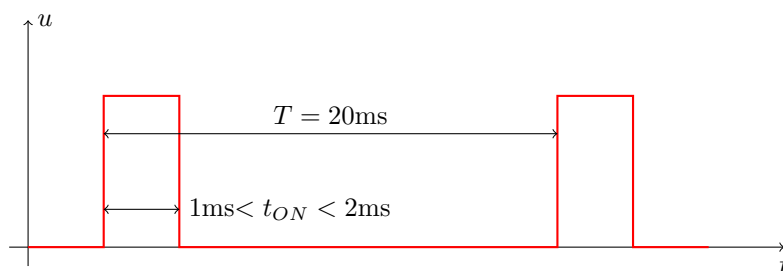


Abb. 10: Signalverlauf eines typischen Modellbau-PWM Signals

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, wie etwa einen Mikrocontroller. Solche BLDC-Steuerungen werden im Modellbau typisch als *Regler* vertrieben und sind auch für hohe Leistungen relativ günstig.

#### 4.6.1 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 mittels Impulsen einen Segmentdurchlauf des Rotationskörpers wiedergibt wie in der Abbildung 11 dargestellt. Dieses Feedback wird mittels eines Mikrocontrollers ausgewertet und regelt damit

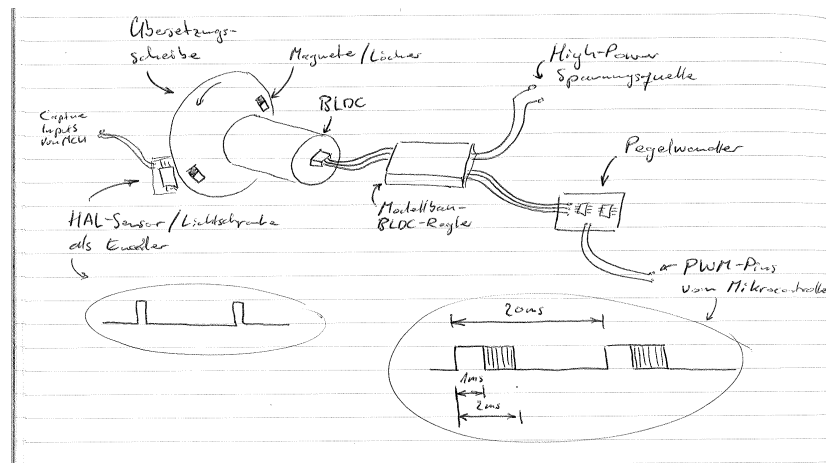


Abb. 11: Erste Skizze des Fallback-Konzepts

den Input der Steuerung mittels des PWM-Signals bzw. 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 dieses Fallback verwendet. Je nach Mikrocontroller ist ein Pegelwandler notwendig für die PWM-Signale.

#### 4.7 Encoder & Drehzahlgeber

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

Encoder sind relativ teuer und der Einsatz des Brushlessmotors verlangt lediglich nach einem Feedback zur Rotation bzw. 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 mittels optischer oder magnetischer Elemente. Als optisches Messinstrument kann eine Lichtschranke mit Reflexionsstreifen 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 solcher Messtechnik verlangt jedoch nach einer Modifikation der Mechanik,

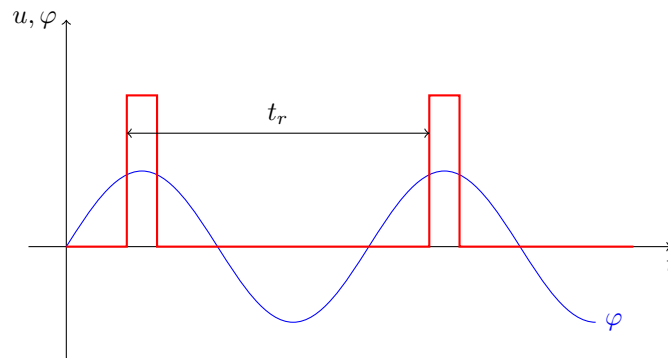


Abb. 12: Vereinfachtes Puls-Feedback eines Hall-Effekt-Schalters

da Magnete in den rotierenden Körper eingebaut werden müssen. Dies birgt ein gewisses Risiko für mechanische Unwucht des Rotationskörpers.

#### 4.7.1 Magnetischer Drehzahlgeber

Um einen eigenen magnetischen Drehzahlgeber zu erstellen wird ein sog. 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 typisch 2 Magnete oder ein Vielfaches davon in den rotierenden Körper eingebaut.

