

# DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

"Master of Science in Engineering"

## Errichtung einer Satellitenfunkanlage mit automatischer Antennennachführung

ausgeführt von Peter Witschel, BSc.  
A-1220 Wien, Biberhaufenweg 100/140

1. Begutachter: Dipl.Ing. Michael Fischer
2. Begutachter: Dipl.Ing. Peter Goldmann

Wien, 20.10.2010



Ausgeführt an der FH Technikum Wien  
Studiengang Master Mechatronik / Robotik

# Kurzfassung

Heute werden oft Satelliten für wissenschaftliche Arbeiten verwendet. Diese Forschung ist aber sehr teuer, weshalb sie finanziell abgesicherten Institutionen vorbehalten ist. Neben der kostenintensiven Entwicklung des Satelliten, ist es auch notwendig eine Menge finanzieller Mittel in den Aufbau einer Bodenstation, mit all ihrer High-End-Komponenten zu investieren. Fast jede wissenschaftliche Bodenstation benötigt dabei ein automatisches Antennennachführungssystem. Der Grund hierfür ist, dass viele Satelliten, im Bezug auf die Bodenstation, keinen festen Punkt am Himmel haben, sondern die Erde mehrmals am Tag umrunden. Mit dieser Ausrüstung ist es nun möglich, dass die Antennenanlage der Umlaufbahn des Satelliten folgen kann.

Auch am Dach des Institutes für Nachrichten- und Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Wien befindet sich eine Satelliten-Bodenstation mit nachführbarer Antennenanlage. Die Antenne ist dabei über Rotoren in zwei Achsen vollautomatisch drehbar. Der Hauptteil dieser Arbeit stellt die Entwicklung eines flexiblen und preiswerten Motortreibers für die Antennenrotoren dar. Dabei werden detaillierte Informationen über das Layout, die Funktion und die Software des Motortreibers gegeben. Da es ein weiterführendes Projekt ist, gab es auch die Notwendigkeit, bestehende Geräte zu modifizieren und zu erweitern. Nach der Fertigstellung des Systems haben Tests gezeigt, dass alle Entwicklungsziele erreicht wurden.

Weiters ist die Antennenanlage auf Sicherheitsrisiken analysiert worden und es wurden Konzepte für ein Sicherheitssystem entwickelt. Es verhindern, dass Menschen, Antennenanlage oder Rotoren durch Fehlbedingung, technisches Gebrechen, große Windlasten oder Blitzschlag gefährdet werden. Für dieses Sicherheitssystem sind bereits Überwachungseinrichtungen und ein Not-Aus-System implementiert worden und Konzepte für Wind- und Blitzschutz angegeben.

**Schlagwörter:** automatische Antennennachführung, Motortreiber, Geschwindigkeitsregler, Positionsmessung, Wind- und Blitzschutz für Antennen

# Abstract

Today satellites are often used for scientific work, but this research is so expensive that it is only reserved to financially strong institutions. Next to the developing of the expensive satellite it is also necessary to invest a lot of money in the setup of a ground station with all of its high end components. Almost every scientific ground station has to be equipped with an automatic satellite tracking solution because most scientific satellites are, with respect to the ground station, not fixed in the sky but circle the earth several times a day. With this equipment it is possible that the antenna system can follow the satellite on its orbit.

On the roof of the Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering at the Vienna University of Technology a satellite ground station with an automatic antenna tracking system is located. The antenna are fully automatic rotatable in two axes. The development of a cheap and flexible motor driver for the antenna system is the main part of this work. Detailed information about the layout, the function and the software solution of the motor driver are given. However, there was also the need to modify and expand some of the equipment already in use. Tests of the whole system show that all development targets have been achieved.

A safety analysis on the antenna system was performed and a safety concept was developed. It prevent people, antennasystem and rotors in case of faulty operation, technical defect, large wind loads or lightning. Supervisory systems and emergency stop have been implemented and concepts for wind and lightning protection have been given.

**Keywords:** automatically adjustment of the antenna, Motor driver, speed control, position measurement, wind load and lightning protection for antenna

# Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



# Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei meinen Betreuern Hr. Dipl.-Ing. Michael Fischer und Hr. Dipl.-Ing. Peter Goldmann, sowie bei Hr. Prof. Aparad L. Scholtz für die produktiven Anregungen und die ausgezeichnete Unterstützung beim Verfassen dieser Arbeit.

Mein Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, die mir immer zur Seite standen.

Mein größter Dank gilt aber meinen Eltern Brigitte und Hugo Witschel. Sie haben mich all die Jahre mit ihrem ganzen Engagement und Wissen unterstützt. Sie standen mir auch immer zur Seite, wenn es mir schlecht ging und haben mich immer wieder aufgebaut und ermuntert das Studium abzuschließen.

Vielen Dank an Euch alle, ohne Euch wäre dies niemals möglich gewesen!

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Anforderungen an die Diplomarbeit . . . . .	3
1.2. Aufbau der Diplomarbeit . . . . .	4
<b>2. Hardware der bestehenden Anlage</b>	<b>5</b>
2.1. Systemübersicht . . . . .	5
2.2. Steuerungseinheit . . . . .	6
2.2.1. Mikrocontroller MSP430F149 von Texas Instrument. . . . .	7
2.3. Motortreiber . . . . .	8
2.4. Energieversorgung . . . . .	12
2.5. Rotoren . . . . .	13
2.5.1. Azimut . . . . .	13
2.5.2. Elevation . . . . .	13
<b>3. Modernisierung der Antennensteuerung</b>	<b>15</b>
3.1. Das neue Steuerungskonzept . . . . .	15
<b>4. Aufbau des neuen Motortreibers</b>	<b>19</b>
4.1. Interne Energieversorgung des Motortreibers . . . . .	19
4.1.1. Die elektronische Sicherung . . . . .	20
4.1.2. Die Energieversorgung des galvanisch getrennte Bereichs . . . . .	24
4.2. Internes Schaltelement des Motortreibers (I/O-Expander) . . . . .	24
4.3. Geschwindigkeitssteuerung . . . . .	26
4.3.1. Funktionsweise des PWM-Generator . . . . .	27
4.3.1.1. Der Dreiecksgenerator . . . . .	27
4.3.1.2. Die Vergleichsspannung und das PWM-Signal . . . . .	30
4.3.2. Geschwindigkeitsregler . . . . .	32
4.3.2.1. Der Regler . . . . .	33
4.3.2.2. Die Treiberschnittstelle . . . . .	34
4.3.3. Messergebnisse PWM-Generator . . . . .	35
4.4. Schaltelemente der Rotoren . . . . .	38
4.4.1. Elemente des Elevations-Rotors . . . . .	38
4.4.1.1. Testergebnisse des Schaltelements für den Elevations-Rotor . . . . .	40
4.4.2. Elemente des Azimut-Rotors . . . . .	41
4.4.2.1. Die H-Brücke. . . . .	42
4.4.2.2. Sicherungselement der H-Brücke . . . . .	46
4.4.2.3. Testergebnisse des Schaltelements für den Azimut-Rotor . . . . .	49
4.5. Positionsmessung . . . . .	53
4.5.1. Die Funktionsweise der neuen Messvariante . . . . .	54

4.5.2. Messergebnisse Positionsbestimmung . . . . .	57
4.6. Datenübertragung . . . . .	60
4.6.1. Inter-Integrated Circuit (I <sup>2</sup> C) . . . . .	60
4.6.2. Serial Peripheral Interface (SPI) . . . . .	64
4.7. Klemmenplan des neuen Motortreibers . . . . .	67
<b>5. Weitere Umbauten der Antennensteuerung</b>	<b>70</b>
5.1. Energieversorgung . . . . .	70
5.2. Motorsteuerung MCU . . . . .	71
5.3. Gehäuse . . . . .	72
5.4. Außenverkabelung der Antennenanlage . . . . .	74
<b>6. Schutzeinrichtungen für die Funkanlage</b>	<b>76</b>
6.1. Windschutz . . . . .	76
6.1.1. Gefahren . . . . .	76
6.1.2. Schutzmaßnahmen . . . . .	77
6.2. Blitzschutz . . . . .	80
6.2.1. Entstehung . . . . .	80
6.2.2. Gefahren . . . . .	81
6.2.3. Schutzeinrichtungen . . . . .	81
6.2.3.1. Äußerer Blitzschutz . . . . .	82
6.2.3.2. Innerer Blitzschutz . . . . .	84
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>87</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>91</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>92</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>93</b>
<b>Glossar</b>	<b>95</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>
<b>A. Messergebnisse komplett</b>	<b>102</b>
A.1. Messdaten Geschwindigkeitssteuerung . . . . .	102
A.2. Messdaten des Elevations-Rotors . . . . .	105
A.3. Messdaten des Azimut-Rotors . . . . .	107
A.4. Messdaten der Positionsmessung . . . . .	113
<b>B. Schaltpläne</b>	<b>117</b>
B.1. Schematik und Layout des neuen Motortreibers . . . . .	118
B.2. Elektroschaltplan der alten Antennensteuerung . . . . .	125
B.3. Elektroschaltplan der neuen Antennensteuerung . . . . .	128

# Kapitel 1.

## Einleitung

Satelliten sind eine der wichtigsten Erfindungen des 20. Jahrhunderts. Alles begann vor etwas mehr als 50 Jahren, genauer gesagt am 4. Oktober 1957 (Growalt 2002), als die ehemalige Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken (UdSSR) den ersten Satelliten, mit dem Namen Sputnik-1, in das Weltall schoss. Auf seiner Reise im All, umrundete er die Erde und sendete dabei ein konstantes Funksignal, das auf der ganzen Welt empfangen werden konnte. Aufgrund der politischen Lage dieses Jahrzehnts, kam es in der amerikanischen Öffentlichkeit zu heftigen Diskussionen bezüglich dieses technologischen Fortschritts der UdSSR und der Verzögerung des eigenen Weltraumprogramm. Unter dem Druck der Öffentlichkeit, starteten die Amerikaner am 31. Jänner 1958 ihre erste Raumsonde, mit dem Namen Explorer-1. Durch diese Ereignisse wurde ein neues Zeitalter in der Geschichte der Menschheit eingeläutet, jenes der Raumfahrt.

Aus heutiger Sicht, sind Satelliten aus unserem täglichen Leben nicht mehr weg zu denken. Laut der Union of Concerned Scientists (UCS 2010) haben sich am 1. Juli 2010, 943 aktive Satelliten in einer Umlaufbahn um die Erde befunden. Bis Dato hat sich diese Anzahl noch vergrößert. Die Bezeichnung aktiv ist deshalb notwendig, da es im All eine Vielzahl an inaktiven oder defekten Satelliten sowie eine riesige Menge Weltraumschrott gibt, der ebenfalls auf Bahnen um die Erde kreist. Um die künstlichen Himmelskörper besser unterscheiden zu können, werden diese nach der Höhe ihrer Umlaufbahn kategorisiert. Eine solche Unterteilung zeigt Abbildung 1.1. Wie man deutlich erkennen kann, befinden sich die meisten Satelliten in einer Umlaufbahn namens Geosynchronous Earth Orbit (GEO) und Low Earth Orbit (LEO). Wie aus anderen Quellen (Lassacher 2008, UNI-Protokolle 2010) ersichtlich, befinden sich geosynchrone Satelliten dabei in einer Höhe von etwa 35 800 km. Durch diese große Höhe, ist es ihnen möglich, die Erde genau so schnell zu umrunden, wie sich diese dreht. Durch diese einmalige Umrundung pro Tag, befindet sich ihre Position immer über dem selben Ort auf der Erde. Satelliten in einer LEO Umlaufbahn bewegen sich hingegen in Höhen zwischen 200 km und 1000 km. Hier muss sich der Satellit wesentlich schneller fortbewegen als sich die Erde dreht. Der Grund für diese erhöhte Geschwindigkeit ist die Gravitation der Erde. Satelliten in diesen Höhen umrunden die Erde mehrmals am Tag und können dabei jeden Punkt auf der Erde überfliegen. Eine kleine Anzahl von Satelliten bewegt sich in der Umlaufbahn Medium Earth Orbit (MEO). Satelliten in dieser Umlaufbahn fliegen dabei in Höhen zwischen 1000 km und 35 800 km. Da dieser Orbit zwischen den LEO und GEO Bereichen liegt, kann durch Veränderung der Flughöhe die Anzahl der Erdumrundungen sehr stark beeinflusst werden. Die letzte Kategorie, sind Satelliten, die sich auf einer elliptischen Bahn um die Erde fortbewegen. Bei diesen Bahnen variiert die Höhe der Flugbahn, je nach Position zur Erde sehr stark. Beispielfhaft nähert

sich die Flugbahn des Satelliten der Erde bis auf eine Höhe von 200 – 800 km an und vergrößert sich anschließend wieder auf eine Höhe von bis zu 50 000 km und mehr.

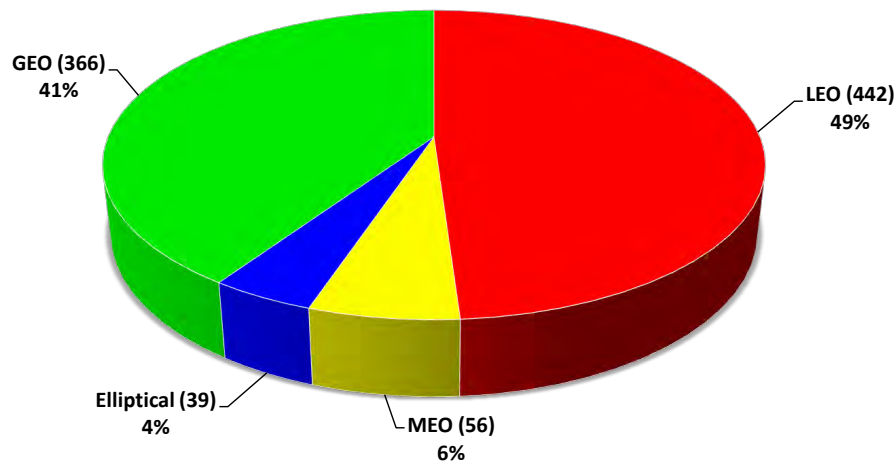


Abbildung 1.1.: Verteilung der aktiven Satelliten nach Ihrer Umlaufbahn (Quelle: UCS 2010).

Mit dieser Vielzahl an Satelliten ist es nun möglich, ohne direkte Kabel- oder Sichtverbindung, Informationen an jeden Punkt der Erde zu übertragen. Ebenfalls sind Forschungen möglich, die schwer oder gar nicht auf oder von der Erde aus möglich sind. Beispiele für solche Forschungen sind zum Beispiel Experimente in der Schwerelosigkeit oder bessere Aufnahmen unserer Galaxie. Damit die ermittelten Daten der Satelliten oder die Kommunikationsdaten verarbeitet werden können, benötigt man einen funktionierenden Kommunikationsweg zwischen einem Sender oder Empfänger auf der Erde und dem Satelliten. Einrichtungen die diese Kommunikation ermöglichen nennt man Satellitenkommunikationsanlagen oder Satellite Ground Stations. Mit diesen Einrichtungen ist es nun möglich, Daten zum Satelliten zu schicken und auch wieder von ihm zu empfangen. Je nach Art des Einsatzfeldes, muss die Kommunikationsanlage dabei unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Für den normalen Anwender, der zu Hause Satellitenfernsehen empfängt oder mit Leuten in anderen Teilen der Welt kommuniziert, sind vor allem die Kommunikationssatelliten in einer GEO-Umlaufbahn von Bedeutung. Auf Grund ihrer fixen Position über einem Punkt der Erde stehen diese 24 Stunden am Tag für eine Kommunikation zur Verfügung. Wettersatelliten für Forschungen und Vorhersagen befinden sich ebenfalls auf dieser Umlaufbahn. Für andere Anwendungen ist diese Umlaufbahn aber sehr ungeeignet. Das liegt daran, dass der Satellit, wegen seiner fixen Position, nur einen eingeschränkten Sichtbereich auf die Erde hat. Daher befinden sich viele Forschungssatelliten aber auch Militärsatelliten in einer LEO oder MEO-Umlaufbahn, wo sie gezwungenermaßen die Erde mehrmals am Tag umrunden müssen. Bekannte Satelliten auf diesen Flugbahnen sind zum Beispiel die Beobachtungssatelliten des Programms Landsat oder die Satelliten des Global Positioning Systems (GPSs). Neben diesen beiden bekannten Satellitensystemen umrundet auch die International Space Station (ISS) in einer LEO-Umlaufbahn die Erde. Der Nachteil dieser ständigen Fortbewegung ist aber, dass sie nicht 24 Stunden am Tag in Funkreichweite einer einzelnen Bodenstation sind. Um dennoch einen 24 Stundenbetrieb zu gewährleisten, werden mehrere Stationen überall auf der Welt verbunden. Die Ironie bei

diesem Zusammenschluss ist jedoch, dass die Verbindungen oft wieder mittels Satelliten, jenen in einem GEO-Orbit, zustande kommen.

Die Flughöhe hat aber nicht nur Auswirkungen auf die Empfangsdauer, sondern auch auf die Bauweise der Bodenstation. Funkanlagen die mit einem GEO-Satelliten kommunizieren, müssen nur einmal ausgerichtet werden. Eine permanente Nachpositionierung der Anlage ist nicht mehr nötig, da der Satellit fix am Himmel steht. Anders ist das bei Bodenstationen, die mit Satelliten in den anderen Umlaufbahnen verbunden sind. Würden diese Station nur einmal auf den Satellit ausgerichtet werden, wäre das Zeitfenster in dem der Satellit erreichbar ist, sehr klein. Aus diesem Grund verfügen solche Anlagen immer über ein Nachführungssystem für die Sende- und Empfangseinheiten, um die Häufigkeit und die Dauer der Verbindungen zum Satelliten zu erhöhen.

Auch jene Satellitenfunkanlage am Dach des Institutes für Nachrichten- und Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Wien, ist eine solche Anlage mit Nachführungssystem für die Sende- und Empfangseinheit. Die derzeitige Anlage ist bereits so weit ausgeführt, dass mit gewissen Einschränkungen eine automatische Nachverfolgung möglich ist und Daten gesendet und empfangen werden können.

## **1.1. Anforderungen an die Diplomarbeit**

Bevor mit dieser Arbeit begonnen wird, muss darauf hingewiesen werden, dass diese Arbeit eine Erweiterung zu einigen bestehenden Komponenten bereits vorangegangener Projekt ist. Aus diesem Grund wird hier auch nicht auf alle Komponenten, die bereits in einer anderen Arbeit beschrieben worden sind, vollständig eingegangen. Arbeiten die dieser bereits vorangegangen sind, stammen von Lassacher (2008) und Recuenco (2008).

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich nun, mit der Erweiterung und Modernisierung des Nachführungssystems, sowie der Umsetzung wichtiger Sicherheitspunkte zum Betrieb der Anlage. Dabei liegt die Hauptaufgabe vor allem darin, einen neuen Motortreiber für die Antennennachführung zu entwickeln. Dieser Motortreiber soll nicht nur eine präzise Positionierung gewährleisten, sondern auch eine Steuerung der Geschwindigkeit für die Motoren ermöglichen. Neben dem Design der Hardware, soll auch die entsprechende Software entworfen und implementiert werden. Die neu entwickelte Software, muss außerdem kompatibel zur bereits bestehenden Steuerungssoftware sein.

Die dadurch anfallenden Umbaumaßnahmen, sollen so weit wie möglich umgesetzt werden. Ist eine Umsetzung aus logistischen, finanziellen oder zeitlichen Gründen nicht möglich, sollen die Teile so weit wie möglich vorbereitet werden.

Ein weiterer Punkt ist es, Konzepte aufzuzeigen, wie die Antennenanlage im Falle von Gewittern und Stürmen besser gegen elektrische und mechanische Beschädigung geschützt werden kann.

## 1.2. Aufbau der Diplomarbeit

Im Kapitel 2, wird zu Beginn der Arbeit kurz das bestehende System vorgestellt. Dabei werden die einzelnen Teile und wichtige Komponenten der Anlage kurz beschrieben. Dieses Kapitel soll dem Leser dazu dienen, die Neu- und Weiterentwicklungen des aktuellen Systems zu erkennen.

Im darauf folgenden Kapitel 3, wird der Aufbau des neuen Systemkonzept vorgestellt. Dabei wird kurz erklärt, in welchen Teilen der Anlage sich etwas verändert hat und wie. Ebenfalls wird in diesem Abschnitt der Entwurf des neuen Motortreibers vorgestellt.

Kapitel 4, behandelt im Detail, den genauen Aufbau des neu entwickelten Motortreibers. Ebenso beinhaltet es die Testergebnisse der einzelnen Komponenten der Schaltung.

Veränderungen die im Zuge der Neugestaltung des Motortreibers an der Antennensteuerung durchgeführt wurden, werden im Kapitel 5 beschrieben. Die hier beschriebenen Aufgaben, sind bereits in Kapitel 2 angesprochen worden.

Das Kapitel 6, befasst sich mit der Umsetzung von Schutzeinrichtungen für die Bereiche Blitzschutz und Windschutz. Dieser Teil der Arbeit befasst sich mit Konzeptvorschläge für weitergehende Projekte und ist nur theoretisch behandelt worden.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse dieser Arbeit nochmals zusammengefasst.

## Kapitel 2.

# Hardware der bestehenden Anlage

Die nachfolgenden Punkte beschreiben kurz, die bestehende Funkanlage. Dabei werden auch die Leistungsdaten der einzelnen Komponenten der Anlage aufgelistet.

### 2.1. Systemübersicht

Zum besseren Verständnis wie die originale Antennensteuerung aufgebaut war und aus welchen Komponenten oder Modulen sie besteht, soll die nachfolgende Abbildung 2.1 dienen. Ein Modul ist ein Teil der Antennensteuerung und besteht aus mehreren Komponenten. Welche Komponenten zu einander gehören, kann man anhand der farblichen Darstellung erkennen. In dieser schematischen Darstellung, werden neben den einzelnen Komponenten, auch die Signal- und Versorgungspfade zwischen diesen aufgezeigt. Als Signalpegel für die Datenkommunikation zwischen den einzelnen Komponenten, wird mit einem 3,3 V Gleichspannungspegel gearbeitet. Da sich dieses Projekt ausschließlich mit der Steuerung der Antennen befasst, wurden die Elemente des Übertragungswegs für die Satellitenkommunikation weggelassen.

Die Module oder Komponenten dieser Antennensteuerung sind folgende:

**Die Steuerungseinheit** oder auch Microcontroller Unit (MCU) genannt (Orange). Sie verarbeitet die Befehle und Messdaten und steuert die einzelnen Komponenten in der Antennensteuerung.

**Der Leitrechner.** Auf diesem läuft das automatisierte Satellitenzielverfolgungsprogramm NOVA, welches der MCU die Stellpositionen für die Rotoren mitteilt. Ebenso kann hier der Benutzer die Antennenanlage über ein Terminalprogramm, manuell steuern und überwachen.

**Das Bedienerinterface** oder auch Human-Machine-Interface (HMI) genannt (Weiß). Der Bediener kann direkt an der Antennensteuerung manuell Befehle eingeben und die Stellung der Antennen ablesen.

**Der Motortreiber** (Grün) verarbeitet die Steuersignale der MCU für die Rotoren und bereitet die Messsignale auf. Er übernimmt den Leistungsteil der Energietechnik für die Antennensteuerung.

**Die Spannungsversorgung** (Gelb). Stellt die benötigte Energie für die einzelnen Komponenten der Antennensteuerung zur Verfügung.



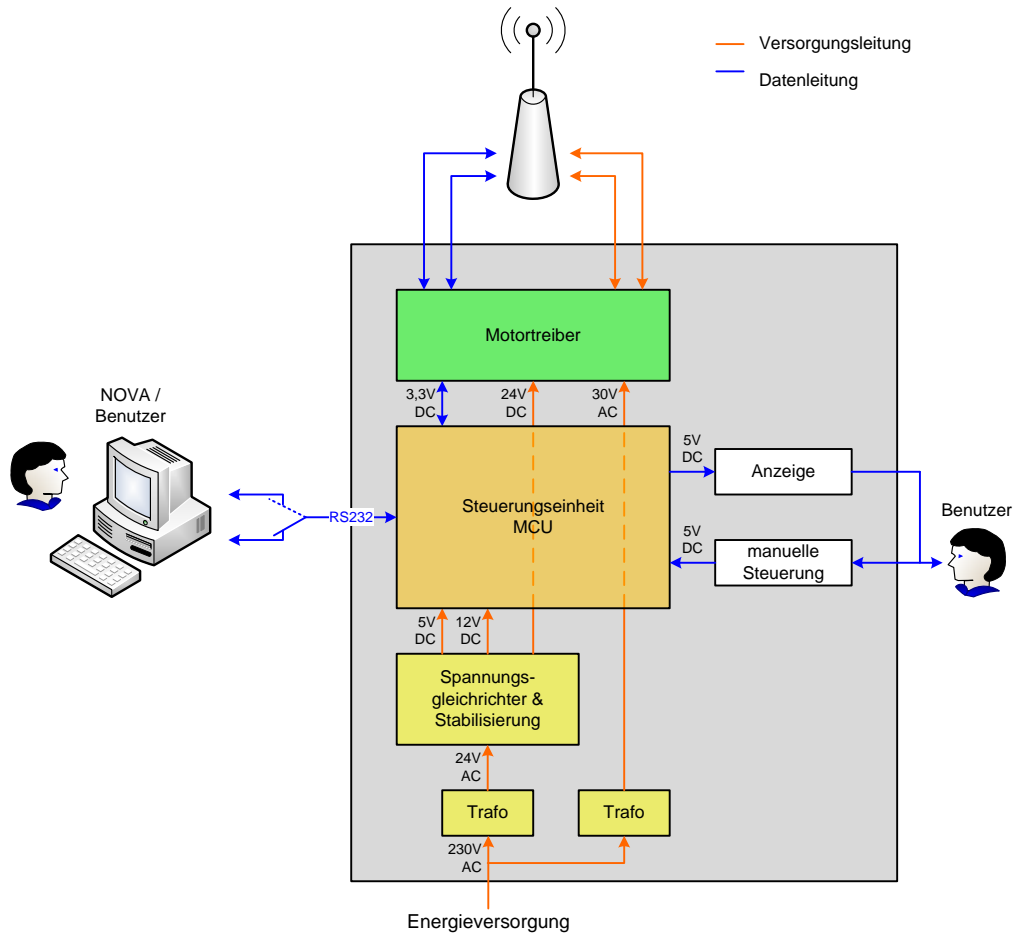


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau der bestehenden Anlage (vgl. Lassacher 2008).

## 2.2. Steuerungseinheit

Die MCU ist das Gehirn der Antennensteuerung, zu deren Aufgabe die Verarbeitung der Messdaten, die Steuerung der Aktuatoren, sowie die Kommunikation mit dem User über das HMI gehört. Der wichtigste Bauteil der Steuerungseinheit ist der Mikrocontroller MSP430F149 der Firma Texas Instruments. Die restliche Peripherie rund um diesen Mikrocontroller besteht aus:

- einer RS232 und einer Universal Serial Bus (USB)-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Leitrechner.
- zwei 14 poligen Input/Output (I/O)-Steckern mit Spannungsversorgung zur Kommunikation mit weiteren Komponenten der Antennensteuerung.
- drei Schnittstellen für die Anzeige und die Befehls Elemente des HMI.
- einer integrierten Programmierschnittstelle zum Aktualisieren der Betriebssoftware des Mikrocontrollers.

- einem Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM) um Systemparameter zu speichern auch wenn die Energieversorgung unterbrochen ist.
- einer 14poligen General Purpose Schnittstelle für zusätzliche Aufgaben.

Wie die Steuerungseinheit in der Abbildung 2.2 im speziellen aufgebaut ist, kann man der Diplomarbeit von Lassacher (2008, S.15ff) entnehmen. Im nachfolgenden Punkt sollen, nochmals kurz die wichtigsten Eckdaten des Mikrocontrollers zusammengefasst werden.

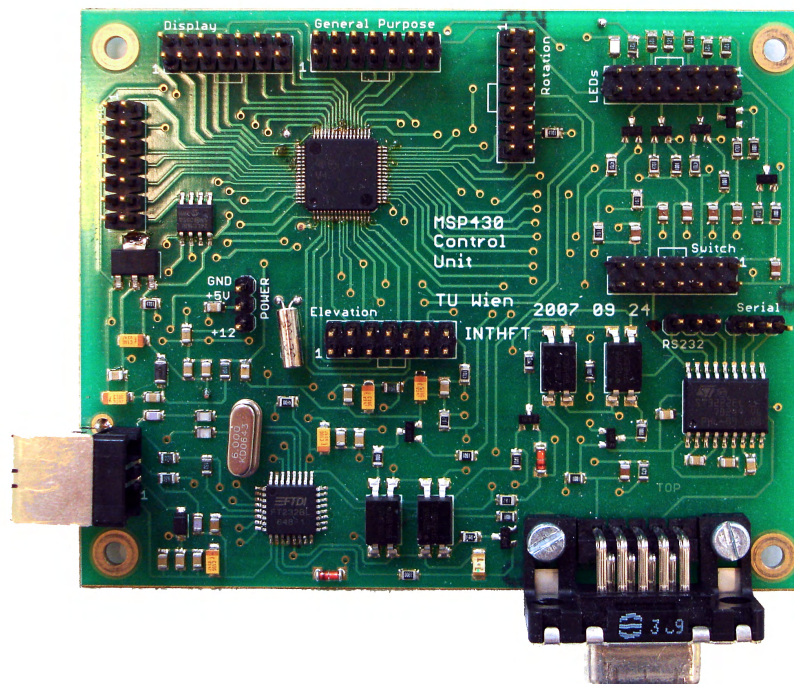


Abbildung 2.2.: Steuerungseinheit basierend auf dem Konzept von Lassacher (2008).

### 2.2.1. Mikrocontroller MSP430F149 von Texas Instrument.

Der MSP430F149 ist ein 16Bit Reduced Instruction Set Computer (RISC)-Prozessor und gehört zur Familie der Mixed Signal-Prozessoren. Aufgrund seines niedrigen Energieverbrauchs, ist er bestens geeignet für jede Art von Anwendung. Die Type F149 aus der MSP430-Familie steckt in einem Gehäuse mit insgesamt 64 Anschlüsse und verfügt laut Datenblatt (Texas Instruments 2004) über folgende Eigenschaften:

- 60 KByte Flash Memory und 2 KByte Random Access Memory (RAM)
- zwei 16 Bit Timer: Timer A und Timer B
- einem Watchdog Timer
- einem 12 Bit Analog to Digital Converter (ADC) Modul
- einem Komparator
- zwei 8 Bit I/O-Ports mit Interrupt-Funktion

- vier 8 Bit Standard I/O-Ports
- zwei seriellen Schnittstellen für asynchrone oder synchrone Datenübertragung: USART 1 und USART 2
- Möglichkeit zur Beschaltung eines externen Oszillator für höhere Taktfrequenzen
- einen Hardware Multiplier zum schnelleren Multiplizieren von bis zu zwei 16 Bit-Zahlen

Ein Blockschaltbild des Aufbaus des MSP430F149 zeigt die Abbildung 2.3, die aus dem Datenblatt (Texas Instruments 2004) entnommen wurde.

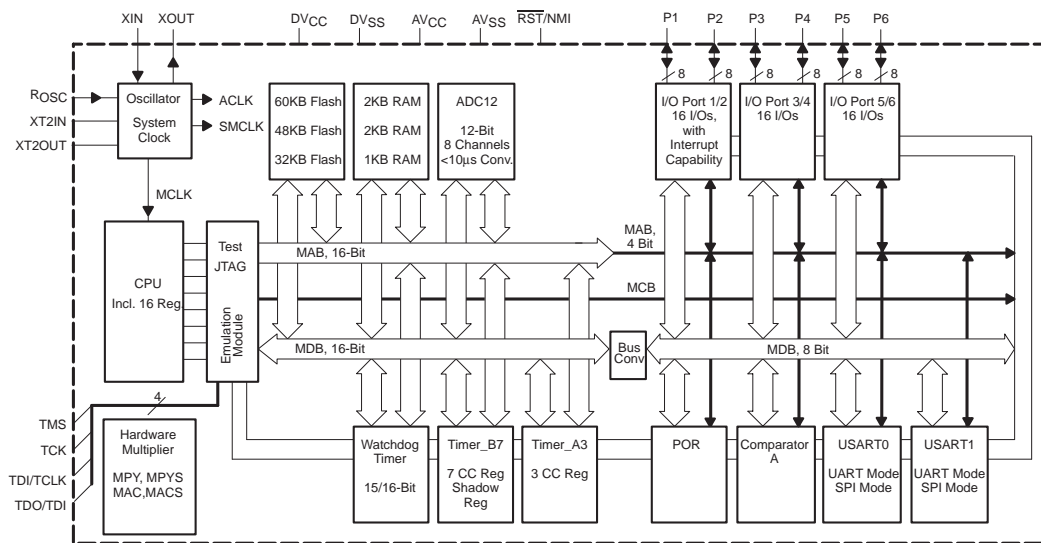


Abbildung 2.3.: Blockschaltbild des Mikrocontrollers MSP430F149 (Quelle: Texas Instruments 2004, S. 5).

## 2.3. Motortreiber

Als Motortreiber ist das Antenna Rotator System (ARS)-Interface RCI-SE von EA4TX (2003) verwendet worden. In Abbildung 2.4 sieht man ein Photo dieses Motortreibers. Zur Steuerung der Rotoren, verfügt dieser über fünf Relais, mit jeweils zwei Öffnern und Schließern. Hierdurch lassen sich zwei Rotoren unabhängig voneinander sicher schalten. Mit „sicher schalten“ ist gemeint, dass bei richtiger Verkabelung, ein Einschalten von Richtung 1 und Richtung 2 eines Rotors zum selben Zeitpunkt unmöglich ist. Wie der Motortreiber nun verkabelt ist, kann man der nachfolgenden Tabelle 2.1 oder dem Schaltplan im Anhang B.2 entnehmen.

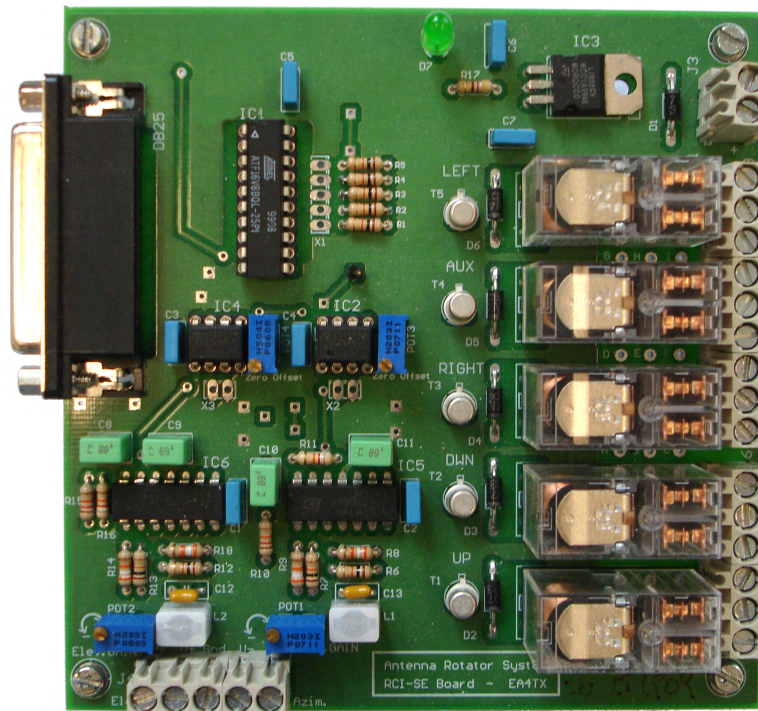


Abbildung 2.4.: ARS-Interface von EA4TX (2003).

Tabelle 2.1.: Pinbelegung der Klemmen des RCI-SE Board von EA4TX.

Klemme	Zielort	Pin	Funktion
$J_{1-1}$	24 V	$J_7$	Versorgung GND Rotor Azimut
	RCI-SE	$J_{1-7}$	Versorgung GND Rotor Azimut
$J_{1-2}$	$X_{10}$	4	Rotor Azimut drehen <i>RECHTS</i>
$J_{1-3}$	24 V	$J_6$	Versorgung 24 V Gleichspannung Rotor Azimut
	RCI-SE	$J_{1-9}$	Versorgung 24 V Gleichspannung Rotor Azimut
$J_{1-4}$	-	-	nicht angeschlossen
$J_{1-5}$	-	-	nicht angeschlossen
$J_{1-6}$	-	-	nicht angeschlossen
$J_{1-7}$	RCI-SE	$J_{1-1}$	Versorgung GND Rotor Azimut
$J_{1-8}$	$X_{10}$	5	Rotor Azimut drehen <i>LINKS</i>
$J_{1-9}$	RCI-SE	$J_{1-3}$	Versorgung 24 V Gleichspannung Rotor Azimut
$J_{2-1}$	RCI-SE	$J_{2-5}$	gegenseitige Verriegelung
$J_{2-2}$	$T_2$	8	Versorgung 30 V Wechselspannung Rotor Elevation
$J_{2-3}$	$X_{11}$	5	Rotor Elevation drehen <i>RAUF</i>
$J_{2-4}$	-	-	nicht angeschlossen
$J_{2-5}$	RCI-SE	$J_{2-1}$	gegenseitige Verriegelung
$J_{2-6}$	$X_{11}$	4	Rotor Elevation drehen <i>RUNTER</i>
$J_{3-1}$	5 V;12 V	$J_{12}$	Versorgung 12 V Gleichspannung RCI-SE Board

weitere Pinbelegung siehe nächste Seite.

Tabelle 2.1.: Fortsetzung Pinbelegung RCI-SE Board.

Klemme	Ort	Pin	Funktion
$J_{3-2}$	5 V;12 V	$J_{11}$	Versorgung GND RCI-SE Board
$J_{4-1}$	$X_{11}$	3	Versorgung GND Potentiometer Elevation
	RCI-SE	$J_{4-3}$	Verbindung GND
$J_{4-2}$	$X_{11}$	2	Messwert Position Elevation
$J_{4-3}$	RCI-SE	$J_{4-1}$	Verbindung GND
	RCI-SE	$J_{4-4}$	Verbindung GND
$J_{4-4}$	$X_{10}$	3	Versorgung GND Potentiometer Azimut
	RCI-SE	$J_{4-3}$	Verbindung GND
$J_{4-5}$	$X_{10}$	2	Messwert Position Azimut
5 V	$X_{10}$	1	Versorgung 5 V Potentiometer Azimut
	$X_{11}$	1	Versorgung 5 V Potentiometer Elevation

Neben der Schaltung der Rotoren, übernimmt das RCI-SE auch die Messung der Position (EA4TX 2003, S.9) der Rotoren. Hierzu verfügt der Rotor über ein Potentiometer, welches mit der zu bewegenden Achse verbunden ist. Durch die Drehung der Achse, verändert sich die Spannung in dem Potentiometer. Eine schematische Darstellung der Funktionsweise, die sich an die Datenblätter Yaesu (2010a,b), EA4TX (2003) anlehnt, kann man der nachfolgenden Abbildung 2.5 entnehmen.

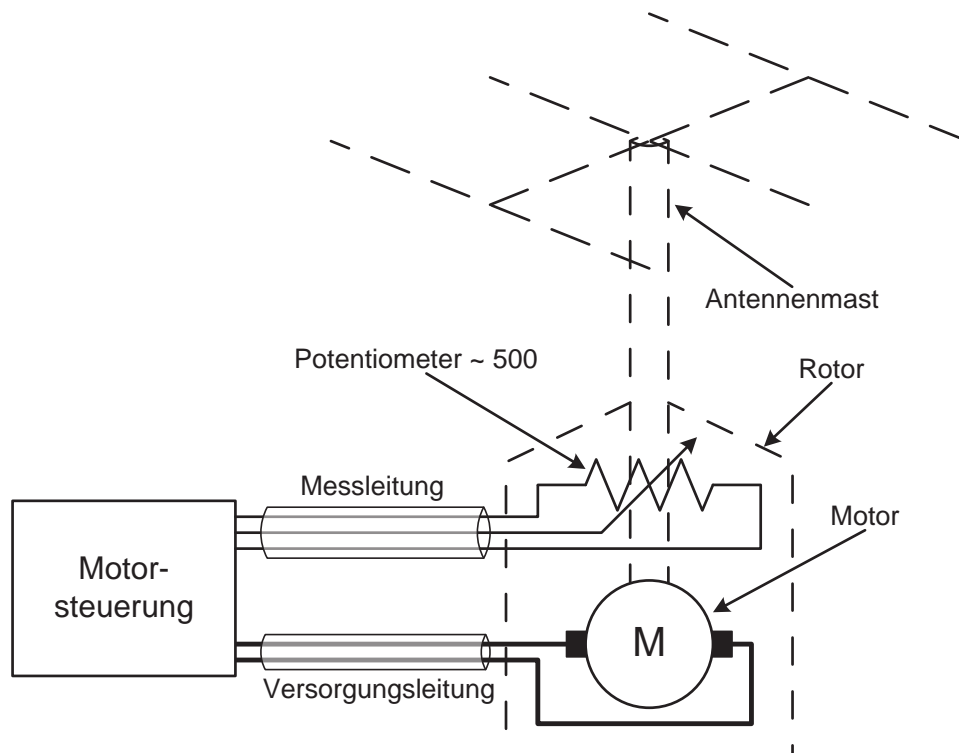


Abbildung 2.5.: schematischer Aufbau der Funktionsweise zur Bestimmung der Position (Quelle: EA4TX 2003, S.9).

Durch diese Bauweise des Rotors, wird jeder Position des Drehbereiches ein Spannungswert zugeordnet und mit einer Messschaltung ausgewertet. Den theoretischen Aufbau dieser Messeinrichtung kann man der Abbildung 2.6 entnehmen. Die Funktionsweise der Schaltung ist folgende. Das Potentiometer im Rotor dient als Spannungsteiler, der wie bereits erwähnt, bei unterschiedlichen Positionen eine andere Spannung liefert. Diese Spannung wird durch einen LC-Tiefpass, aufgebaut aus einer Spule in Längsrichtung und einem Kondensator in Querrichtung, geführt. Hierdurch ergibt sich im Vergleich zu einem normalen RC-Tiefpass, eine stärkere Dämpfung von unerwünschten Oberschwingungen auf dem zu messenden Signal und einen verringerten Spannungsabfall an den Bauteilen. Anschließend wird die Spannung mit Hilfe eines Spannungsteiler und eines nicht invertierenden Operationsverstärkers (OPVs) auf ein neues Spannungslevel verstärkt. Ein Vorteil des OPV ist auch sein hoher Eingangswiderstand, wodurch der Spannungsteiler des Potentiometers im Rotor als unbelastet betrachtet werden kann. Anschließend wird das verstärkte Signal, durch einen zweiten Tiefpass, bestehend aus einem RC-Glied, weiter geglättet. Bevor nun die zu messende Spannung im ADC in ein digitales Signal umgewandelt wird, durchläuft es noch einen Spannungsfolger, auch Impedanzwandler genannt. Der Spannungsfolger hat eine Verstärkung von Eins und hat damit am Ausgang die selbe Spannung wie am Eingang, entlastet jedoch die vorgeschaltete Schaltung. Dies wird durch den hochohmigen Eingangswiderstand des OPV gewährleistet, denn dieser verhindert, dass hohe Ströme über die Eingänge fließen. Die Energie für die nachfolgende Schaltung, wird direkt von der Versorgung am Ausgang des Impedanzwandlers bereitgestellt. Anschließend wird wie bereits erwähnt, die Spannung mit dem ADC in ein digitales Signal umgewandelt. Dieses Signal wird nun über die Schnittstelle, an den Mikrocontroller übermittelt und dort je nach Aufgabe verarbeitet.