Bei der Rotation des Körpers entstehen durch das Vorbeigehen der Magnete am Hall-Effekt-Schalter Impulse. Aus diesen Impulsen lässt sich mittels einer Zeitmessung direkt die Drehzahl bestimmen. Die Abbildung 12 illustriert das Prinzip anhand eines Beispiels mit einem Magneten am Rotationskörper. Ein solches Verfahren lohnt sich bei schnellen

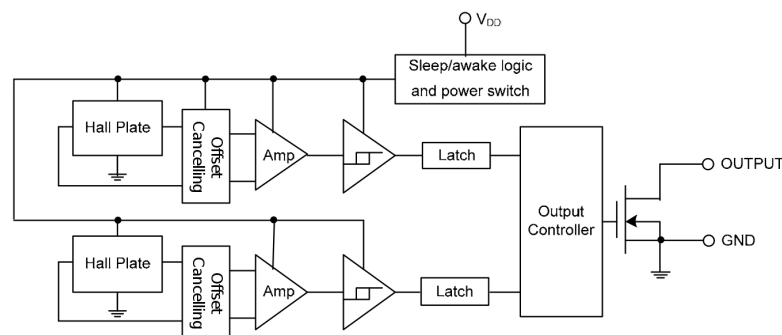


Abb. 13: Funktionelles Blockschaubild des Hall-Effekt-Schalters AH180N

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 13). Interessant ist diese Art von Drehzahl-Geber insbesondere durch ihren geringen Preis, denn solche Hall-Effekt-Schalter wie der AH180N befinden sich im Preissegment  $< 1$  CHF.

## 4.8 Acrylglas-Test

## 5 Projektplanung /-Management

Das Projektteam 32 besteht aus sieben Personen welche sich auf folgende Studienrichtungen aufteilen: Drei Personen Maschinentechnik, drei Personen Informatik und eine Person Elektrotechnik. Die Studienrichtungen sind sogleich die jeweiligen Verantwortungen. In den Bereichen mit mehreren Projektmitgliedern wird die Verantwortung für Teilaufgaben jeweils situativ verteilt. Für allgemeine Projektarbeiten ist jeweils die Hauptverantwortliche Person bestimmt. Diese kann Teilaufgaben definieren und sie an andere Teammitglieder zur Bearbeitung delegieren. Die Hierarchie im Team ist bewusst flach und ohne eigentlichen Projektleiter gehalten. Entscheide werden im Plenum diskutiert und gefällt. Die Leitung oder Führung einer Besprechung obliegt der oder den Verantwortlichen des jeweiligen Themas. Mit dieser Teamstruktur ist gewährleistet, dass alle Mitglieder Verantwortung tragen können und müssen. Dies soll Motivation und Eigeninitiative fördern.