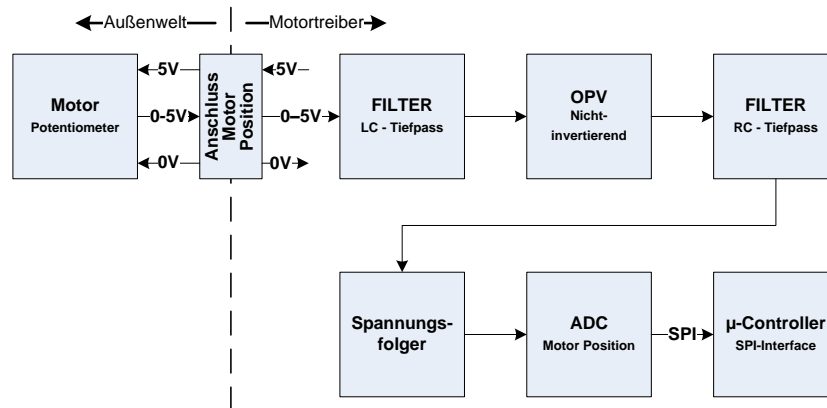


Abbildung 2.6.: Schematische Darstellung der Elemente zur Messung der Position auf der ARS-Platine.

Zur Kommunikation mit einer MCU ist das RCI-SE Board mit einer 25poligen D-SUB (DB25) Schnittstelle ausgerüstet. Die Pinbelegung entspricht einer parallelen Schnittstelle nach dem Standard IEEE 1284. Damit diese Schnittstelle mit der Steuerungseinheit kommunizieren kann, musste die Pinbelegung jedoch angepasst werden. Hierfür konnte kein handelsübliches IEEE 1284 Druckerkabel verwendet werden. In der Tabelle 2.2 wird die modifizierte Pinbelegung aufgelistet.



Tabelle 2.2.: modifizierte Pinbelegung des DB25 Steckers des RCI-SE Boards.

Pin	Zielort	Pin	MSP430	Funktion
1	$JP_9$	8	P1.0	Clockleitung für die beiden ADCs
2	$JP_{10}$	7	P6.5	parallele Datenleitung „DATA 0“
3	$JP_{10}$	13	P5.1	parallele Datenleitung „DATA 1“
4	$JP_{10}$	12	P5.2	parallele Datenleitung „DATA 2“
5	$JP_{10}$	11	P5.0	parallele Datenleitung „DATA 3“
6	$JP_{10}$	10	P1.3	parallele Datenleitung „DATA 4“
7	$JP_{10}$	9	P6.4	parallele Datenleitung „DATA 5“
8	$JP_{10}$	8	P1.2	parallele Datenleitung „DATA 6“
9	$JP_9$	7	P6.2	parallele Datenleitung „DATA 7“
10	-	-	-	nicht angeschlossen
11	$JP_9$	5	P6.0	Vorgeschaltet ein Spannungsteiler 3,6 k $\Omega$ über 6,8 k $\Omega$ . Datenleitung für den ersten ADC
12	-	-	-	Paper End
13	-	-	-	Select
14	$JP_9$	9	P6.3	Aktivierungssignal für eine Datenübertragung
15	$JP_9$	6	P6.1	Vorgeschaltet ein Spannungsteiler 3,6 k $\Omega$ über 6,8 k $\Omega$ . Datenleitung für den zweiten ADC
16	$JP_{10}$	4	P6.7	Init
17	$JP_{10}$	5	P6.6	Sel IN
18–25	$JP_{10}$	3	-	Versorgung GND; Potentialausgleich

## 2.4. Energieversorgung

Zum Betrieb der Antennensteuerung wird eine normale Steckdose mit 230 V Wechselspannung benötigt, an die die Anlage angeschlossen werden kann. Innerhalb der Anlage wandeln zwei Transformatoren die 230 V Wechselspannung in die benötigten Betriebsspannungen um. Der Erste liefert sekundärseitig 24 V Wechselspannung und durch Mittelpunktanzapfung noch zusätzlich 12 V Wechselspannung. Der zweite Trafo liefert 30 V Wechselspannung, die direkt über den Motortreiber an den Rotor für die Elevation angeschlossen ist. Die anderen beiden Wechselspannungen werden über Brückengleichrichter mit nachgeschalteter Spannungsstabilisierung und Siebung, in eine Gleichspannung umgewandelt. Die gewonnene 24 V Gleichspannung wird direkt an die Relais des Motortreibers für den Azimut-Rotor angeschlossen. Die 12 V Gleichspannung wird anschließend nochmals auf eine 5 V Gleichspannung reduziert. Mit diesen beiden Spannungen, wird die MCU mit Energie versorgt. Ebenso wird auch der Motortreiber mit 12 V versorgt. Eine genaue Übersicht wo welche Spannungen anliegen und welche Komponenten mit ihr versorgt werden, kann man dem Stromlaufplan aus dem Anhang B.2 entnehmen.

## 2.5. Rotoren

### 2.5.1. Azimut

Als Rotor für die Azimutdrehung wird die Type G-2800DXA (Yaesu 2010a) der Firma Yaesu verwendet. Dieser Rotor wurde entwickelt um mittlere und große Antennensysteme zu bewegen. In der Tabelle 2.3 sind einige Eckdaten dieses Rotors aus dem Datenblatt (Yaesu 2010a, S. 16, 20) aufgelistet:

Tabelle 2.3.: Eckdaten des Azimut-Rotors G-2800DXA (Yaesu 2010a).

Spannungsversorgung	11 – 24 V DC
Leistungsaufnahme max.	91 W
Drehbereich	$450^\circ \pm 3^\circ$
Dauer einer Umdrehung $360^\circ$	$50 \pm 5 \text{ s} - 120 \pm 10 \text{ s}$
Drehmoment	$\approx 78 - 270 \text{ Nm}$
maximale Traglast (dauerhaft)	300 kg

Angeschlossen an die Steuerung ist der Rotor über einen siebenpoligen Stecker. Die genaue Pinbelegung kann der Tabelle 2.4 entnommen werden.

Tabelle 2.4.: Pinbelegung  $X_{10}$  für den Azimut-Rotors.

Pin	Klemme	Ort	Funktion
1	5 V	RCI-SE	Versorgung 5 V DC Potentiometer Azimut
2	$J_{4-5}$	RCI-SE	Messwert Position Azimut
3	$J_{4-4}$	RCI-SE	Versorgung GND Potentiometer Azimut
4	$J_{1-2}$	RCI-SE	Rotor Azimut drehen <i>RECHTS</i>
5	$J_{1-8}$	RCI-SE	Rotor Azimut drehen <i>LINKS</i>
6	-	nicht angeschlossen	
7	-	nicht angeschlossen	

### 2.5.2. Elevation

Als Rotor für die Elevationsdrehung wird das Modell G-550 (Yaesu 2010b), ebenfalls von der Firma Yaesu verwendet. Dieser Rotor wurde entwickelt um kleinere und mittlere Antennensysteme zu bewegen. Da es sich bei dieser Anlage um eine mittelgroße Funkanlage handelt, ist dieser Motor ausreichend für diese Zwecke geeignet. In der Tabelle 2.5 sind einige Eckdaten dieses Rotors aus dem Datenblatt (Yaesu 2010b, S. 3, 9) aufgelistet:



Tabelle 2.5.: Eckdaten des Elevations-Rotors G-550 (Yaesu 2010b).

Spannungsversorgung	24 – 29 V Wechselspannung
Leistungsaufnahme	30 VA
Drehbereich	180°
Dauer einer Umdrehung (180°)	≈67 s
Drehmoment	≈ 137 Nm

An die Steuerung angeschlossen, ist der Rotor über einen zehnpoligen Stecker. Die genaue Pinbelegung kann der Tabelle 2.6 entnommen werden.

Tabelle 2.6.: Pinbelegung  $X_{11}$  für den Elevations-Rotors.

Pin	Klemme	Ort	Funktion
1	5 V	RCI-SE	Versorgung 5 V DC Potentiometer Elevation
2	$J_{4-2}$	RCI-SE	Messwert Position Elevation
3	$J_{4-1}$	RCI-SE	Versorgung GND Potentiometer Elevation
4	$J_{2-6}$	RCI-SE	Rotor Elevation drehen <i>RUNTER</i>
5	$J_{2-3}$	RCI-SE	Rotor Elevation drehen <i>RAUF</i>
6	5	$T_2$	Versorgung 30 V Wechselspannung Rotor Elevation
7	-	nicht angeschlossen	
8	-	nicht angeschlossen	
9	-	nicht angeschlossen	
10	-	nicht angeschlossen	

## Kapitel 3.

# Modernisierung der Antennensteuerung

Im Zuge der Modernisierungsarbeiten für die Antennensteuerung, wurde auch das Steuerungskonzept überarbeitet. Wie dieses jetzt aufgebaut ist und wo die Unterschiede zum alten System sind, soll das folgende Kapitel zeigen.

### 3.1. Das neue Steuerungskonzept

Wie man in Abbildung 3.1 erkennt, wurde am Prinzip des Steuerungskonzeptes aus Abschnitt 2.1 einiges verändert. So wurden im Bereich der Energieversorgung (Gelb), wie auch bei dem Modul Bedienerinterface (Weiß) einige offensichtliche Veränderungen vorgenommen. Obwohl sich bei dem Konzeptaufbau des Motortreibers (Grün) und des MCU's (Orange) nicht viel verändert hat, sind im realen Design des Motortreibers die meisten Veränderungen vorgenommen worden.

So wurde der bestehende Motortreiber, das RCI-SE Board, durch eine neu entwickelte Schaltung ersetzt. Der Grund warum hier eine neue Schaltung entwickelt wurde ist, dass die Schaltung des RCI-SE Board nicht alle Anforderungen, die an sie gestellt wurden, voll erfüllt hat. Hier einige wichtige Eckdaten zu den Anforderungen, die nicht durch die Schaltung des RCI-SE Board erfüllt wurden:

- Geschwindigkeitsregelung der Motoren.
- Sicherheitseinrichtungen innerhalb des Motortreiber.
- Galvanische Trennung zwischen Motortreiber und der Steuerungseinheit.
- einfache Datenkommunikation zwischen Motortreiber und der Steuerungseinheit.

Da diese Punkte nicht einfach nachträglich eingebaut werden können, hat man sich entschlossen, den Motortreiber komplett neu aufzubauen und alle Anforderungen so weit wie möglich zu implementieren. Ein Konzeptdesign des neuen Motortreibers kann man in der Abbildung 3.2 sehen. Dieses neue Konzept erfüllt neben den gleichen Aufgaben wie auch schon das RCI-SE Board (siehe Abschnitt 2.3), auch die hier aufgelisteten Anforderungen. Wie werden nun mit diesem Konzept alle Anforderungen erfüllt:

**Richtungsvorwahl** Die Richtungsvorwahl zum Drehen wird für den Azimut-Rotor mittels des „Schaltelement H-Brücke“ ausgewählt. Für den Elevations-Rotor wird dies durch das „Schaltelement Relais“ bewerkstelligt.

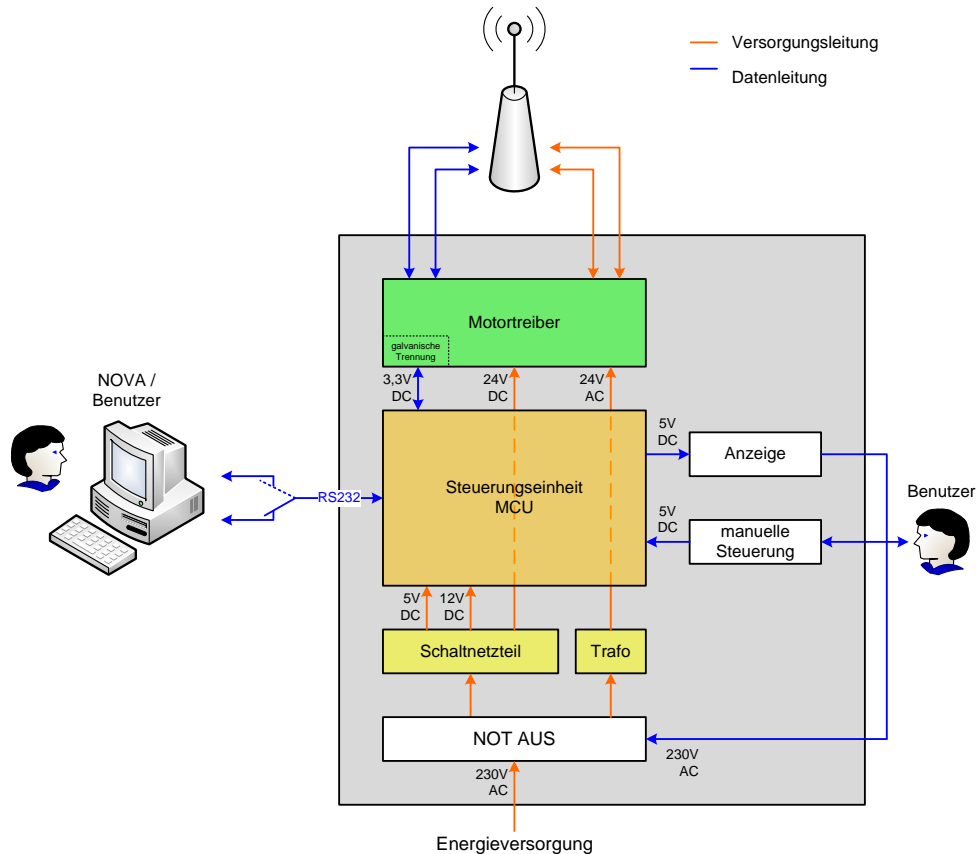


Abbildung 3.1.: Schematischer Aufbau der neu konzipierten Steuerungsanlage.

**Positionsbestimmung** Um die Position der Rotoren zu ermitteln, ist für beide Rotoren eine Messeinrichtung vorgesehen. Diese werden durch die beiden Elemente „Motor Position“ dargestellt.

**Geschwindigkeitsregelung** Hier konnte nur bedingt eine Verbesserung gegenüber dem alten Motortreiber umgesetzt werden. Eine Geschwindigkeitsregelung ist nur für den Azimut-Rotor vorgesehen. Diese Funktion wird durch das Element „Geschwindigkeitssteuerung“ im Konzept dargestellt. Aufgrund der Bauform des Elevations-Rotors, war es nicht möglich, eine Geschwindigkeitssteuerung zu realisieren.

**Sicherheitseinrichtungen** Wie auch bei der Geschwindigkeitsregelung, können bei den Sicherheitseinrichtungen nur für den Azimut-Rotor wirkliche Verbesserungen eingeführt werden. Dargestellt werden diese durch die beiden Elemente mit dem Namen „elektronische Sicherung“ und „Schmelzsicherung“ sowie dem Element „Laststrom“. Für den Elevations-Rotor ist aber ebenso eine Vorsicherung vorgesehen, dargestellt durch das Element „Schmelzsicherung“. Dargestellt wird diese Funktion durch das Element Schmelzsicherung im Versorgungszweig „Versorgung 24 V AC“.

**Galvanische Trennung** Diese Eigenschaft konnte für die gesamte neue Schaltung des Motortreibers realisiert werden. Dargestellt wird sie durch die Elemente „Galvanische Trennung“ und „Versorgung 3,3 V“.

**Datenkommunikation** Um eine einfache Kommunikation zu gewährleisten, wurde die parallele Schnittstelle, durch den Datenbus „Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)“ ersetzt. Zum Steuern der einzelnen Komponenten, wird an Stelle des nicht mehr vorhanden Umsetzers für die parallele Schnittstelle, ein I/O-Expander, dargestellt durch das Element „I/O-Port“, verwendet. Weiters wurde der bereits eingesetzte „Serial Peripheral Interface (SPI)-Bus“, um weitere Busteilnehmer erweitert. Dargestellt werden diese beiden Busse in dem Konzept durch die beiden Schnittstellen auf der linken Seite.

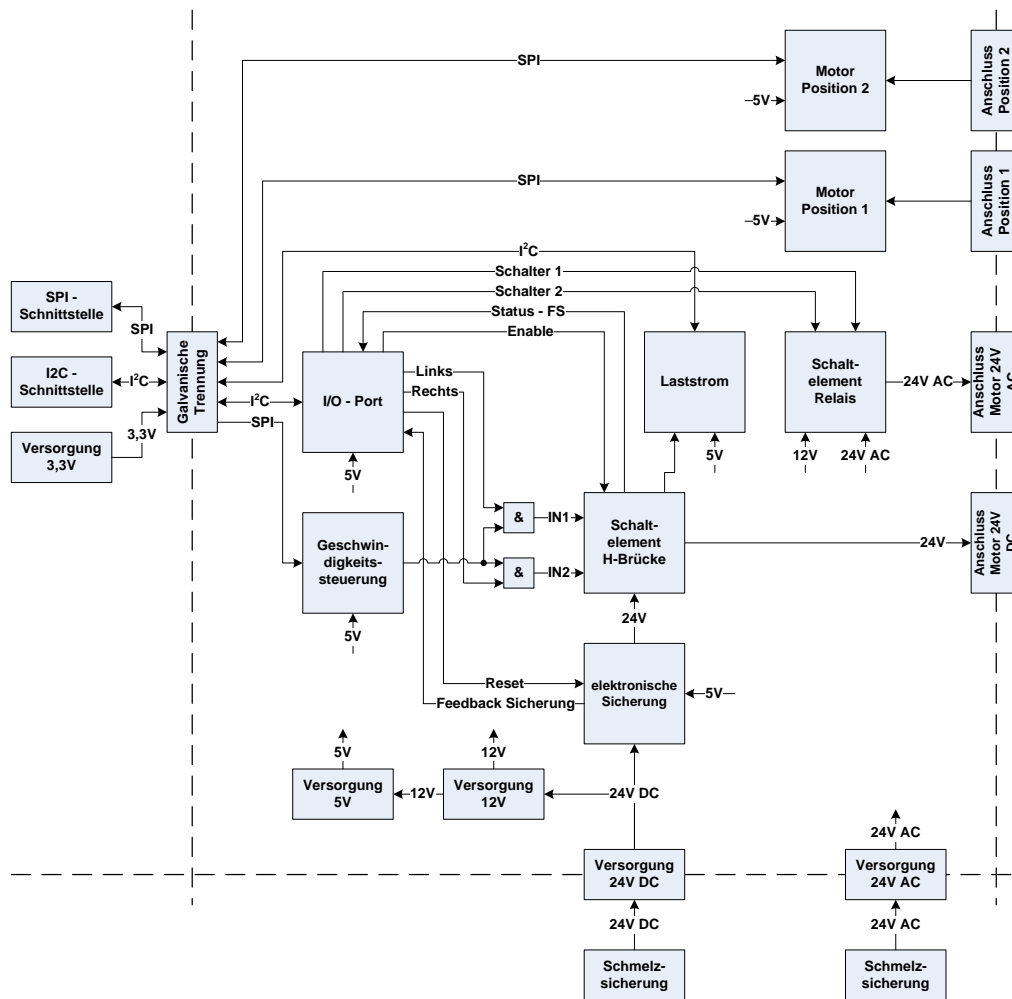


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung des neuen Motortreibers.

Die fertige Platine, die nach diesem Design entwickelt wurde, kann man in Abbildung 3.3 sehen. Eine zusätzliche Eigenschaft, die nicht im Design des neuen Motortreibers dargestellt ist, jene zur Erweiterung der Antennensteuerung um einen weiteren Motortreiber. Er ist so flexibel ausgeführt, dass durch Aktivieren oder Deaktivieren einiger Schaltungsteile, ein parallel Betrieb von bis zu Zwei Motortreibern möglich ist. Den gesamte Schaltplan und das Layout zu dieser Platine findet man im Anhang B.1. Die genau Funktionsweise wird im nachfolgenden Kapitel 4 genauer beschrieben.

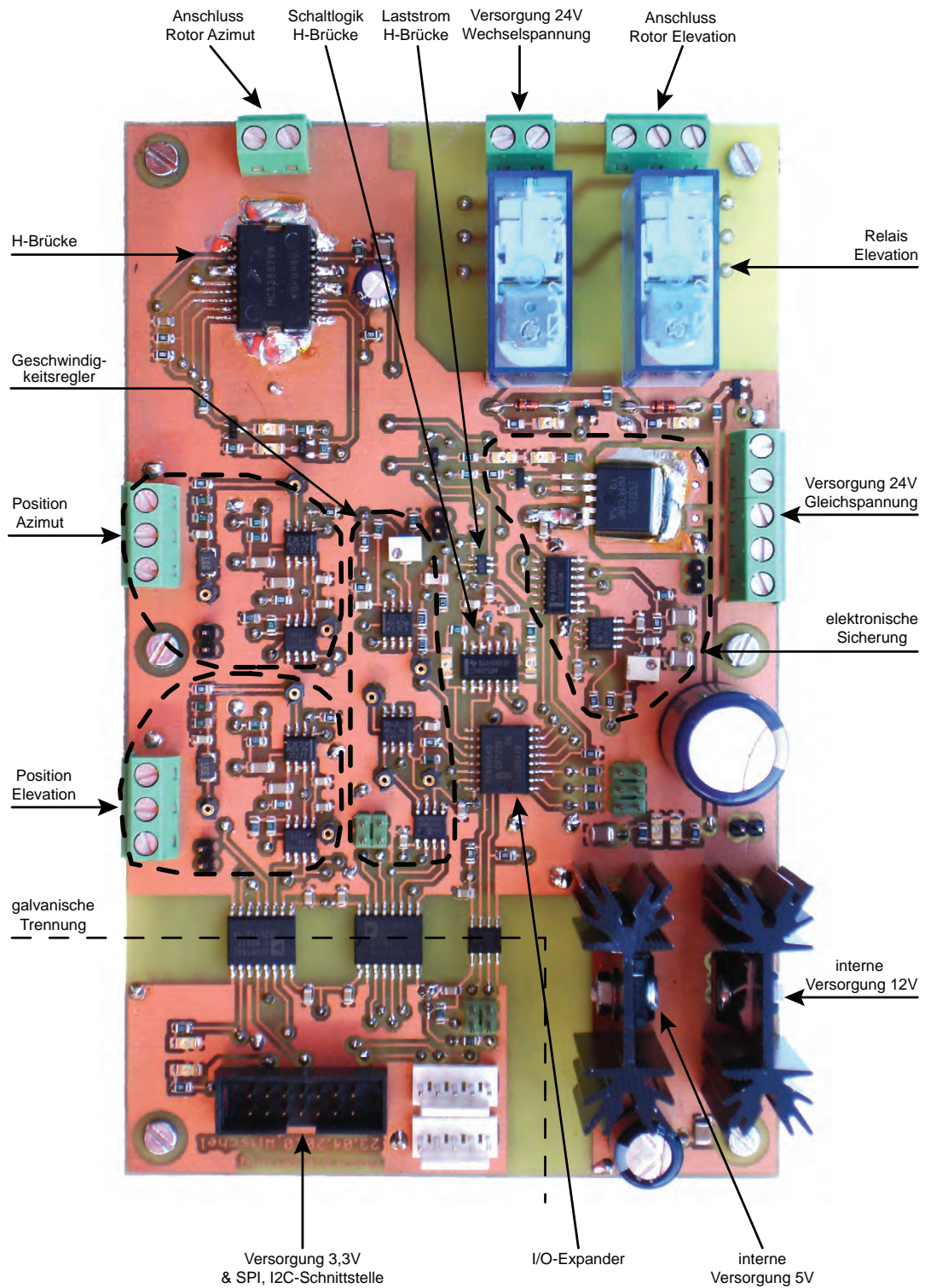


Abbildung 3.3.: Fertig konzipierte und getestete Platine des neuen Motortreibers.

# Kapitel 4.

## Aufbau des neuen Motortreibers

Dieser Teil der Arbeit, beschäftigt sich nun im Detail mit dem Aufbau des neuen Motortreibers. Hierbei werden auch die Testergebnisse der einzelnen Komponenten behandelt. Getestet wurden dabei die Funktionsweise, die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten.

### 4.1. Interne Energieversorgung des Motortreibers

Dieser Teil des Motortreibers stellt für alle Logikelemente sowie für das Schaltelement des Azimut-Rotors die benötigte Betriebsspannung zur Verfügung. Den Schaltplan kann man der Abbildung 4.1 entnehmen. Als Eingangsspannung dient hierbei eine 24 V Gleichspannung, die an die Klemmen  $X_{1-2}$  und  $X_{1-4}$  angeschlossen ist. Als eine von vielen Schutzmaßnahmen des Motortreibers, ist diesem Eingang eine Schmelzsicherung vorgeschaltet. Dabei handelt es sich um eine 5 A Glassicherung. Im Falle eines Totalausfalls aller anderen Schutzeinrichtungen soll diese den Motortreiber komplett von der Energieversorgung abtrennen. Da dieses Sicherungselement nicht einfach zurückgesetzt werden kann, ist es nicht auf dem Motortreiber integriert, sondern in die Rückwand des Gehäuses eingelassen worden. Hierdurch ist ein einfacher Tausch der Sicherung möglich. Neben der 24 V Gleichspannung, werden hier auch die beiden Betriebsspannungen

- 12 V und
- 5 V

zur Verfügung gestellt. Die 24 V werden direkt an das Schaltelement des Azimut-Rotors angeschlossen. Hierbei fließt der Strom über einen Integrated Circuit (IC), der als elektronische Sicherung diesen Teil der Schaltung besonders schützen soll. Der Aufbau dieses Sicherungselementes wird etwas weiter unten in diesem Kapitel genauer beschrieben. Die 24 V Eingangsspannung kann durch Aktivieren des Jumpers  $JP_1$  auch als Eingangsspannung für die beiden anderen Betriebsspannungen dienen. Wird diese Brücke nicht aktiviert, kann über die Klemme  $X_{1-1}$  und  $X_{1-5}$  eine externe Betriebsspannung zugeführt werden. Diese Spannung muss aber mindestens 14 V betragen, damit der Spannungswandler für 12 V richtig funktioniert. Diese Spannung wird für die Schaltelemente des Elevations-Rotor benötigt. Ebenfalls stellt sie die Eingangsspannung für den 5 V Spannungswandler zur Verfügung. Diese Spannung wird für den gesamten Logikteil des Motortreibers benötigt. Da bei beiden Spannungswandlern die Eingangsspannung wesentlich größer ist als die Ausgangsspannung,

erwärmen sich diese Bauteile. Damit sie nicht überhitzen, sind diese mit Kühlkörpern versehen. Alle drei Spannungsversorgungen sind mit Light Emitting Diodes (LEDs) versehen, die dem Benutzer mitteilen sollen, dass die jeweilige Spannungsversorgung aktiv ist. Die Farbe Grün für die LEDs wurde aus dem Grund verwendet, da sie beim Benutzer rein subjektiv signalisieren soll „Alles in Ordnung“. Die Kondensatoren  $C_2$  bis  $C_6$  und der Kondensator  $C_{35}$  dienen als Stütz- und Pufferkondensatoren für die drei Spannungsversorgungen.

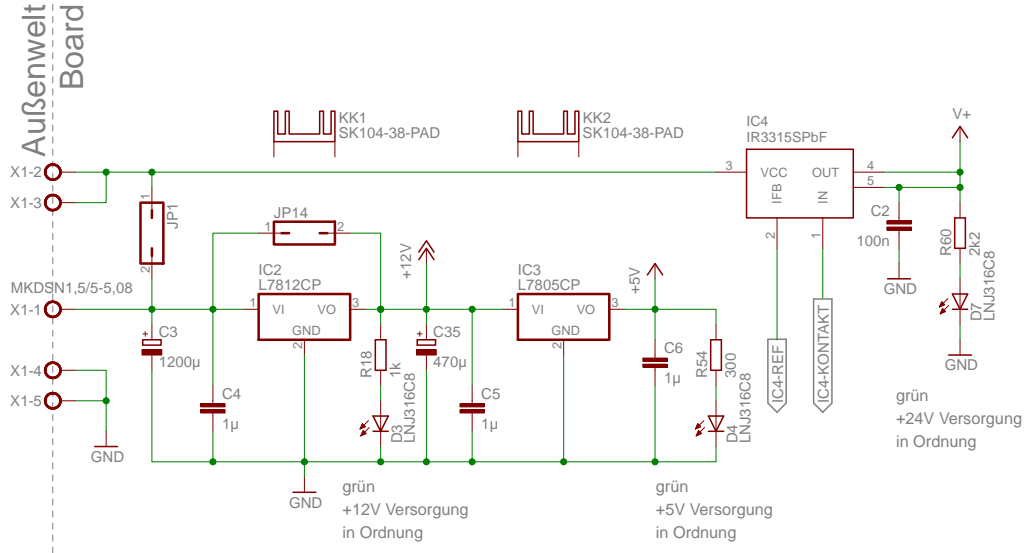


Abbildung 4.1.: Schaltplan der internen Energieversorgung des Motortreibers.

Falls die 12 V Spannung für die Schaltelemente des Elevations-Rotors nicht benötigt wird, kann dieser Teil der Spannungsversorgung durch den Jumper  $JP_{14}$  überbrückt werden. Hierbei ist aber darauf zu achten, dass der Spannungswandler für die 5 V Versorgung über eine externe Spannungsquelle versorgt wird, denn die Eingangsspannung darf laut Datenblatt (ST Microelectronics 2010, S. 11) nicht mehr als 18 V Gleichspannung betragen.

#### 4.1.1. Die elektronische Sicherung

Die elektronische Sicherung, die das Schaltelement des Azimut-Rotors schützen soll, orientiert sich an der Schaltung aus ELV (2005). Die Schaltung für die elektronische Sicherung, ist dabei in Abbildung 4.2 dargestellt. Als Schaltelement für diese Sicherung dient der „High-Side-Switch IR3315SPbF“ der Firma International Rectifier (2006). Dieser Baustein wird in der Abbildung 4.1 als  $IC_4$  dargestellt. Dieser misst den momentanen Laststrom in Echtzeit und gibt einen zu diesem Wert proportionalen Strom am Ausgang „IFB“ aus. Laut Datenblatt (International Rectifier 2006, S. 1) beträgt der Umrechnungsfaktor

$$\frac{1}{2800} \quad (4.1)$$

des aktuellen Laststrom. Somit lässt sich der auftretende Strom für den Ausgang „IFB“ mit der Gleichung

$$I_{\text{IFB}} = \frac{I_{\text{LAST}}}{2800} \quad (4.2)$$

berechnen. Wird dieser Ausgang mit einem Widerstand, in der Schaltung durch  $R_1$  dargestellt, versehen, kann ein definierter Abschaltzeitpunkt des High-Side-Switch programmiert werden. Dies ist möglich, da ab einer Spannung von  $U_{\text{IFB}} = 4,5 \text{ V}$ , der Baustein von selbst abschaltet. Um diesen Abschaltzeitpunkt zu definieren, berechnet man mit Hilfe des Ohm'schen Gesetz (Schiemann et al. 2009, S. 19f)

$$I = \frac{U}{R} \quad (4.3)$$

und dem proportionalen Faktor (4.1) für den maximalen Laststrom, den benötigten Widerstandswert für  $R_1$ . Für einen maximalen Laststrom von  $I_{\text{LAST}} = 4 \text{ A}$  ergibt sich mit

$$\begin{aligned} I_{\text{IFB}} &= \frac{U_{\text{IFB}}}{R_1} \\ R_1 &= \frac{U_{\text{IFB}}}{I_{\text{IFB}}} \\ R_1 &= \frac{U_{\text{IFB}}}{\frac{I_{\text{LAST}}}{2800}} \\ R_1 &= \frac{4,5 \text{ V}}{\frac{4 \text{ A}}{2800}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ein Widerstandswert von

$$R_1 = 3150 \Omega = 3,15 \text{ k}\Omega. \quad (4.5)$$

Da es in der Widerstandsreihe „E24“ keinen  $3,15 \text{ k}\Omega$  Widerstand gibt, ist der Wert auf den nächst Kleineren geändert worden. Der neue Widerstandswert für  $R_1$  beträgt nun  $3 \text{ k}\Omega$ . Die Annahme für  $I_{\text{LAST}} = 4 \text{ A}$  wird dadurch begründet, da dies laut Datenblatt (Yaesu 2010a, S. 20) der maximalen Stromaufnahme des Azimut-Rotors, plus einem kleinen Schwankungsbereich, entspricht. Durch die Veränderung des Widerstandes  $R_1$  hat sich auch der maximal zulässige Laststrom des High-Side-Switch verändert. Der neue Abschaltzeitpunkt ist laut Ohm'schen Gesetz (4.3) und dem proportionalen Faktor (4.1)

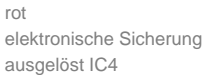
$$\begin{aligned} I_{\text{IFB}} &= \frac{U_{\text{IFB}}}{R_1} \\ \frac{I_{\text{LAST}}}{2800} &= \frac{U_{\text{IFB}}}{R_1} \\ I_{\text{LAST}} &= \frac{U_{\text{IFB}}}{R_1} \cdot 2800 \\ I_{\text{LAST}} &= \frac{4,5 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} \cdot 2800 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ein Laststrom von

$$I_{\text{LAST}} = 4,2 \text{ A}. \quad (4.7)$$

Der Kondensator  $C_7$ , der parallel zu diesem Widerstand geschaltet ist, soll bei schnellem Lastwechsel, mögliche Einschaltspitzen an diesem Bauteil unterdrücken. Wenn dieser





gung des Motortreibers.

Kondensator nicht eingebaut ist, kann es passieren, dass beim Einschalten der Last eine Spannungsspitze entsteht, die den Bauteil sofort wieder deaktiviert.

Mit dem Widerstand  $R_1$  ist ein definierter Abschaltpunkt eingestellt worden. Der Nachteil bei diesem Aufbau ist, dass er nicht einfach verändert werden kann. Um einen variablen Abschaltpunkt zu definieren, muss eine weitere Messschaltung in dieses Sicherungselement integriert werden. Dabei wird die Spannung am Widerstand  $R_1$  gemessen und mit einer zweiten Spannung verglichen. Diese Vergleichsspannung definiert nun die variable Abschaltchwelle und kann durch das Potentiometer  $R_7$  eingestellt werden. Der Widerstand  $R_3$  verhindert dabei, dass diese Vergleichsspannung auf mehr als 4,5 V eingestellt werden kann. Für den gewünschten Schwellwert von  $I_{\text{LAST}} = 4 \text{ A}$  ist das Potentiometer auf einen

Wert von

$$I_{\text{IFB}} = \frac{U_{\text{R}_7}}{R_7} \quad (4.8)$$

$$U_{\text{R}_7} = I_{\text{IFB}} \cdot R_7$$

$$U_{\text{R}_7} = \frac{I_{\text{LAST}}}{2800} \cdot R_7$$

$$U_{\text{R}_7} = \frac{4 \text{ A}}{2800} \cdot 3 \text{ k}\Omega$$

$$U_{\text{R}_7} = 4,29 \text{ V}$$

eingestellt worden. Die beiden Spannungen  $U_{\text{IFB}}$  und  $U_{\text{R}_7}$  werden anschließend in einem Komparator, dargestellt durch den  $IC_{12A}$ , verglichen. Solange die gemessene Spannung  $U_{\text{IFB}}$  des High-Side-Switch, am nicht invertierenden Eingang des OPVs, kleiner als die Vergleichsspannung  $U_{\text{R}_7}$  ist, ist der Ausgang des Komparators auf LOW gesetzt. Mit diesem Signal wird anschließend ein aus NOR-Gattern bestehendes RS-Flip-Flop angesteuert. Eine Wahrheitstabelle zu diesem RS-Flip-Flop kann man der Tabelle 4.1 entnehmen. Bei den Anschlüssen aus Abbildung 4.2 sind die Pins  $IC_{6-1}$  und  $IC_{6-2}$  die Eingänge zum „Setzen“ und der Pin  $IC_{6-4}$  der Eingang zum „Rücksetzen“ des RS-Flip-Flops. Der Pin  $IC_{6-6}$  ist der nicht invertierende Ausgang  $Q_1$  und  $IC_{6-9}$  der invertierende Ausgang  $Q_2$  des RS-Flip-Flops.

Tabelle 4.1.: Wahrheitstabelle eines RS-Flip-Flops (Schiemann et al. 2009, S. 282f).

S ( $IC_{6-1,6-2}$ )	R ( $IC_{6-4}$ )	$Q_1$ ( $IC_{6-6}$ )	$Q_2$ ( $IC_{6-9}$ )	Aktion
1	0	1	0	Setzen
0	0	X	X	Speichern
0	1	0	1	Rücksetzen
1	1	0	0	irregulär

Solange also der Ausgang des Komparators auf LOW ist, ist auch der Ausgang „ $IC_{6-6}$ “ auf LOW. Dadurch ist auch der Eingang „ $IC_{6-11}$ “ in dem nachgeschalteten NOR-Gatter ebenfalls LOW. Solange alle Eingänge dieses Bausteins LOW (Schiemann et al. 2009, S. 263) sind, liegt am Ausgang ein HIGH-Signal an. Dieses HIGH-Signal ist auch erwünscht, da es den Metal-Oxide-Semiconductor-Feldeffekt-Transistor (MOS-FET)  $Q_4$  durchschaltet. Hierdurch liegt der Pin „IN“ des High-Side-Switch gegen Masse, und die innere Schaltung dieses Bausteins schaltet ebenfalls durch.

Sobald aber die Spannung am Widerstand  $R_1$  größer wird als die Vergleichsspannung, wird im RS-Flip-Flop die Aktion „Setzen“ ausgelöst. Hierdurch wird der Ausgang  $IC_{6-6}$  aktiviert, wodurch das nachgeschaltete NOR-Gatter deaktiviert wird. Da das Ausgangssignal des NOR-Gatter ein LOW-Signal liefert, ist auch der MOS-FET  $Q_4$  deaktiviert. Die Deaktivierung dieses Schalters hat nun zur Folge, dass der High-Side-Switch den Verbraucher von der Quelle trennt. Die elektronische Sicherung hat ausgelöst. Das deaktivieren des High-Side-Switch hat auch zur Folge, dass die LED „ $D_5$ “ zu leuchten beginnt. Als Farbe ist hier „Rot“ verwendet worden, denn sie soll dem Benutzer mitteilen „*ACHTUNG! Hier*

ist etwas passiert“. Dieser Zustand kann erst wieder rückgängig gemacht werden, wenn der Befehl zum Rücksetzen des RS-Flip-Flops erteilt wird. Dies kann über das HMI der Antennensteuerung oder den Leitrechner erfolgen. Wenn das passiert, setzt eine Softwareroutine, in der MCU, die beiden Eingänge  $IC_{6-4}$  und  $IC_{6-13}$ , über den I/O-Expander aus dem Abschnitt 4.2, kurzfristig auf HIGH und anschließend wieder auf LOW. Hierdurch ist im RS-Flip-Flop die Aktion „Rücksetzen“ aktiviert worden, wodurch das NOR-Gatter wieder ein HIGH-Signal am Ausgang liefert. Der High-Side-Switch schaltet die Quelle wieder zum Verbraucher durch.

Versorgt wird die ganze Schaltung mit 5 V. Die Kondensatoren  $C_8$  bis  $C_{10}$  dienen in der Messschaltung als Glättungskondensatoren für die beiden Vergleichsspannungen. Die Kondensatoren  $C_{15}$  und  $C_{16}$  arbeiten als Stützkondensatoren für die beiden ICs. Der IC des Komparators besteht aus zwei baugleichen Bauteilen. Da nur einer benötigt wird, ist der zweite deaktiviert worden.

#### 4.1.2. Die Energieversorgung des galvanisch getrennte Bereichs

Da auf dem Motortreiber eine galvanische Trennung zu der MCU implementiert ist (siehe Abschnitt 4.6), ist für den abgetrennten Teil des Motortreibers eine separate Spannungsversorgung nötig. Da dieser Teil vom elektrischen Potential her zur MCU gehört, versorgt diese ihn mit einer 3,3 V und einer 12 V Gleichspannung. Um zu kontrollieren ob auch wirklich eine Spannung an diesem Teil der Schaltung anliegt, sind auch hier zwei LEDs eingebaut worden (siehe Abbildung 4.3). Als Anzeigefarbe ist auch hier Grün gewählt worden, um instinktiv mitzuteilen „Spannungsversorgung OK“.

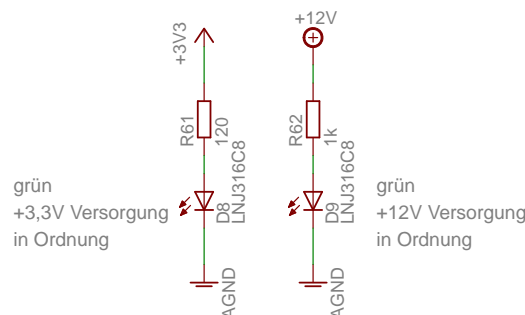


Abbildung 4.3.: Grafische Anzeigeelemente für den galvanisch getrennten Bereich des Motortreibers.

## 4.2. Internes Schaltelement des Motortreibers (I/O-Expander)

Das interne Schaltelement des Motortreibers ist ein I/O-Expander der Type PCA9554 der Firma Texas Instruments (2008). Dieses Bauteil stellt auf dem Motortreiber acht I/O-Ports zur Verfügung, die über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle mit der MCU verbunden sind. Als Motorsteuerung wird weiterhin die Platine aus Abschnitt 2.2 mit dem MSP430F149 der Firma

Texas Instruments (2004) verwendet. Den schematischen Schaltplan des I/O-Expanders auf dem Motortreiber kann man in Abbildung 4.4 sehen. Neben seinen acht I/O-Ports und den zwei Anschlüssen, SCL und SDA, für die Kommunikation, besitzt er noch drei Pins für die Auswahl einer Adresse. Durch die drei Pins können bis zu acht Expander in ein Netzwerk integriert werden. Da in einem anderen Teil der Kommunikationsanlage (Recuenco 2008), mehrere ähnliche Bauteile verarbeitet worden sind, kann die Adresse nicht einfach frei gewählt werden. Für diesen Baustein ist die Binäradresse 4 (XXXX 100X) ausgewählt worden. Diese wird durch Brücken der Pins 5 und 6 des Jumpers  $JP_3$  aktiviert. Falls der Expander zum Empfang wichtiger Signale dient, besitzt er einen separaten Pin namens  $\overline{INT}$ , der einen Interrupt an einem Mikrocontroller aktivieren könnte. Diese Eigenschaft wird aber hier nicht benötigt und ist daher deaktiviert.

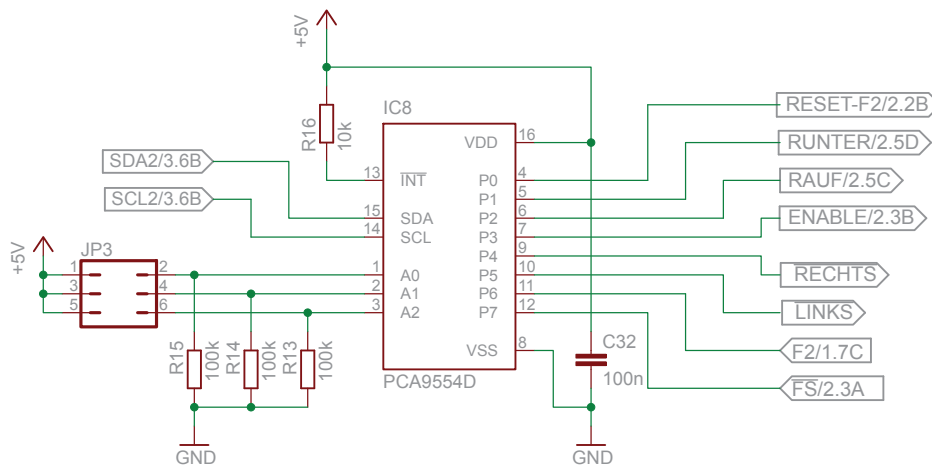


Abbildung 4.4.: Schaltplan des I/O-Expanders auf dem Motortreiber.

Von den acht Ports sind sechs als Ausgänge definiert. Die Definition der Pins, welcher als Ausgang und welcher als Eingang bestimmt ist, wird in der Einschalt routine der MCU festgelegt. Der Pin  $P_0$  ist der Reset-Pin für den Motortreiber. Nach Auftreten einer Störung, wird dieser Pin kurz gesetzt. Dadurch soll die elektronische Sicherung, aus Abschnitt 4.1.1 oder das Schaltelement für den Azimut-Rotor, aus Abschnitt 4.4, in einem Fehlerfall zurückgesetzt werden. Mit den nächsten fünf Ausgangspins  $P_1$  bis  $P_5$  werden die beiden Schaltelemente der Rotoren gesteuert.

Die restlichen zwei Pins,  $P_6$  und  $P_7$ , sind als Eingänge definiert. Diese dienen zur Überwachung ob die elektronische Sicherung oder das Schaltelement für den Azimut-Rotor ausgelöst hat. Damit die MCU weiß ob ein Fehler aufgetreten ist, wird der Expander alle 5 Sekunden abgefragt. Falls einer der beiden Pins ein LOW Signal zurückliefert, wird im Mikrocontroller sofort eine Stop-Routine aufgerufen. Diese Routine versetzt den Rotor in einen gesicherten Modus, in der er keine Steuerbefehle ausführt. Damit der Motortreiber wieder in den normalen Betriebsmodus umschaltet, muss der LOCK-Befehl manuell am HMI der Antennensteuerung oder dem Leitreehner beendet werden.

### 4.3. Geschwindigkeitssteuerung

Einer der wichtigsten Punkte für den Austausch der alten Motorsteuerung ist, dass es mit ihr nicht möglich war die Geschwindigkeit der Rotoren zu steuern. Durch die Entwicklung des neuen Motortreibers, konnte dieses Problem für den Azimut-Rotor gelöst werden. Zur Steuerung der Geschwindigkeit, verwendet der Motortreiber ein Pulse Width Modulation (PWM)-Signal. Welche Art von Signal das ist und wie es auf dem Motortreiber erzeugt wird, wird in den nächsten Punkten genauer beschrieben.

Das PWM-Signal besteht aus einem Rechtecksignal mit konstanter Grundfrequenz, bei der die Pulsdauer, zwischen HIGH und LOW Signal verändert wird. Damit ist gemeint, dass das Verhältnis zwischen Einschalt- und Ausschaltzeitpunkt der Grundfrequenz beeinflusst wird. Diese Variation der Pulsdauer nennt man auch Duty Cycle und wird in der Einheit Prozent [%] angegeben. Dabei sagt der prozentuelle Wert aus, wie lange die Impulsdauer im Verhältnis zur Impulsperiodendauer aktiv ist. Die nachfolgende Abbildung 4.5 zeigt diese Art der Signalmodulation. Je größer der Wert für das Duty Cycle ist, desto länger ist der Impuls des Ausgangssignals im HIGH Zustand. Mit dieser Art von Signalmodulation können verschiedene Arten von Verbrauchern gesteuert werden. Sehr oft wird sie eben auch zum Steuern von Motoren verwendet.

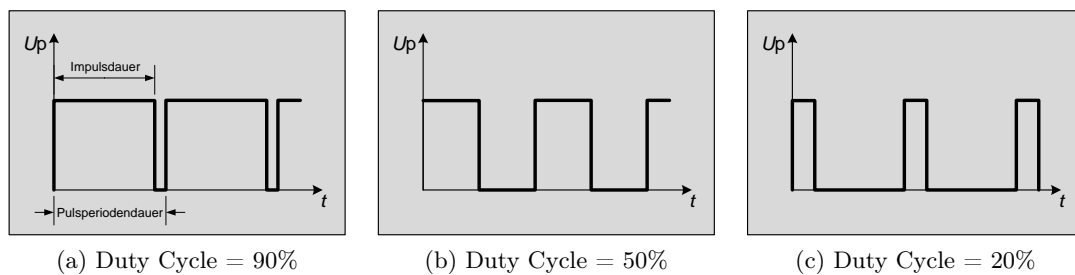


Abbildung 4.5.: Darstellung eines PWM-Signals bei verschiedenen Duty Cycles.

PWM-Generatoren gehören heute zu den Standardfunktionen der meisten Mikrocontroller. Ebenso können einzelne ICs, die als Stand-alone Variante ausgeführt sind, in Schaltungen eingefügt werden. Eine solche Stand-alone Variante eines PWM-Generators, wird auch in diesem Projekt verwendet. Der Grund hierfür ist, dass der Mikrocontroller MSP430F149 von Texas Instruments (2004) diese Funktion der Signalmodulation nicht direkt unterstützt. Damit die an den PWM-Generator gestellten Aufgaben erfüllt werden können, hat man sich für einen diskreten Aufbau der Grundelemente entschieden. Die Kriterien, die dabei erfüllt werden müssen, sind:

- die maximale Taktfrequenz für die H-Brücke von  $f_{\max} = 10 \text{ kHz}$ ,
- ihn in das bestehende SPI-Netzwerk des Mikrocontrollers einzugliedern,
- die Möglichkeit ihn schnell mit neuen Parametern konfigurieren zu können.

Alle diese Punkte werden durch den hier realisierten Aufbau erfüllt. Wie dieser PWM-Generator genau funktioniert, wird im nachfolgenden Punkt beschrieben.

### 4.3.1. Funktionsweise des PWM-Generator

Für einen funktionstüchtigen PWM-Generator, müssen drei verschiedene Schaltungen kombiniert werden. Beim ersten Teil handelt es sich um einen Dreiecksgenerator, der für die Grundfrequenz des Signals verantwortlich ist. Der zweite Teil wird für die Vergleichsspannung und damit für die Ein- und Ausschaltzeitpunkte benötigt. Der letzte Teil des PWM-Generators ist für die Zusammenführung der beiden Teile verantwortlich und erzeugt das PWM-Signal. Einen schematischen Aufbau dieses PWM-Generators, zeigt die nachfolgende Abbildung 4.6. Diese Schematik orientiert sich dabei, an den Schaltungen von MAXIM (2004) und Jacobs (2004).

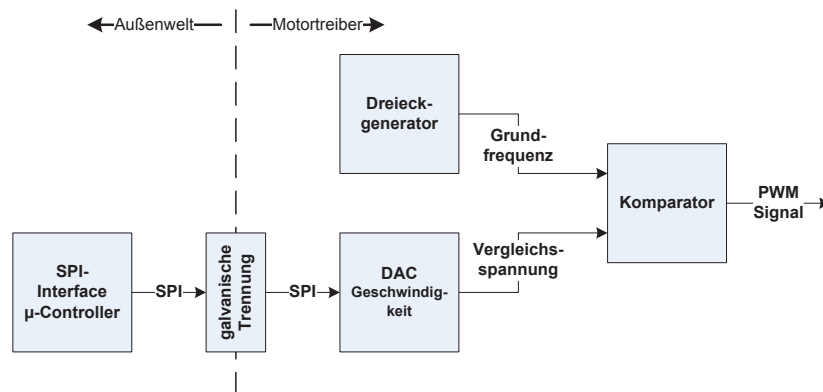


Abbildung 4.6.: Schematische Darstellung des PWM-Generators.

Mit Hilfe dieser Beschreibungen, konnte eine Schaltung konstruiert werden, die alle geforderten Kriterien erfüllt und flexibel genug ist, um weitere Veränderungen und Anpassungen vornehmen zu können.

#### 4.3.1.1. Der Dreiecksgenerator

Der Dreiecksgenerator ist wie schon erwähnt, für die Grundfrequenz des Signals verantwortlich. Dabei erzeugt er, wie schon sein Name sagt, ein Dreiecksignal. Die Abbildung 4.7 zeigt den Schaltplan dieses Teils des PWM-Generators.

Durch Zusammenschluss eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers in der Schaltung durch den OPV  $IC_{18A}$  dargestellt und eines invertierenden Integrators, dem  $IC_{18B}$ , wird das Dreiecksignal mit der Grundfrequenz generiert. Die Frequenz des Dreiecksignals hängt dabei sehr stark von dem Widerstand  $R_{50}$  ab. Er beeinflusst den Stromfluss zum Laden und Entladen des Kondensators  $C_{31}$ . Das bedeutet, je größer der Widerstandswert, desto kleiner ist der fließende Strom und desto länger benötigt der Kondensator zum Laden. Diese Zeit hängt natürlich auch von der Größe des Kondensators selbst ab. Durch die Rückkopplung über den Kondensator, verhält sich der Verstärkungsfaktor des Integrators  $IC_{18B}$  symmetrisch zu dessen Ladungskurve. Am Ausgang des Integrators, wird ein lineares Signal ausgegeben. Ob ein steigendes oder fallendes Signal generiert wird, hängt aber von dem Schmitt-Trigger  $IC_{18A}$  ab. Er bestimmt über seinen Ausgang, wann der Kondensator geladen oder entladen wird. Die Schaltpunkte des Schmitt-Triggers, hängen dabei von dem

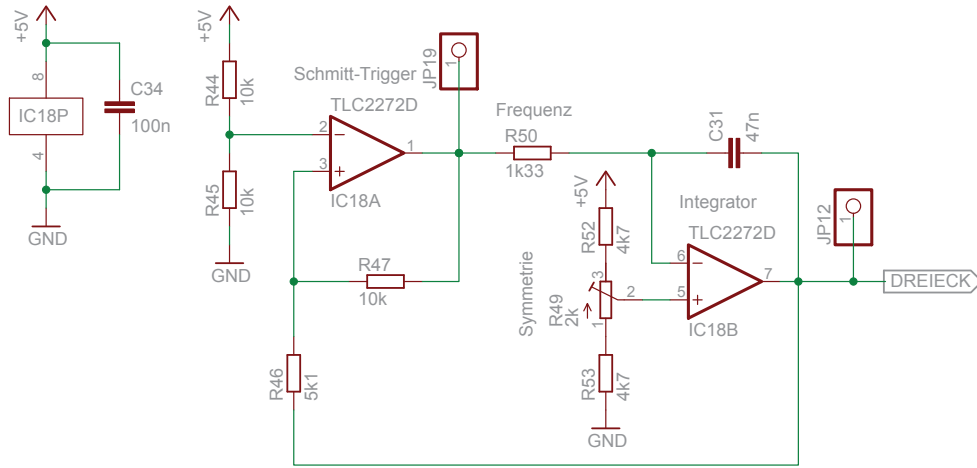


Abbildung 4.7.: Schaltplan des Dreieckgenerators.

Verhältnis der Bauteile  $R_{46}$  und  $R_{47}$  ab. Wann diese Schwellpunkte erreicht werden, kann anhand der Gleichungen (MAXIM 2004) für

$$U_{\text{Dreieck, min}} = U_e \cdot \frac{R_{47} - R_{46}}{2 \cdot R_{47}} \quad (4.9)$$

$$U_{\text{Dreieck, max}} = U_e \cdot \frac{R_{47} + R_{46}}{2 \cdot R_{47}} \quad (4.10)$$

berechnet werden. Mit den hier vorliegenden Bauteilwerten aus Abbildung 4.7, entsprechen diese Schwellpunkte den folgenden Werten.

$$\begin{aligned} U_{\text{Dreieck, min}} &= 5 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega - 5,1 \text{ k}\Omega}{2 \cdot 10 \text{ k}\Omega} & U_{\text{Dreieck, max}} &= 5 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega + 5,1 \text{ k}\Omega}{2 \cdot 10 \text{ k}\Omega} \\ U_{\text{Dreieck, min}} &= 1,225 \text{ V} & U_{\text{Dreieck, max}} &= 3,775 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.11)$$

An diesen Gleichungen ist zu erkennen, dass je geringer die Differenz zwischen den Bauteilgrößen  $R_{47}$  und  $R_{46}$  ist, desto größer wird der Abstand zwischen den Schwellwerten und desto kleiner die Frequenz. Um eine sehr hohe Frequenz zu bekommen, müssen die Bauteilgrößen für diese beiden Widerstände sehr eng beieinander liegen. Dabei ist aber darauf zu achten, dass  $R_{47}$  immer größer als  $R_{46}$  ist. Die Grundfrequenz (MAXIM 2004)

$$f_{\text{Grundfrequenz}} = \frac{R_{47}}{4 \cdot R_{50} \cdot C_{31} \cdot R_{46}} \quad (4.12)$$

hängt jetzt also von der Verflechtung dieser beiden Elemente, dem nicht invertierenden Schmitt-Trigger und dem invertierenden Integrator, ab. Dabei wird anhand der Bauteilwerte eine Grundfrequenz von

$$\begin{aligned} f_{\text{Grundfrequenz}} &= \frac{10 \text{ k}\Omega}{4 \cdot 1,33 \text{ k}\Omega \cdot 47 \text{ nF} \cdot 5,1 \text{ k}\Omega} \\ f_{\text{Grundfrequenz}} &= 7841,88 \text{ Hz} \approx 7,84 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4.13)$$

erzeugt.

Damit für diesen Dreiecksgenerator keine symmetrische Betriebsspannung, das heißt  $\pm 5\text{ V}$ , verwendet werden muss, sind an dem invertierenden Eingang des Schmitt-Triggers und dem nicht invertierenden Eingang des Integrators, Spannungsteiler angeschlossen worden. Diese liefern eine entsprechende Vorspannung, wodurch keine symmetrische Betriebsspannung benötigt wird. Um Bauteiltoleranzen, die Auswirkungen auf die Symmetrie des Dreiecksignals haben, entgegen zu wirken, ist in den Spannungsteiler des Integrators ein Potentiometer eingebaut worden. Mit ihm kann eine Anpassung des Signals vorgenommen werden. Dabei ist aber auch zu beachten, dass diese Anpassung zum Teil die Frequenz selbst beeinflusst.

Zur Funktionskontrolle sind die berechneten Daten für die Werte  $U_{\text{Dreieck, min}}$ ,  $U_{\text{Dreieck, max}}$  und  $f_{\text{Grundfrequenz}}$ , mit einer Messung des Dreiecksignals, siehe Abbildung 4.8, verglichen worden. Neben den einzelnen Messergebnissen, zeigt diese Grafik auch die Abhängigkeit des Dreiecksignals (rosa) von den Schaltpunkten des Schmitt-Triggers (gelb). Das Ergebnis dieser Messung ist, dass die gemessenen von den berechneten Werte abweichen. Diese Abweichungen liegen aber innerhalb des Toleranzbereiches für das Schaltelement des Azimut-Rotors und der Vergleichsspannung. Aus diesem Grund, können diese Abweichungen vernachlässigt werden. Die Abweichung der berechneten Werte, zu den tatsächlich gemess-

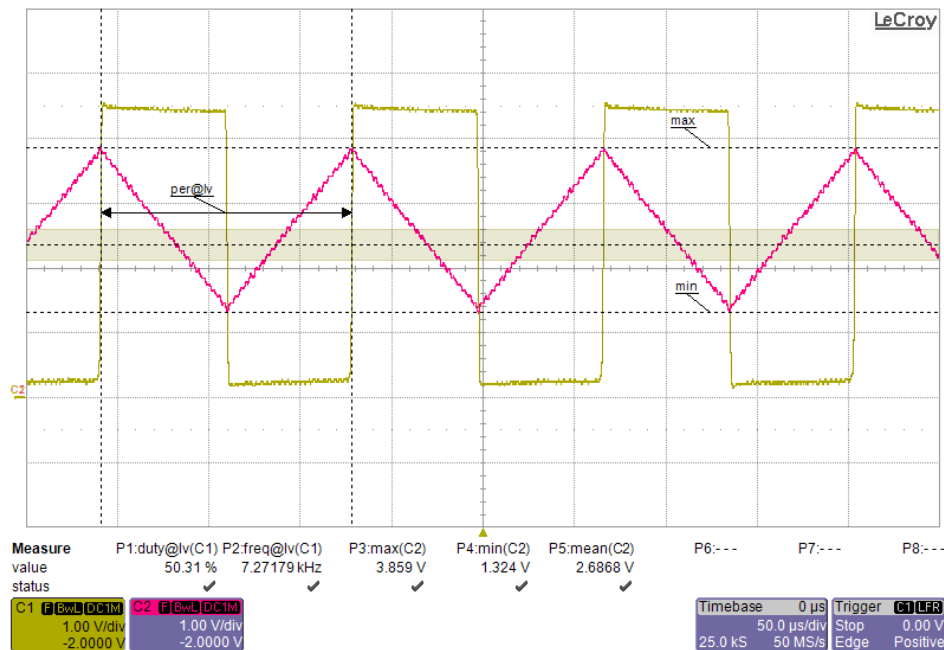


Abbildung 4.8.: Vermessung des generierten Dreiecksignals.

senen, kann man der nachfolgenden Tabelle 4.2 entnehmen. Betrachtet man die Werte für  $U_{\text{Dreieck, min}}$  und  $U_{\text{Dreieck, max}}$  erkennt man, dass beide Werte nach oben verschoben sind. Dieser Fehler kommt auf Grund einer leichten Bauteiltoleranz der Widerstände  $R_{44}$  und  $R_{45}$  am nicht invertierenden Eingang des  $IC_{18A}$  zu Stande. Um dieses Problem zu lösen, kann wie in dem Spannungsteiler des Integrators, auch hier ein Potentiometer eingebaut werden.



Tabelle 4.2.: Abweichung der Messwerte zur Erzeugung des Dreiecksignals.

Variable	$U_{\min}$ [V]	$U_{\max}$ [V]	$f_{\text{Grundfrequenz}}$ [kHz]
berechnet	1,225	3,775	7,84
gemessen	1,324	3,859	7,27

#### 4.3.1.2. Die Vergleichsspannung und das PWM-Signal

Die Vergleichsspannung für das Dreiecksignal wird vom Mikrocontroller digital vorgegeben und von einem Digital to Analog Converter (DAC) in eine analoge Spannung umgewandelt. In Abbildung 4.9 ist die dazugehörige Schaltung dargestellt. Hier wird mit dem  $IC_{25}$  der digitale Wert in eine analoge Spannung umgewandelt. Übertragen werden die Daten an den DAC mittels eines SPI-Protokolls. Wie dies genau funktioniert, kann man im Abschnitt 4.6.2 genauer nachlesen. Zum Empfang eines Datenpakets besitzt der DAC die vier Eingänge  $\overline{CS}$ ,  $SCL$ ,  $SDI$  und  $\overline{LDAC}$ . Der Pin  $\overline{LDAC}$  ist dabei aber nur Teil dieses einen speziellen Bausteins. Er soll dafür sorgen, dass die empfangenen Datenpakete, erst auf einen speziellen externen Befehl hin, in das Verarbeitungsregister geschoben werden. Diese Eigenschaft wird hier aber nicht benötigt, weshalb der Pin gegen Masse gelegt ist. In diesem Zustand werden die Daten sofort in das Verarbeitungsregister weitergeleitet. Wie bereits früher schon erwähnt, ist dieser Motortreiber so ausgelegt, dass ein Zweiter parallel betrieben werden kann. Um das zu gewährleisten, ist vor dem Eingang des  $\overline{CS}$  Pins, der Jumper  $JP_{18}$  platziert worden. Er dient zur Auswahl der Adresse des Motortreibers. Im aktuellen Zustand sind die Kontakte  $JP_{18-1}$  und  $JP_{18-2}$  mit einer Brücke versehen. Dadurch reagiert er nur auf Daten, die durch das Signal  $\overline{CS} - WRITE1$  aktiviert werden. Warum er erst auf den Befehl  $\overline{CS} - WRITE1$  reagiert, wird später noch in Abschnitt 4.6.2 beschrieben.

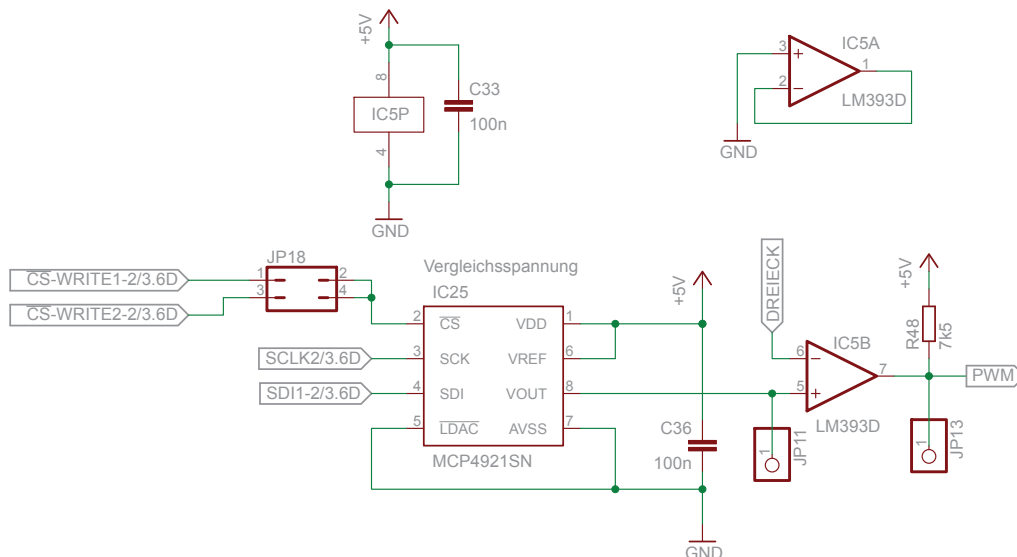


Abbildung 4.9.: Schematik für den Aufbau der Referenzspannung des PWM-Generators.

Versorgt wird dieser Baustein über die interne 5 V Spannungsversorgung des Motortreibers aus Abschnitt 4.1. Diese Spannung dient gleichzeitig auch als Referenzspannung  $U_{\text{REF}}$ , am Pin  $V_{\text{REF}}$ , für den Transformationsprozess des digitalen Wertes in eine analoge Spannung. Im Gegensatz zu einem ADC, wo jeder Spannung ein digitaler Wert zugewiesen wird, ist das beim DAC genau anders herum. Hier wird jedem digitalen Wert eine analoge Spannung zugewiesen. Um diesen Spannungswert zu berechnen, benötigt man die Referenzspannung  $U_{\text{REF}}$  und die Auflösung des DACs. Der hier verwendete DAC besitzt eine Auflösung von 12 Bit ( $2^{12} = 4096$ ), wodurch sich eine Ausgangsspannung  $U_{\text{OUT}}$  (Microchip 2010, S. 19) pro einzelmem UNIT von

$$\begin{aligned} U_{\text{OUT}} &= \frac{U_{\text{REF}}}{\text{Auflösung DAC}} \cdot \text{DAC}_{\text{VALUE}} \\ U_{\text{OUT}} &= \frac{5 \text{ V}}{4096 \text{ UNIT}} \cdot 1 \text{ UNIT} \\ U_{\text{OUT}} &= 0,001\,221 \text{ V/UNIT} = 1,221 \text{ mV/UNIT} \end{aligned} \quad (4.14)$$

ergibt. Die Einheit UNIT, dient als Größeneinheit für die digitalen Werte, mit denen im Mikrocontroller gerechnet wird. Dabei stellt die Zahl, die Wertigkeit der Binärzahlen  $2^0, 2^1, 2^2, 2^4, \dots$  dar.

Damit nun ein PWM-Signal mit einem bestimmten Duty Cycle zustande kommt, muss die Ausgangsspannung  $U_{\text{VOUT}}$  am Pin  $V_{\text{OUT}}$ , einen Spannungswert innerhalb der Schwellwerte  $U_{\text{Dreieck, min}}$  und  $U_{\text{Dreieck, max}}$  des Dreieck-Signals annehmen. Für die beiden gemessenen Schwellwerte, ergeben sich nach

$$\text{DAC}_{\text{VALUE}} = \frac{U_{\text{VOUT}}}{U_{\text{OUT}}} \quad (4.15)$$

die Werte:

$$\begin{aligned} \text{DAC}_{\text{min}} &= \frac{U_{\text{Dreieck, min}}}{U_{\text{OUT}}} & \text{DAC}_{\text{max}} &= \frac{U_{\text{Dreieck, max}}}{U_{\text{OUT}}} \\ \text{DAC}_{\text{min}} &= \frac{1,324 \text{ V}}{0,001\,221 \text{ V/UNIT}} & \text{DAC}_{\text{max}} &= \frac{3,859 \text{ V}}{0,001\,221 \text{ V/UNIT}} \\ \text{DAC}_{\text{min}} &= 1084 \text{ UNIT} & \text{DAC}_{\text{max}} &= 3161 \text{ UNIT} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Da es sich um digitale Werte handelt, wurden sie gleich auf die nächst kleinere Ganzzahl abgerundet. Diese Werte entsprechen nun Werten mit denen der Mikrocontroller ohne Probleme arbeiten kann. Diese beiden Werte definieren nun innerhalb des Leistungsbereichs des Rotors die Geschwindigkeiten „Rotor Aus“ und „Rotor volle Geschwindigkeit“. Um diese beiden Zustände genauer zu definieren und im Betrieb auch sicher zu halten, wurde der Wertebereich in dem sich die Ausgangsspannung  $U_{\text{VOUT}}$  bewegen darf, erweitert. Die neuen Werte für den DAC und welcher Ausgangsspannung  $U_{\text{VOUT}}$  dies entspricht, kann der Tabelle 4.3 entnommen werden.

Die Ausgangsspannung  $U_{\text{VOUT}}$  wird anschließend an den nicht invertierenden Eingang des Komparator „ $IC_{5B}$ “ aus Abbildung 4.9 weitergegeben. Dieser Baustein vergleicht nun das Dreiecksignal aus Abbildung 4.8 mit dieser Vergleichsspannung. In Abbildung 4.10 sieht man einen solchen Vergleich des Dreiecksignals (gelb) mit der Vergleichsspannung (rosa). Unterschreitet das Dreiecksignal den Wert der Vergleichsspannung, so schaltet der Ausgang

Tabelle 4.3.: neuer Arbeitsbereich des DACs.

	$DAC_{\min}$ [UNIT]	$U_{VOUT_{\min}}$ [V]	$DAC_{\max}$ [UNIT]	$U_{VOUT_{\max}}$ [V]
berechnet	1084	1,34	3161	3,87
neu zugewiesen	1000	1,28	3250	3,97

des Komparators auf HIGH. Dieser Zustand wird so lange beibehalten, bis das Dreieckssignal wieder größer ist als die Vergleichsspannung vom DAC. Wenn dem so ist, schaltet der Ausgang wieder auf LOW. Das dadurch gewonnene Ausgangssignal ist das gewünschte PWM-Signal (blau). Durch variieren der Vergleichsspannung wird das Duty Cycle und somit auch der Einschalt- und Ausschaltzeitpunkt des PWM-Signals verändert.

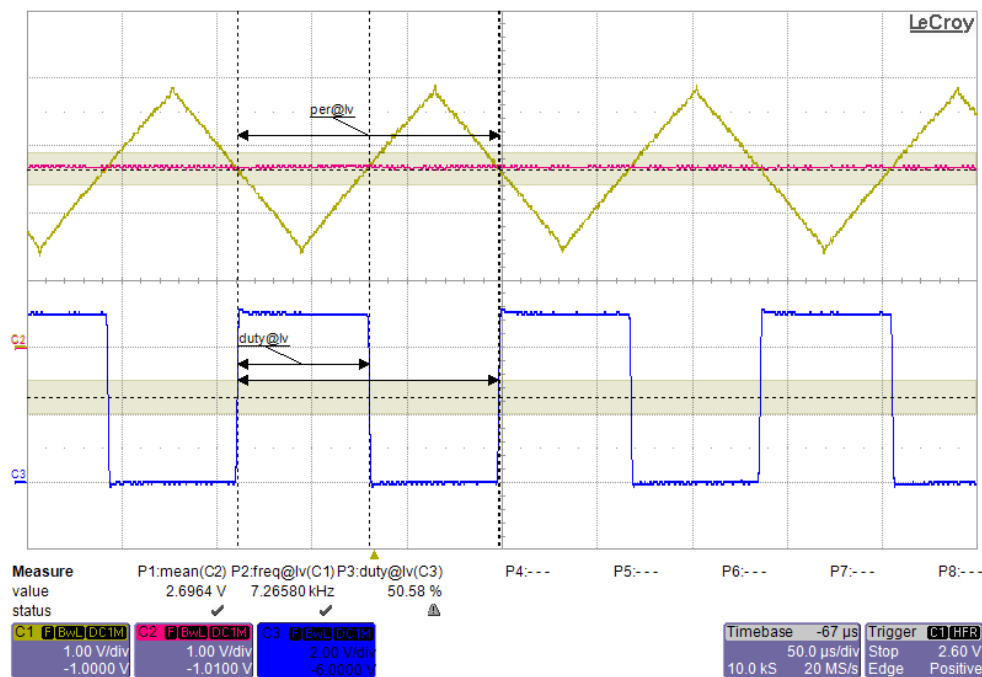


Abbildung 4.10.: Schaltvorgang des Komparators in Abhängigkeit der Eingangsspannungen.

### 4.3.2. Geschwindigkeitsregler

Welcher Wert an den DAC übermittelt wird, bestimmt der Geschwindigkeitsregler der Motorsteuerung. Dieser Teil besteht aus zwei unabhängigen Funktionen und ist in der Software der Antennensteuerung implementiert. Die erste Funktion ist der Regler zur Berechnung der Sollgröße für die Geschwindigkeit. Die zweite Funktion ist die Treiberschnittstelle, die die Sollgröße des Reglers an den Motortreiber übermittelt.

#### 4.3.2.1. Der Regler

Als Reglertype für die Berechnung der Sollgröße, hat man sich für einen einfachen Proportionalregler (P-Regler) entschieden. Diese einfache Reglertype, erfüllt die an ihn gestellten Anforderungen ausreichend. Seine Aufgabe ist, anhand der aktuellen Position und der Sollposition, sowie eines Zeitlimits zum Erreichen der Sollposition, einen Geschwindigkeitswert zu ermitteln. Dieser Regelalgorithmus wird immer dann aufgerufen, wenn der Leitrechner eine Position vorgibt. Diese Vorgabe kann durch zwei Befehle hervorgerufen werden.

1. Der Befehlssatz stammt von dem Satellitentrackingprogramm NOVA und wurde automatisch generiert.
2. Der Befehlssatz stammt von dem Benutzer, die gewünschte Position ist manuell gegeben worden.

Werden Positionsdaten an die MCU übermittelt, wandelt diese die Winkelmaße der Positionsdaten, in Stellgrößen, welche kompatibel mit jenen von den Potentiometer der Rotoren (siehe Abschnitt 2.3) sind. Anschließend hinterlegt der Mikrocontroller diese Daten mit einem Zeitstempel in einem Speicher. Bei diesem Zeitstempel handelt es sich um das Zeitlimit, zu dem die Antenne auf die jeweilige Position ausgerichtet sein muss. Wie groß dieses Zeitlimit ist, hängt vom Benutzer und den von ihm vorgenommenen Einstellungen in NOVA ab. Dieses Zeitlimit wird in jedem Durchlauf des Reglers, um die Abtastperiode des Mikrocontrollers verringert. Diese Abtastperiode beträgt 50 ms. Wenn das Zeitlimit sehr groß gewählt wurde, passiert es, dass NOVA neue Positionsdaten übermittelt, bevor die aktuellen abgearbeitet worden sind. Diese Daten werden ebenfalls mit einem Zeitstempel abgespeichert. Damit der Speicher des Mikrocontroller nicht unnötig belegt wird, ist ein Ringpuffer entworfen worden, der diese Daten aufnimmt. Sobald der umgewandelte Sollwert gespeichert ist, beginnt der Regler aus der Differenz zwischen der Istposition und der Sollposition, sowie der ihm zur Verfügung stehenden Zeitdauer, die Drehgeschwindigkeit für den Rotor zu berechnen. Bei der Istposition handelt es sich um den digitalisierten Spannungswert der Potentiometer aus dem Rotor. Wie diese Digitalisierung funktioniert, wird in dem nachfolgenden Abschnitt 4.5 beschrieben. Für die zur Verfügung stehende Zeitdauer unterscheidet der Regler zwei Fälle. Die Entscheidung welcher Fall ansteht, hängt von der Anzahl der Sollpositionen im Speicher ab. Dabei wird unterschieden, ob es die letzte Sollposition ist oder ob es noch weitere gibt. Der Grund für diese Unterscheidung ist, dass er bei der letzten Position noch mit einkalkuliert, wie lange er benötigt um den Rotor zu bremsen. Die Dauer des Bremsvorgang wird anschließend von der Zeitdauer zum Erreichen der Position abgezogen. Ebenfalls wird die Sollposition um die Strecke, die während des Abbremsen zurückgelegt wird, korrigiert. Dieser Punkt ist sehr wichtig, damit die Antenne nicht über das Ziel hinaus fährt oder durch sofortiges Abschalten der Rotoren, zum Schwingen beginnt. Wenn es nicht die letzte Position im Speicher ist, wird auch nicht am Zielort abgebremst, sondern sofort zum nächsten Ziel aus dem Speicher weiter gefahren. Hierdurch ist eine konstante Nachführung der Antenne zum Satelliten möglich. Sobald die Drehgeschwindigkeit ermittelt worden ist, übergibt der Regler diesen Wert an die Treiberschnittstelle.

Wenn das Zeitlimit einer Positionsvorgabe abgelaufen ist und sich ein weiterer Datensatz im Speicher befindet, wird dieser als neue Sollposition übernommen. Wenn nicht, wird der Regler bis zur nächsten Übermittlung von Positionsdaten deaktiviert.

Ein Ablaufdiagramm des Reglers kann der Abbildung 4.11 entnommen werden. Dieser Ablauf wird nach Aktivierung des Reglers in jedem Rechenzyklus der MCU aufgerufen. Damit die aktuellen Werte im nächsten Zyklus bekannt sind, werden diese ebenfalls in einem separaten Speicher zwischengespeichert.

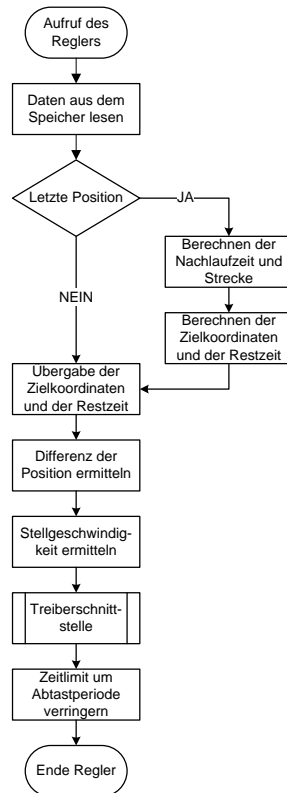


Abbildung 4.11.: Ablaufdiagramm des Regelalgorithmus.

#### 4.3.2.2. Die Treiberschnittstelle

Wenn der Regler eine Drehgeschwindigkeit und Drehrichtung ermittelt hat, übergibt er diesen Wert an die Treiberschnittstelle des Rotors. Diese ist dafür zuständig, dass die Stellgröße für den Rotor nicht zu schnell erhöht oder verringert wird. Hierbei wird die Differenz der alten Stellgröße zur neuen Stellgröße ermittelt und diese anschließend mit einem Maximalwert verglichen. Ist dieser Wert nicht größer als der Maximalwert, wird die neue Stellgröße akzeptiert. Wird aber der Maximalwert überschritten, wird nur dieser zu der alten Stellgröße hinzu addiert oder subtrahiert. Diese Überprüfung soll verhindern, dass der Rotor zu schnell angefahren oder abgebremst wird. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass die Schwellwerte für  $DAC_{\min}$  und  $DAC_{\max}$  nicht unter- oder überschritten werden. Somit arbeitet der DAC immer in der Nähe des Dreiecksignals.

Die Treiberschnittstelle wird aber nicht nur von dem Regler aufgerufen, sondern auch von der automatischen Kalibrierfunktion und dem Bedienerinterface. Der Grund dafür ist, dass auch hier ein Sanftanlauf und ein kontrolliertes Bremsmoment gewünscht sind. Natürlich

kann auch dem Treiber eine maximale Obergrenze für die Geschwindigkeit vorgeben werden. Hierdurch kann der Rotor auch im Handbetrieb genau positioniert werden. Ebenso ist es möglich, dass man den Wert, für die Veränderung der Stellgröße pro Zeitintervall, konfigurieren kann, wodurch der Rotor schneller oder langsamer anfährt und abbremst.

### 4.3.3. Messergebnisse PWM-Generator

Nach dem Aufbau des PWM-Generators sind zu Beginn nicht nur die Signale des Dreiecksgenerators vermessen worden. Da es sich um eine Eigenentwicklung handelt, ist auch kontrolliert worden, ob das PWM-Signal über den gesamten Bereich des Dreiecksignals linear verläuft. Hierdurch sollte kontrolliert werden, ob die Einstellungen und die Berechnungen für den DAC korrekt sind. Weiters ist auch kontrolliert worden, ob die eingestellten Bereiche für die beiden definierten Zustände „Rotor Aus“ und „Rotor volle Geschwindigkeit“ ausreichend groß sind. Dies ist vor allem für den Zustand „Rotor AUS“ wichtig, um ein dauerndes Ein- und Ausschalten der Schaltelemente des Azimut-Rotors zu verhindern. Das Ergebnis dieser Messung ist in der Abbildung 4.12 dargestellt. Man kann hier deutlich erkennen, dass der PWM-Generator über seinen gesamten Einstellbereich linear arbeitet. Ebenfalls erkennt man, dass die beiden definierten Zustände, das sind die beiden horizontalen Bereiche an den Enden der Gerade, ausreichend dimensioniert wurden. Durch diese Messung kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich das Ausgangssignal des Generators linear zum digitalen Eingangssignal des DAC verhält und die Geschwindigkeitssteuerung wie gewünscht funktioniert. Die kompletten Ergebnisse dieser Versuchsmessung sind im Anhang A.1 in der Tabelle A.1 ersichtlich.

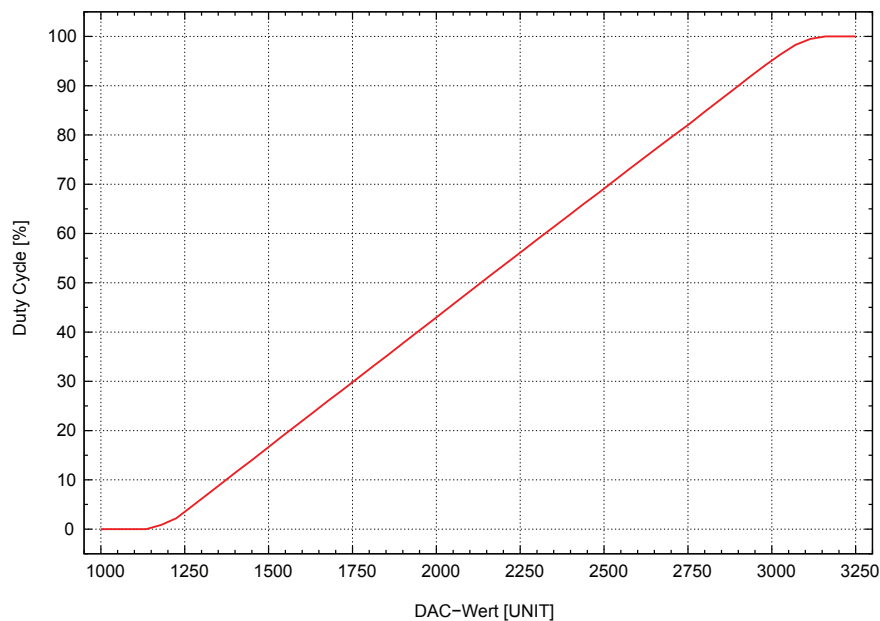


Abbildung 4.12.: Überprüfung des PWM-Generators auf Funktionstüchtigkeit.

Nachdem der PWM-Generator auf seine Funktionstüchtigkeit überprüft wurde, ist das Schaltelement und der Rotor angeschlossen worden. Anschließend ist überprüft worden,

ab wann der Rotor überhaupt zu drehen beginnt. Das hat den Grund, dass bis zu einem gewissen Duty Cycle der Motor nicht genügend Energie bekommt. Dadurch kann er kein ausreichend großes Drehmoment aufbauen, um das Trägheitsmoment zu überwinden. Durch empirische Tests anhand verschiedener Duty Cycle konnte festgestellt werden, dass ab einem Duty Cycle von etwa 28,7% eine erste wahrnehmbare Bewegung des Rotors feststellbar ist. Dieses Duty Cycle entspricht einem Wert von 1730 UNIT. Um noch einen gewissen Sicherheitsbereich für die Rotorstellung „Rotor Aus“ zu haben, wurde der Grenzwert wieder etwas nach unten versetzt. Der neue Wert für den unteren Grenzwert des DACs ist nun,  $DAC_{\min} = 1650 \text{ UNIT}$ . Dies entspricht einem Duty Cycle von 24,5% und einer Vergleichsspannung von  $U_{\text{VOUT}_{\min}} = 2,0212 \text{ V}$  (siehe Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14).

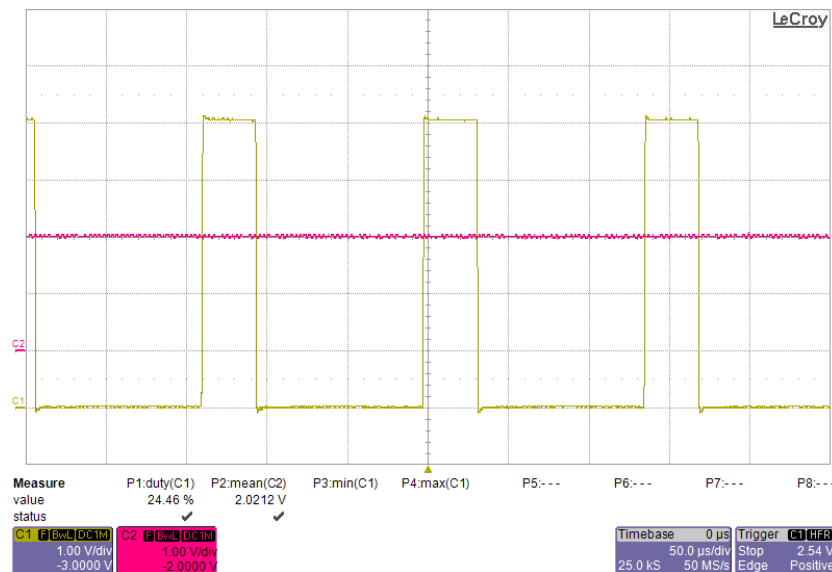


Abbildung 4.13.: Neue Untergrenze der Vergleichsspannung (rosa) und des Duty Cycles (gelb).