### 5.1 Kosten

## 5.2 Zeit

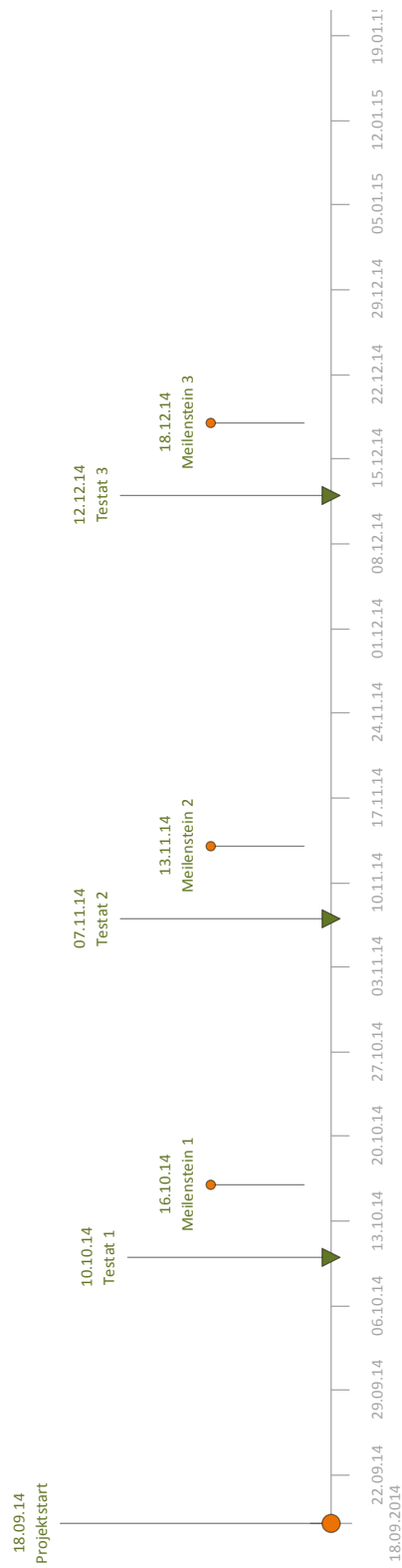
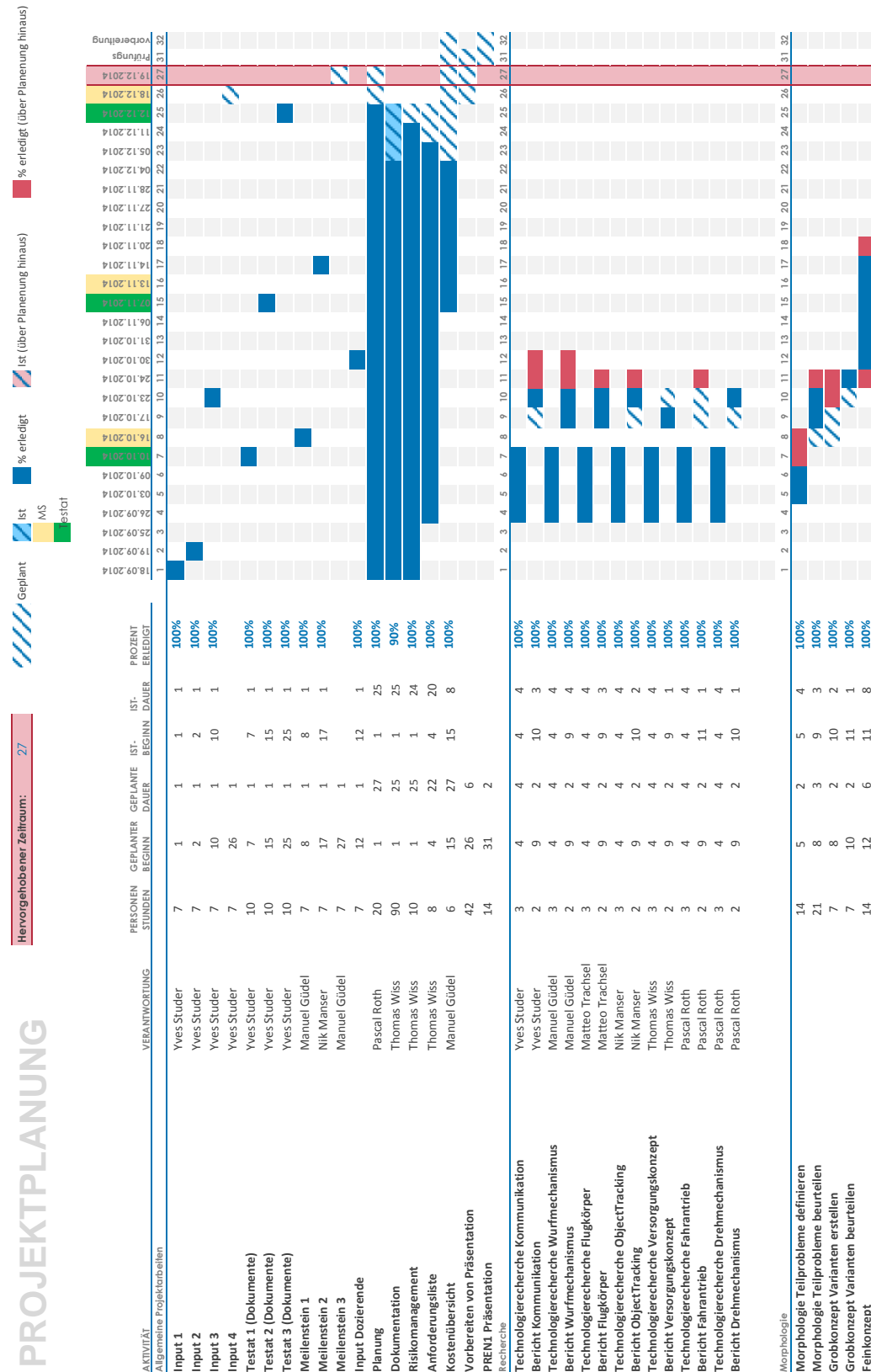
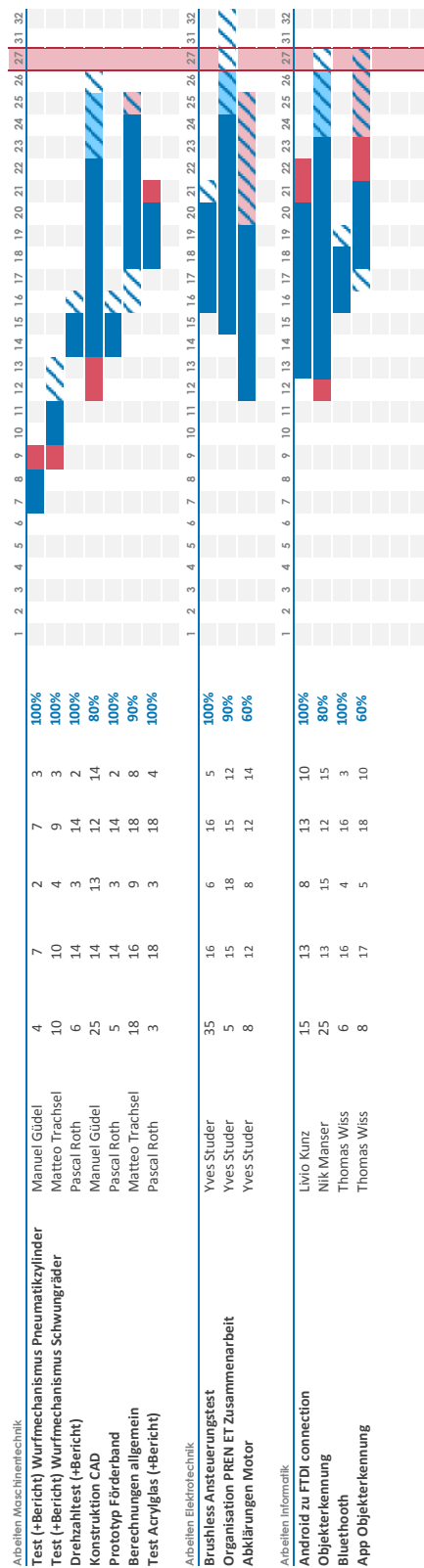


Abb. 14: Zeitplan des Projekts







## 6 Schlusdiskussion

Die Zusammenarbeit in der Gruppe war ausgezeichnet. Nach einer kurzen Einschwingphase konnte direkt mit der Erarbeitung eines Konzept begonnen werden.

### 6.1 Rückblick

Eine wichtige Erkenntnis wurde im PREN1-Modul bezüglich kollaboratives Arbeiten gewonnen. Der Austausch aller Dateien fand via Dropbox statt. Dieses Modell zeigte jedoch mit der Zeit schwächen, vor allem bezüglich gemeinsames editieren eines Dokuments. Es wäre daher eine Diskussion wert, die Dokumente welche von mehreren Teammitgliedern bearbeitet werden, auf eine Plattform für kollaboratives Arbeiten (z.B. Google Drive) auszulagern und die Dropbox als reinen Dateiaustausch beizubehalten.

Im PREN2-Modul müssen wir vermehrt und verbessert zu Beginn einer Meilensteinphase absprechen oder abklären, welche Dokumente mit welchem spezifischen Inhalt erstellt sein müssen. Jedesmal mussten wir vor einem Meilenstein die Dokumente überarbeiten oder gar neu erstellen, weil sich zeigte, dass der Inhalt nicht dem Geforderten entsprach.

Wir haben bewusst eine flache Teamhierarchie gewählt und managen unser Projekt so, das jedes Teammitglied die Verantwortung für einen festgelegten Bereich erhält. Generelle Diskussionen zu Projektmanagement-Themen werden im Plenum besprochen und allfällige Entscheide gegebenenfalls gefällt. Bis zum jetzigen Zeitpunkt funktioniert diese Art der Zusammenarbeit ohne grosse Probleme und Reiberein.

Es hat sich gezeigt, dass man in Diskussionen rasch vom eigentlichen Thema abweicht oder nicht mehr zielgerichtet diskutiert. Alle Teammitglieder sollten vermehrt darauf bedacht sein, themenbezogen und effizient an einer Lösung zu diskutieren.

### 6.2 Ausblick

## Abbildungsverzeichnis

1	Funktionsskizze . . . . .	6
2	Funktionsskizze . . . . .	8
3	Blockschaltbild der Controller-Hardware . . . . .	9
4	Schema der DC-Motoransteuerung . . . . .	10
5	Zeitliche Darstellung der Ansteuerung mit Hall-Sensoren . . . . .	13
6	Schema des Rekonstruktionsprinzips . . . . .	14
7	Wahrheitstabelle der Ansteuerung . . . . .	14
8	Schema des Brushless-Versuchsaufbaus . . . . .	15
9	Testaufbau . . . . .	16
10	Signalverlauf eines typischen Modellbau-PWM Signals . . . . .	16
11	Erste Skizze des Fallback-Konzepts . . . . .	17
12	Vereinfachtes Puls-Feedback eines Hall-Effekt-Schalters . . . . .	18
13	Funktionelles Blockschaltbild des Hall-Effekt-Schalters AH180N . . . . .	18
14	Zeitplan des Projekts . . . . .	21

## Literatur- und Quellenverzeichnis

Atmel AVR443: Sensor-based Control of Three Phase Brushless DC Motor  
[Software-Handbuch]. (2013). Atmel Corporation, 1600 Technology Drive, San  
Jose, CA 95110 USA.

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

## **A Anhang**

### **A.1 Berechnung**