Innerhalb dieses neuen Arbeitsbereiches, ist bei den verschiedenen Duty Cycles auch die Zeit gemessen worden, wie lange der Rotor benötigt um von einem Endanschlag zum anderen zu gelangen. Hierdurch sollte ein messbarer Beweis erbracht werden, dass der Rotor in der Lage ist, sowohl sehr große Positionsunterschiede in kurzer Zeit wie auch kleine Unterschiede in einem langen Zeitraum, ohne Unterbrechung anzufahren. Das Ergebnis zu dieser Messung sieht man in der Abbildung 4.15. Ebenfalls in dieser Abbildung ersichtlich, ist die Drehgeschwindigkeit des Rotors bei den verschiedenen Duty Cycles. Wie man hier deutlich erkennen kann, weicht die Linie sehr stark von der idealen Gerade ab. Der Grund für diese Abweichung liegt aber nicht in der Schaltung für die Geschwindigkeitssteuerung, sondern wird durch die Bauweise des Rotors hervorgerufen. In der dazugehörigen Tabelle 4.4, sind die Werte für den oberen und unteren Grenzwert des Drehverhaltens nochmals genauer beschrieben. Hier wird neben der Dauer und der Stellgröße auch das dazugehörige Duty Cycle und die Drehgeschwindigkeit des Rotors in  $[\circ/\text{s}]$  und pro Abtastperiode des Mikrocontroller  $[\circ/50\text{ms}]$  dargestellt. Die gesamten Ergebnisse zu der Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 findet man im Anhang A.1 in der Tabelle A.2.

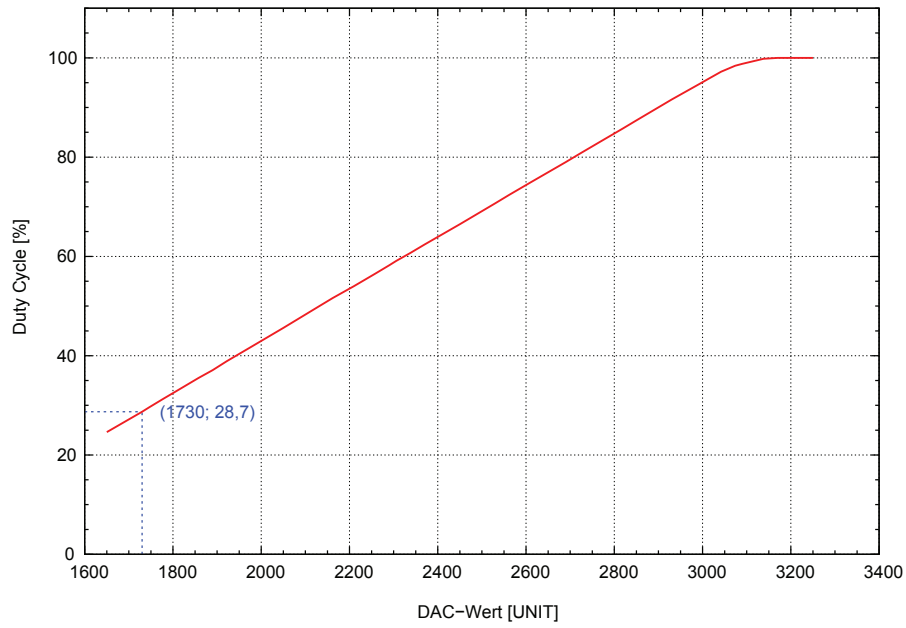


Abbildung 4.14.: Abhängigkeit des Duty Cycles vom digitalen Wert des DAC.

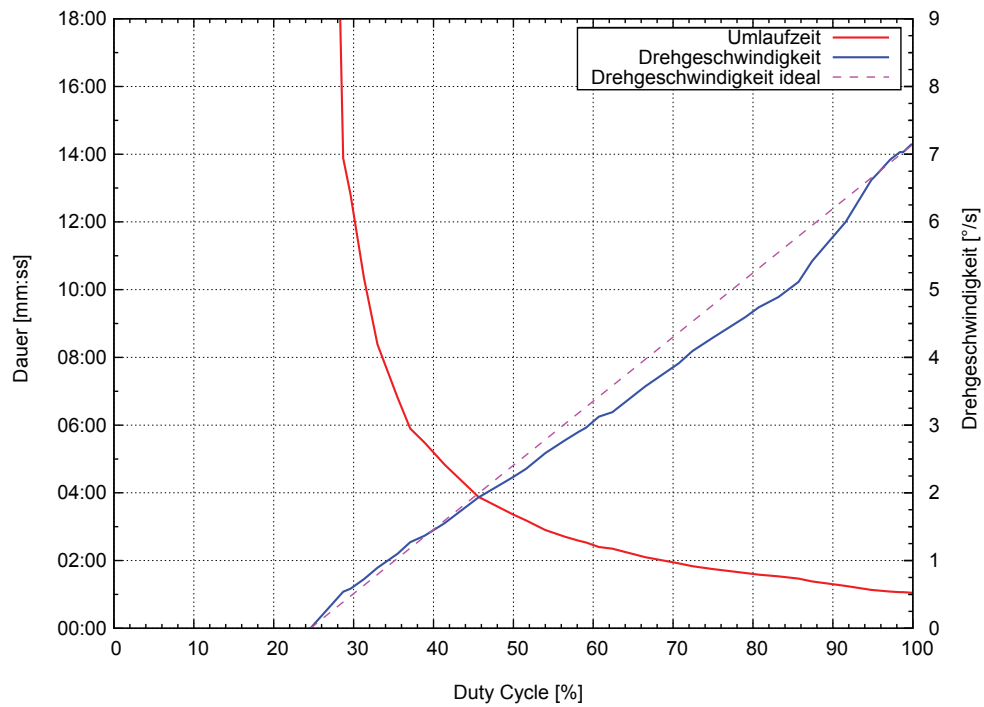


Abbildung 4.15.: Abhängigkeit der Umlaufzeit und der Drehgeschwindigkeit des Azimut-Rotors bei verschiedenen Duty Cycles.



Tabelle 4.4.: Oberer und unterer Grenzwert des Drehverhaltens für den Azimut-Rotor.

	Dauer eines Umlauf [mm:ss]	DAC Wert [UNIT]	Duty Cycle [%]	Dreh- geschwindigkeit [°/s]	Drehgeschwindigkeit pro Abtastperiode [°/50 ms]
$DAC_{\max}$	01:03	3250	100,0	7,14	0,36
$DAC_{\min}$	13:53	1730	28,7	0,54	0,03

## 4.4. Schaltelemente der Rotoren

Die am stärksten beanspruchten Bauteile des Motortreibers sind die Schaltelemente zur Ansteuerung der Rotoren. Hierbei werden auf Grund der Bauform der Rotoren zwei verschiedene Systeme verwendet. Diese beiden unterscheiden sich sehr stark in ihrem Betrieb, der Bauform und in ihren Fähigkeiten.

Für den Azimut-Rotor wird, wie bereits im Kapitel 3 beschrieben, eine sogenannte H-Brücke verwendet. Mit diesem Bauteil ist es nun möglich die Drehrichtung und die Geschwindigkeit des Rotors zu steuern.

Zur Ansteuerung des Elevations-Rotors werden zwei Relais verwendet. Mit diesen Bauteilen ist nur eine Richtungsvorwahl und eine einfache Schutzschaltung des Rotors möglich. Eine Geschwindigkeitsregelung ist mit diesen Bauteilen nicht realisierbar.

In den nachfolgenden Abschnitten, wird der Aufbau dieser beiden Komponenten im Detail genauer beschrieben.

### 4.4.1. Elemente des Elevations-Rotors

In der Abbildung 4.16 sieht man den schematischen Aufbau des Schaltelements für den Elevations-Rotor. Versorgt wird dieser Rotor über eine 24 V Wechselspannung an den Kontakten  $X_3$ . Eine genauere Auflistung über die Anschlüsse kann man dem Klemmenplan in Abschnitt 4.7 oder dem Schaltplan aus Anhang B.3 entnehmen. Zum Schutz des Rotors und der Schaltelemente ist diesem Eingang eine Schmelzsicherung vorgeschaltet. Dabei handelt es sich um eine 2 A Glassicherung. Im Falle eines Defektes der Energieversorgung oder des Rotors, trennt diese Schutzeinrichtung den Motortreiber komplett von der Energieversorgung ab. Da dieses Sicherungselement nicht einfach zurückgesetzt werden kann, ist es nicht auf dem Motortreiber integriert, sondern in die Rückwand des Gehäuses eingelassen worden. Hierdurch ist ein einfacher Tausch der Sicherung möglich.

Die Versorgungsspannung 12 V Gleichspannung für die Spulen, wird direkt auf dem Motortreiber zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 4.1). Durch Aktivieren einer der beiden MOS-FETs  $Q_5$  oder  $Q_6$  wird die Spule des dazugehörigen Relais  $K_1$  oder  $K_2$  aktiviert, wodurch dessen Schließer betätigt und der Stromkreis zum Motor geschlossen wird. Durch die besondere Verdrahtung der Kontakte der Relais, kann immer nur eine Richtung aktiviert werden. Ein unabsichtliches Einschalten beider Richtungen ist daher nicht möglich. Betätigt werden die MOS-FETs durch den am Motortreiber integrierten I/O-Port aus Abschnitt 4.2. Um die Spule zum Aktivieren der Relais und den jeweiligen MOS-FET zu

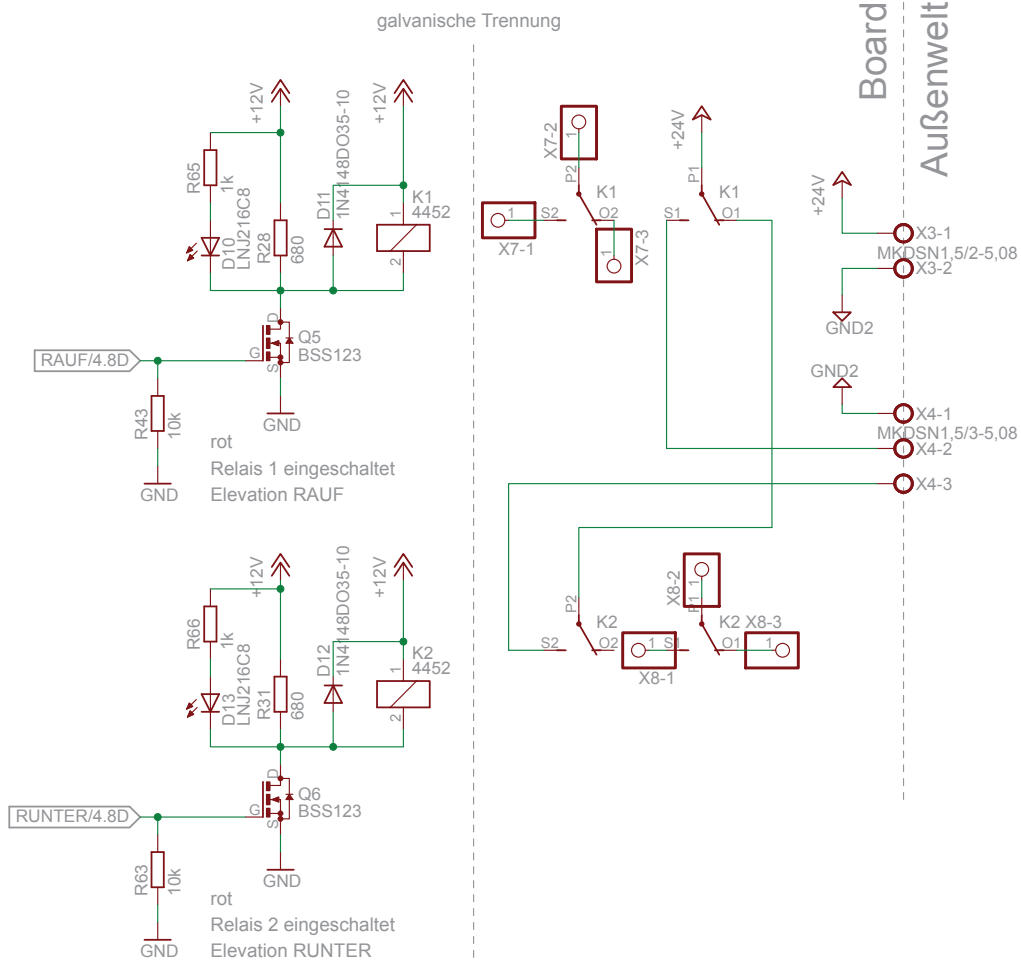


Abbildung 4.16.: Schematik für die Schaltelemente des Elevations-Rotor.

schützen, sind die Dioden  $D_{11}$  und  $D_{12}$  in die Schaltung eingebaut worden. Werden Dioden in dieser Weise verbaut, bezeichnet man sie als Freilaufdiode (Schiemann et al. 2009, S. 77, 228). Diese sollen verhindern, dass beim Abschalten der Relais, die Spannung die in den Spulen induziert wird, so groß wird, dass sie die MOS-FETs beschädigt. Der Nachteil der Freilaufdioden ist aber, dass sie die Schaltzeit der Relais deutlich verlängern, da das Magnetfeld in der Spule langsamer abgebaut wird.

Neben der Spule, wird beim Einschalten der MOS-FETs auch die jeweilige „LED“  $D_{10}$  und  $D_{13}$ , die parallel zu den Spulen liegen, aktiviert. Diese zeigen an, dass das jeweilige Relais gerade aktiv ist. Die Farbe Rot wurde bei diesen Elementen absichtlich ausgewählt, da sie signalisieren sollen „*ACHTUNG! Hier ist etwas aktiv*“.

Einen Vorteil den die Relais gegenüber der H-Brücke haben ist, dass sie den Rotor nochmals galvanisch von dem Motortreiber trennen. Das muss jedoch so sein, da dieser mit einer Wechselspannung betrieben wird und der Rest des Motortreibers für Gleichspannung ausgelegt ist. Falls jedoch der Elevations-Rotor gegen einen neuen Gleichspannungsrotor getauscht wird, können diese Relais als galvanisch getrennte Schalter arbeiten. Hier muss man aber beachten, dass das Relais  $K_1$ , auf Grund seiner Verdrahtung, eine höhere Priorität be-

sitzt als  $K_2$  und bei Aktivierung dessen Befehl unterbricht. Alternativ ist der jeweils zweite Schaltkontakt der Relais über die Stiftleisten  $X_7$  und  $X_8$  zugänglich. Diese Anschlüsse besitzen keine gegenseitige Verriegelung, wodurch sie beide gleichzeitig eingeschaltet werden können.

#### 4.4.1.1. Testergebnisse des Schaltelements für den Elevations-Rotor

Während der Rotor von Anschlag nach Anschlag gefahren ist, wurden die Messdaten für Stromverbrauch, Eingangsspannung und die Zeitdauer einer Umdrehung aufgenommen. Eine Volle Umdrehung ist bei diesem Rotor ein  $180^\circ$  Schwenk. Bei der Messung für den Stromverbrauch des Rotors ist jede Sekunde ein Messpunkt aufgenommen worden. Das Resultat dieser Messung sieht man in Abbildung 4.17 und die kompletten Messdaten im Anhang A.2 in der Tabelle A.3. Man erkennt hier deutlich, dass der Rotor mit dem neuen Motortreiber, etwas langsamer ist als mit der original Steuerung. Der Grund hierfür ist, dass neben dem geringeren Stromverbrauch, auch eine geringere Eingangsspannung anliegt. Als Eingangsspannung ist für den neuen Motortreiber eine Spannung von  $U_{\text{Ele}} = 25 \text{ V}$  gemessen worden. Im Vergleich dazu, wurde beim Original eine Spannung von  $U_{\text{Ele}} = 28,9 \text{ V}$  gemessen. Wie man nun deutlich erkennt, sind diese Werte ausschlaggebend für die Drehgeschwindigkeit des Rotors. Obwohl der Rotor etwas langsamer ist, kann man dennoch sagen, dass der neue Motortreiber genau so gut, wenn nicht sogar effektiver arbeitet, als das Original. Anhand dieser Messdaten konnte die Dauer für die  $180^\circ$  Drehung bestimmt werden. Der Rotor legte dabei mit dem neuen Motortreiber die volle Strecke in etwa 1 Minute und 25 Sekunden zurück.

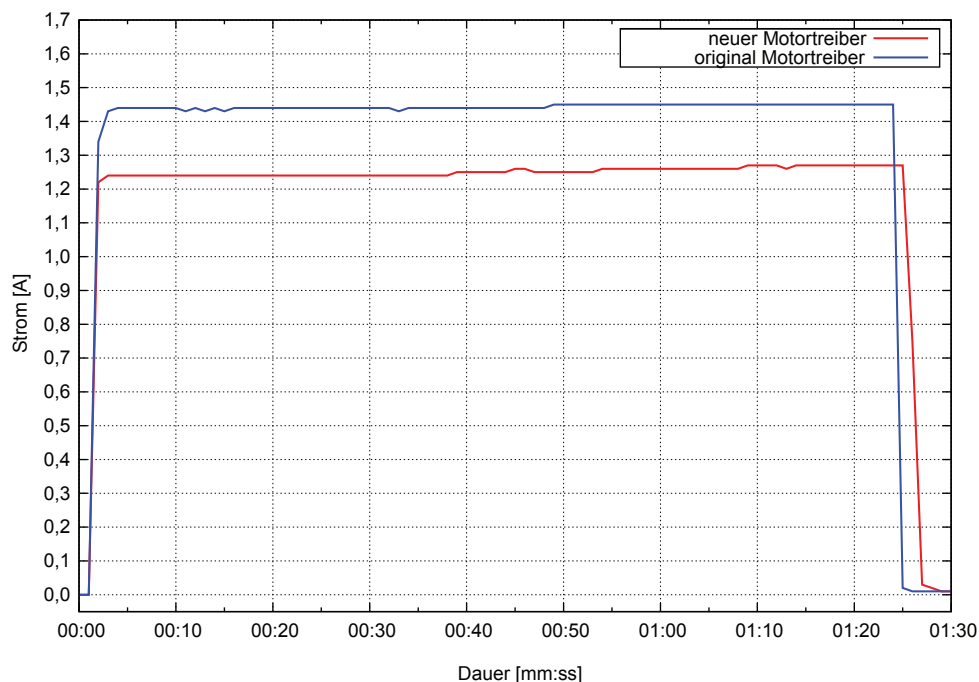


Abbildung 4.17.: Messung der Stromaufnahme des Elevations-Rotor während einer Umdrehung.

Die maximale Stromaufnahme  $\hat{I}_{\text{Ele}}$  des neuen Motortreibers betrug dabei  $\hat{I}_{\text{Ele}} \approx 1,27 \text{ A}$ . Weiters ist mit diesen Messdaten auch der durchschnittliche Stromverbrauch  $\bar{I}_{\text{Ele}}$  mit Hilfe der Gleichung für das arithmetische Mittel (Bartsch 2001, S. 571)

$$\bar{I}_{\text{Ele}} = \frac{1}{n} \sum_{i=a}^b x_i \quad (4.17)$$

wobei

$$n = b - a + 1 \quad (4.18)$$

ist, berechnet worden. Diese Berechnung hat einen Wert von

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{Ele}} &= \frac{1}{86} \sum_{i=3}^{88} x_i \\ \bar{I}_{\text{Ele}} &= \frac{1}{86} \cdot 105,86 \text{ A} \\ \bar{I}_{\text{Ele}} &= 1,23 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.19)$$

für den durchschnittlichen Stromverbrauch des neuen Motortreibers ergeben.

Aus dem Mittelwert  $\bar{I}_{\text{Ele}}$  des Stroms und der Eingangsspannung  $U_{\text{Ele}}$  des Rotors lässt sich die Scheinleistung (Seyr & Schwaiger 1998, S. 129f)

$$S = U \cdot I \quad (4.20)$$

berechnen. Mit den hier angegebenen Werten, beträgt die Scheinleistung des Elevations-Rotors

$$\begin{aligned} S_{\text{Ele}} &= 25 \text{ V} \cdot 1,23 \text{ A} \\ S_{\text{Ele}} &= 30,77 \text{ VA.} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Vergleicht man nun die Wert für die Leistung und die Umdrehungsdauer mit jenen aus dem Datenblatt (siehe Abschnitt 2.5.2), kommt man zu dem Schluss, dass dieser Rotor an seiner Leistungsgrenze betrieben wird.

#### 4.4.2. Elemente des Azimut-Rotors

Der Aufbau des Schaltelements für den Azimut-Rotor ist wesentlich aufwändiger als jenes für den Elevations-Rotor. Das Schaltelement dieses Rotors besteht aus zwei Komponenten. Aus dem Schaltelement für den Rotor und einer Sicherungsschaltung aus Hardware und Software, die die Stromaufnahme des Rotors überwacht. Beginnen wir nun mit dem Schaltelement.

#### 4.4.2.1. Die H-Brücke.

Der Begriff H-Brücke, ergibt sich aus dem Aufbau dieses Bauteils, da seine Komponenten wie ein H angeordnet sind. Eine andere Bezeichnung für einen solchen Bauteil ist auch Gleichstromsteller. Diese Methode zur Steuerung eines Gleichstrommotors ist laut Schiemann et al. (2009, S. 603), heutzutage der Standard bei der Ansteuerung eines Gleichstrommotors. Die Funktionsweise, die hinter dieser Technik steckt, ist recht simpel. In Abbildung 4.18 ist ein einfacher Aufbau eines solchen Bauelementes ersichtlich. Werden die Leistungshalbleiterschalter, auch MOS-FET genannt,  $Q_1$  und  $Q_4$  aktiviert, beginnt ein Strom von  $L+$  über den Motor nach  $L-$  zu fließen. Der Motor beginnt jetzt in eine Richtung zu drehen. Aktiviert man hingegen die Schalter  $Q_2$  und  $Q_3$ , dreht sich der Motor in die andere Richtung. Ein gleichzeitiges Einschalten der Elemente auf einer Seite des Motors oder gar aller Schalter ist verboten. Der Grund dafür ist, dass dadurch die Quelle kurzgeschlossen würde.

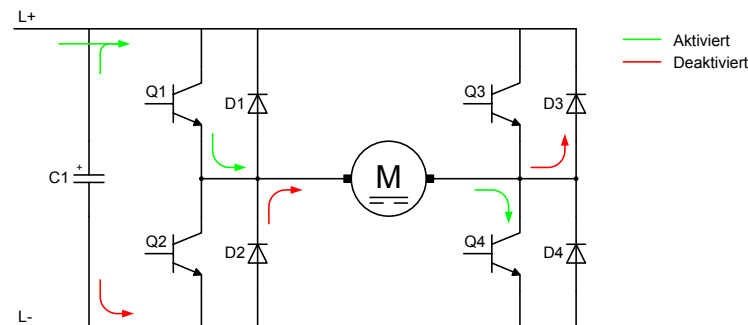


Abbildung 4.18.: Funktionsweise einer H-Brücke (Quelle: Schiemann et al. 2009, S. 603).

Durch takten der Halbleiterelemente mit einem PWM-Signal, ist es möglich die Ausgangsspannung und damit die Geschwindigkeit des Motors zu beeinflussen. In der Ausschaltphase des Taktsignals sind die jeweiligen Halbleiterelemente deaktiviert. Durch die Induktivität des Motors und die in ihm induzierte Spannung, fließt der durch die induzierte Spannung entstehende Strom weiter. In dieser Phase fließt der Strom aber nicht über die Schalter, sondern über die Freilaufdioden  $D_2$  und  $D_3$ . Der Kondensator  $C_1$ , am Eingang der Schaltung, dient in der Abschaltphase als Puffer für die Energie.

Heutzutage bekommt man einen solchen Gleichstromsteller, bis zu einer gewissen Strombelastbarkeit, bereits in einem kleinen IC-Gehäuse, das nicht größer ist als eine Euro-Münze. Zusätzlich besitzen diese Bauteile meist auch eine integrierte Logik, die eine Reihe von Aufgaben übernimmt, wie zum Beispiel den Bauteil vor Beschädigung schützen. Als Gleichstromsteller für den Azimut-Rotor der Bodenstation, ist der Baustein MC33887 der Firma Freescale Semiconductors (2008) verwendet worden. In Abbildung 4.19 ist ein Blockschaltbild der Schalt- und Logikelemente dieser H-Brücke dargestellt.

Der MC33887 ist jetzt wie in Abbildung 4.20 gezeigt, folgender Maßen in die Schaltung des Motortreibers integriert. Als Schaltelemente innerhalb des ICs dienen auch hier vier MOS-FETs. Versorgt wird die H-Brücke dabei über die Versorgungsspannung  $V_+$  mit 24 V Gleichspannung. Diese Versorgungsspannung ist durch die elektronische Sicherung aus Abschnitt 4.1.1 vor Überbelastung geschützt. Der Kondensator  $C_1$  dient hierbei sowohl als

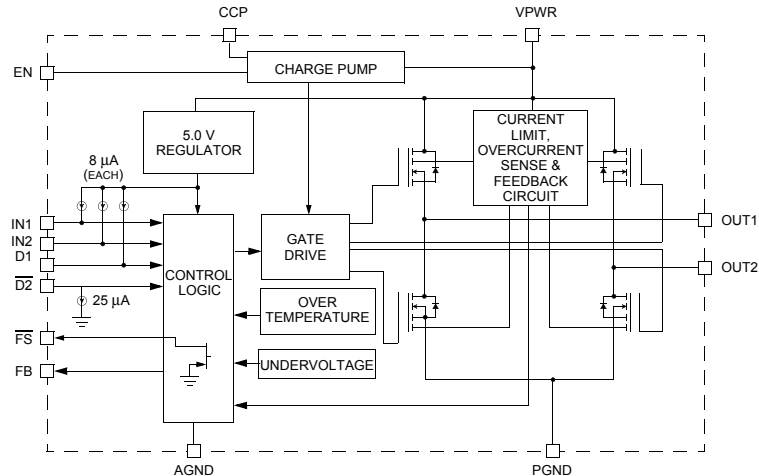


Abbildung 4.19.: Blockschaltbild der H-Brücke MC38877 (Quelle: Freescale Semiconductors 2008, S. 2).

Ladungspuffer für die Energie und auch als Stützkondensator für die interne Schaltungslogik. Damit der IC aktiviert ist, muss am Pin „EN“ ein HIGH Signal anliegen. Mit Setzen dieses Eingangs auf HIGH, wird dieses Bauelement vom Standby-Mode in den Aktiv-Mode umgeschaltet. Wie auch schon die MOS-FETs beim Schaltelement für den Elevations-Rotor im Abschnitt 4.4.1 werden auch die Eingänge dieses Schaltelements über den I/O-Port aus Abschnitt 4.2 gesteuert. Über die Kontakte „OUT1“ und „OUT2“, ist der Motortreiber mit dem Rotor verbunden. Für die Wahl der Drehrichtung des Rotors sind die Eingänge „IN1“ und „IN2“ gedacht. Je nach Auswahl eines Eingangs aktiviert die interne Logik des Bausteins die richtigen MOS-FETs. Die an die Eingänge angeschlossenen Widerstände  $R_{21}$  und  $R_{22}$  fungieren jeweils als sogenannte Pulldown-Widerstände und sichern auch beim Einschalten des Motortreibers einen LOW-Eingangsspiegel. Neben der Richtungsvorwahl, wird über diese beiden Eingänge, auch die Geschwindigkeit des Rotors gesteuert. Damit die beiden einzelnen Signale als ein gemeinsames Signal an den Eingängen der H-Brücke anliegen, werden diese in einer vorgeschalteten Logik kombiniert. Die Verbindung wird dabei mit Hilfe der NOR-Gatter  $IC_{17A-C}$  realisiert. Der schematische Aufbau und die Logik dieser Verknüpfung, ist in der Abbildung 4.21 und in der Tabelle 4.5 dargestellt. In den beiden Gattern „ $IC_{17A}$ “ und „ $IC_{17B}$ “, wird die eigentliche Verknüpfung von Richtung und Geschwindigkeit vorgenommen. Damit diese Gatter richtig durchschalten, müssen die beiden Eingangssignale einen LOW-Pegel aufweisen. Beim PWM-Signal wird das mit Hilfe des „ $IC_{17C}$ “ vorgenommen. Bei den beiden Richtungssignalen  $\overline{LINKS}$  und  $\overline{RECHTS}$ , ist das in der Software vorgenommen worden. Diese beiden Steuersignale sind als Negativ-Logik am I/O-Expander ausgeführt. Wird eines der beiden Richtungssignale aktiviert, das heißt auf LOW gesetzt, schaltet das jeweilige NOR-Gatter durch. Neben dem Aktivieren des Gatters wird auch die entsprechende LED  $D_1$  oder  $D_{14}$  aktiviert. Diese sollen wie auch schon die LED beim Schaltelement des Elevations-Rotor anzeigen, „*ACHTUNG! Hier ist etwas aktiv*“. Dementsprechend ist auch wieder die Farbe Rot für diese LEDs ausgewählt worden.

Das Auftreten einer Störung am Bauteil  $IC_1$  aus Abbildung 4.20, wird über den Ausgang „FS“ gemeldet. Wenn dem so ist, wechselt der Ausgang von einem HIGH auf einen LOW-

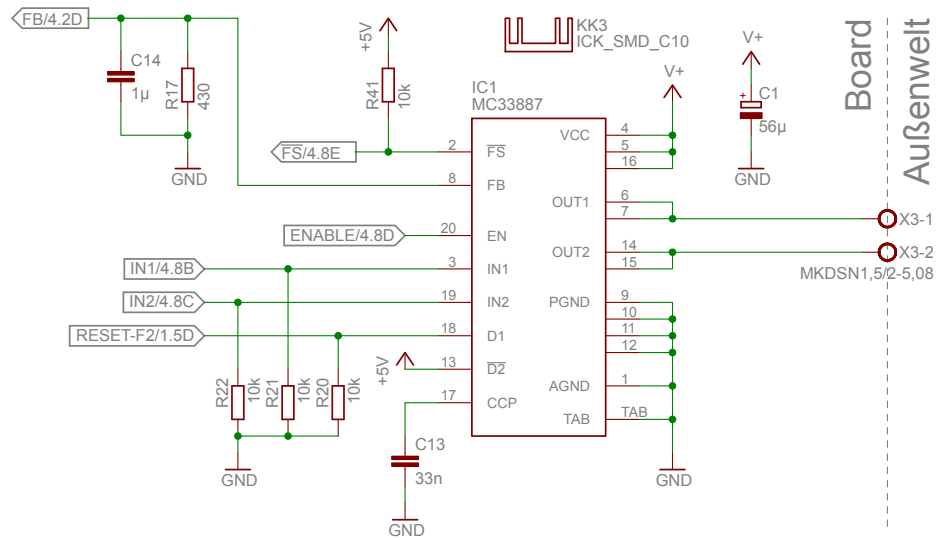


Abbildung 4.20.: Schematik für den Leistungsschalter des Azimut-Rotors.

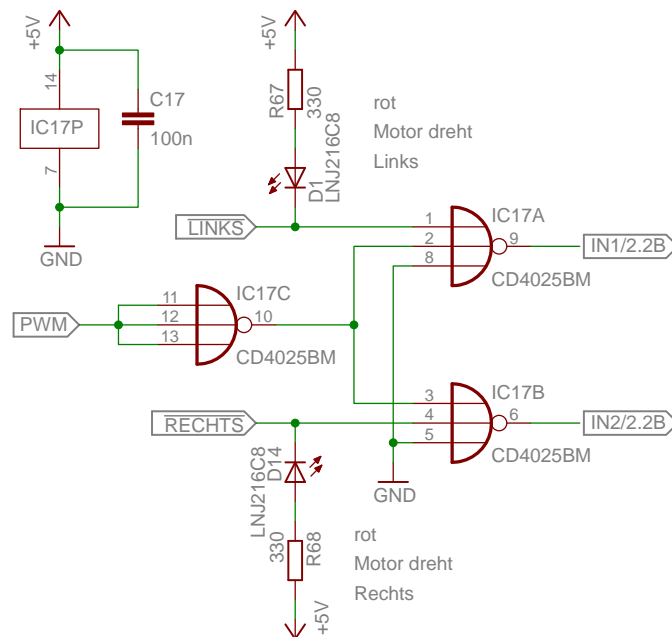


Abbildung 4.21.: Logik zum Vereinen der Signale für Drehrichtung und Geschwindigkeit des Azimut-Rotors.

Tabelle 4.5.: Wahrheitstabelle der Schaltungslogik des Azimut-Rotors.

$\overline{LINKS}$	$\overline{RECHTS}$	$PWM$	$IN1$	$IN2$	Aktion
1	0	1	0	1	H-Brücke dreht <i>RECHTS</i>
0	1	1	1	0	H-Brücke dreht <i>LINKS</i>
0	0	1	1	1	irregulär
X	X	0	0	0	H-Brücke deaktiviert
1	1	X	0	0	H-Brücke deaktiviert

Pegel. Hier ist jedoch zu beachten, dass dieser Pin nur meldet, dass ein Fehler aufgetreten ist, aber nicht welcher. Fehler die durch die interne Logik des MC 33887 erkannt werden sind laut Datenblatt (Freescale Semiconductors 2008, S. 1):

- Unterspannung,
- Kurzschluss und
- Überhitzung.

Im Gegensatz zu der Störungsmeldung „Unterspannung“, welche durch Beheben des Problems automatisch quittiert wird, bleiben die Meldungen für die beiden anderen, nach dem Lösen des Problems, weiterhin bestehen. Solange eine Fehlermeldung angezeigt wird, ist der MC 33887 durch seine Logik in den Standby-Mode geschaltet. Wenn der Fehler für den Kurzschluss oder die Überhitzung behoben ist, kann der MC 33887 über den Eingang „D1“, durch einen kurzen HIGH-Impuls, wieder eingeschaltet werden. Um den letzten Fehlerpunkt erst gar nicht eintreten zu lassen, wurden einige technische Maßnahmen ergriffen um dies zu verhindern. Welche Maßnahmen das sind, kann man in dem nachfolgenden Abschnitt 4.4.2.3 nachlesen. Da der Pin „ $\overline{FS}$ “ als Open-Collector-Ausgang konstruiert ist, wird hier der Widerstand  $R_{41}$  als Pullup benötigt.

Der am Eingang „CCP“ angeschlossenen Kondensator  $C_{13}$  ist nicht zwingend notwendig, aber laut Datenblatt (Freescale Semiconductors 2008, S. 21) hilft er, um störende Schwingungen beim Einschalten der MOS-FETs bei hohen Taktfrequenzen zu mindern. Daher wurde dieser in die Schaltung integriert. Der Pin „ $\overline{D2}$ “ wird nicht benötigt und ist daher deaktiviert.

Damit man nun weiß, ob der IC aktiv ist oder ob ein Fehler aufgetreten ist, wurden die Signale „EN“ und „ $\overline{FS}$ “ mit LEDs beschaltet. In Abbildung 4.22 sieht man, wie diese aufgebaut sind. Durch Aktivieren des Pins „EN“, wird auch die LED  $D_6$  aktiviert. Da dieses optische Signal nur einen Zustand und keine Warnung darstellt, wurde die Farbe Grün ausgewählt. Anders ist das bei der LED für das Signal der Fehlermeldung. Hier wurde wieder die Aktionsfarbe Rot ausgewählt, um den Bediener auf etwas aufmerksam zu machen. Da es sich bei diesem Signal auch um eine Negativ-Logik handelt, musste ein PNP-Transistor zum Schalten verwendet werden.



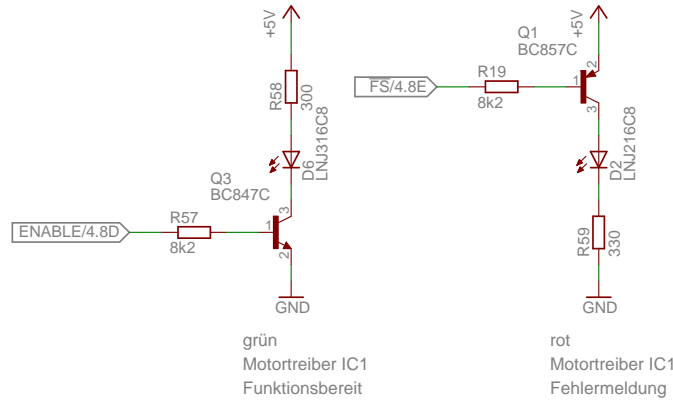


Abbildung 4.22.: Schematischer Aufbau der Anzeigeelemente der H-Brücke.

#### 4.4.2.2. Sicherungselement der H-Brücke

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnittes erwähnt, besteht das Sicherungselement für das Schaltelement des Azimut-Rotors aus einem Hardware- und einem Softwareteil.

Der letzte Ausgang des ICs, aus Abbildung 4.20, ist der Ausgang „FB“. Dieser Ausgang gibt in Echtzeit anhand eines Proportionalitätsfaktor, den aktuellen Stromverbrauch der H-Brücke an. Laut Datenblatt (Freescale Semiconductors 2008, S. 1, 3, 21) beträgt dieser Faktor

$$\frac{1}{375} \quad (4.22)$$

des tatsächlichen Stromverbrauchs. Das bedeutet, der Strom am Ausgang „FB“, lässt sich über die Gleichung

$$I_{FB} = \frac{I_{LAST}}{375} \quad (4.23)$$

berechnen. Durch Beschalten dieses Ausgangs mit einem Widerstand, hier durch den Widerstand  $R_{17}$  dargestellt, kann dieser Strom, wie auch schon bei der elektronischen Sicherung aus Abschnitt 4.1.1, mit dem Ohm'schen Gesetz (4.3) in eine Spannung umgewandelt werden. Der für die Berechnung benötigte Widerstand, wird wieder durch Formelumstellung und unter zu Hilfenahme der Maximalwerte für die Spannung und den Strom, ermittelt. Für den Widerstand  $R_{17}$  ergibt sich bei einer maximalen Spannung  $U_{FB} = 5 \text{ V}$  und einem maximalen zulässigen Laststrom  $I_{LAST} = 4 \text{ A}$

$$\begin{aligned} I_{FB} &= \frac{U_{FB}}{R_{17}} \\ R_{17} &= \frac{U_{FB}}{I_{FB}} \\ R_{17} &= \frac{5 \text{ V}}{\frac{4 \text{ A}}{375}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

ein Widerstandswert von

$$R_{17} = 468,75 \Omega. \quad (4.25)$$

Da es in der Widerstandsreihe „E24“ keinen  $468,75 \Omega$  Widerstand gibt, ist der Wert auf den nächst kleineren geändert worden. Der neue Widerstandswert für  $R_{17}$  beträgt daher

430  $\Omega$ . Durch die Veränderung des Widerstandes  $R_{17}$  hat sich auch der maximal zulässige Laststrom verändert. Der neue maximal zulässige Laststrom besitzt jetzt einen Wert von

$$\begin{aligned}
 I_{\text{FB}} &= \frac{U_{\text{FB}}}{R_{17}} \\
 \frac{I_{\text{LAST}}}{375} &= \frac{U_{\text{FB}}}{R_{17}} \\
 I_{\text{LAST}} &= \frac{U_{\text{FB}}}{R_{17}} \cdot 375 \\
 I_{\text{LAST}} &= \frac{5 \text{ V}}{430 \Omega} \cdot 375 \\
 I_{\text{LAST}} &= 4,36 \text{ A.}
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

Da es das letzte Sicherungselement vor dem Rotor ist, muss der Abschaltstrom natürlich kleiner sein als der des Elements davor. Das Element davor, ist die elektronische Sicherung. Diese ist mit ihrem variablen Abschaltpunkt auf 4 A eingestellt. Aus diesem Grund, ist das Sicherungselement der H-Brücke so definiert, dass es bereits ab einer dauerhaften Belastung von  $I_{\text{LAST}} = 3,7 \text{ A}$  abschalten soll. Mit dieser Belastung und dem Proportionalitätsfaktor stellt sich dabei am Widerstand  $R_{17}$  eine Spannung  $\hat{=} U_{\text{FB}}$  von

$$\begin{aligned}
 I_{\text{FB}} &= \frac{U_{\text{FB}}}{R_{17}} \\
 U_{\text{FB}} &= I_{\text{FB}} \cdot R_{17} \\
 U_{\text{FB}} &= \frac{I_{\text{LAST}}}{375} \cdot R_{17} \\
 U_{\text{FB}} &= \frac{3,7 \text{ A}}{375} \cdot 430 \Omega \\
 U_{\text{FB}} &= 4,243 \text{ V}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

ein.

Der Kondensator  $C_{14}$  wird im einfachen Modus, also ohne Steuerung der Geschwindigkeit, nicht benötigt. Wird die H-Brücke aber auch zum Steuern der Geschwindigkeit, mit hohen PWM-Taktraten an den Eingängen „IN1“ und „IN2“ beschaltet, hilft er ähnlich wie der Kondensator  $C_{13}$  am Eingang „CCP“, Spannungsspitzen im Einschaltmoment am Pin „FB“ zu unterdrücken.

Die Spannung  $U_{\text{FB}}$  wird anschließend mit einem ADC in einen digitalen Wert umgewandelt. Die Schaltung für die Transformation ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Der dabei eingesetzte ADC besitzt eine Auflösung von 12 Bit und überträgt seine Daten mittels eines I<sup>2</sup>C-Protokolls an die MCU. Wie diese Übertragungstechnik funktioniert, wird später in Abschnitt 4.6.1 genauer beschrieben. Die Beschaltung des ADC ist wie man sieht sehr einfach. Versorgt wird er mit einer 5 V Gleichspannung die auch gleich als Referenzspannung  $U_{\text{REF}}$  dient. Das bedeutet, er besitzt eine Auflösung für die Eingangsspannung

$U_{\text{IN}}$  (National Semiconductor 2010, S. 15) pro einzelmem UNIT von

$$U_{\text{IN}} = \frac{U_{\text{REF}}}{\text{Auflösung ADC}} \quad (4.28)$$

$$U_{\text{IN}} = \frac{5 \text{ V}}{4096 \text{ UNIT}}$$

$$U_{\text{IN}} = 0,001221 \text{ V/UNIT} = 1,221 \text{ mV/UNIT}.$$

Die Umrechnung der analogen Eingangsspannung am Pin „VIN“  $\hat{=}$   $U_{\text{FB}}$  in einen digitalen Wert, wird mit Hilfe der Formel

$$ADC_{\text{VALUE}} = \frac{U_{\text{FB}}}{U_{\text{IN}}} \quad (4.29)$$

durchgeführt. Nach dieser Gleichung, ergibt sich für den maximal erlaubten Laststrom von  $I_{\text{LAST}} = 3,7 \text{ A}$  an der H-Brücke, ein digitaler Wert von

$$ADC_{\text{VALUE}} = \frac{4,243 \text{ V}}{1,221 \text{ mV/UNIT}} \quad (4.30)$$

$$ADC_{\text{VALUE}} = 4375,02 \text{ UNIT}.$$

Da diese Werte keine Kommastellen haben können, wird der Wert auf  $ADC_{\text{VALUE};\text{max}} = 4375 \text{ UNIT}$  abgerundet. Dieser Wert wird über die I<sup>2</sup>C Schnittstelle, die aus den Anschlüssen „SDA“ und „SCL“ besteht, an die Motorsteuerung übertragen. Zusätzlich ist dieser ADC mit einem Adress-Pin ausgestattet. Dieser Anschluss erlaubt es, dass sich zwei gleiche Bausteine in einem Bus-Netzwerk befinden können. Dies ist möglich, wenn bei einem IC der Jumper  $JP_{15}$  gesetzt ist und bei dem anderen nicht. Hierdurch wird die Bus-Adresse des Bausteins verändert. Der Widerstand  $R_{15}$  wird benötigt, damit der Adress-Pin bei nicht gesetztem Jumper, nicht zwischen LOW und HIGH Signal hin und her schwankt.

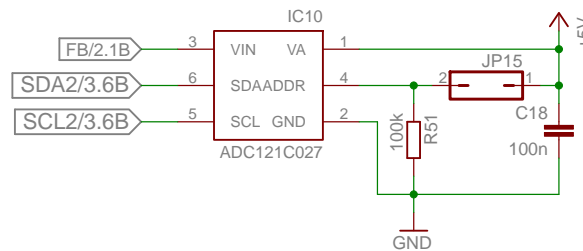


Abbildung 4.23.: Schematische Darstellung der Messschaltung für die aktuelle Stromaufnahme der H-Brücke.

Nach dem das analoge Signal digitalisiert ist, kann es von der Motorsteuerung verarbeitet werden. Abgefragt wird das Ergebnis dieser Messung, in der selben Routine wie auch schon der I/O-Expander aus Abschnitt 4.2, alle 5 Sekunden über den I<sup>2</sup>C-Bus. Sobald der aktuelle Wert und der letzte gespeicherte Wert größer oder gleich sind als der definierte Grenzwert  $ADC_{\text{VALUE};\text{max}}$ , stoppt auch er, durch den LOCK-Befehl, alle aktiven Aufgaben des Rotors und schaltet ihn automatisch ab. Erst durch Betätigen eines manuellen UNLOCK-Befehls kann der Rotor wieder freigegeben werden. Dieses Sicherheitselement

wurde eingebaut, weil es über den Leitrechner einfach an die aktuellen Gegebenheiten der Antennenanlage angepasst werden kann. Dabei muss nur der definierte Grenzwert in der Software neu berechnet und anschließend in den Mikrocontroller eingespielt werden. Durch diese Möglichkeit zum Setzen des Grenzwertes, wird das System sehr flexibel für verschiedene Antriebssysteme.

#### 4.4.2.3. Testergebnisse des Schaltelements für den Azimut-Rotor

Zu Beginn der Tests für den Azimut-Rotor, ist ein Belastungstest für diesen Teil der Schaltung durchgeführt worden. Dabei ging es darum, ob das Schaltelement bei der maximalen Strombelastbarkeit des Rotors (Yaesu 2010a, S. 20) und für die gesamte Dauer eines möglichen Satellitenüberfluges, geeignet ist. Ein Überflug eines Satelliten in einer LEO-Umlaufbahn, dauert in etwa 15 Minuten. Aus diesem Grund wurde die Zeitdauer für den Testlauf, auf etwas mehr als 30 Minuten ausgedehnt. Gemessen wurde dabei die Temperatur der H-Brücke, denn es ist bekannt gewesen, dass durch regelmäßiges Ein- und Ausschalten der MOS-FETs, Hitze erzeugt wird. Als Taktfrequenz zum Ein- und Ausschalten für die MOS-FETs, ist das PWM-Signal aus Abbildung 4.24 verwendet. Dabei handelt es sich um ein PWM-Signal mit einem Duty Cycle von 85 %.

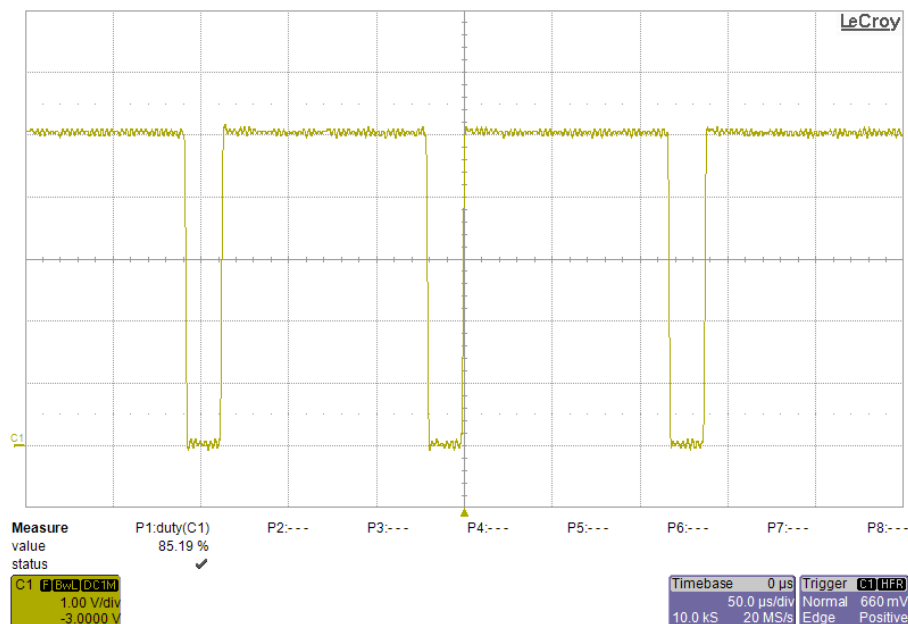


Abbildung 4.24.: Taktfrequenz zum Ein- und Ausschalten der MOS-FETs für den Belastungstest der H-Brücke bei einem Duty Cycles von 85 %.

Schon in der Entwurfsphase wurde darauf geachtet, ausreichend Kühlfläche für den Gleichstromsteller einzuplanen. Mittels Durchkontaktierungen unterhalb des MC 33887, wird die Hitze auch auf die Unterseite der Platine, wo eine weitere Massefläche ist, umgelenkt und abgeführt. Zusätzlich ist der Bauteil noch mit einem Kühlkörper an seiner Oberseite ausgestattet. Mit diesen Schutzmaßnahmen gegen Überhitzung, ist ein Testlauf gestartet worden. Ein wichtiger Faktor eines solchen Testlaufs ist aber auch die Umgebungstemperatur, da

hiervon die Betriebstemperatur sehr stark abhängt. Zum Zeitpunkt dieser Messung betrug die Umgebungstemperatur  $\approx 29,4^\circ\text{C}$ . Die Ergebnisse zu diesem Testlauf findet man in der Abbildung 4.25 und im Anhang A.3 in der Tabelle A.4 unter dem Punkt „ohne aktive Kühlung“. Anhand dieser Daten wurde festgestellt, dass die Betriebstemperatur der H-Brücke bis über  $100^\circ\text{C}$  hinausgeht. Obwohl die H-Brücke laut Datenblatt (Freescale Semiconductors 2008, S.1) eine maximale Betriebstemperatur von  $125^\circ\text{C}$  besitzt, waren diese Werte zu hoch. Der Grund dafür ist, dass die Komponenten, die dem Schaltelement am nächsten sind nur bis höchstens  $105^\circ\text{C}$  ausgelegt sind.

Hier wurde eindeutig die durch die Leistung des Bauteils entstehende Hitze unterschätzt. Eine Verbesserung dieses Problems konnte durch eine aktive Kühlung des Bauteils mittels Luft erzielt werden. Wie diese aktive Kühlung erfolgt, wird später in dem Abschnitt 5.3 genauer beschrieben. Diese Lösung, hat nun zur Folge, dass die Temperatur um bis zu mehr als  $20^\circ\text{C}$  geringer ist, als zu vor. Dies kann man auch deutlich in der Abbildung 4.25 an der Kurve „mit aktiver Kühlung“ erkennen. Die Umgebungstemperatur bei dieser Messung betrug  $\approx 28,3^\circ\text{C}$ . Die Ergebnisse zu dieser Messung, findet man ebenfalls im Anhang A.3 in der Tabelle A.4 unter dem Punkt „mit aktiver Kühlung“.

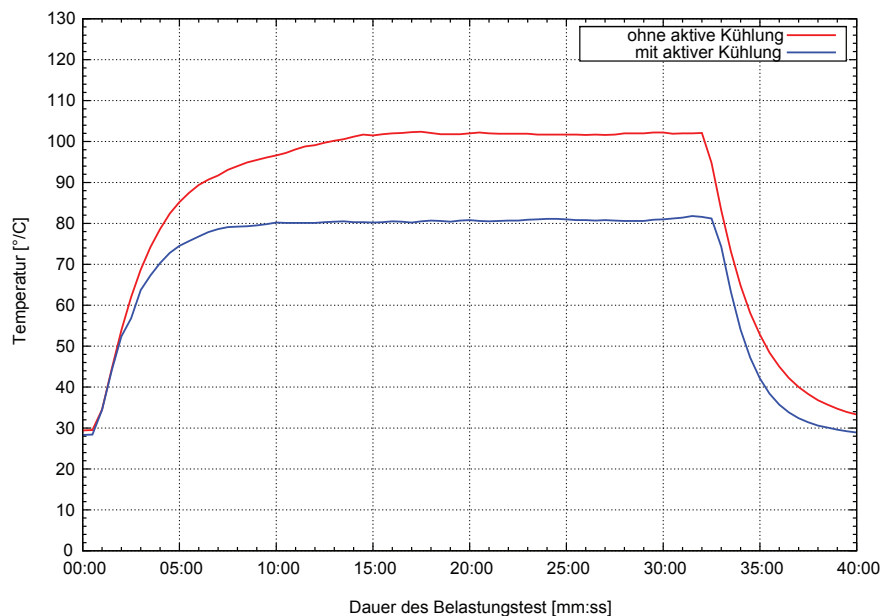


Abbildung 4.25.: Messergebnisse der Temperatur während der Belastungstests.

Diese Temperaturen wird die H-Brücke in der hier aufgebauten Anlage aber nie bekommen. Betrachtet man die beiden Kurven, sieht man, dass diese maximalen Temperaturen erst nach mehreren Minuten erreicht werden. Bei diesen Ein- und Ausschaltzeitpunkten des PWM-Signals aus Abbildung 4.24, würde der Rotor aber bereits nach kurzer Zeit, einen der beiden Endanschläge erreichen. Somit kann er sich bei diesem Duty Cycle nicht so stark erhitzen. Selbst wenn der Überflug des Satelliten bis zu 15 Minuten dauert kann diese Temperatur nicht erreicht werden. Damit er in dieser Zeit dem Satelliten folgt, muss sich die Antenne nur langsam bewegen. Eine langsame Bewegung hat nun zur Folge, dass das PWM-Signal nur ein kleines Duty Cycle besitzt. Dies hat zur Folge, dass die Stromaufnahme des Rotors

geringer ist, wodurch die Temperatur nicht so stark ansteigen kann.

Ein weiterer Grund warum diese Werte nie erreicht werden ist, dass diese Ergebnisse nur für den Belastungstest gelten. Mit ihm sollte gezeigt werden, dass diese Komponenten für einen Langzeitbetrieb geeignet sind. Bei Messungen im Normalbetrieb wurde festgestellt, dass der für den Belastungstest herangezogene Betriebsstrom von rund 3,5 A, nicht erreicht wird. Die Abbildung 4.26 zeigt den Stromverbrauch des Azimut-Rotors im normalen Betrieb bei einer vollen Umdrehung, bei der gleichen Taktfrequenz wie aus Abbildung 4.24. Eine volle Umdrehung des Azimut-Rotors ist ein Schwenk um  $450^\circ$ . Die genauen Messdaten findet man im Anhang A.3 in der Tabelle A.5.

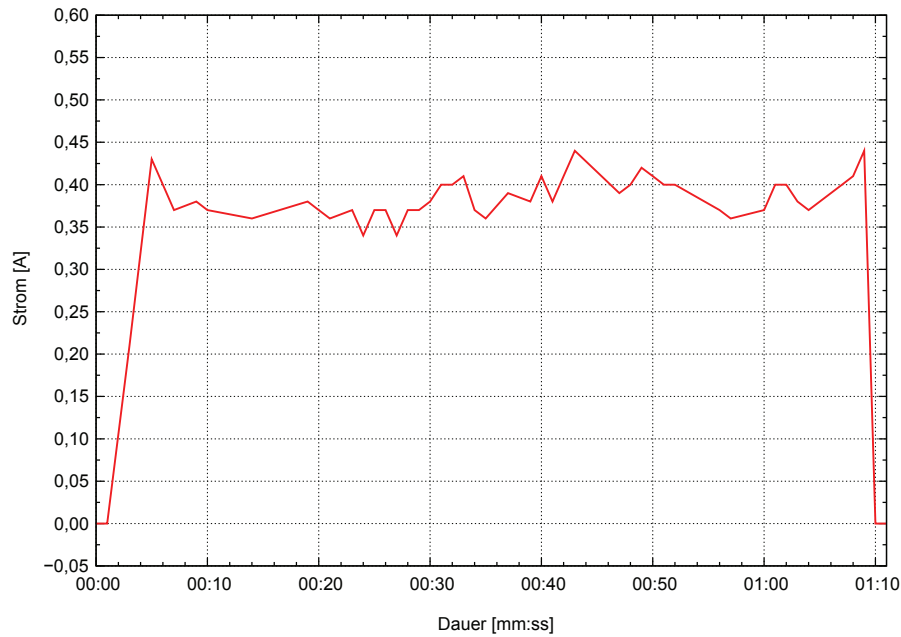


Abbildung 4.26.: Stromaufnahme des Azimut-Rotors während einer vollen Umdrehung bei einem Duty Cycle von 85 %.

Mit einer so geringen Stromaufnahme der H-Brücke, bei einem so großen Wert des Duty Cycles des PWM-Signals, kommt man zu dem Schluss, dass der Rotor für diesen Zweck bestens geeignet ist. Eine Überhitzung des Schaltelements für den Azimut-Rotor muss nicht befürchtet werden.

Der maximale Stromverbrauch  $\hat{I}_{Azi}$  und die minimale Umdrehungsdauer kann aber nicht aus dieser Messung entnommen werden. Der Grund hierfür ist, dass der Rotor nicht mit voller Geschwindigkeit betrieben wird. Hierzu ist eine eigene Messung vorgenommen worden. Wie auch schon bei dem Schaltelement für den Elevations-Rotor ist auch hier die Messung mit dem original Motortreiber verglichen worden. Bei diesem Vergleich stellte sich heraus, dass der neue Motortreiber etwas länger als das Original benötigt um eine volle Umdrehung durchzuführen. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 4.27 zu sehen. Der Grund für diese Verzögerung liegt dabei in der für den Rotor zur Verfügung gestellten Versorgungsspannung. Der original Motortreiber lieferte bei der Einstellung volle

Geschwindigkeit eine Spannung von  $U_{\text{Azi}} = 25,3 \text{ V}$ . Hingegen der neu entwickelte Motortreiber nur eine Spannung von  $U_{\text{Azi}} = 23,7 \text{ V}$ . Anhand dieser Versorgungsspannung legte der Rotor die volle Umdrehung in etwa 1 Minute und 4 Sekunden zurück.

Anhand dieser Messung, ist auch der Spitzenstrom für den neuen Motortreiber ermittelt worden. Dieser Spitzenstrom tritt immer im Einschaltmoment des Schaltelements auf. Für den neuen Motortreiber ist hierzu ein Wert von  $\hat{I}_{\text{Azi}} = 0,48 \text{ A}$  gemessen worden. Im Vergleich hierzu, liegt der Spitzenstrom des original Motortreibers bei etwas über  $\hat{I}_{\text{Azi}} = 0,8 \text{ A}$ . Der Grund für dieses unterschiedliche Einschaltverhalten des Rotors liegt in der Ansteuerung der Schaltelemente. Durch die langsame Erhöhung des Duty Cycle wird dieses Problem stark verringert (siehe Abschnitt 4.3.2.2). Die durchschnittliche Stromaufnahme ist auch anhand dieser Messdaten berechnet worden. Die genauen Messdaten findet man in Anhang A.3 in der Tabelle A.6. Die Formel zum Berechnung des Mittelwertes (4.17) und (4.18) ist wieder die selbe wie auch schon beim Elevations-Rotor. Für den durchschnittlichen Stromverbrauch des Azimut-Rotors  $\bar{I}_{\text{Azi}}$  ergibt sich ein Wert von

$$\bar{I}_{\text{Azi}} = \frac{1}{65} \sum_{i=3}^{67} x_i \quad (4.31)$$

$$\bar{I}_{\text{Azi}} = \frac{1}{65} \cdot 24,74 \text{ A} \quad (4.32)$$

$$\bar{I}_{\text{Azi}} \approx 0,38 \text{ A}.$$

In Verbindung mit der Versorgungsspannung  $U_{\text{Azi}}$  kann die Leistung mit Hilfe der Gleichung (Schiemann et al. 2009, S. 36)

$$P = U \cdot I \quad (4.33)$$

berechnet werden. Anhand dieser Bauteilwerte, ergibt sich für den Azimut-Rotor eine Leistung  $P_{\text{Azi}}$  von

$$P_{\text{Azi}} = 23,7 \text{ V} \cdot 0,38 \text{ A} \quad (4.34)$$

$$P_{\text{Azi}} \approx 9,02 \text{ W}.$$

Da der Rotor viel weniger Energie benötigt als zu Beginn vermutet, musste die Vergleichsspannung der elektronischen Sicherung, aus Abschnitt 4.1.1, angepasst werden. Diese ist zu Beginn der Messungen auf einen Laststrom des High-Side-Switch von etwa 4 A eingestellt gewesen. Da der Rotor aber laut Messungen bei Volllast nur einen Spitzenwert von  $\hat{I}_{\text{Azi}} = 0,48 \text{ A}$  hat, ist die elektronische Sicherung neu eingestellt worden. Der variable Abschaltpunkt für den maximal zulässigen Laststrom ist auf  $I_{\text{LAST}} = 1,3 \text{ A}$  verringert worden. Zum Auslösen der Sicherung, ist das Potentiometer für die Vergleichsspannung mit Hilfe der Gleichung (4.8) neu berechnet worden. Der neue Wert für das Potentiometer  $R_7$  beträgt jetzt  $U_{R_7} = 1,39 \text{ V}$ . Ebenso ist auch der Wert des Sicherheitselementes der H-Brücke angepasst worden. Der neue Wert ist für einen maximalen Laststrom von  $I_{\text{LAST}} = 1 \text{ A}$  berechnet worden. Der digitale Wert für die MCU besitzt jetzt nach den Gleichungen (4.27) und (4.30) einen Wert von  $ADC_{\text{VALUE}} = 939 \text{ UNIT}$ .

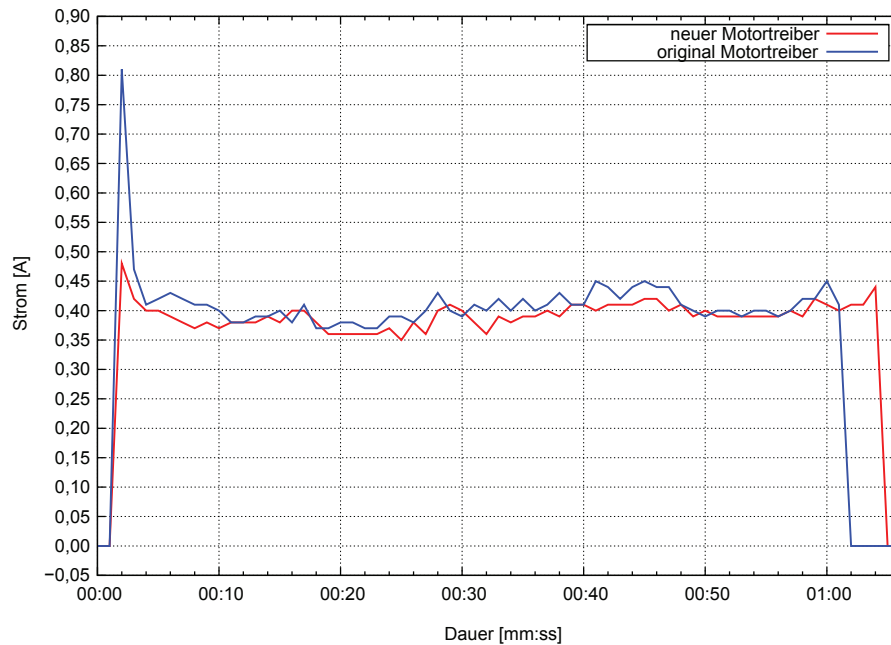


Abbildung 4.27.: Stromaufnahme des Azimut-Rotors während einer vollen Umdrehung bei einem Duty Cycle von 100 %.

## 4.5. Positionsmessung

Um eine Kommunikation zwischen dem Satelliten und der Bodenstation herstellen zu können, muss die Antenne der Bodenstation nicht nur bewegt werden, sondern sie muss auch präzise ausgerichtet werden. Hierzu ist es notwendig die Stellung der Rotoren zu kennen. Wie bereits im Abschnitt 2.3 beschrieben, besitzen beide Rotoren eine Methode zur Rückmeldung ihrer Position. Auch wurde kurz beschrieben, wie der Motortreiber RCI-SE von EA4TX (2003) diese Daten ausgewertet hat. Dieses Messverfahren, hat sich als sehr robust und zuverlässig herausgestellt. Aus diesem Grund, ist eine ähnliche Variante, auch für diesen neuen Motortreiber konstruiert worden. Wie diese Messschaltung aufgebaut ist und welche Eigenschaften sie besitzt, wird nun in den nachfolgenden Punkten genauer beschrieben.

Obwohl das Messverfahren sehr gut ist und auch präzise die Position ermittelt, besitzt die Hardware des alten Motortreibers einige Schwächen, die erst während des Betriebes entdeckt wurden. Eine gravierende Schwäche ist zum einen, die etwas zu geringe Auflösung des ADCs mit nur 10 Bit. Um diese Schwäche zu kompensieren, sind immer vier Messungen durchgeführt worden, um anschließend ein Ergebnis mit 12 Bit zu erhalten. Ein anderes Problem des RCI-SE Boards ist die Schnittstelle zur Außenwelt. Das Board wurde nämlich dafür entwickelt um mit einem Personal Computer (PC) über die parallele Schnittstelle DB25 zu kommunizieren.



### 4.5.1. Die Funktionsweise der neuen Messvariante

Um die Schwächen zu beheben, wurden Teile des Messprinzips komplett überarbeitet. Außerdem sind im Zuge der Neugestaltung des Messverfahrens neue Eigenschaften hinzugefügt worden, die für den Betrieb zweier Motortreiber benötigt werden. Das überarbeitete Design entspricht der in Abbildung 4.28 dargestellten Schematik. Komponenten, die in dieser neuen Variante verbessert wurden, sind zum einen die beiden Tiefpassfilter, das Verstärkungsverhalten des nicht invertierenden OPVs und das Messverhalten des ADCs. Anhand dieser schematischen Vorlage, ist eine Schaltung, die sich an jene von EA4TX orientiert, entworfen worden. Den Schaltplan für diesen Entwurf sieht man in Abbildung 4.29. Da bis zu zwei Rotoren mit einer Motortreiberplatine betrieben werden können, musste dieser Teil der Schaltung doppelt ausgeführt werden. Die nachfolgenden Gleichungen und Beschreibungen beziehen sich dabei auf den oberen der beiden Messstränge in Abbildung 4.29. Da diese aber baugleich sind, gelten für den unteren Messstrang die selben Gleichungen und Werte.

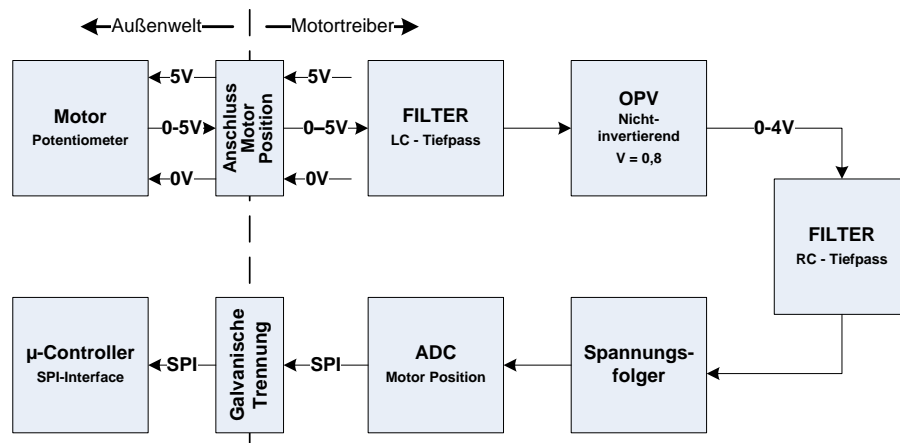


Abbildung 4.28.: Schematische Darstellung der Elemente zur Messung der Position auf dem neuen Motortreiber.

Dieser Teil der Schaltung wird ebenfalls über die interne 5 V Gleichspannung des Motortreibers versorgt. Neben den einzelnen ICs wird aber auch das Potentiometer des jeweiligen Rotors von hier mit Energie versorgt. Durch die beiden Brücken  $JP_{16}$  und  $JP_{17}$  wird wieder die Flexibilität des Motortreibers, bei Einsatz eines zweiten Treibers, sichergestellt. Durch einfaches Öffnen der Brücke, kann der jeweilige Messzweig deaktiviert werden. Somit kann auch die Position auf zwei verschiedenen Boards gemessen werden. In der derzeitigen Konfiguration der Antennensteuerung sind beide Brücken aktiviert.

Wenn das Messsignal vom Rotor über den Pin  $X_{7-2}$  zurückkommt, muss es über eine Verstärkerschaltung und durch mehrere Filter laufen um dann, mittels eines ADC in einen digitalen Wert umgewandelt zu werden. Bei den beiden Filtern handelt es sich um Tiefpassfilter verschiedener Bauform. Im Gegensatz zu jenen auf dem alten Motortreiber, wurde bei beiden Filtern, die Grenzfrequenz neu angepasst. Diese Einstellungen sollen mögliche Störungen auf der Leitung, die durch die Funkanlage und die lange Messleitung selbst hervorgerufen werden, noch besser filtern. Die neu eingestellten Grenzfrequenzen liegen für

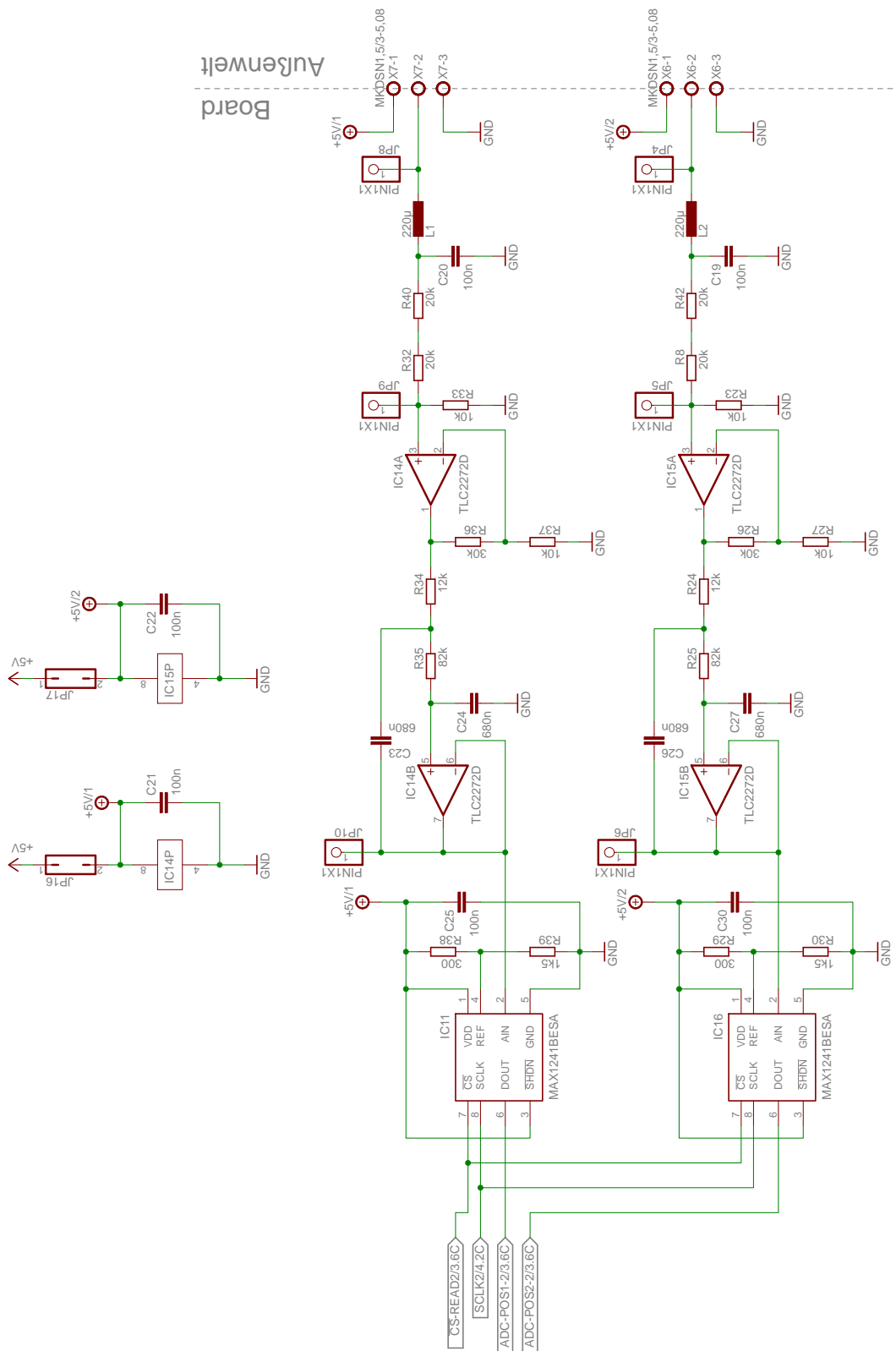


Abbildung 4.29.: Schaltplan zur Messung der Position auf dem Motortreiber.

das LC-Glied (Mietke 2009a) bei etwa

$$\begin{aligned} f_{g,LC} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_{20}}} \\ f_{g,LC} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{220 \mu\text{H} \cdot 100 \text{nF}}} \\ f_{g,LC} &= 33\,931,9 \text{ Hz} \approx 34 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4.35)$$

und für das, hinter dem OPV liegende RC-Glied (Mietke 2009b), bei etwa

$$\begin{aligned} f_{g,RC} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{35} \cdot C_{24}} \\ f_{g,RC} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 82 \text{ k}\Omega \cdot 680 \text{ nF}} \\ f_{g,RC} &= 2,85 \text{ Hz} \approx 3 \text{ Hz}. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Die Bauteilwerte für diese Gleichungen, stammen aus dem Schaltplan in Abbildung 4.29.

Wie bereits oben erwähnt, ist auch das Verstärkungsverhältnis des nicht invertierenden OPV überarbeitet worden. Die Verstärkung des OPVs  $IC_{14A}$  ist dabei auf einen Wert von 80% des Eingangsbereichs eingestellt worden. Durch diese Anpassung liegt die maximale Ausgangsspannung des OPVs in einem stabilen Arbeitsbereich des nachgeschalteten ADCs. Das bedeutet, bei einer Eingangsspannung von  $U_e = 5 \text{ V}$  und einem Verstärkungsfaktor von  $V = 0,8$ , liefert der Verstärker am Ausgang nur mehr  $U_a = 4 \text{ V}$ . Um diese Verstärkung zu bewerkstelligen, wird zuerst das Eingangssignal des nicht invertierenden OPV auf ein Fünftel seines Wertes, mittels eines vorgeschalteten Spannungsteilers (Schiemann et al. 2009, S. 32f)

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R_x}{R_x + R_y} \quad (4.37)$$

gewandelt. Der Spannungsteiler besteht dabei aus den Widerständen  $R_{32}$ ,  $R_{33}$  und  $R_{40}$ . Bei einer Eingangsspannung von  $U_e = 5 \text{ V}$ , ergibt sich hierdurch am nicht invertierenden Eingang „ $IC_{17A-3}$ “ eine Spannung  $\hat{=} U_{R_{33}}$  von

$$\begin{aligned} \frac{U_{R_{33}}}{U_e} &= \frac{R_{33}}{R_{33} + (R_{34} + R_{40})} \\ U_{R_{33}} &= U_e \cdot \frac{R_{33}}{R_{33} + (R_{34} + R_{40})} \\ U_{R_{33}} &= 5 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + (20 \text{ k}\Omega + 20 \text{ k}\Omega)} \\ U_{R_{33}} &= 1 \text{ V}. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Da der Eingangswiderstand eines OPV sehr hoch ist, kann dieser Spannungsteiler als unbelastet betrachtet werden. Anschließend wird die Eingangsspannung  $U_{R_{33}}$  durch den Verstärkungsfaktor des OPVs (Schiemann et al. 2009, S. 218f)

$$V = 1 + \frac{R_{36}}{R_{37}} \quad (4.39)$$

auf den endgültigen Messwert des ADCs umgewandelt. Hierdurch ergibt sich nun am Ausgang „ $IC_{17A-1}$ “ eine Spannung von

$$U_a = U_e \cdot V \quad (4.40)$$

$$U_a = U_{R_{33}} \cdot \left(1 + \frac{R_{36}}{R_{37}}\right)$$

$$U_a = 1 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{30 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega}\right)$$

$$U_a = 4 \text{ V}.$$

Diese Ausgangsspannung wird jetzt am PIN „ $AIN$ “ des ADC eingelesen. Wie auch schon in der Schaltung des RCI-SE Boards, werden auch hier der OPV  $IC_{14A}$  und der ADC  $IC_{11}$  durch einen Impedanzwandler  $IC_{14B}$  von einander getrennt. Der neue ADC besitzt jetzt eine Auflösung von 12 Bit, wodurch gegenüber der alten Messschaltung, Zeit eingespart werden kann. Der Grund hierfür ist, dass eine Messung nicht mehr vier mal vorgenommen werden muss, um eine 12 Bit Auflösung zu erhalten, sondern nur einmal. Als Betriebsspannung dient dem ADC die interne 5 V Versorgung des Motortreibers. Um die Auflösung des ADCs optimal zu nutzen, wird diese Versorgung aber nicht für die Referenzspannung verwendet. Der Grund hierfür ist, die zuvor berechnete Ausgangsspannung des nicht invertierenden OPVs. Diese Spannung ist mittels eines Spannungsteilers (4.37) aus den Widerständen  $R_{38}$  und  $R_{39}$  so eingestellt worden, dass am Pin „ $REF$ “ eine Spannung  $\hat{=} U_{R_{39}}$  von  $U_{REF} = 4,167 \text{ V}$  anliegt.

Durch diese Referenzspannung  $U_{REF}$  und die Auflösung des ADCs von 12 Bit, ergibt sich nach der Gleichung (4.28) eine Auflösung für die Eingangsspannung pro einzeltem UNIT von  $U_{IN} = 1,017 \text{ mV/UNIT}$ .

Der vom ADC gemessene Wert, wird anschließend mittels eines SPI-Protokolls an die MCU übermittelt. Im Gegensatz zu dem PWM-Controller aus Abschnitt 4.3, benötigt dieser Teil der Schaltung nur eine  $\overline{CS}$ -Leitung um die Messdaten beider Rotoren zu übermitteln. Warum das so ist, wird später im Abschnitt 4.6.2 noch genauer beschrieben. Der Pin  $\overline{SHDN}$  ist eine Eigenheit dieses einen speziellen Bauteils. Er kann dazu verwendet werden, um bei einem LOW-Signal den ADC in einen Ruhezustand zu versetzen. Da diese Funktion nicht benötigt wird, ist er durch direktes Verbinden mit der Versorgungsspannung deaktiviert worden.

#### 4.5.2. Messergebnisse Positionsbestimmung

Um die Abweichung dieser Messschaltung zu ermitteln, sind die Spannungen an den Punkten  $JP_8$  bis  $JP_{10}$  in der Schaltung überprüft worden. Zusätzlich zu den Spannungen, ist auch das umgewandelte Signal des ADCs zu jeder gemessenen Eingangsspannung aufgenommen worden. Mit der analogen Spannung des Rotors und dem dazugehörigen digitalen Wert des ADCs, jeweils am linken und rechten Anschlag des Rotors, ist eine Gleichung aufgestellt worden, mit der der theoretische ADC-Wert für die aktuelle Eingangsspannung ermittelt werden kann. Diese Grenzwerte sowohl für den Azimut-Rotor wie

auch für den Elevations-Rotor sind in der Tabelle 4.6 zusammengefasst. Die Gleichung für den idealen ADC-Wert sieht nun wie folgender Maßen aus:

$$Value_{ADC, ideal} = \frac{(U_{Poti, aktuell} - U_{Poti, min})}{(U_{Poti, max} - U_{Poti, min})} \cdot (Value_{ADC, max} - Value_{ADC, min}) + Value_{ADC, min} \quad (4.41)$$

Anhand des tatsächlich gemessenen ADC-Wertes und den durch die Gleichung berechneten theoretisch idealen Wert, konnte die Abweichung der Messschaltung ermittelt werden. Somit konnte auch, durch Umrechnung der digitalen Werte in eine reale Position, die Abweichung der tatsächlichen Position von der gemessenen ermittelt werden. Die Gleichung zur Umrechnung der Differenz in die Positionsabweichung sieht folgender Maßen aus:

$$Position_{Abweichung} = \frac{Value_{ADC, ideal}}{(Value_{ADC, max} - Value_{ADC, min})} \cdot Drehbereich_{Rotor, max} \quad (4.42)$$

Mit Hilfe dieser beiden Gleichungen ist das gesamte Spannungsspektrum des Potentiometer stichprobenartig ausgemessen worden. Hierdurch ist überprüft worden, wie genau die Antenne ausgerichtet werden kann. Die Abweichungen der ADC-Werte und der dazugehörigen Positionsabweichungen sind für den Azimut-Rotor in Abbildung 4.30 und für den Elevations-Rotor in Abbildung 4.31 dargestellt. Die gesamten Messergebnisse dieser Funktionsprüfung, findet man im Anhang A.4 in der Tabelle A.7 und Tabelle A.8. Anhand dieser Daten ist ermittelt worden, dass die gemessenen Werte über den gesamten Spannungsbereich des Azimut-Rotors nicht mehr als  $\pm 0,1^\circ$  und für den Elevations-Rotor nicht mehr als  $\pm 0,08^\circ$  vom idealen Wert abweichen. Die stärksten Abweichung dieser Messung sind in der Tabelle 4.7 zusammengefasst. Diese kleinen Positionsabweichungen beweisen nun, das mit Hilfe dieses neuen Motortreibers, die Antenne sehr präzise ausgerichtet werden kann.

Tabelle 4.6.: min. und max. Messwert der Rotoren.

	Azimut		Elevation	
	min	max	min	max
Poti OUT [V]	0,04	4,39	0,37	5,03
OPV 1 IN [V]	0,01	0,88	0,08	1,02
ADC IN [V]	0,04	3,51	0,30	4,06
Position [°]	0,00	450,00	180,00	0,00
ADC OUT [UNIT]	33,00	3457,00	292,00	3988,00
ADC ideal [UNIT]	33,00	3457,00	292,00	3988,00
Differenz ADC [UNIT]	0,00	0,00	0,00	0,00
Abweichung [°]	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 4.7.: größte Abweichung vom idealen ADC-Wert.

	Azimut		Elevation	
	negativ	positiv	negativ	positiv
Poti OUT [V]	4,08	0,73	2,52	3,50
OPV 1 IN [V]	0,82	0,15	0,51	0,71
ADC IN [V]	3,26	0,58	2,04	2,82
Position [°]	57,30	71,00	96,60	59,40
ADC OUT [UNIT]	3209,00	573,00	2001,00	2771,00
ADC ideal [UNIT]	3208,27	573,76	2000,35	2771,60
Differenz ADC [UNIT]	-0,73	0,76	-0,65	0,60
Abweichung [°]	-0,10	0,10	-0,08	0,07

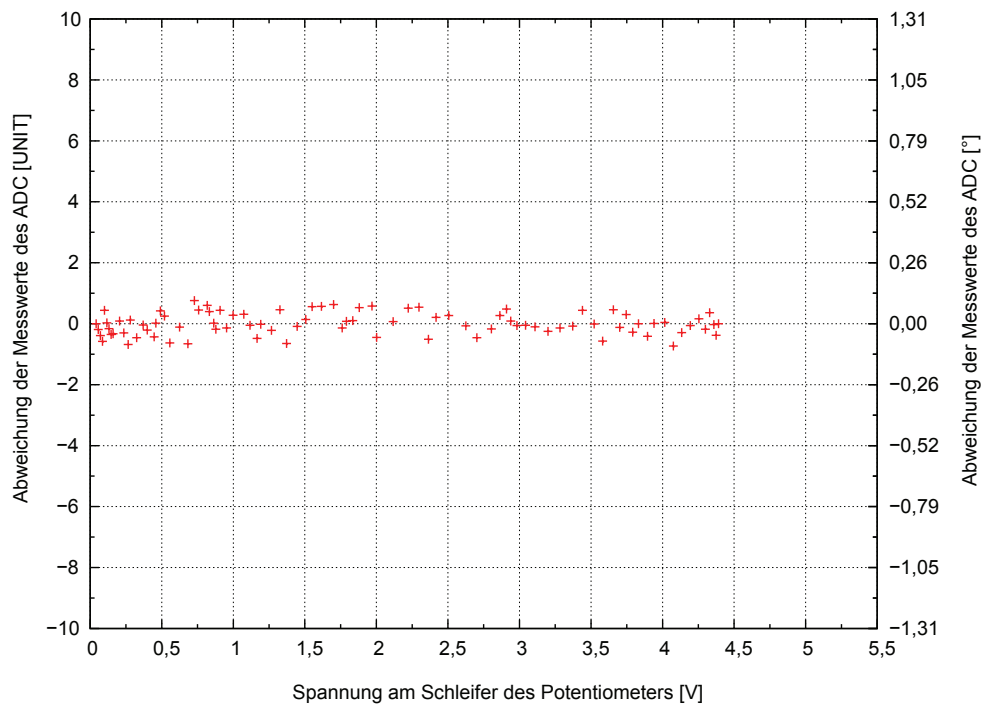


Abbildung 4.30.: Abweichung der Positionswerte, über das gesamte Spannungsspektrum des Potentiometers des Azimut-Rotors.

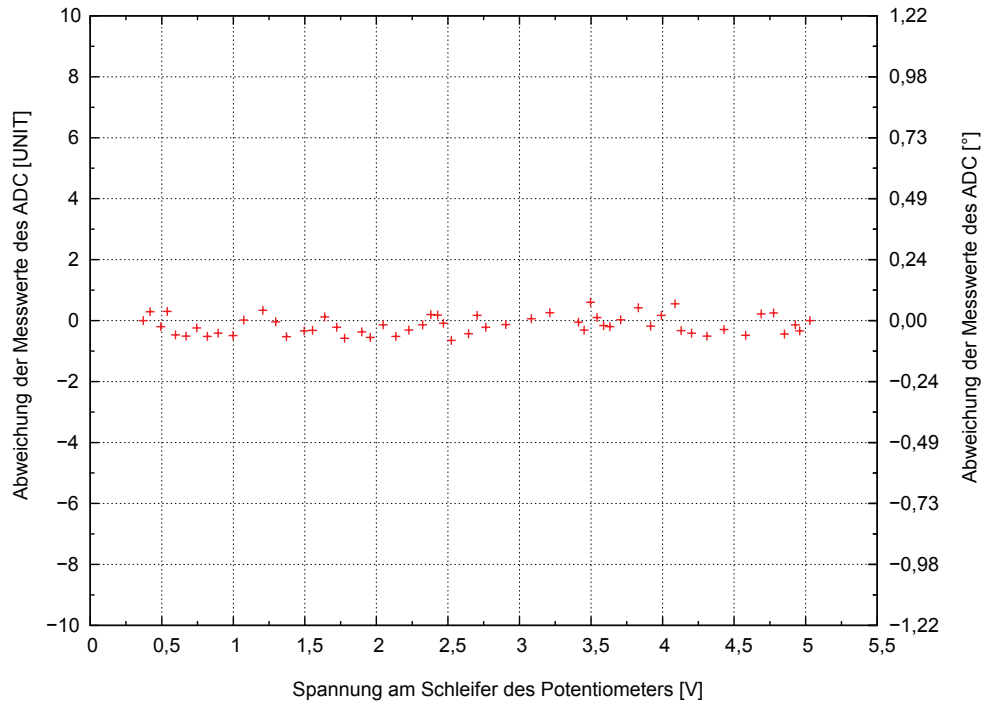


Abbildung 4.31.: Abweichung der Positionswerte, über das gesamte Spannungsspektrum des Potentiometers des Elevations-Rotors.

## 4.6. Datenübertragung

### 4.6.1. Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)

Der Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)-Bus ist eine einfache Methode, um mehrere verschiedene Komponenten einer Anwendung in einem Bus-System zu integrieren. In seinem Buch beschreibt Bähring (2010, S. 287ff) diesen Bus folgendermaßen:

Dieses Bus-System ist in den 80er-Jahren von der Firma Philips/Valvo entwickelt worden. Seine Hauptaufgabe war es, mehrere ICs kostengünstig miteinander zu vernetzen. Die Geschwindigkeit der Datenübertragung kann in dem Bus-System frei gewählt werden. Jedoch ist auf die Obergrenze der einzelnen Bauteile zu achten. Die Standard-Obergrenze für die Datenübertragung liegt bei diesem Bus bei 100 kBit/sec  $\hat{=}$  100 kHz.

Aufgebaut ist er als ein getakteter synchroner Zwei-Draht-Bus. Dabei ist eine der zwei Leitungen die Clockleitung, auch Serial Clock (SCL) Leitung genannt und die andere die Datenleitung, auch Serial Data (SDA) Leitung genannt. Diese Anschlüsse sind bei jedem I<sup>2</sup>C-Bauteil als Open Drain Anschlüsse ausgeführt. Aus diesem Grund wird je Netzwerk ein Pullup-Widerstand an jeder der beiden Leitungen benötigt.

Innerhalb des Netzwerkes existiert mindestens ein Master, der die Synchronisation aller Teilnehmer über die Taktleitung vornimmt. Obwohl der Master den Takt vorgibt, kann jeder Teilnehmer als Sender oder Empfänger im Netzwerk auftreten. Ebenso ist ein

Multimaster-System möglich. Ein schematischer Aufbau eines solchen Bus-Netzwerkes ist in Abbildung 4.32 dargestellt.

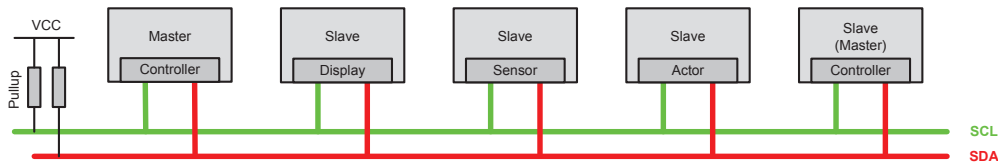


Abbildung 4.32.: Schematischer Aufbau eines I<sup>2</sup>C-Netzwerkes (Quelle: Bähring 2010, S. 287).

Damit die verschiedenen Komponenten in einem Netzwerk miteinander kommunizieren können, unterliegt das Übertragungsprotokoll des I<sup>2</sup>C-Busses einem gewissen Standard. Eine Konversation zwischen Master und Slave besteht dabei aus mindestens fünf Kommunikationsphasen. Diese Phasen sind:

1. Startbedingung
2. Adressierung und Datenzugriff
3. Acknowledgement (ACK)
4. Datentransfer
5. Bestätigung oder Stoppbedingung

Wie man in der fünften Phase sieht, muss hier entschieden werden, ob die Verbindung, mittels einer Bestätigung weiterhin aufrecht erhalten bleibt oder ob man sie beenden möchte. Diese Entscheidung ist sehr wichtig, da ein frühzeitiges Beenden der Übertragung dazu führen kann, dass ein Datenpaket nicht vollständig übertragen wird. Der Grund dafür ist, dass eine Datentransferphase einen definierten Übertragungsrahmen von einem Byte besitzt. Für ein Datenpaket bestehend aus zwei Byte muss die Datentransferphase daher zwei mal aufgerufen werden. Auch die Phase für die Adressierung und den Datenzugriff besitzt einen solchen Übertragungsrahmen von einem Byte. Innerhalb dieser Phase wird durch Eingabe einer siebenstelligen Binäradresse der entsprechende Teilnehmer aktiviert. Dabei muss der Aufbau der Binäradresse für jeden Busteilnehmer anders sein. Aus diesem Grund bieten viele Bausteine externe Möglichkeiten an, um die letzten Bits der Adresse zu variieren. Hierdurch können mehrere Bausteine der gleichen Type in ein gemeinsames Netzwerk integriert werden. Das letzte Bit in dieser Phase ist jenes für den Datenzugriff. Es teilt dem Bauteil mit, ob es sich bei der Datenphase um einen Schreib- oder Lesezugriff des Master handelt.

Die restlichen drei Phasen, besitzen im Grunde keinen Übertragungsrahmen. Hier handelt es sich um definierte Zustände der beiden Signale zueinander zu einem gewissen Zeitpunkt. Wie diese Zustände definiert sind, kann man der nachfolgenden Abbildung 4.33 entnehmen. Um die Busteilnehmer zu informieren, dass eine Datenübertragung beginnt, muss die Startbedingung erzeugt werden. Diese wird erzeugt, indem der Master die Datenleitung von HIGH auf LOW zieht, während die Clockleitung HIGH ist. Bei der Stoppbedingung funktioniert es genau in die andere Richtung. Hier setzt der Master die Datenleitung von LOW auf HIGH während die Clockleitung HIGH ist. Hiermit teilt er den Busteilnehmern



mit, dass keine weiteren Daten am Bus übermittelt werden. Damit ein geregelter Datenaustausch vorgenommen werden kann, darf der Signalpegel der Datenleitung nur geändert werden, wenn die Clockleitung ein LOW Signal besitzt. Nachdem eine Adressierungs- oder Datentransferphase beendet ist, muss der Empfänger der Daten, das kann auch ein Slave im Netzwerk sein, die Datenleitung auf LOW (Acknowledgement (ACK)) ziehen, bis der Master einen neuen Takt generiert hat. Hiermit teilt er dem Sender mit, dass er ein weiteres Datenpaket empfangen möchte. Wenn er kein weiteres Datenpaket möchte, setzt er die Datenleitung auf HIGH (no Acknowledgement (NACK)) und wartet bis zum nächsten Takt. Die Datenübertragung wird hierdurch unterbrochen, jedoch wird nicht die Verbindung getrennt. Dies geschieht nur durch den Stoppbefehl oder eine erneute Startbedingung.

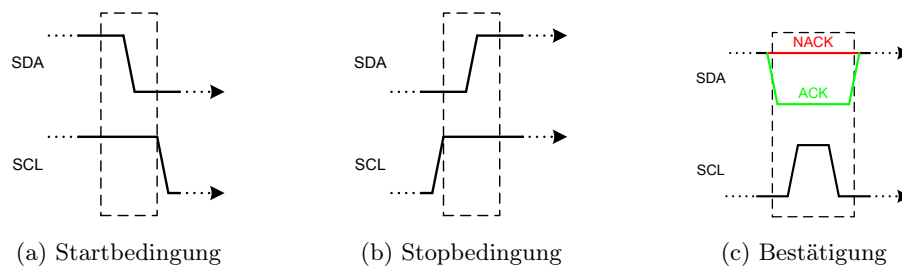


Abbildung 4.33.: Definierte Zustände des I<sup>2</sup>C-Bus Protokolls (Quelle: Texas Instruments 2008, S. 5f).

Diese Art von Bus ist einer von zwei Systemen, der auf dem Motortreiber implementiert ist. Er dient zum Übertragen der Steuerbefehle für die Rotoren und einiger Messdaten. An diesem Bus sind die Steuerungseinheit, der I/O-Expander und der ADC des Sicherungselements der H-Brücke angeschlossen. Der Grund, warum nicht auch die anderen Komponenten, die mit der MCU kommunizieren, mit diesem Bus verbunden sind, ist zum einen die benötigte Adressierungsphase und zum anderen die Verfügbarkeit des Busses. Darum ist für die Komponenten der Regelschleife ein zweiter Bus auf dem Motortreiber integriert worden. Hierbei handelt es sich um einen SPI-Bus.

Zum Schutz der MCU vor Fehlern am Motortreiber oder der Antenne, ist eine galvanische Trennung der Komponenten vorgenommen worden. Mit dieser Trennung ist die Steuereinheit elektrisch vom Motortreiber getrennt. Den Schaltplan hierzu kann man der nachfolgenden Abbildung 4.34 entnehmen. Diese elektrische Trennung übernimmt der *IC*<sub>7</sub>, der speziell für I<sup>2</sup>C-Busleitungen (Analog Devices 2010) konzipiert wurde. Im Gegensatz zu normalen Optokopplern kann dieser Isolator, Signale auf der Datenleitung in beide Richtungen übertragen. Dabei nutzt er nicht die sonst übliche Methode mit Lichtübertragung, sondern verwendet eine Methode die auf Elektromagnetismus beruht. Da es auf der Seite der MCU möglich ist, dass bereits mehrere Komponenten in einem Netzwerk hängen, sind die beiden Pullup-Widerstände durch einen Jumper *JP*<sub>2</sub> von den Leitungen getrennt. Wenn diese benötigt werden, können sie einfach durch Überbrücken der Jumper in die Schaltung integriert werden. Anders ist dies auf der Seite des Motortreibers. Hier sind die Pullup-Widerstände fix in die Schaltung integriert. Die beiden Kondensatoren *C*<sub>11</sub> und *C*<sub>12</sub> dienen als Stützkondensatoren für die jeweilige Seite des Isolators.

Eine weitere wichtige Aufgabe, die dieser Bauteil übernimmt, ist die Anpassung der Signal-

pegel auf beiden Seiten. Der Grund dafür ist, dass die MCU mit einem Spannungspegel von 3,3 V arbeitet und der Motortreiber mit einem Spannungspegel von 5 V.

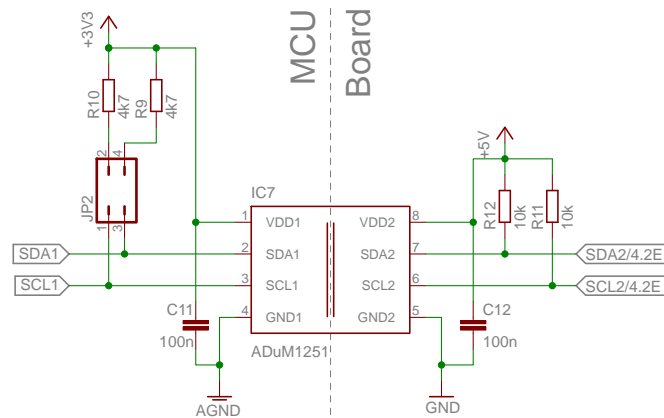


Abbildung 4.34.: Schaltplan der galvanische Trennung des I<sup>2</sup>C-Busses von der MCU.

Da der I<sup>2</sup>C-Bus nicht vom Mikrocontroller MSP430F149 hardwaremäßig unterstützt wird, wurde die Funktionen für die Startbedingung, die Bestätigung, die Stoppbedingung und für den Takt rein softwaretechnisch realisiert. Ein Nachteil dieser Lösung ist, dass dadurch nicht die Standard Übertragungsgeschwindigkeit von 100 kHz ausgenutzt werden kann. Tatsächlich wurde eine Übertragungsgeschwindigkeit von  $\approx 20,2$  kHz gemessen (siehe Abbildung 4.35). Eine Datenübertragung zwischen der MCU und dem I/O-Expander, mit der Länge von vier Bytes, dauerte dabei in etwa 2 ms.

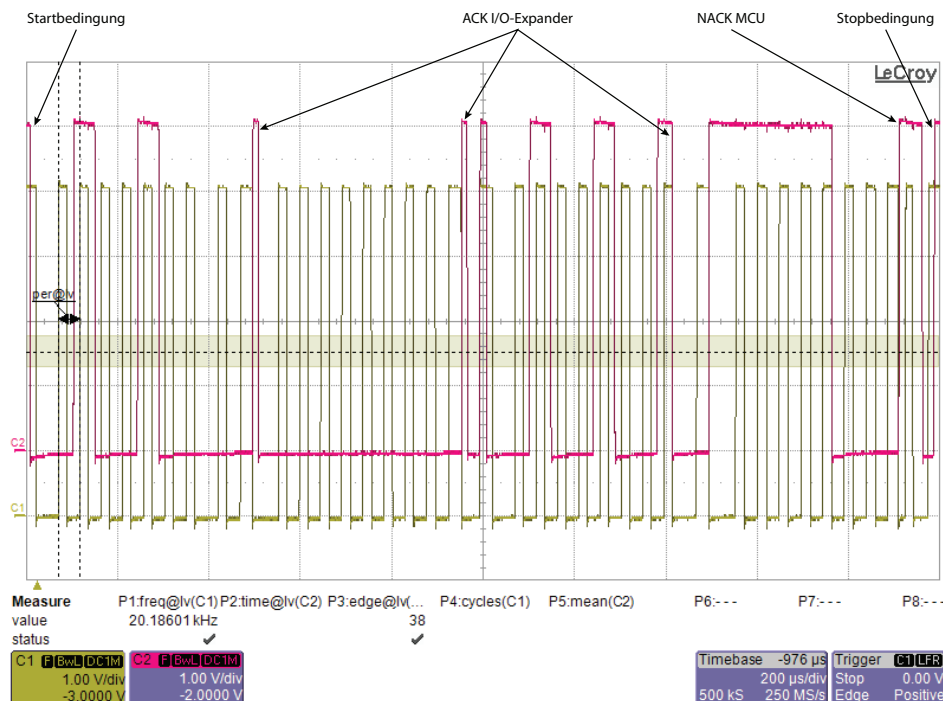


Abbildung 4.35.: Messung eines vier Byte langen I<sup>2</sup>C-Übertragungsprotokolls.

#### 4.6.2. Serial Peripheral Interface (SPI)

Wie auch schon bei dem I<sup>2</sup>C Bus, handelt es sich auch bei dem Serial Peripheral Interface (SPI)-Bus, dem zweiten verwendeten System, um ein synchrones serielles Busprotokoll. Schwerdfeger (2000) beschreibt in seinem Artikel diesen Bus folgendermaßen:

Von wem und wann dieser Bus entwickelt worden ist, ist nicht bekannt. Der Name SPI stammt aber von der Firma Motorola. Ebenso hört dieser Bus auch auf den Namen Micro-wire, welcher durch die Firma National Semiconductors geprägt wurde. Bei diesem Busprotokoll handelt es sich um einen sehr offenen Standard, bei dem es nur wenige Richtlinien gibt. Eine dieser Richtlinien ist, dass es in einem SPI-Netzwerk nur einen Master geben darf. Die Anzahl der Slaves ist dabei jedoch nicht begrenzt. Da dieser Standard sehr frei definiert werden kann, existieren auch keine Beschränkungen bei der Taktfrequenz der Bauteile. Wie schnell getaktet werden darf, hängt immer von den einzelnen Bauteilen ab. Dabei kann der Frequenzunterschied zwischen den einzelnen Bauteilen mehrere MHz betragen. Man muss sich hier entscheiden, ob man eine Taktrate für alle Teilnehmer implementiert oder für jeden eine eigene bereitstellt.

In der Standardkonfiguration sind Komponenten, die den SPI-Bus unterstützen, mit zwei Steuerleitungen und zwei Datenleitungen ausgerüstet. Die beiden Steuerleitungen „Chip-Select ( $\overline{CS}$ )“ und „Serial Clock (SCLK)“ sind dabei immer vorhanden. Die  $\overline{CS}$ -Leitung dient zum Aktivieren des jeweiligen Bausteins und die SCLK-Leitung zum Übertragen des Taktes für die Synchronisation. Anders ist das bei den Datenleitungen, dabei dient die Serial Data Input (SDI)-Leitung als Empfangsleitung und die Serial Data Output (SDO)-Leitung als Sendeleitung. Ob beide Datenleitungen vorhanden sind, hängt immer von den Fähigkeiten des Bauteils ab. Aus diesem Grund gibt es auch Bausteine, die nur drei Leitungen besitzen. Komponenten die diesen Drei-Leiter-Bus sehr häufig haben, sind Wandler der Kategorie Analog/Digital oder umgekehrt. Auch die auf diesem Motortreiber eingesetzten Wandler für die Positionsmessung oder zur Erzeugung der Referenzspannung des PWM-Controllers, arbeiten mit einem solchen Drei-Leiter-System. Ein weiterer Unterschied zum I<sup>2</sup>C Standard ist, dass keine Pullup-Widerstände an den Leitungen benötigt werden.

Damit der Master mit den verschiedenen Slaves kommunizieren kann, muss der entsprechende Baustein aktiviert werden. Hierbei setzt der Master die  $\overline{CS}$ -Leitung, die auf Basis einer Negativ-Logik arbeitet, auf LOW. Egal ob eine Datenübertragung läuft oder das Taktsignal kommt, die Verbindung wird unterbrochen, sobald er diese Leitung wieder auf HIGH setzt. Alle Geräte die an diesem Signal angeschlossen sind, warten nach der Aktivierung auf das Taktsignal auf der SCLK-Leitung, um eine Datenübertragung zu starten. Wie die Steuerleitung  $\overline{CS}$  oder die beiden Datenleitungen zwischen Master und Slave verbunden sind, hängt immer von dem Entwickler und dessen Aufgabenstellung ab. Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Komponenten miteinander zu verbinden. Die auf dem Motortreiber eingesetzten Komponenten arbeiten dabei nach zwei verschiedene Busstrukturen. Die verwendete Busstruktur aus Abbildung 4.36, ist nun folgendermaßen aufgebaut. Die beiden ADCs werden parallel betrieben, das heißt sie werden durch die selbe  $\overline{CS}$ -Leitung aktiviert. Die Daten übertragen sie dabei auf zwei getrennten SDO-Leitungen, wodurch der Master, beide Signale innerhalb eines Taktzyklus abfragen kann. In einem sequenziellen Modus, arbeiten hingegen die DACs. Hier wird jeder Bauteil separat angesprochen, wodurch zwei  $\overline{CS}$ -Leitungen benötigt werden. Dafür teilen sie sich aber die selbe SDI-Leitung. Obwohl

derzeit nur ein Motortreiber in Betrieb ist, wurde die  $\overline{CS}$ -Leitung bereits für einen zweiten vorbereitet.

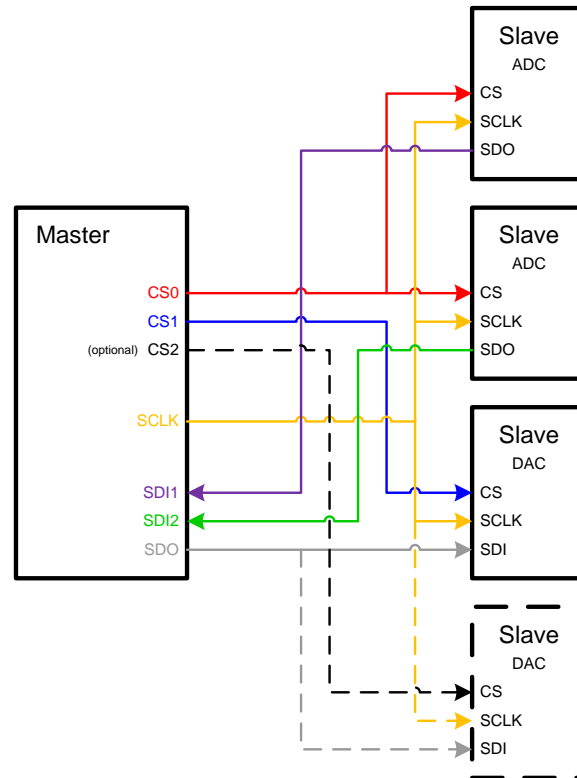


Abbildung 4.36.: Aufbau der SPI-Busstruktur am Motortreiber.

Der wohl wichtigste Grund, warum dieses Bussystem für die Komponenten der Regelschleife verwendet worden ist, dass dieser die Daten schneller überträgt. Diese Aussage wird dadurch begründet, weil allein schon im Übertragungsprotokoll des SPI-Busses die Adressierungs- und Bestätigungsphase entfällt. Einen Übertragungszyklus des SPI-Busses, sieht man in der Abbildung 4.37. Hier erkennt man, dass ein zwei Byte Lesezyklus eines ADCs via SPI, nicht länger als  $600\text{ }\mu\text{s}$  dauert. Auch dieser Bus wird nicht von dem Mikrocontroller MSP430F149 unterstützt und ist daher vollkommen softwaretechnisch realisiert. Im Gegensatz zum I<sup>2</sup>C-Bus, ist aber dieser Programmcode nicht so aufwendig, wodurch auch eine höhere Taktrate realisiert werden konnte. Die Taktfrequenz des SPI-Busses liegt dabei, bei einer Frequenz von  $\approx 33\text{ kHz}$ . Ein weiterer Grund warum dieser Bus verwendet wird ist, wie bereits weiter oben erwähnt, dass die Messdaten der Regelschleife für die Geschwindigkeit parallel eingelesen werden können.

Der Vorteil, dass dieser Bus schneller ist und auch einen parallel Betrieb unterstützt, hat aber auch seine negativen Seiten. Der Nachteil der dadurch entsteht ist, dass mehr Steuer- und Datenleitungen benötigt werden. Hierdurch wird die Verbindung der MCU mit dem Motortreiber wesentlich aufwendiger. Vor dem Entwurf des Motortreibers musste daher abgewogen werden, was für die Erfüllung der Aufgabe wichtiger ist. Die Entscheidung fiel dabei auf die Geschwindigkeit der Datenübertragung, weil es sich hier um die Komponenten der Regelschleife handelt.

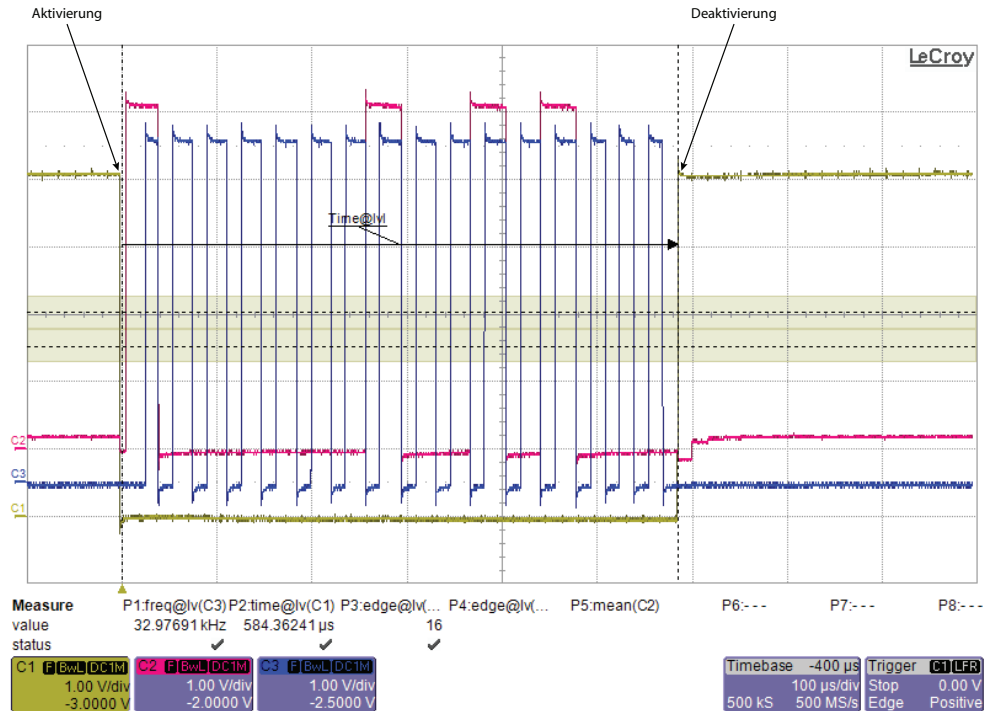


Abbildung 4.37.: Übertragung eines zwei Byte großen Datenpaketes via SPI-Bus.

Wie auch schon beim I<sup>2</sup>C-Bus, ist auch beim SPI-Bus, zum Schutz der MCU, eine galvanische Trennung zwischen dem Motortreiber und der MCU eingebaut worden. Den Schaltplan für die Trennung des SPI-Netzwerkes kann man der nachfolgenden Abbildung 4.38 entnehmen. Da bei diesem Bus genau definiert ist, welche Leitung zum Senden und welche zum Empfangen von Daten genutzt wird, musste hier kein spezieller Isolator verwendet werden. In diesen Schaltungsteil sind jetzt Isolatoren eingebaut, die die Signale auf einem Kanal, nur in eine Richtung durchlassen. Wie auch schon der Isolator im I<sup>2</sup>C-Bus, arbeiten auch diese auf dem Prinzip der elektromagnetischen Datenübertragung. Zusätzliche Pullup-Widerstände sind wie bereits vorher erwähnt, an den einzelnen Leitungen nicht notwendig. Ebenfalls übernehmen die Isolatoren auch hier die Aufgabe der Signalpegelanpassung zwischen den beiden Elementen.



Tabelle 4.8.: Fortsetzung Klemmbelegung des neuen Motortreibers.

Pin	Zielort	Anschluss	Funktion
$X_{4-2}$	$X_{11}$	5	Rotor Elevation drehen <i>RAUF</i>
$X_{4-3}$	$X_{11}$	4	Rotor Elevation drehen <i>RUNTER</i>
$X_{5-1}$	$X_{10}$	1	Versorgung 5 V Potentiometer Azimut
$X_{5-2}$	$X_{10}$	2	Messwert Position Azimut
$X_{5-3}$	$X_{10}$	3	Versorgung GND Potentiometer Azimut
$X_{6-1}$	$X_{11}$	1	Versorgung 5 V Potentiometer Elevation
$X_{6-2}$	$X_{11}$	2	Messwert Position Elevation
$X_{6-3}$	$X_{11}$	3	Versorgung GND Potentiometer Elevation

Für die Verbindung zu der Steuerungseinheit, wird ein 14 poliger Flachbandstecker verwendet. Durch eine spezielle Steckernase ist er gegen Verpolung geschützt. Die Klemmbelegung des Steckers  $J_1$  kann der Tabelle 4.9 entnommen werden. Beschrieben wird dabei, wie die Pins am Motortreiber mit der MCU verbunden sind und an welchem Port und Pin des Mikrocontrollers sie angeschlossen sind.

 Tabelle 4.9.: Pinbelegung des Steckers  $J_1$  für die Verbindung mit der MCU.

Treiber Pin	MCU Stecker	Mikrocontroller				Funktion am Motortreiber
Pin	Stecker	Pin	Port	Pin		
1	$JP_9$	1	-	-		Zuleitung Spannungsversorgung 3,3 V Gleichspannung
2	$JP_9$	2	-	-		Ableitung Spannungsversorgung GND
3	$JP_9$	3	-	-		nicht angeschlossen
4	$JP_9$	4	-	-		Zuleitung Spannungsversorgung 12 V Gleichspannung
5	$JP_9$	5	6.0	59		Datenleitung ADC-POS1 des SPI-Busses für die Position des Azimut-Rotors
6	$JP_9$	6	6.1	60		Datenleitung ADC-POS2 des SPI-Busses für die Position des Elevations-Rotors
7	$JP_9$	7	6.2	61		Datenleitung SDI1 des SPI-Busses für die Geschwindigkeit des Azimut-Rotors
8	$JP_9$	8	1.0	12		Steuerleitung $\overline{CS}$ des SPI-Busses für die Positionsdaten
9	$JP_9$	9	6.3	2		Clockleitung CLK des SPI-Busses
10	$JP_9$	10	1.1	13		nicht angeschlossen
11	$JP_9$	11	3.2	30		Steuerleitung $\overline{CS}$ des SPI-Busses für die Geschwindigkeit des Azimut-Rotors
12	$JP_9$	12	3.3	31		OPTIONAL Steuerleitung $\overline{CS}$ des SPI-Busses für die Geschwindigkeit des Elevations-Rotors
weitere Pinbelegung siehe nächste Seite.						

Tabelle 4.9.: Fortsetzung Pinlegung des Steckers  $J_1$  mit der MCU.

Treiber	MCU		Mikrocontroller		
Pin	Stecker	Pin	Port	Pin	Funktion am Motortreiber
13	$JP_9$	13	3.1	29	Datenleitung SDA des I <sup>2</sup> C-Busses
14	$JP_9$	14	3.0	28	Clockleitung SCL des I <sup>2</sup> C-Busses

Neben diesem Flachbandstecker sind auch zwei weitere Stecker,  $J_2$  und  $J_3$ , implementiert worden, um weitere Komponenten an den I<sup>2</sup>C-Bus anzuschließen. Hierbei handelt es sich um einen fünfpoligen Stecker mit Verpolungsschutz. Hierdurch soll eine Erweiterung der Antennensteuerung vereinfacht werden. Die Pins dieser Stecker sind parallel zum Stecker  $J_1$  geschaltet. Dadurch wird ein Durchschleifen der Signale bis zum nächsten Busteilnehmer ermöglicht. Die Pinbelegung dieses Steckers kann man der Tabelle 4.10 entnehmen.

Tabelle 4.10.: Pinbelegung der Stecker  $J_2$  und  $J_3$  zur Erweiterung der Antennensteuerung mittels I<sup>2</sup>C-Bus.

Treiber	MCU		Mikrocontroller		
Pin	Stecker	Pin	Port	Pin	Funktion
1	$JP_9$	13	3.1	29	Datenleitung SDA des I <sup>2</sup> C-Busses
2	$JP_9$	14	3.0	28	Clockleitung SCL des I <sup>2</sup> C-Busses
3	$JP_9$	1	-	-	Zuleitung Spannungsversorgung 3,3 V Gleichspannung
4	$JP_9$	2	-	-	Ableitung Spannungsversorgung GND
5	$JP_9$	4	-	-	Zuleitung Spannungsversorgung 12 V Gleichspannung



## Kapitel 5.

# Weitere Umbauten der Antennensteuerung

Neben der Entwicklung des neuen Motortreibers ist auch der Rest der Antennensteuerung umgebaut worden. Hierbei wurden einige Abschnitte der Anlage neu aufgebaut oder modifiziert. Neu aufgebaut wurden die Bereiche Energieversorgung der Antennensteuerung und das Gehäuse, in dem sie untergebracht ist. Teile die modifiziert wurden, sind die Motorsteuerung und die Verkabelung zwischen der Leitstation und der Antennenanlage.

Dieser Punkt, beschäftigt sich jetzt mit diesen Umbauten und zeigt im Detail, was geändert wurde.

### 5.1. Energieversorgung

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, ist laut Systemkonzept die Energieversorgung der Antennensteuerung gegenüber der alten Anlage, verändert worden. Wie auch schon bei der alten Antennenanlage, wird auch diese weiterhin über eine 230 V Wechselspannung betrieben. Die erste Neuerung in der Elektrik der Anlage, ist gleich am Eingang verbaut worden. Bei der Neuerung handelt es sich um ein 230 V Relais, das so beschalten ist, dass es als „Not-Aus-Element“ fungiert. Mit Hilfe dieses Elements ist ein schnelles und sicheres abschalten der Anlage im Notfall von verschiedenen Orten aus möglich. Der Transformator für den Elevations-Rotor ist durch ein neues Modell ersetzt worden. Bei dem neuen Modell, handelt es sich um einen Ringkerntrafo mit einer Sekundärspannung von 24 V. Der Vorteil dieses neuen Trafos ist seine höhere Effizienz auf Grund seiner Bauform und die daraus resultierende Gewichtsreduktion. Auch der zweite Trafo und die nachgeschalteten Gleichrichter mit Spannungsstabilisierung und Siebung, die zur Erzeugung der drei Betriebsspannungen 24 V, 12 V und 5 V Gleichspannung gedient haben, wurden ersetzt. An ihrer Stelle werden jetzt zwei industrielle Schaltnetzteile verwendet. Für die Betriebsspannung 24 V wird das Netzteil „LS150“ der Firma TDK-Lambda (2010) verwendet. Es versorgt den Motortreiber und den daran angeschlossenen Azimut-Rotor. Dieses 150 W Netzteil ist absichtlich so groß dimensioniert worden, um im Falle eines Tausches des Wechselstrommotors für die Elevation, einen zweiten Gleichstrommotor mit versorgen zu können. Für die anderen beiden Betriebsspannungen, wird das Netzteil TXL035-0512D der Firma Traco Power (2010) verwendet. Dieses Netzteil liefert sowohl die 12 V wie auch die 5 V Betriebsspannung für die Motorsteuerung. Einen Übersichtsplan, wie die neue Energieversorgung aufgebaut ist, findet man im Anhang B.3.

Der Umbau dieses Teiles der Anlage hatte mehrere Gründe gehabt. Der wohl wichtigste Grund war es, die Stabilität der Energieversorgung weiter zu erhöhen. Hiermit ist gemeint, dass Teile die an ihrer Leistungsgrenze arbeiteten, ersetzt wurden. Dazu gehörten die Stabilisierungsschaltungen der Betriebsspannungen. Durch den Austausch dieser Schaltungen, ist auch eine starke Hitzequelle aus dem Gehäuse entfernt worden. Ein Grund war auch, dass das Gehäuse mit alten, nur mehr zum Teil verwendeten Schaltungen, belegt war und es keinen Platz für die neue Motorsteuerung gab. Ein weiterer Vorteil des Umbaus, der zufällig zustande gekommen ist, ist die Reduktion des Gesamtgewichtes der Anlage um einige Kilogramm.

## 5.2. Motorsteuerung MCU

An der Motorsteuerung selbst wurde versucht, nur so wenig wie möglich zu ändern. Es ließ sich aber leider nicht vermeiden, die beiden 14 poligen I/O-Stecker mit Spannungsversorgung (siehe Abschnitt 2.2)  $JP_9$  und  $JP_{10}$ , für die Verbindung mit dem Motortreiber umzubauen. Einen Vorher-Nacher-Vergleich der beiden Stecker, kann man der Abbildung 5.1 entnehmen. Die an diesem Stecker angeschlossene Versorgungsspannung von 5 V am Pin  $JP_{9-1}$  und  $JP_{10-1}$  ist durch eine Versorgungsspannung von 3,3 V ersetzt worden. Dies war nötig, um die Isolatoren auf dem Motortreiber mit der richtigen Spannung zu versorgen. Wären diese Bauteile weiterhin mit 5 V auf der MCU-Seite versorgt worden, hätte man auf Grund eines zu hohen Spannungspegels, die Ports des Mikrocontrollers beschädigt, denn diese verkraften nur eine maximale Spannung von 3,3 V.

Ein weiterer Umbau ist nur an dem Stecker  $JP_9$  „Rotation“ durchgeführt worden. Hier wurde der Widerstand  $R_{39}$  am Pin  $JP_{9-12}$  entfernt. Dies war nötig, um den Pin als Signalleitung für eine der drei  $\overline{CS}$ -Leitung zu verwenden. Da der SPI-Bus nicht auf einer Open-Collector-Bauform beruht, hätte dieser Pullup-Widerstand zu Übertragungsfehlern geführt.

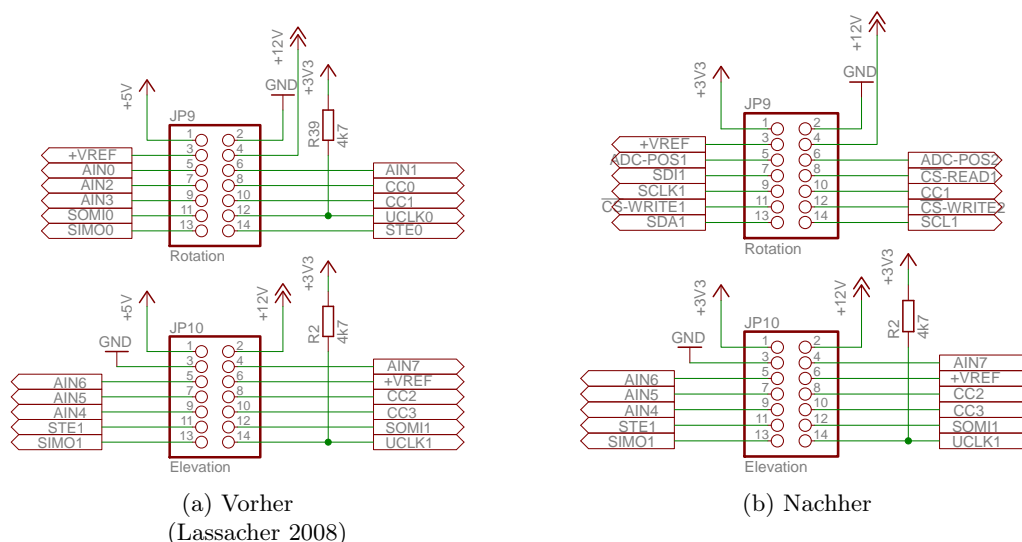


Abbildung 5.1.: Vorher-Nacher-Vergleich des 14 poligen I/O-Steckers.

An den restlichen Pins der beiden Stecker sind zum Teil nur, die Signalnamen der einzelnen Verbindungen geändert worden. An der Beschaltung selbst ist nichts verändert worden. Die Namensänderung ist deshalb durchgeführt worden, weil diesen Pins, in der neuen Software neue Aufgaben zugeteilt wurden.

Um einen Zweiten Motortreiber mit der aktuellen MCU zu betreiben, können beide an den selben Stecker der MCU angeschlossen werden. Diese Verbindung kann mit Hilfe eines Flachbandkabels mit drei Anschlüssen bewerkstelligt werden. Eine weitere Modifikation des Steckers  $JP_9$  ist nicht nötig, da er bereits dementsprechend ausgelegt ist.

### 5.3. Gehäuse

Am Gehäuse der Antennensteuerung mussten einige mechanische Veränderungen vorgenommen werden. Neben der Positionierung der einzelnen neuen Komponenten innerhalb des Gehäuses, ist auch die Rückseite neu gestaltet worden. Den Unterschied zu der vorherigen Rückplatte sieht man in Abbildung 5.2. Die Rückseite ist jetzt um einen Lüfter, die Sicherungshalter für die Schmelzsicherungen des Motortreibers und dem Anschluss für den Not-Aus Schalter erweitert worden. Natürlich hätte man auch die bestehende Rückseite einfach modifizieren können. Nach einigen Skizzen wie diese modifizierte Rückseite aussehen würde, hat man sich dennoch entschieden, diese neu zu fertigen.

Der Lüfter ist aus dem Grund eingebaut worden, da vor den ersten Tests mit einer starken Wärmeentwicklung an den Komponenten der Energieversorgung gerechnet worden ist. Aus diesem Grund ist eine temperaturabhängige Lüftersteuerung in das Gehäuse eingebaut worden. Der Temperaturfühler ist dabei, mit dem Schaltnetzteil „LS150“ des Azimut-Rotors verbunden worden. Hier wurde am ehesten angenommen, dass Hitze entsteht. Wie sich herausgestellt hat, war dies aufgrund der aktuellen Leistungsaufnahme des Azimut-Rotors, aber nicht der Fall. Da jetzt kaum eine Erwärmung stattfindet, läuft der Lüfter derzeit nur mit der minimalen Drehzahl.

Wie auch bereits im Abschnitt 4.4 angesprochen, sollte dieser Ventilator auch zum aktiven Kühlen der H-Brücke verwendet werden. Um dies zu bewerkstelligen, war eine Umlenkung des Luftstroms notwendig. Es wurde ein Blechteil in das Gehäuse eingebaut, der genau diese Aufgabe übernimmt. Das Element zum Umlenken des Luftstroms, ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Mit Hilfe dieser Umlenkung wird aber nicht nur die H-Brücke gekühlt, sondern auch die beiden Spannungswandler der internen Spannungsversorgung des Motortreibers. Auf Grund der hohen Spannungsdifferenz zwischen dem Eingang und dem Ausgang der beiden Wandler, erhitzen sich diese stark. Damit sie nicht überhitzen wurden die beiden Kühlkörper eingebaut. Zur Abfuhr der Wärme an den Kühlkörpern, wird jetzt zusätzlich auch der umgelenkte Luftstrom verwendet.



Abbildung 5.2.: Vergleich der Gehäuserückseite der Antennensteuerung.

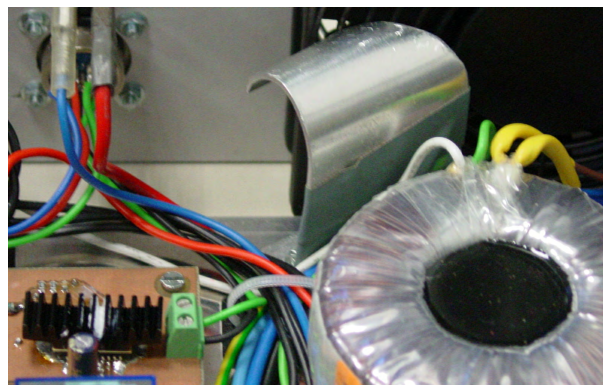


Abbildung 5.3.: Element zum Umlenken des Luftstroms für die aktive Kühlung der H-Brücke.

## 5.4. Außenverkabelung der Antennenanlage

Bei der Außenverkabelung der Funkanlage, ist bis dato noch nichts verändert worden. Der Grund für diese Verzögerung ist, dass noch weitere Umbauarbeiten am Dach stattfinden und diese Arbeiten dann später zeitgleich ausgeführt werden. Derzeit bereits angeschlossen, sind die beiden Rotoren für Azimut und Elevation. Hierzu sind zwei Außenkabel,  $W_{10}$  und  $W_{11}$  der Type (Seyr 2009, S. 65ff) „A05VV-F 10G1,5 (YMM-JZ)“, mit jeweils 9 Adern und einem geerdeten Schutzleiter (PE-Leiter) verwendet worden. Ebenfalls an diese Kabel angeschlossen sind die Steuerleitungen für die Polarisationsumschalter der beiden Antennen. Neben diesen beiden Kabeln verlaufen auch bereits die beiden Koaxialkabel,  $W_{12}$  und  $W_{13}$  der Type „ECOFLEX 15“ (SSB-Electronic 2010), für die Übertragung der Funksignale hinauf zu den Antennen. Diese Kabel müssen nicht verändert werden. Ein neues Kabel,  $W_{14}$  der Type „A05VV-F 3G1,5 (YMM-J)“, das hinzukommt, ist jenes für den „Not-Aus-Kreis“. Weil dieser Stromkreis mit 230 V Wechselspannung betrieben wird, wird dieser Kreis nicht über die bereits bestehende Verkabelung zum Dach hinauf geführt. Die genaue Auflegung der einzelnen Adern, kann man der nachfolgenden Tabelle 5.1 entnehmen.

Tabelle 5.1.: Adernplan für die Außenverkabelung der Funkanlage.

Ader	Alte Belegung	Neue Belegung
$W_{10}; 10 \times 1,5 \text{ mm}^2$		
1	5 V Pos 1 & 2	5 V Pos 1
2	Schleifer Pos 1	Schleifer Pos 1
3	GND Pos 1	GND Pos 1 & 2
4	Rotor Azimut <i>LINKS</i>	Rotor Azimut <i>LINKS</i>
5	Rotor Azimut <i>RECHTS</i>	Rotor Azimut <i>RECHTS</i>
6	Endschalter	Schleifer Pos 2
7	5 V Pos 2	Rotor Elevation <i>RAUF</i>
8	Schleifer Pos 2	Rotor Elevation <i>RUNTER</i>
9	GND Pos 2	Rotor Elevation GND
10	Rotor Elevation <i>RUNTER</i>	PE-Leiter
$W_{11}; 10 \times 1,5 \text{ mm}^2$		
1	Rotor Elevation <i>RAUF</i>	70 cm LHCP
2	Rotor Elevation GND	70 cm HP
3	not connected	70 cm RHCP
4	70 cm LHCP	2 m LHCP
5	70 cm HP	2 m HP
6	70 cm RHCP	2 m RHCP
7	2 m LHCP	70 cm & 2 m GND
8	2 m HP	nicht angeschlossen
9	2 m RHCP	nicht angeschlossen
10	70 cm & 2 m GND	PE-Leiter
$W_{14}; 3 \times 1,5 \text{ mm}^2$		
1	-	Not-Aus <i>L</i>
2	-	Not-Aus <i>N</i>
3	-	PE-Leiter

## Kapitel 6.

# Schutzeinrichtungen für die Funkanlage

Dieser Teil der Arbeit, befasst sich mit Konzepten zum Schutz der Antennenanlage vor elektrischer und mechanischer Beschädigung, insbesondere bei Unwetter. Die hier gezeigten Konzepte, sind nur rein theoretisch ausgearbeitet worden und sollen als Anregung für zukünftige Arbeiten dienen.

Die zwei größten Gefahrenquellen für die Funkanlage sind natürlichen Ursprungs. Aus diesem Grund können sie nicht beeinflusst oder umgangen werden. Zum Schutz der Antennenanlage können nur Vorkehrungen getroffen werden, um diesen Gefahrenquellen entgegen zu wirken. Bei diesen Gefahrenquellen handelt es sich um starke Winde und um Blitze.

### 6.1. Windschutz

Der Wind ist ein natürliches Phänomen, das zu jeder Tag- und Nachtzeit vorhanden ist. Im Normalfall ist er keine Gefahr für die hier aufgestellte Antennenanlage. Dennoch kommt es immer wieder zu Stürmen, bei denen Windgeschwindigkeiten von mehr als 50 km/h auftreten. Dieser Wert entspricht laut einer Windgeschwindigkeits-Tabelle (König 2010) einem starken Wind, bei dem Bäume schwanken und das Gehen bereits erschwert wird.

#### 6.1.1. Gefahren

Die größte Gefahr die dabei besteht ist, dass es zu einem mechanischen Gebrechen kommt und Teile der Anlage zu spitzen Wurfgeschossen werden können. Damit das nicht passiert, müssen die Anlagen statisch berechnet und dementsprechend befestigt werden. Aus diesem Grund, wird die Windlast einer Antenne, bei bestimmten Windgeschwindigkeiten, bereits vom Hersteller angegeben. Die Windlast wird dabei in Newton [N] angegeben. Mit Hilfe der Formel zur Berechnung des Drehmoments

$$M = F \cdot l \tag{6.1}$$

kann das benötigte Einspannmoment der Antennenanlage berechnet werden. Dabei dürfen aber nicht nur die Windlasten der Antennen berücksichtigt werden, sondern auch die Windlast des Mastes, des Querträgers und die der Rotoren. Zur Berechnung der Windlast der anderen Komponenten benötigt man deren Windangriffsfläche  $A$ . Diese Fläche lässt sich einfach aus der Länge mal der Breite des Bauteils bestimmen und wird in Quadratmeter [m<sup>2</sup>] angegeben. Mit dieser Windangriffsfläche und dem dazugehörigen Staudruck  $q$  der

Luft an dem Element, lässt sich die Windlast berechnen. Die Formel zur Berechnung der Windlast (WIMO 2010) ist

$$F_{\text{Wind}} = q \cdot A . \quad (6.2)$$

Im Staudruck wird jetzt auch die Variable für die Windgeschwindigkeit  $v$  eingesetzt. Dabei schaut die Formel für den Staudruck (Harm 2006) folgendermaßen aus

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 . \quad (6.3)$$

Das griechische Zeichen  $\rho$  steht dabei für die Dichte der Luft. Laut Harm (2006) ist die Berechnung ausreichend genau, wenn hier ein Wert von  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  eingesetzt wird.

Mit Hilfe dieser Gleichungen, kann aber nur berechnet werden, ob die Antennenanlage richtig befestigt ist. Es müssen jetzt aber auch Schutzmaßnahmen ergriffen werden, so dass bei zu starker Windbelastung der Betrieb eingestellt wird und die Anlage in eine sichere Position fährt. Damit ist gemeint, dass die Antennen so ausgerichtet wird, dass sie dem Wind nur eine geringe Angriffsfläche bietet. Hierdurch können die einzelnen Komponenten noch besser vor den Kräften des Windes geschützt werden. Auch ein Brechen einzelner Teile soll so verhindert werden. Wie diese Schutzmaßnahme aussehen könnte, soll der nächste Punkt zeigen.

### 6.1.2. Schutzmaßnahmen

Um zu wissen, wann es nötig ist, in eine sichere Position zu fahren, muss die Windgeschwindigkeit gemessen werden. Hierzu kann ein Anemometer verwendet werden. Durch diese Messung kann aber nur gesagt werden, dass die Anlage in eine sichere Position gefahren werden muss. Welche Position das ist, kann aber mit dieser Messung nicht bestimmt werden. Um dies zu bestimmen, wird noch die Windrichtung benötigt. Diese kann mit Hilfe eines Windrichtungsgebers gemessen werden. Durch Bestimmung der Windrichtung, kann die Antennenanlage nun in eine sichere Position gefahren werden. Messstationen die über diese beiden Sensoren verfügen, gibt es einige. Eine davon ist zum Beispiel das „Ultimeter 100“ der Firma Pete Bros (2010). Neben der Anzeige auf dem Display, können die Daten mittels einer modifizierten RS232-Schnittstelle an einen Rechner übertragen werden. Der Rechner muss dabei die Datenauswertung der Messsignale vornehmen. Anhand dieser bestimmt er, ob eine sichere Position angefahren werden muss oder nicht.

Für die Datenübertragung ist es ausreichend, wenn die Messdaten einmal pro Minute abgefragt werden. Für die Abfrage gibt es verschiedene Möglichkeiten wie dies durchgeführt werden kann.

Im ersten Konzeptvorschlag übernimmt die derzeitige Motorsteuerung mit dem Mikrocontroller MSP430F149 diese Aufgabe der Datenauswertung. Einen schematischen Aufbau dieser Struktur kann man in Abbildung 6.1 sehen. Die Daten werden dabei direkt am Mikrocontroller eingelesen und verarbeitet. Diese Methode hat den Vorteil, dass alle Daten an einer zentralen Stelle zusammenlaufen und verarbeitet werden. Der Nachteil dabei ist aber, dass die Platine der Motorsteuerung neu konstruiert werden muss. Der Grund dafür ist, dass alle beiden seriellen Ports des MSP430F149 bereits verdrahtet sind. Da die USB-Schnittstelle aber nicht benutzt wird, kann dieser Teil der Platine ersetzt werden.







gibt, der mehr als zwei RS232-Schnittstellen hardwaremäßig realisiert hat, werden alle Schnittstellen in der Software realisiert. Durch Einsatz dieses Konzeptes, muss an der Software der bestehenden MCU auch keine Veränderung vorgenommen werden, wodurch sich weder der Rechenaufwand erhöht noch die Zykluszeit verlängert werden muss.

Wie diese Beschreibung nun zeigt, ist dieser Aufbau gegenüber dem ersten Konzept zwar etwas aufwendiger, besitzt aber wesentlich mehr Vorteile. Einige dieser Vorteile sind die Entlastung von rechenintensiven Aufgaben in der Motorsteuerung, geringere Umbauarbeiten an der bestehenden Anlage und die einfache Erweiterung mit neuen Anlagen. Als Nachteil ist hier nur zu nennen, dass eine neue Schaltung entworfen und programmiert werden muss.

Obwohl dieser letzte Punkt aufwendig und sehr komplex ist, ist diese Methode zur Realisierung einer Schutzeinrichtung gegen Windbelastung, der ersten Methode vorzuziehen.

## **6.2. Blitzschutz**

Dieser Punkt befasst sich mit dem Thema Blitzschutz. Dabei soll kurz erklärt werden, wie ein Blitz entsteht und welche Gefahren er in sich birgt. Ebenfalls sollen Maßnahmen gezeigt werden, wie man den Gefahren eines Blitzes entgegenwirken kann.

### **6.2.1. Entstehung**

Die Entstehung eines Blitzes, beschreibt das Austrian Lightning Detection and Information System (ALDIS) auf seiner Homepage (ALDIS 2010) folgendermaßen. Der Ursprung eines Blitzes befindet sich in einer elektrisch geladenen Gewitterwolke. Dabei ist diese Wolke in zwei elektrisch geladene Bereiche aufgeteilt. Die wohl am häufigsten vorkommende Blitzvariante ist der „negative Wolke-Erde Blitz“. Hierbei handelt es sich um eine Entladung, die sich von der Wolke in Richtung Erde fortbewegt und negativ geladen ist. Forscher vermuten (ALDIS 2010), dass zur Initialisierung einer solchen Entladung, es zu Ladungsverschiebungen innerhalb der Wolke kommt. Die in der Initialisierungsphase entstehende Entladung, wird Leitblitz genannt. Dieser baut auf seinem Weg Richtung Erde, einen sehr stark negativ geladenen Blitzkanal auf. Nähert sich der Leitblitz der Erdoberfläche, steigt die elektrische Feldstärke an den Spitzen stark hervorstehender Objekte wie zum Beispiel Antennen, Kirchen oder Bäumen, stark an. Wenn die elektrische Feldstärke um die Objekte größer ist, als die Durchbruchfeldstärke von Luft, wird von dem jeweiligen Objekt, eine positive Fangentladung abgegeben. Hierbei kann jedes Objekt eine eigene Fangentladung abgeben. Wo die Hauptentladung statt findet, hängt jetzt davon ab, welche Fangentladung sich zuerst mit dem Leitblitz verbindet. Durch diese Verbindung besteht jetzt eine geladene Strecke zwischen Wolke und Erde, über die die negative Ladung des Leitblitzes in Richtung Erde abgeführt wird. Dieser Prozess der Hauptentladung, ist allgemein als Blitz bekannt. Am Einschlagsort des Blitzes, tritt ein Stromimpuls auf, der eine Amplitude von einigen 1000 A bis zu mehreren 100 000 A haben kann. Diese Entladungen, dauern in der Regel nicht länger als einige Bruchteile einer Sekunde und können sich mehrmals wiederholen. Während der Hauptentladung, wird die Temperatur um den Blitzkanal auf bis zu 30 000 °C aufgeheizt. Durch diese schnelle Erhitzung der Luft, kommt es zu einer Stoßwelle innerhalb

der Atmosphäre. Diese Stoßwelle ist allgemein als Donner bekannt. Die Abbildung 6.3 zeigt die drei Phasen der Blitzentladung jetzt nochmals im Detail.

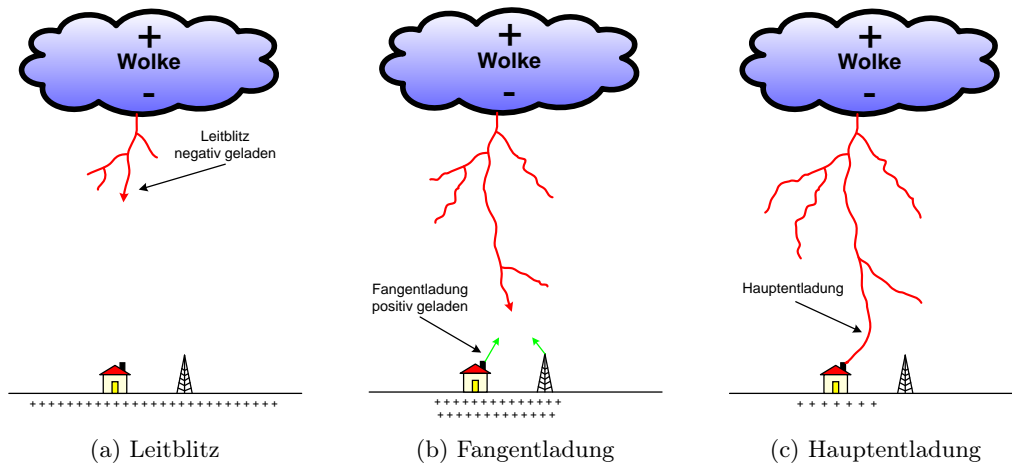


Abbildung 6.3.: Die drei Aufbauphasen eines Blitzes (Quelle: ALDIS 2010).

### 6.2.2. Gefahren

Wie der Wind, birgt auch der Blitz sehr viele Gefahren, die man beachten muss. Neben der Gefahr, die Antenne auf Grund der hohen Stromstärken mechanisch zu beschädigen, besitzt er auch die Fähigkeit die elektrischen Bauteile der Anlage zu zerstören. Die Zerstörungskraft ist dabei so groß, dass er die Anlage entzünden und dadurch einen Brand auslösen kann.

Neben dieser Zerstörungskraft für Maschinen, geht von einem Blitz aber auch ein sehr großes Gefährdungspotential für den Mensch aus. Die Gefahr besteht darin, dass sich der Blitzstrom von der Antenne über die Verbindungskabel, in das Gebäude fortbewegt. Im Gebäude selbst, können Personen durch Berührung eines an die Antenne angeschlossenen Gerätes oder durch einen Überschlag des Blitzstromes schwere Verletzungen davontragen. Diese Verletzungen können bis zum Tode führen. Wegen diesem großen Gefährdungspotential für Mensch und Maschine, sieht der Gesetzgeber vor, dass immer eine Schutz Einrichtung, für den Fall eines Blitzeinschlages, vorhanden sein muss. Mit Hilfe dieser Einrichtung soll die von einem Blitz ausgehende Gefahr minimiert werden. Der nachfolgende Abschnitt 6.2.3 zeigt jetzt Vorschläge wie die Satellitenfunkanlage am Dach des Institutes für Nachrichten und Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Wien, besser gegen diese Gefahr geschützt werden kann.

### 6.2.3. Schutz einrichtungen

Um einen bestmöglichen Schutz gegen Blitze zu haben, benötigt man Schutz einrichtungen wie die bekannten Blitzableiter. Diese sollen den Einschlag in das zu schützende Gebäude

verhindern, indem sie den Blitz, ohne Gefährdung des Objektes oder Personen, in die Erde ableiten. Ausgenommen der Fachleute, wissen die wenigsten Personen jedoch, dass ein äußerer Blitzschutz alleine nicht genügt, um Hab und Gut wirklich effektiv vor Blitzschlag zu schützen. Ein zusätzlicher innerer Blitzschutz wird benötigt. Dieser erhöht zusätzlich die Sicherheit und erspart Ärger und Reparaturkosten. Jedes wirksame Schutzkonzept, besteht also aus zwei Teilen. Seyr (2009, S.171ff) beschreibt in seinem Buch diese folgendermaßen:

**Der äußere Blitzschutz** dient dazu, dass im Falle eines Einschlages, der entstandene Blitzstrom, gefahrlos am Gebäude vorbei, zur Erde abgeleitet wird. Hierzu verfügt er über die Elemente Fangvorrichtung, Ableitung und Erdungsanlage.

**Der innere Blitzschutz** soll innerhalb des äußeren Blitzschutzes, das Auftreten von gefährlichen Spannungen und Funkenbildung verhindern. Diese Gefahrenquellen können durch den Blitzstrom bei einem direkten Einschlag hervorgerufen werden, aber auch wenn der Blitz in eine leitfähige Zuleitung einschlägt. Elemente dieser Schutzeinrichtung sind der Überspannungsschutz, der Potentialausgleich und Schirmung sowie die Trennung von Bauteilen.

### 6.2.3.1. Äußerer Blitzschutz

Die Ableitung und die Erdungsanlage des äußeren Blitzschutzes ist bereits Bestand des Gebäudes. Daher muss an diesem Element der Schutzeinrichtung nichts mehr vorgenommen werden. Damit die Antenne durch diese Teile geschützt wird, ist sie einfach mit diesen verbunden worden. Hierzu wurde der Ableiter verlängert und mit dem Antennenmasten verbunden (siehe Abbildung 6.4). Durch diese Verbindung ist der Antennenmast automatisch auch zur Fangeinrichtung umfunktioniert worden, da die Mastspitze der Antenne, einer der höchsten Punkte am Dach ist.



Abbildung 6.4.: Verbindung des Antennenmastens mit dem Ableiter des äußeren Blitzschutzes des Gebäudes.

Das ist aber gleichzeitig auch ein Problem, da an diesem Masten die Rotoren befestigt sind. Hierdurch kann ein Teil der Energie des entstehenden Blitzstroms, über die Zuleitungen in das Gebäude eindringen und Teile der Anlage beschädigen. Da es keine Möglichkeit gibt, das Problem in diesem Teil des Blitzschutzes zu lösen, muss das im nächsten Teil behandelt werden.

Die Antennen selbst, sind nicht mit dem Masten verbunden. Diese sind mittels eines Querbalkens, aus Glasfaser-Verstärktem-Kunststoff (GFK), nach außen geführt. Obwohl keine direkte Verbindung zum Ableiten des Stromes besteht, sind sie dennoch durch den vom Masten hervorgerufenen Schutzbereich geschützt. Der Radius des Schutzbereiches lässt sich mit Hilfe des Schutzwinkelverfahrens und unter Zuhilfenahme der Winkelfunktion eines rechtwinkligen Dreiecks (Bartsch 2001, S. 125) über

$$GK = \tan(\alpha) \cdot AK \quad (6.4)$$

berechnen. Hierbei ist die Gegenkathete  $GK$  der Radius des Schutzbereiches und die Ankathete  $AK$  die Höhe der Fangeinrichtung über dem zu schützenden Objekt. Den Schutzwinkel  $\alpha$  kann man aus einer Tabelle (Seyr 2009, S. 174; Abb.3) entnehmen. Mit dieser Gleichung, hat sich bei den vorliegenden Gegebenheiten, ein Radius für den Schutzbereich von

$$\begin{aligned} r_{\text{Schutz}} &= \tan(\approx 65^\circ) \cdot 1,8 \text{ m} \\ r_{\text{Schutz}} &= 3,86 \text{ m} \end{aligned} \quad (6.5)$$

ergeben.

Obwohl die beiden Antennen theoretisch durch den Schutzbereich des Masten geschützt sind, ist dennoch zu empfehlen, dass die Antennen und der Mast elektrisch leitfähig verbunden werden. Der Grund hierfür ist, dass ein direkter Einschlag in eine der beiden Antennen dennoch möglich ist. Wenn dem so ist und es keine direkte Ableitung in Richtung Erde gibt, wird sich der gesamte Blitzstrom über die Signalleitung in das Gebäude fortbewegen. Erst hier besteht über die angeschlossenen Transceiver, eine Verbindung mit dem PE-Leiter des Gebäudes. Durch diesen Ableitungspfad, kann nicht nur der angeschlossenen Transceiver zerstört, sondern auch ein Brand ausgelöst werden. Zur Verbindung der Antennen mit dem Antennenmast und damit mit dem Blitzableiter des Gebäudes, stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl.

Bei der ersten Möglichkeit wird das GFK-Rohr durch ein Aluminium- oder Stahlrohr ersetzt. Damit die Kabel der Antennen geschützt sind, wird die Schirmung der Kabel mit dem neuen Tragrohr verbunden. Weiters wird dieses Tragrohr durch eine flexibles Kupferband mit dem Antennenmast verbunden. Es besteht nun eine direkte Verbindung zwischen der Schirmung des Antennenkabels und dem Blitzableiter des Gebäudes. Der Nachteil dieser Variante ist aber, dass das GFK-Rohr, welches keine negativen elektromagnetischen Auswirkungen auf die Signalübertragung der Antennen hat, ersetzt werden muss.

Die zweite Möglichkeit sieht vor, dass das GFK-Rohr erhalten bleibt. Der Blitzableiter wird erst außerhalb des elektromagnetischen Feldes der Antenne mit der Schirmung des Antennenkabels verbunden. Hierdurch werden die elektrischen Eigenschaften der Antenne nicht beeinflusst. Der Nachteil dieser Variante ist aber, dass das Antennenkabel über eine längere Strecke als Blitzableiter fungiert und den gesamten Stromfluß aufnehmen muss.

Hierfür sind diese Kabel aber nicht ausgelegt, wodurch mit schweren Beschädigungen des Antennenkabels zu rechnen ist.

Wie man sieht, besitzen beide Möglichkeiten ihre Vor- und Nachteile. Für das hier vorgestellte Konzept, wird die erste Variante bevorzugt. Der Grund für diese Entscheidung ist die, dass hierbei ein geringeres Risiko vor Beschädigung besteht. Weiters kann durch den Einsatz eines stabileren Tragrohrs, die Funkanlage um weitere Antennen erweitert werden.

Wie auch schon bei den Rotoren, gibt es auch hier keine Möglichkeit, in dieser Phase Teile der Energie wirklich effektiv vor dem Eindringen in das Gebäude zu hindern. Aus diesem Grund benötigt man den inneren Blitzschutz. Wie der in diesem Konzept aufgebaut sein könnte, wird im nächsten Punkt beschrieben.

### 6.2.3.2. Innerer Blitzschutz

Der innere Blitzschutz (Landesinnung-Wien Elektrotechniker 2006) ist der sogenannte „Überspannungsschutz“. Er dient vor allem als Brand- und Sachschutz. Seine Aufgabe ist es, Spannungsspitzen im Leitungsnetz des zu schützenden Objektes, unschädlich zu machen. Dabei ist es nicht wichtig, ob diese Überspannungen von einem direkten oder indirekten Blitzschlag kommen oder durch Spannungsschwankungen im Versorgungsnetz hervorgerufen werden. Aus diesem Grund müssen alle Leitungen der ans Netz angeschlossenen Geräte, ob direkt oder durch Vernetzung, gesichert werden.

Im Falle dieser Antennenanlage, müssen nun die beiden Steuerkabel, die Signalkabel der beiden Antennen und das Kabel für den „Not-Aus“, aus Abschnitt 5.4, gesichert werden. Da es noch nicht erwähnt wurde, aber für die Wahl der Elemente des Überspannungsschutzes wichtig ist, werden hier kurz die Leistungsdaten der Signale auf den Koaxialkabeln (siehe Tabelle 6.1) beschrieben.

Tabelle 6.1.: Leistungsdaten der Funkanlage für den Überspannungsschutz.

Eigenschaft	$W_{12}$	$W_{13}$
Kabel	ECOFLEX 15	ECOFLEX 15
Frequenz	430–440 MHz	144–146 MHz
Leistung	75 W (18,8 dBW)	100 W (20 dBW)
Amplitude eff.	61,2 V	70,7 V
Amplitude max.	115,5 V	133,3 V

Ebenfalls sollen noch weitere Kabel die vom Dach kommen, vor Überspannungen geschützt werden. Hierzu zählt ein Ethernetkabel mit der Spezialfunktion Power over Ethernet (PoE) und ein weiteres Signalkabel für eine zusätzliche Funkanlage. Die Leistungsdaten dieser zusätzliche Funkanlage kann man der Tabelle 6.2 entnehmen. Das Ethernet-Kabel mit PoE wird zum Betrieb einer Außenkamera verwendet. Durch den Anschluss mit einem solchen Kabel, ist eine weitere Verkabelung der Kamera nicht nötig.

Tabelle 6.2.: Leistungsdaten der erweiterten Funkanlage für den Überspannungsschutz.

Eigenschaft	$W_{15}$
Kabel	ECOFLEX 15
Frequenz	2000–2450 MHz
Leistung	50 W (17 dBW)
Amplitude eff.	50 V
Amplitude max.	94,3 V

Zur Sicherung aller dieser Leiter, bieten viele bekannte Firmen Schutzeinrichtungen an. Einige dem Autor bekannte Firmen, für Schutzeinrichtungen diese Art sind:

- Fa. Citel
- Fa. Dehn + Söhne
- Fa. Phoenix Contact

Für das Konzept des inneren Blitzschutzes, werden jetzt Komponenten der Fa. Citel verwendet. In der nachfolgenden Tabelle 6.3, stehen für die einzelnen Geräte und deren Funktionen, passende Überspannungsableiter. Ebenso wird die benötigte Anzahl an Elementen aufgezeigt.

Tabelle 6.3.: Mögliche Überspannungsableiter für die Antennenanlage.

Gerät	Funktion	Schutzelement	Anzahl
Rotor Azimuth	Betriebsspannung	DLU-24D3-10A	1
	Positionsmessung	DLU2-06D3	1
Rotor Elevation	Betriebsspannung	DLU-48D3-2A	2
	Positionsmessung	DLU2-06D3	1
Polarisationsumschalter	2 m	DLU2-12D3	1
	70 cm	DLU2-12D3	1
Antennen	2 m	P8AX25-N/MF	3
	70 cm		
	13 cm		
Not Aus		DS250VG-300-TN	2
Ethernet		MJ8-505-24D3A60-12	1

Für die Umsetzung des Blitzschutzes für den Elevations-Rotor, muss laut der Tabelle 6.3 die Type „DLU-48D3-2A“ (Citel 2010) zweimal verwendet werden. Der Grund hierfür ist, dass dieses Schutzelement nur zwei Anschlüsse für den Überspannungsschutz besitzt. Die beiden übrigen Anschlüsse dienen zum Anschluss einer Schirmung des Kabels und eines Potentialausgleichs. Um alle drei Versorgungsleitungen des Rotors zu schützen, werden aus diesem Grund zwei Elemente benötigt. Auch erkennt man, dass dieses Element durch die Kennung „\*-48\*“, für höhere Spannungen ausgelegt ist. Der Grund hierfür ist, dass dieser Wert den üblichen Nennwert von Gleichspannungen angibt. In diesem Fall hier 48 V Gleichspannung. Dieser Wert gilt aber nicht für Wechselspannung. Hierzu muss im Datenblatt (Citel



2010, S. 2) der Parameter „Max. zul. Betriebsspannung DC/AC ( $U_C$ )“ herangezogen werden. Das Schutzelement „DLU-48D3“ kann bis zu einer maximalen Betriebsspannung von 37 V Wechselspannung betrieben werden. Im Vergleich dazu, erlaubt das nächst niedrigere Element nur eine maximale Betriebsspannung von 20 V Wechselspannung. Aus diesem Grund, muss das hier angegebene Schutzelement verwendet werden.

Was in dieser Tabelle 6.3 noch auffällt ist, dass für alle drei Signalkabel der Antennen, das selbe Schutzelement verwendet wird. Dieses Element besitzt laut Datenblatt (Citel 2009) eine Bandbreite von 0–3000 MHz bei einer maximalen Leistung von 190 W. Somit deckt es alle in dieser Anlage verwendeten Frequenzbereiche und Leistungen ab. Diese Werte sind zwar wichtig für die Auswahl der zur Verfügung stehenden Elemente, aber für die Entscheidung selbst, sind die Parameter, Einfügedämpfung und Stehwellenverhältnis (SWV) wichtig. Oft wird der Parameter SWV, auch mit Standing Wave Ratio (SWR) oder Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) bezeichnet. Je geringer diese Werte sind, Dämpfung gegen 0 dB und SWR gegen 1, desto besser sind sie. Für diese beiden Parameter, gibt der Hersteller (Citel 2009, S. 2) nun folgende Werte an. Für den Dämpfungsgrad des zu übertragenden Signals einen Wert von  $<0,2$  dB und für das SWV einen Wert von  $<1,2$ .

Der Aufbau dieser Schutzeinrichtungen ist im Schaltschrank am Dach des Institutes vorzunehmen. Hier führen die einzelnen Kabeln das erste Mal von den Antennen in das Gebäude. Montiert werden die einzelnen Schutzelemente auf einer Hutschiene, welche wiederum mit dem PE-Leiter des Gebäudes verbunden ist. Von hier führen die einzelnen Kabel, wie im Abschnitt 5.4 beschrieben, vom Dach in die Leitstelle. Bei der Verdrahtung des Außenkables  $W_{10}$  mit den Blitzschutzelementen ist darauf zu achten, dass die Versorgungsleitungen „5 V Pos 1 & 2“ und „GND Pos 1 & 2“ für die Positionsmessung vor den Schutzelementen aufgesplittet wird. Durch diese Maßnahme, sind die beiden Rotoren in einem geschützten Bereich der Anlage miteinander verbunden. Hierdurch soll verhindert werden, dass nicht gewünschte Ströme, von einem Rotor zum anderen fließen können. Würde diese Aufsplittung erst nach den Schutzelementen vorgenommen werden, kann dieses Problem nicht verhindert werden.

# Kapitel 7.

## Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Modernisierung einer Antennenanlage zur Satellitenkommunikation. Dabei handelt es sich um eine Antenne, die über Rotoren in zwei Achsen vollautomatisch drehbar ist. Ebenfalls werden hier die Gefahren für eine Antennenanlage und wie sie geschützt werden kann, beschrieben. Diese Arbeit kann im Wesentlichen in drei Teilgebiete gegliedert werden:

- die Entwicklung eines neuen Motortreibers,
- die Modernisierung vom Altbestand der Anlage und
- die Entwicklung von Konzeptvorschlägen für die Errichtung von Schutzelementen gegen die Auswirkungen von Gewittern.

Im ersten Teil, der Entwicklung eines neuen Motortreibers, wird im Speziellen auf den Entwurf und die Konstruktion einer Treiberschnittstelle für bis zu zwei Rotoren eingegangen. Mit Hilfe dieser Treiberschnittstelle ist es möglich, die vorhandenen Rotoren noch effektiver und präziser zu steuern, als es mit den bestehenden Komponenten möglich war. Für die Kommunikation mit der Microcontroller Unit (MCU), ist die bestehende Serial Peripheral Interface (SPI)-Schnittstelle erweitert und eine neue Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)-Schnittstelle implementiert worden. Der Motortreiber ist zur Funktionskontrolle der verschiedenen Komponenten und ihren Aufgaben, vermessen und analysiert worden. Zu diesen Komponenten zählen die Schaltelemente der Rotoren, die Geschwindigkeitssteuerung, die Positionsmessung und die Datenübertragung. Die Hardware des Treibers wurde so konzipiert, dass ein Austausch oder eine Erweiterung möglichst einfach durchgeführt werden kann. Eine Übersicht der technischen Daten des neuen Motortreibers ist in der Tabelle 7.1 zu finden.

Nach der Fertigstellung des neuen Motortreibers, ist mit der Modernisierung der bestehenden Anlage begonnen worden. Neben der Modernisierung eines Teils der Hardware der MCU und der Neuplanung Außenverkabelung der Antennenanlage, ist die komplette Energieversorgung der Anlage erneuert worden. Im Zuge dieses Umbaus, ist im Bereich der Energieversorgung ein Not-Aus-Kreis implementiert worden. Die Modernisierung der Energieversorgung führte dazu, dass das Gehäuse für die Antennensteuerung komplett umgebaut werden musste (siehe Abbildung 7.1). Neben der Modernisierung der Hardware-Elemente ist auch die Firmware der bestehenden Rotorsteuerung verändert und an die neuen Gegebenheiten angepasst worden.

Als letzter Teil sind die Konzeptvorschläge für die Schutzeinrichtungen entworfen worden. Hierbei wird beschrieben, wie die Antennenanlage gegen die Einflüsse und Gefahren durch Blitze und starke Winde besser geschützt werden kann. Diese Konzepte sollen als Vorschläge für weiter Arbeiten an der Antennenanlage dienen.

Tabelle 7.1.: Technische Daten des neuen Motortreibers.

Parameter	min	max	verwendet
Versorgung Motortreiber [V DC]	14	32	24
Versorgung galv. Trennung	Bereich 1 [V DC]	2,7	3,6
	Bereich 2 [V DC]	4,5	5,5
Anzahl Motortreiber im Netzwerk	-	2	1
Anschlüsse für Rotoren	geregelt (DC)	-	1
	ungeregelt	-	1
Überwachung von Rotoren	-	2	2
Auflösung der Istwerte [UNIT]	0	4096	4096
Motornennspannung Azimut [V DC]	11	26	24
Motornennsstrom Azimut [A DC]	-	3,50	0,38
Sicherung Azimut Feedback [A DC]	-	4,36	1,00
Sicherung Azimut elektronisch [A DC]	-	4,20	1,30
Sicherung Azimut Glassicherung [A]	-	5	5
Grundfrequenz PWM [kHz]	-	10	7,3
Auflösung PWM [UNIT]	1000	3250	1650 – 3250
Motornennspannung Elevation [V AC]	-	29	25
Motornennsstrom Elevation [A AC]	-	1,25	1,23
Sicherung Elevation Glassicherung [A]	-	2	2

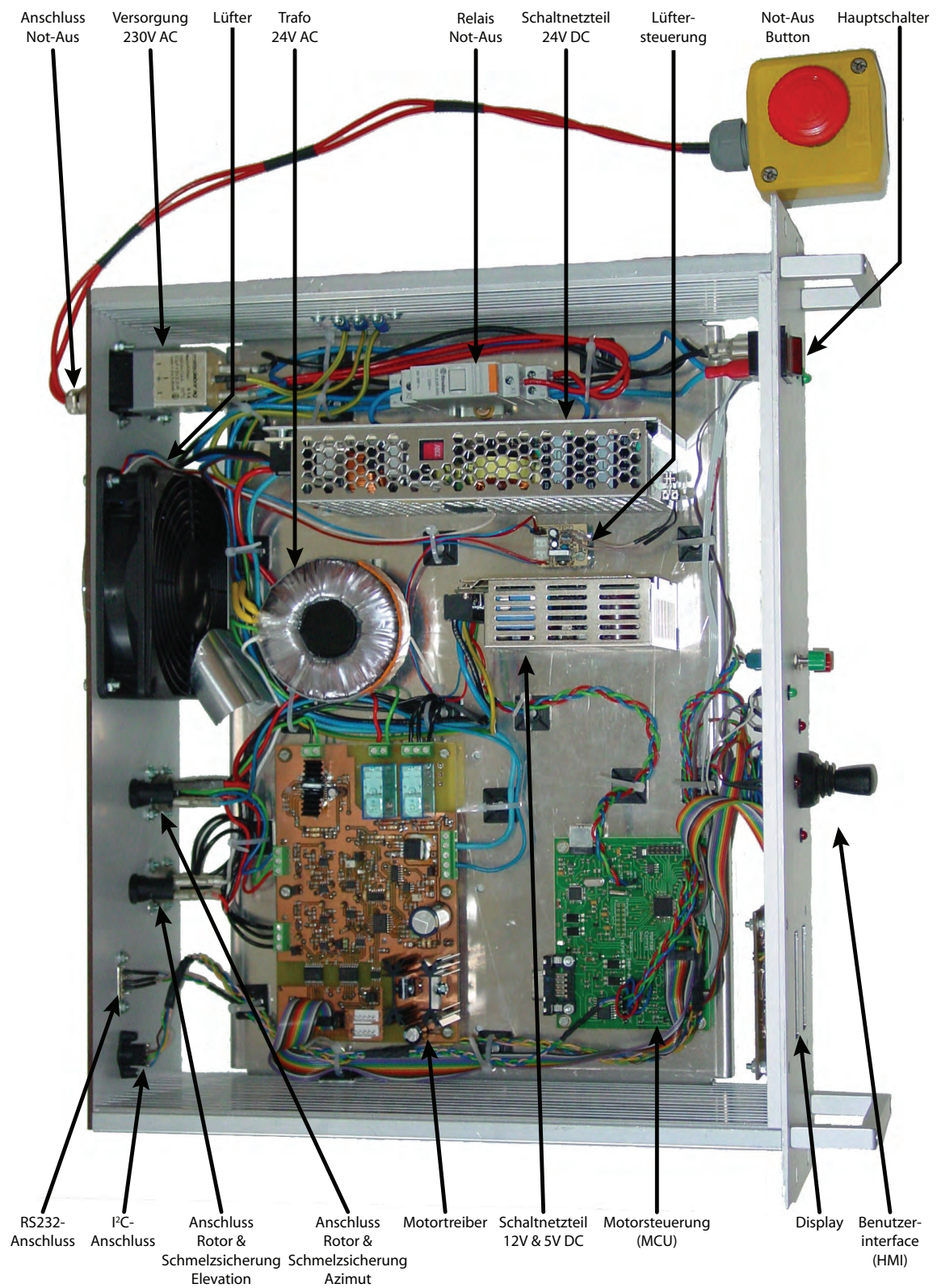


Abbildung 7.1.: Aufbau der neuen Antennensteuerung.

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Verteilung der aktiven Satelliten nach Ihrer Umlaufbahn (Quelle: UCS 2010).	2
2.1. Schematischer Aufbau der bestehenden Anlage (vgl. Lassacher 2008).	6
2.2. Steuerungseinheit basierend auf dem Konzept von Lassacher (2008).	7
2.3. Blockschaltbild des Mikrocontrollers MSP430F149 (Quelle: Texas Instruments 2004, S. 5).	8
2.4. ARS-Interface von EA4TX (2003).	9
2.5. schematischer Aufbau der Funktionsweise zur Bestimmung der Position (Quelle: EA4TX 2003, S. 9).	10
2.6. Schematische Darstellung der Elemente zur Messung der Position auf der ARS-Platine.	11
3.1. Schematischer Aufbau der neu konzipierten Steuerungsanlage.	16
3.2. Schematische Darstellung des neuen Motortreibers.	17
3.3. Fertig konzipierte und getestete Platine des neuen Motortreibers.	18
4.1. Schaltplan der internen Energieversorgung des Motortreibers.	20
4.2. Schaltplan des elektronischen Sicherungselementes in der Energieversorgung des Motortreibers.	22
4.3. Grafische Anzeigeelemente für den galvanisch getrennten Bereich des Motortreibers.	24
4.4. Schaltplan des I/O-Expanders auf dem Motortreiber.	25
4.5. Darstellung eines PWM-Signals bei verschiedenen Duty Cycles.	26
4.6. Schematische Darstellung des PWM-Generators.	27
4.7. Schaltplan des Dreiecksgenerators.	28
4.8. Vermessung des generierten Dreiecksignals.	29
4.9. Schematik für den Aufbau der Referenzspannung des PWM-Generators.	30
4.10. Schaltvorgang des Komparators in Abhängigkeit der Eingangsspannungen.	32
4.11. Ablaufdiagramm des Regelalgorithmus.	34
4.12. Überprüfung des PWM-Generators auf Funktionstüchtigkeit.	35
4.13. Neue Untergrenze der Vergleichsspannung (rosa) und des Duty Cycles (gelb).	36
4.14. Abhängigkeit des Duty Cycles vom digitalen Wert des DAC.	37
4.15. Abhängigkeit der Umlaufzeit und der Drehgeschwindigkeit des Azimut-Rotors bei verschiedenen Duty Cycles.	37
4.16. Schematik für die Schaltelemente des Elevations-Rotor.	39
4.17. Messung der Stromaufnahme des Elevations-Rotor während einer Umdrehung.	40
4.18. Funktionsweise einer H-Brücke (Quelle: Schiemann et al. 2009, S. 603).	42
4.19. Blockschaltbild der H-Brücke MC 38877 (Quelle: Freescale Semiconductors 2008, S. 2).	43
4.20. Schematik für den Leistungsschalter des Azimut-Rotors.	44

4.21. Logik zum Vereinen der Signale für Drehrichtung und Geschwindigkeit des Azimut-Rotors. . . . .	44
4.22. Schematischer Aufbau der Anzeigeelemente der H-Brücke. . . . .	46
4.23. Schematische Darstellung der Messschaltung für die aktuelle Stromaufnahme der H-Brücke. . . . .	48
4.24. Taktfrequenz zum Ein- und Ausschalten der MOS-FETs für den Belastungstest der H-Brücke bei einem Duty Cycles von 85 %. . . . .	49
4.25. Messergebnisse der Temperatur während der Belastungstests. . . . .	50
4.26. Stromaufnahme des Azimut-Rotors während einer vollen Umdrehung bei einem Duty Cycle von 85 %. . . . .	51
4.27. Stromaufnahme des Azimut-Rotors während einer vollen Umdrehung bei einem Duty Cycle von 100 %. . . . .	53
4.28. Schematische Darstellung der Elemente zur Messung der Position auf dem neuen Motortreiber. . . . .	54
4.29. Schaltplan zur Messung der Position auf dem Motortreiber. . . . .	55
4.30. Abweichung der Positionswerte, über das gesamte Spannungsspektrum des Potentiometers des Azimut-Rotors. . . . .	59
4.31. Abweichung der Positionswerte, über das gesamte Spannungsspektrum des Potentiometers des Elevations-Rotors. . . . .	60
4.32. Schematischer Aufbau eines I <sup>2</sup> C-Netzwerkes (Quelle: Bähring 2010, S. 287). . . . .	61
4.33. Definierte Zustände des I <sup>2</sup> C-Bus Protokolls (Quelle: Texas Instruments 2008, S. 5f). . . . .	62
4.34. Schaltplan der galvanische Trennung des I <sup>2</sup> C-Busses von der MCU. . . . .	63
4.35. Messung eines vier Byte langen I <sup>2</sup> C-Übertragungsprotokolls. . . . .	63
4.36. Aufbau der SPI-Busstruktur am Motortreiber. . . . .	65
4.37. Übertragung eines zwei Byte großen Datenpaketes via SPI-Bus. . . . .	66
4.38. Schaltplan der galvanischen Trennung des SPI-Busses von der MCU. . . . .	67
5.1. Vorher-Nacher-Vergleich des 14 poligen I/O-Steckers. . . . .	71
5.2. Vergleich der Gehäuserückseite der Antennensteuerung. . . . .	73
5.3. Element zum Umlenken des Luftstroms für die aktive Kühlung der H-Brücke. . . . .	73
6.1. Konzept 1 der Datenverarbeitung für die Messdaten des Windes. . . . .	78
6.2. Konzept 2 der Datenverarbeitung für die Messdaten des Windes. . . . .	79
6.3. Die drei Aufbauphasen eines Blitzes (Quelle: ALDIS 2010). . . . .	81
6.4. Verbindung des Antennenmastens mit dem Ableiter des äußeren Blitzschutzes des Gebäudes. . . . .	82
7.1. Aufbau der neuen Antennensteuerung. . . . .	89

# Tabellenverzeichnis

2.1. Pinbelegung der Klemmen des RCI-SE Board von EA4TX. . . . .	9
2.2. modifizierte Pinbelegung des DB25 Steckers des RCI-SE Boards. . . . .	12
2.3. Eckdaten des Azimut-Rotors G-2800DXA (Yaesu 2010a). . . . .	13
2.4. Pinbelegung $X_{10}$ für den Azimut-Rotors. . . . .	13
2.5. Eckdaten des Elevations-Rotors G-550 (Yaesu 2010b). . . . .	14
2.6. Pinbelegung $X_{11}$ für den Elevations-Rotors. . . . .	14
4.1. Wahrheitstabelle eines RS-Flip-Flops (Schiemann et al. 2009, S.282f). . . . .	23
4.2. Abweichung der Messwerte zur Erzeugung des Dreiecksignals. . . . .	30
4.3. neuer Arbeitsbereich des DACs. . . . .	32
4.4. Oberer und unterer Grenzwert des Drehverhaltens für den Azimut-Rotor. . . . .	38
4.5. Wahrheitstabelle der Schaltungslogik des Azimut-Rotors. . . . .	45
4.6. min. und max. Messwert der Rotoren. . . . .	58
4.7. größte Abweichung vom idealen ADC-Wert. . . . .	59
4.8. Klemmbelegung des neuen Motortreibers. . . . .	67
4.9. Pinbelegung des Steckers $J_1$ für die Verbindung mit der MCU. . . . .	68
4.10. Pinbelegung der Stecker $J_2$ und $J_3$ zur Erweiterung der Antennensteuerung mittels I <sup>2</sup> C-Bus. . . . .	69
5.1. Adernplan für die Außenverkabelung der Funkanlage. . . . .	75
6.1. Leistungsdaten der Funkanlage für den Überspannungsschutz. . . . .	84
6.2. Leistungsdaten der erweiterten Funkanlage für den Überspannungsschutz. . . . .	85
6.3. Mögliche Überspannungsableiter für die Antennenanlage. . . . .	85
7.1. Technische Daten des neuen Motortreibers. . . . .	88
A.1. Messdaten der Funktionsprüfung des PWM-Generators. . . . .	102
A.2. Messdaten des Drehverhaltens für den Azimut-Rotor. . . . .	103
A.3. Stromaufnahme des Elevations-Rotors während eines vollen Umlaufes. . . . .	105
A.4. Messergebnisse der Belastungstests der H-Brücke für den Azimut-Rotor . . . . .	107
A.5. Stromaufnahme des Azimut-Rotors während eines vollen Umlaufes (Duty Cycle=85%). . . . .	109
A.6. Stromaufnahme des Azimut-Rotors während eines Umlaufes bei voller Ge- schwindigkeit (Duty Cycle=100%). . . . .	111
A.7. Messergebnisse Positionsmessung des Azimut-Rotors. . . . .	113
A.8. Messergebnisse Positionsmessung des Elevations-Rotors. . . . .	115

# Abkürzungsverzeichnis

$\overline{\text{CS}}$	Chip-Select
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog to Digital Converter
ALDIS	Austrian Lightning Detection and Information System
ARS	Antenna Rotator System
DAC	Digital to Analog Converter
DB25	25 poligen D-SUB
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GEO	Geosynchronous Earth Orbit
GFK	Glasfaser-Verstärktem-Kunststoff
GPS	Global Positioning System
HMI	Human-Machine-Interface
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
I/O	Input/Output
IC	Integrated Circuit
ISS	International Space Station
LED	Light Emitting Diode
LEO	Low Earth Orbit
MCU	Microcontroller Unit
MEO	Medium Earth Orbit
MOS-FET	Metal-Oxide-Semiconductor-Feldeffekt-Transistor
NACK	no Acknowledgement



NASA	National Aeronautics and Space Administration
OPV	Operationsverstärker
P-Regler	Proportionalregler
PC	Personal Computer
PE-Leiter	geerdeten Schutzleiter
PoE	Power over Ethernet
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
SCL	Serial Clock
SCLK	Serial Clock
SDA	Serial Data
SDI	Serial Data Input
SDO	Serial Data Output
SPI	Serial Peripheral Interface
SWR	Standing Wave Ratio
SWV	Stehwellenverhältnis
UCS	Union of Concerned Scientists
UdSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
USB	Universal Serial Bus
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

# Glossar

## Acknowledgement

aus dem Englischen übersetzt: die Bestätigung oder die Rückmeldung.

## Azimut

Melcher Nachrichtentechnik (2005) definiert den Begriff Azimut folgendermaßen: „Ist der Winkel für die horizontale Ausrichtung des Spiegels. Der Winkel wird in Grad [°] angegeben. Norden=0°, Süden=180°“.

## Duty Cycle

Verhältnis der Einschaltzeit zur Ausschaltzeit eines Pulse Width Modulation (PWM)-Signals. Diese Einheit ist dimensionslos und wird in 0...100% angegeben.

## EEPROM

Das EEPROM (Schiemann et al. 2009, S.371) ist ein mehrfach programmierbarer Nur-Lese-Speicherbaustein. Die Daten bleiben nach Abschalten der Betriebsspannung erhalten. Ein Speicherelement besteht aus einem Transistor, dessen Gate beim Programmieren negativ geladen wird. Aufgrund der negativen Ladung sperrt der Transistor. Der Speicherinhalt kann durch Anlegen einer externen Spannung gelöscht werden. Zum Programmieren und Löschen muss das EEPROM nicht aus der Anwenderschaltung entfernt werden. Er dient daher sehr oft als Speicher für wichtige Daten.

## Elevation

Melcher Nachrichtentechnik (2005) definiert den Begriff Elevation folgendermaßen: „Ist der Erhebungswinkel und wird in Grad [°] ausgedrückt. Es handelt sich um den Winkel, um den die Antenne in Bezug auf den theoretischen Horizont gekippt werden muss, um sie genau auf den gewünschten Satelliten auszurichten“. Der Winkel wird in Grad [°] angegeben.

## Explorer

aus dem Englischen übersetzt: der Erforscher.

## GPS

Ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium (Wößner 2008) in den 70er Jahren erdachtes, realisiertes und betriebenes System, das aus bis zu 30 Satelliten besteht. Diese senden ein Signal aus, das die genaue Ortsbestimmung eines GPS-Empfängers ermöglicht. Dieses System wird sowohl in der Luft-, Land- und Seefahrtnavigation, sowie bei Landvermessung und anderen Anwendungen eingesetzt, bei der es auf genaue Positionsbestimmung ankommt. Das System steht jedem der einen Empfänger besitzt, gratis zur Verfügung.

**Komparator**

Bei einem Komparator (Schiemann et al. 2009, S.221) handelt es sich um eine spezielle Betriebsart eines OPVs. Komparatoren dienen immer als Kippschaltungen. Für diese Betriebsart kann ein allgemeiner OPV oder ein speziell für diese Betriebsart entwickelter Baustein verwendet werden. Mit diesem Baustein kann man eine unbekannte Spannung  $U_x$  mit einer definierten Spannung  $U_{\text{def}}$  vergleichen. Ist  $U_x > U_{\text{def}}$  schaltet der Ausgang des OPV auf die maximal negative Ausgangsspannung. Ist hingegen  $U_x < U_{\text{def}}$  schaltet der Ausgang des OPV auf die maximal positive Ausgangsspannung. Diese Schaltungen werden oft als einfache Melder in der Regelungstechnik eingesetzt.

**Landsat**

Das Landsat-Programm (Rocchio 2010) ist eine Reihe von 7 Satelliten, die von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) in den 70er Jahren in den Weltraum geschossen wurden. Die Aufgabe dieses Programms ist die Fernerkundung, Beobachtung und Aufzeichnung der natürlichen Ressourcen auf der Erde, aus dem Weltall. Diese Satelliten dienen rein der zivilen Nutzung und stehen jedermann zur Verfügung.

**LED**

aus dem Englischen übersetzt: Licht aussendende Diode oder Leuchtdiode. Die Leuchtdiode (Schiemann et al. 2009, S.99) ist eine in Vorwärtsrichtung betriebene Halbleiterdiode. Nach Anlegen einer Spannung, wird am Übergang zwischen Sperrschicht und P-Schicht Energie frei. Diese frei werdende Energie wird in Licht umgewandelt. Je nach verwendeten Halbleiterwerkstoff ändert sich die Farbe der Leuchtdiode.

**Mixed Signal**

Der Begriff Mixed Signal wird oft im Zusammenhang mit Mikrocontrollern oder verschiedenen ICs verwendet. Diese Bezeichnung bedeutet, dass dieser Baustein sowohl analoge wie auch digitale Eingangssignale verarbeiten kann.

**MOS-FET**

Das MOS-FET (Beuth & Beuth 2003, Flegel et al. 2004) ist eine spezielle Form eines Transistors und gehört zu den Feldeffekttransistoren. Wie auch der Transistor besteht das MOS-FET aus drei Schichten. Der Unterschied liegt nun aber in der Bauform der beiden. Der aktive Teil dieses Bauteils ist das Substrat auch Gate (G) genannt. Dieses ist durch eine dünne Sperrschicht vom dessen Anschluss getrennt. In das Substrat sind die beiden leitenden Schichten, Source (S) und Drain (D) eingebettet. Zwischen diesen beiden Schichten, entsteht bereits bei einer kleinen Spannung am Gate eine leitende Brücke. Der Grund hierfür ist, weil sich die Elektronen an der Sperrschicht des Gates in großen Mengen sammeln und so einen Kanal zwischen Source und Drain bilden. Die gängigste Form ist der positiv dotierte MOS-FET, bei dem das Substrat ein p-leitender Kristall ist. MOS-FETs werden oft in der Leistungselektronik verwendet. Weiters sind die Schaltzeiten eines MOSFET wesentlich kürzer als die eines Bipolartransistors. Sie werden daher auch oft in der Digitaltechnik, wo schnelle Schaltvorgänge benötigt werden, eingesetzt.

**Negativ-Logik**

Die Negativlogik (Flegel et al. 2004, S. 130) ordnet den digitalen Zuständen „0“ und „1“ die logischen Zustände folgendermaßen zu: „HIGH-Signal = 0 und LOW-Signal = 1“. Die entgegengesetzte Zuordnung ist ebenfalls möglich und wird Positivlogik genannt.

**NOVA**

NOVA (Lassacher 2008, S. 42ff) ist ein Satelliten-Zielverfolgungsprogramm. Mit Hilfe dieses Programms ist es möglich die Position von Himmelskörpern mit Hilfe physikalischer Gleichungen zu berechnen.

**Potentiometer**

Ein Potentiometer (Flegel et al. 2004, S. 84f) ist einstellbarer Widerstand. Dabei kann die Größe des Widerstandswertes zwischen fast  $0\Omega$  und dem Nennwert eingestellt werden. Der Widerstandswert wird dabei durch Drehen eines Schleifers auf der einer Widerstandsschicht verändert. Ein Potentiometer wird oft als flexibler Spannungsteiler oder Abgleich in einer Schaltung verwendet.

**Power over Ethernet**

Mit Power over Ethernet (Schiemann et al. 2009, S. 418) können einige netzwerkfähige Geräte (z. B. Kameras) nur mittels des Netzkabels betrieben werden. Die Teilnehmer werden dabei mit 48 V und bis zu 0,35 A über das Netzkabel versorgt. Die Funktion PoE ist in der IEEE 802.3af genormt.

**RAM**

Ein RAM (Schiemann et al. 2009, S. 369) ist ein Speicherbaustein. Man unterscheidet diesen Speicherbaustein in zwei Kategorien. Das statische RAM und das dynamische RAM. Der Unterschied der beiden Kategorien liegt dabei in ihrem Aufbau und den damit einhergehenden Eigenschaften. Beide Kategorien verlieren nach Abschalten der Betriebsspannung die gespeicherte Information. Dieser Art Speicherbausteine ist schreib-/lesefähig.

**RS232**

Die RS232-Schnittstelle, oder auch V.24-Schnittstelle genannt, ist laut Schiemann et al. (2009) die wohl meist verwendete serielle Schnittstelle weltweit. Der Grund für diese Beliebtheit ist, dass sie international genormt ist. Diese Schnittstelle benötigt nur drei Leitungen, um Daten zu senden oder zu empfangen. Die Daten werden dabei seriell über eine Datenleitung übertragen. Bei dieser Leitung müssen die beiden Leitungen für Senden und Empfangen gekreuzt sein. Der Grund hierfür ist, dass sowohl beim Sender als auch beim Empfänger die Sende- und Empfangspins dieselben sind. Die Schnittstelle arbeitet mit einem  $\pm 12\text{ V}$  Spannungspegel. Die Übertragungsgeschwindigkeiten der RS232-Schnittstelle sind unterschiedlich und müssen je nach Verbindung eingestellt werden. Die maximale Übertragungsgeschwindigkeit dieser Schnittstelle liegt dabei bei 19 200 bit/s.

**Satellite Ground Station**

aus dem Englischen übersetzt: Satelliten Bodenstation oder Satelliten Funkstation.

**Scheinleistung**

Die Scheinleistung (Seyr & Schwaiger 1998, S.129) ist das Produkt aus Spannung und Strom im Wechselstromkreis ohne Rücksicht auf die Phasenlage. Die Einheit der Scheinleistung ist das Voltampere [VA]. Die Scheinleistung ist die geometrische Summe aus der Wirkleistung und der Blindleistung eines Verbrauchers. Aus diesem Grund ist sie maßgebend für die Stromaufnahme des Verbrauchers und bestimmt die Abmessungen der Energiequelle (z.B.: Transformator).

**Sputnik**

aus dem Russischen übersetzt: der Begleiter oder der Gefährte (Growalt 2002).

**Transistor**

Ein Transistor (Flegel et al. 2004, Schiemann et al. 2009) ist ein Steuerelement mit dessen Hilfe die Stromstärke in einem elektrischen Schaltkreis gesteuert werden kann. Es ist vergleichbar mit einem Ventil in einem Wasserkreislauf. Spricht man von einem Transistor, ist meistens der Bipolartransistor gemeint. Der Transistor besteht aus drei Halbleiterschichten abwechselnder Dotierung. Man unterscheidet dabei zwischen NPN und PNP Transistoren. Die mittlere Schicht des Transistors wird Basis (B) genannt. Die beiden Außenschichten werden Kollektor (C) und Emitter (E) genannt. Fließt durch die Basis ein Strom, sendet der Emitter Ladungsträger aus. Die Emission wird dabei durch die Stromstärke an der Basis beeinflusst. Die ausgesendeten Ladungsträger bewegen sich anschließend in Richtung Kollektor, wo sie wieder eingesammelt werden. Eine kleine Änderung des Basisstroms führt bereits zu einer großen Änderung des Stromflusses zwischen Kollektor und Emitter. Transistoren werden überwiegend als Schalter oder Verstärker eingesetzt.

# Literaturverzeichnis

ALDIS (2010). Physik der Blitzentladung, [online]. <http://www.aldis.at/forschung/physik.html> (letzter Aufruf am 30.08.2010).

Analog Devices (2010). *ADuM1250/ADuM1251 - Hot Swappable Dual I2C Isolator*, c edn. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADUM1250\\_1251.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUM1250_1251.pdf) (letzter Aufruf am 08.09.2010).

Bartsch, H. J. (2001). *Taschenbuch Mathematischer Formeln*, 19 edn, München: Carl Hanser Verlag.

Beuth, K. & Beuth, O. (2003). *Elementare Elektronik*, 7. edn, Würzburg: Vogel Buchverlag.

Bähring, H. (2010). *Anwendungsorientierte Mikroprozessoren - Mikrocontroller und Digitale Signalprozessoren*, 4 edn, Heidelberg: Springer-Verlag.

Citel (2009). *Überspannungsschutz für HF-Anwendungen – P8AX, PRC, CXP*, 1.1 edn. <http://www.citel.de/download.php?filename=ibase%2Fmodule%2Fmedienarchiv%2Fdateien%2Fprodukte%2FDatenblatt%2FP8AX.pdf> (letzter Aufruf am 27.08.2010).

Citel (2010). *Überspannungsschutz für MSR, Telekommunikation und Datentechnik – DLU, DLU2*, 1.2 edn. <http://www.citel.de/download.php?filename=ibase%2Fmodule%2Fmedienarchiv%2Fdateien%2Fprodukte%2FDatenblatt%2FDLU.pdf> (letzter Aufruf am 27.08.2010).

EA4TX (2003). *Antennen Rotor System - Setup & Hardware Reference Manual RCI-SE*, 2.1c edn.

ELV (2005). Elektronische Sicherung/Relais, [online]. [http://www.elv-downloads.de/service/manuals/ESI200/ESI200\\_KM\\_G\\_051104.pdf](http://www.elv-downloads.de/service/manuals/ESI200/ESI200_KM_G_051104.pdf) (letzter Aufruf am 16.08.2010).

Flegel, G., Birnstiel, K. & Nerreter, W. (2004). *Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik*, 8. edn, München: Carl Hanser Verlag.

Freescale Semiconductors (2008). *5.0 A H-Bridge with Load Current Feedback*, 13.0 edn. [http://freescale.com/files/analog/doc/data\\_sheet/MC33887.pdf](http://freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33887.pdf) (letzter Aufruf am 09.08.2010).

Growalt, L. (2002). Sputnik 1 - mit 80 Kilo um die Welt, [online]. [http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raumsonden/Sputnik\\_01.shtml](http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raumsonden/Sputnik_01.shtml) (letzter Aufruf am 14.04.2010).

Harm, H. (2006). Sicherheit von Antennen, [online]. <http://www.mucl.de/~hharm/afu-kurs/pdf/files/sicherheit.pdf> (letzter Aufruf am 23.08.2010).

- International Rectifier (2006). *IR3315(S)Pbf - Low EMI current sense high side switch*. <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir3315pbf.pdf> (letzter Aufruf am 15.08.2010).
- Jacobs, C. (2004). Lineare Dreieck-/Sägezahngeneratoren mit Operationsverstärker, [online]. <http://homepages.internet.lu/absolute3/tronic/sz.htm> (letzter Aufruf am 12.04.2010).
- König, O. (2010). Windstärken-Tabelle, [online]. [http://www.windfinder.com/wind/windspeed.htm#windspeed\\_conversion\\_table](http://www.windfinder.com/wind/windspeed.htm#windspeed_conversion_table) (letzter Aufruf am 23.08.2010).
- Landesinnung-Wien Elektrotechniker (2006). Überspannungsschutz, [online]. <http://www.elektroinnung-wien.at/k-info/elektrotechniker/%DCberspannung%20Konsument.pdf> (letzter Aufruf am 24.08.2010).
- Lassacher, B. (2008). *Erdefunkstelle für Satellitenkommunikation*, Master's thesis, Technische Universität Wien, Institut für Nachrichten- und Hochfrequenztechnik. [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_171003.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_171003.pdf) (letzter Aufruf am 13.04.2010).
- MAXIM (2004). Pulse-Width Modulator Operates at Various Levels of Frequency and Power, [online]. <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/3201> (letzter Aufruf am 12.04.2010).
- Melcher Nachrichtentechnik (2005). AZ/EL - Werte, [online]. [http://members.aon.at/melchernt/\\_was/az\\_el\\_wert.htm](http://members.aon.at/melchernt/_was/az_el_wert.htm) (letzter Aufruf am 08.04.2010).
- Microchip (2010). *MCP4901/4911/4921 Digital-to-Analog Converter*, a edn. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22248a.pdf> (letzter Aufruf am 03.09.2010).
- Mietke, D. (2009a). Passive elektrische Filter, [online]. <http://www.elektroniktutor.de/analog/filter.html> (letzter Aufruf am 07.09.2010).
- Mietke, D. (2009b). Tiefpässe - frequenzabhängige Spannungsteiler, [online]. <http://www.elektroniktutor.de/analog/tiefpass.html> (letzter Aufruf am 07.09.2010).
- National Semiconductor (2010). *ADC121C021/ADC121C027 - 12-Bit Analog-to-Digital Converter*. <http://www.national.com/ds/DC/ADC121C021.pdf> (letzter Aufruf am 06.09.2010).
- Pete Bros (2010). *ULTIMETER 100 OWNERS MANUAL*. <http://www.peetbros.com/pdf/ULTIMETER100Manual.pdf> (letzter Aufruf am 23.08.2010).
- Recuenco, A. M. (2008). *SSETI Groundstation*, Master's thesis, Technische Universität Wien, Institut für Nachrichten- und Hochfrequenztechnik. [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_174217.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_174217.pdf) (letzter Aufruf am 13.04.2010).
- Rocchio, L. E. (2010). The Landsat Program, [online]. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/> (letzter Aufruf am 07.05.2010).
- Schiemann, B., Häberle, G. et al. (2009). *Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik*, 10. edn, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.
- Schwerdfeger, M. (2000). SPI - Serial Peripheral Interface, [online]. <http://www.mct.de/faq/spi.html> (letzter Aufruf am 18.08.2010).

- Seyr, S. (2009). *Elektrotechnik Fachkunde 2 - Elektroinstallation und Blitzschutz*, Wien: Verlag Jugend & Volk.
- Seyr, S. & Schwaiger, H. (1998). *Elektrotechnik Grundlagen*, Wien: Bohmann Verlag.
- SSB-Electronic (2010). Ecoflex 15, [online]. [http://ssb.de/pdfs/ssb\\_090804\\_datenblatt\\_Ecoflex15.pdf](http://ssb.de/pdfs/ssb_090804_datenblatt_Ecoflex15.pdf) (letzter Aufruf am 10.09.2010).
- ST Microelectronics (2010). *L78XX Series - Positive voltage regulators*, 21 edn. <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/2143.pdf> (letzter Aufruf am 15.08.2010).
- TDK-Lambda (2010). *LS Serie*, 4 edn. [http://de.tdk-lambda.com/KB/129240112040156250\\_LS%20Series\\_Jan\\_10.pdf](http://de.tdk-lambda.com/KB/129240112040156250_LS%20Series_Jan_10.pdf) (letzter Aufruf am 19.08.2010).
- Texas Instruments (2004). *MSP430x13x, MSP430x14x, MSP430x14x1 Mixed Signal Microcontroller*, f edn. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f149.pdf> (letzter Aufruf am 03.08.2010).
- Texas Instruments (2008). *Remote 8-Bit I2C and SMBus I/O expander*, b edn. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/pca9554.pdf> (letzter Aufruf am 13.08.2010).
- Texas Instruments (2009). *MSP430F21x2 Mixed Signal Microcontroller*, g edn. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2112.pdf> (letzter Aufruf am 23.08.2010).
- Traco Power (2010). *TXL Serie*, 4 edn. [http://www.tracopower.com/datasheet\\_g/txl-d.pdf](http://www.tracopower.com/datasheet_g/txl-d.pdf) (letzter Aufruf am 19.08.2010).
- UCS (2010). UCS Satellite Database, [online]. [http://www.ucsusa.org/nuclear\\_weapons\\_and\\_global\\_security/space\\_weapons/technical\\_issues/ucs-satellite-database.html](http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html) (letzter Aufruf am 02.08.2010).
- UNI-Protokolle (2010). Orbit (Himmelsmechanik), [online]. [http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Orbit\\_\(Himmelsmechanik\).html](http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Orbit_(Himmelsmechanik).html) (letzter Aufruf am 05.05.2010).
- WIMO (2010). Welche Windlast hat meine Antenne?, [online]. [http://www.wimo.de/windlast-berechnung\\_d.html](http://www.wimo.de/windlast-berechnung_d.html) (letzter Aufruf am 23.08.2010).
- Wößner, M. (2008). NAVSTAR GPS - Geschichtliches, [online]. <http://www.kowoma.de/gps/Geschichte.htm> (letzter Aufruf am 07.05.2010).
- Yaesu (2010a). *G-800DXA, G-1000DXA, G-2800DXA - Antenna Rotator & Controller User Manual*. <http://www.yaesu.com/downloadFile.cfm?FileID=685&FileCatID=155&FileName=G%2D800%5FG%2D1000%5FG%2D2800%5FDXA%5F0pMan.pdf&FileContentType=application%2Fpdf> (letzter Aufruf am 06.05.2010).
- Yaesu (2010b). *Instruction Manual G-550*. <http://www.yaesu.com/downloadFile.cfm?FileID=968&FileCatID=155&FileName=G%2D550.pdf&FileContentType=application%2Fpdf> (letzter Aufruf am 06.05.2010).



# Anhang A.

## Messergebnisse komplett

### A.1. Messdaten Geschwindigkeitssteuerung

Tabelle A.1.: Messdaten der Funktionsprüfung des PWM-Generators.

Differenz $DAC_{max} - DAC_{min}$ [UNIT]	Duty Cycle [%]	Vergleichsspannung DAC [V]
1000	0,00	1,19
1045	0,00	1,24
1090	0,00	1,30
1135	0,00	1,35
1180	0,85	1,42
1225	2,22	1,47
1270	4,56	1,54
1315	6,93	1,60
1360	9,29	1,66
1405	11,68	1,72
1450	14,01	1,77
1495	16,40	1,83
1540	18,83	1,89
1585	21,15	1,94
1630	23,54	2,00
1675	25,92	2,05
1720	28,23	2,11
1765	30,62	2,16
1810	32,98	2,22
1855	35,31	2,28
1900	37,71	2,33
1945	40,08	2,39
1990	42,43	2,45
2035	44,84	2,50
2080	47,22	2,56
2125	49,60	2,62
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.		

Tabelle A.1.: Fortsetzung Messdaten Funktionsprüfung des PWM-Generators.

Differenz $DAC_{max} - DAC_{min}$ [UNIT]	Duty Cycle [%]	Vergleichsspannung DAC [V]
2170	51,97	2,68
2215	54,30	2,73
2260	56,64	2,79
2305	59,02	2,85
2350	61,33	2,91
2395	63,67	2,97
2440	66,04	3,03
2485	68,32	3,09
2530	70,70	3,14
2575	73,09	3,20
2620	75,40	3,25
2665	77,73	3,31
2710	80,03	3,37
2755	82,28	3,42
2800	84,72	3,48
2845	87,09	3,53
2890	89,43	3,59
2935	91,82	3,65
2980	94,15	3,70
3025	96,31	3,76
3070	98,27	3,81
3115	99,51	3,87
3160	100,00	3,92
3205	100,00	3,99
3250	100,00	4,04
Ende der Datenreihe.		

Tabelle A.2.: Messdaten des Drehverhaltens für den Azimut-Rotor.

Dauer eines Umlauf [mm:ss]	DAC Wert [UNIT]	Duty Cycle [%]	Dreh- geschwindigkeit [°/s]	Drehgeschwindigkeit pro Abtastperiode [°/50ms]
∞	1650,00	24,6	0,000	0,000
13:53	1730,00	28,7	0,540	0,027
12:50	1746,00	29,6	0,584	0,029
10:21	1778,00	31,3	0,725	0,036
08:23	1810,00	33,0	0,895	0,045
06:49	1858,00	35,5	1,100	0,055
05:54	1890,00	37,1	1,271	0,064
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.				

Tabelle A.2.: Fortsetzung Messdaten des Drehverhaltens.

Dauer eines Umlauf [mm:ss]	DAC Wert [UNIT]	Duty Cycle [%]	Dreh- geschwindigkeit [°/s]	Drehgeschwindigkeit pro Abtastperiode [°/50 ms]
05:29	1922,00	38,9	1,368	0,068
04:50	1970,00	41,4	1,552	0,078
03:53	2050,00	45,6	1,931	0,097
03:22	2130,00	49,9	2,228	0,111
03:11	2162,00	51,6	2,356	0,118
02:54	2210,00	54,0	2,586	0,129
02:42	2258,00	56,5	2,778	0,139
02:35	2290,00	58,2	2,903	0,145
02:32	2306,00	59,1	2,961	0,148
02:24	2338,00	60,7	3,125	0,156
02:21	2370,00	62,4	3,191	0,160
02:06	2450,00	66,5	3,571	0,179
01:55	2530,00	70,7	3,913	0,196
01:50	2562,00	72,4	4,091	0,205
01:45	2610,00	74,9	4,286	0,214
01:38	2690,00	79,0	4,592	0,230
01:35	2722,00	80,7	4,737	0,237
01:32	2770,00	83,2	4,891	0,245
01:28	2818,00	85,7	5,114	0,256
01:23	2850,00	87,4	5,422	0,271
01:15	2930,00	91,6	6,000	0,300
01:08	2994,00	94,8	6,618	0,331
01:07	3010,00	95,6	6,716	0,336
01:05	3042,00	97,2	6,923	0,346
01:04	3074,00	98,4	7,031	0,352
01:04	3090,00	98,8	7,031	0,352
01:03	3138,00	99,8	7,143	0,357
01:03	3170,00	100,0	7,143	0,357
01:03	3250,00	100,0	7,143	0,357
Ende der Datenreihe.				

## A.2. Messdaten des Elevations-Rotors

Tabelle A.3.: Stromaufnahme des Elevations-Rotors während eines vollen Umlaufes.

Dauer [mm:ss]	neuer Motortreiber [A]	original Motortreiber [A]
00:00	0,00	0,00
00:01	0,00	0,00
00:02	1,22	1,34
00:03	1,24	1,43
00:04	1,24	1,44
00:05	1,24	1,44
00:06	1,24	1,44
00:07	1,24	1,44
00:08	1,24	1,44
00:09	1,24	1,44
00:10	1,24	1,44
00:11	1,24	1,43
00:12	1,24	1,44
00:13	1,24	1,43
00:14	1,24	1,44
00:15	1,24	1,43
00:16	1,24	1,44
00:17	1,24	1,44
00:18	1,24	1,44
00:19	1,24	1,44
00:20	1,24	1,44
00:21	1,24	1,44
00:22	1,24	1,44
00:23	1,24	1,44
00:24	1,24	1,44
00:25	1,24	1,44
00:26	1,24	1,44
00:27	1,24	1,44
00:28	1,24	1,44
00:29	1,24	1,44
00:30	1,24	1,44
00:31	1,24	1,44
00:32	1,24	1,44
00:33	1,24	1,43
00:34	1,24	1,44
00:35	1,24	1,44
00:36	1,24	1,44
00:37	1,24	1,44
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.		

Tabelle A.3.: Fortsetzung Messergebnisse Stromaufnahme Elevations-Rotor.

Dauer [mm:ss]	neuer Motortreiber [A]	original Motortreiebr [A]
00:38	1,24	1,44
00:39	1,25	1,44
00:40	1,25	1,44
00:41	1,25	1,44
00:42	1,25	1,44
00:43	1,25	1,44
00:44	1,25	1,44
00:45	1,26	1,44
00:46	1,26	1,44
00:47	1,25	1,44
00:48	1,25	1,44
00:49	1,25	1,45
00:50	1,25	1,45
00:51	1,25	1,45
00:52	1,25	1,45
00:53	1,25	1,45
00:54	1,26	1,45
00:55	1,26	1,45
00:56	1,26	1,45
00:57	1,26	1,45
00:58	1,26	1,45
00:59	1,26	1,45
01:00	1,26	1,45
01:01	1,26	1,45
01:02	1,26	1,45
01:03	1,26	1,45
01:04	1,26	1,45
01:05	1,26	1,45
01:06	1,26	1,45
01:07	1,26	1,45
01:08	1,26	1,45
01:09	1,27	1,45
01:10	1,27	1,45
01:11	1,27	1,45
01:12	1,27	1,45
01:13	1,26	1,45
01:14	1,27	1,45
01:15	1,27	1,45
01:16	1,27	1,45
01:17	1,27	1,45
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.		

Tabelle A.3.: Fortsetzung Messergebnisse Stromaufnahme Elevations-Rotor.

Dauer [mm:ss]	neuer Motortreiber [A]	original Motortreiber [A]
01:18	1,27	1,45
01:19	1,27	1,45
01:20	1,27	1,45
01:21	1,27	1,45
01:22	1,27	1,45
01:23	1,27	1,45
01:24	1,27	1,45
01:25	1,27	0,02
01:26	0,75	0,01
01:27	0,30	0,01
01:28	0,20	0,01
01:29	0,10	0,01
01:30	0,10	0,01
Ende der Datenreihe.		

### A.3. Messdaten des Azimut-Rotors

Tabelle A.4.: Messergebnisse der Belastungstests der H-Brücke für den Azimut-Rotor

ohne aktive Kühlung		mit aktiver Kühlung	
Dauer [mm:ss]	Temperatur [°C]	Dauer [mm:ss]	Temperatur [°C]
00:00	29,4	00:00	28,3
00:30	29,5	00:30	28,4
01:00	34,5	01:00	34,4
01:30	44,5	01:30	44,1
02:00	53,9	02:00	52,4
02:30	62,0	02:30	56,8
03:00	68,7	03:00	63,7
03:30	74,2	03:30	67,3
04:00	78,6	04:00	70,3
04:30	82,4	04:30	72,8
05:00	85,2	05:00	74,5
05:30	87,5	05:30	75,7
06:00	89,4	06:00	76,8
06:30	90,7	06:30	77,9
07:00	91,7	07:00	78,6
07:30	93,1	07:30	79,1
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.			

Tabelle A.4.: Fortsetzung Messergebnisse Belastungstests der H-Brücke

ohne aktive Kühlung		mit aktiver Kühlung	
Dauer	Temperatur	Dauer	Temperatur
[mm:ss]	[°C]	[mm:ss]	[°C]
08:00	94,0	08:00	79,2
08:30	94,9	08:30	79,3
09:00	95,5	09:00	79,5
09:30	96,1	09:30	79,8
10:00	96,6	10:00	80,2
10:30	97,2	10:30	80,1
11:00	98,1	11:00	80,1
11:30	98,8	11:30	80,1
12:00	99,1	12:00	80,1
12:30	99,7	12:30	80,3
13:00	100,2	13:00	80,4
13:30	100,6	13:30	80,5
14:00	101,2	14:00	80,3
14:30	101,7	14:30	80,3
15:00	101,5	15:00	80,2
15:30	101,8	15:30	80,3
16:00	102,0	16:00	80,5
16:30	102,1	16:30	80,4
17:00	102,3	17:00	80,2
17:30	102,4	17:30	80,5
18:00	102,1	18:00	80,7
18:30	101,8	18:30	80,6
19:00	101,8	19:00	80,4
19:30	101,8	19:30	80,7
20:00	102,0	20:00	80,8
20:30	102,2	20:30	80,6
21:00	102,0	21:00	80,5
21:30	101,9	21:30	80,6
22:00	101,9	22:00	80,7
22:30	101,9	22:30	80,7
23:00	101,9	23:00	80,9
23:30	101,7	23:30	81,0
24:00	101,7	24:00	81,1
24:30	101,7	24:30	81,1
25:00	101,7	25:00	81,0
25:30	101,7	25:30	80,8
26:00	101,6	26:00	80,8
26:30	101,7	26:30	80,7
27:00	101,6	27:00	80,8
27:30	101,7	27:30	80,7
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.			

---

Tabelle A.4.: Fortsetzung Messergebnisse Belastungstests der H-Brücke

ohne aktive Kühlung		mit aktiver Kühlung	
Dauer	Temperatur	Dauer	Temperatur
[mm:ss]	[°C]	[mm:ss]	[°C]
28:00	102,0	28:00	80,6
28:30	102,0	28:30	80,6
29:00	102,0	29:00	80,6
29:30	102,2	29:30	80,9
30:00	102,2	30:00	81,0
30:30	101,9	30:30	81,2
31:00	102,0	31:00	81,4
31:30	102,0	31:30	81,8
32:00	102,1	32:00	81,6
32:30	94,8	32:30	81,2
33:00	83,2	33:00	74,3
33:30	73,2	33:30	63,3
34:00	64,8	34:00	54,0
34:30	58,1	34:30	47,2
35:00	52,8	35:00	42,1
35:30	48,4	35:30	38,4
36:00	45,0	36:00	35,7
36:30	42,2	36:30	33,8
37:00	40,0	37:00	32,4
37:30	38,3	37:30	31,4
38:00	36,8	38:00	30,6
38:30	35,7	38:30	30,1
39:00	34,7	39:00	29,6
39:30	33,9	39:30	29,2
40:00	33,3	40:00	28,9
Ende der Datenreihe.			

Tabelle A.5.: Stromaufnahme des Azimut-Rotors während eines vollen Umlaufes (Duty Cycle=85%).

Dauer	Strom
[mm:ss]	[A]
00:00	0,00
00:01	0,00
00:03	0,21
00:05	0,43
00:06	0,40
00:07	0,37
00:09	0,38
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.	



Tabelle A.5.: Fortsetzung MessERGEBNISSE StromAufnahme Azimut-Rotor (Duty Cycle=85%).

Dauer [mm:ss]	Strom [A]
00:10	0,37
00:14	0,36
00:19	0,38
00:20	0,37
00:21	0,36
00:23	0,37
00:24	0,34
00:25	0,37
00:26	0,37
00:27	0,34
00:28	0,37
00:29	0,37
00:30	0,37
00:31	0,40
00:32	0,40
00:33	0,41
00:34	0,37
00:35	0,36
00:37	0,38
00:39	0,38
00:40	0,41
00:41	0,38
00:42	0,41
00:43	0,43
00:47	0,39
00:48	0,40
00:49	0,42
00:50	0,41
00:51	0,40
00:52	0,40
00:56	0,37
00:57	0,36
01:00	0,37
01:01	0,40
01:02	0,40
01:03	0,38
01:04	0,37
01:07	0,40
01:08	0,41
01:09	0,44
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.	

Tabelle A.5.: Fortsetzung Messergebnisse Stromaufnahme Azimut-Rotor (Duty Cycle=85%).

Dauer [mm:ss]	Strom [A]
01:10	0,00
01:11	0,00
Ende der Datenreihe.	

Tabelle A.6.: Stromaufnahme des Azimut-Rotors während eines Umlaufes bei voller Geschwindigkeit (Duty Cycle=100%).

Dauer [mm:ss]	neuer Motortreiber [A]	original Motortreiebr [A]
00:00	0,00	0,00
00:01	0,00	0,00
00:02	0,48	0,81
00:03	0,42	0,47
00:04	0,40	0,41
00:05	0,40	0,42
00:06	0,39	0,43
00:07	0,38	0,42
00:08	0,37	0,41
00:09	0,38	0,41
00:10	0,37	0,40
00:11	0,38	0,38
00:12	0,38	0,38
00:13	0,38	0,39
00:14	0,39	0,39
00:15	0,38	0,40
00:16	0,40	0,38
00:17	0,40	0,41
00:18	0,38	0,37
00:19	0,36	0,37
00:20	0,36	0,38
00:21	0,36	0,38
00:22	0,36	0,37
00:23	0,36	0,37
00:24	0,37	0,39
00:25	0,35	0,39
00:26	0,38	0,38
00:27	0,36	0,40
00:28	0,40	0,43
weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.		

Tabelle A.6.: Fortsetzung Messergebnisse Stromaufnahme Azimut-Rotor (Duty Cycle=100%).

Dauer [mm:ss]	neuer Motortreiber [A]	original Motortreiber [A]
00:29	0,41	0,40
00:30	0,40	0,39
00:31	0,38	0,41
00:32	0,36	0,40
00:33	0,39	0,42
00:34	0,38	0,40
00:35	0,39	0,42
00:36	0,39	0,40
00:37	0,40	0,41
00:38	0,39	0,43
00:39	0,41	0,41
00:40	0,41	0,41
00:41	0,40	0,45
00:42	0,41	0,44
00:43	0,41	0,42
00:44	0,41	0,44
00:45	0,42	0,45
00:46	0,42	0,44
00:47	0,40	0,44
00:48	0,41	0,41
00:49	0,39	0,40
00:50	0,40	0,39
00:51	0,39	0,40
00:52	0,39	0,40
00:53	0,39	0,39
00:54	0,39	0,40
00:55	0,39	0,40
00:56	0,39	0,39
00:57	0,40	0,40
00:58	0,39	0,42
00:59	0,42	0,42
01:00	0,41	0,45
01:01	0,40	0,41
01:02	0,41	0,00
01:03	0,41	0,00
01:04	0,44	0,00
01:05	0,00	0,00
01:06	0,00	0,00
Ende der Datenreihe.		

## A.4. Messdaten der Positionsmessung

Tabelle A.7.: Messergebnisse Positionsmessung des Azimut-Rotors.

Poti OUT [V]	OPV 1 IN [mV]	ADC IN [V]	ADC OUT [UNIT]	Grad [°]	ADC ideal [UNIT]	Differenz ADC [UNIT]	Abweichung [°]
0,041	0,009	0,035	33	0,0	33,00	0,00	0,000
0,056	0,012	0,047	45	1,6	44,81	-0,19	-0,025
0,071	0,015	0,059	57	3,0	56,61	-0,39	-0,051
0,086	0,018	0,071	69	4,6	68,42	-0,58	-0,076
0,100	0,021	0,083	79	6,2	79,44	0,44	0,058
0,116	0,024	0,095	92	7,7	92,03	0,03	0,005
0,131	0,027	0,107	104	9,2	103,84	-0,16	-0,021
0,146	0,030	0,119	116	10,8	115,65	-0,35	-0,046
0,160	0,033	0,130	127	12,3	126,67	-0,33	-0,044
0,205	0,041	0,166	162	16,8	162,09	0,09	0,012
0,235	0,048	0,190	186	20,0	185,70	-0,30	-0,039
0,265	0,054	0,214	210	23,1	209,32	-0,68	-0,090
0,280	0,057	0,226	221	24,7	221,12	0,12	0,016
0,325	0,066	0,262	257	29,3	256,54	-0,46	-0,060
0,370	0,075	0,297	292	34,0	291,96	-0,04	-0,005
0,399	0,080	0,320	315	36,8	314,79	-0,21	-0,027
0,447	0,090	0,358	353	41,8	352,57	-0,43	-0,056
0,459	0,093	0,369	362	43,2	362,02	0,02	0,002
0,490	0,099	0,393	386	46,8	386,42	0,42	0,055
0,519	0,104	0,417	409	49,3	409,25	0,25	0,032
0,556	0,112	0,446	439	53,0	438,37	-0,63	-0,083
0,624	0,125	0,500	492	60,2	491,89	-0,11	-0,014
0,683	0,137	0,548	539	66,4	538,34	-0,66	-0,087
0,728	0,146	0,584	573	71,0	573,76	0,76	0,099
0,758	0,152	0,608	597	74,0	597,45	0,45	0,059
0,818	0,164	0,656	644	80,4	644,60	0,60	0,078
0,833	0,167	0,668	656	81,9	656,40	0,40	0,053
0,863	0,173	0,691	680	85,0	680,02	0,02	0,002
0,878	0,176	0,703	692	86,5	691,82	-0,18	-0,023
0,908	0,182	0,727	715	89,5	715,44	0,44	0,058
0,953	0,191	0,763	751	94,2	750,86	-0,14	-0,018
0,998	0,200	0,799	786	98,9	786,28	0,28	0,037
1,073	0,215	0,859	845	106,5	845,31	0,31	0,041
1,117	0,224	0,895	880	111,3	879,95	-0,05	-0,007
1,166	0,234	0,934	919	116,2	918,52	-0,48	-0,063
1,192	0,239	0,954	939	119,0	938,98	-0,02	-0,002
1,267	0,254	1,014	998	126,7	997,78	-0,22	-0,029

weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.

Tabelle A.7.: Fortsetzung Positionsmessung des Azimut-Rotors.

Poti OUT [V]	OPV 1 IN [mV]	ADC IN [V]	ADC OUT [UNIT]	Grad [°]	ADC ideal [UNIT]	Differenz ADC [UNIT]	Abweichung [°]
1,326	0,266	1,062	1044	132,9	1044,46	0,46	0,060
1,372	0,275	1,098	1081	137,6	1080,35	-0,65	-0,085
1,446	0,290	1,158	1139	145,3	1138,91	-0,09	-0,011
1,506	0,302	1,206	1186	151,4	1186,14	0,14	0,018
1,551	0,311	1,241	1221	156,1	1221,56	0,56	0,074
1,616	0,324	1,293	1272	162,9	1272,57	0,57	0,074
1,701	0,341	1,361	1339	171,6	1339,63	0,63	0,083
1,761	0,353	1,409	1387	177,7	1386,86	-0,14	-0,019
1,791	0,359	1,433	1410	180,9	1410,08	0,08	0,010
1,835	0,368	1,469	1445	185,5	1445,10	0,10	0,014
1,880	0,377	1,504	1480	190,0	1480,53	0,53	0,069
1,969	0,395	1,576	1550	199,4	1550,58	0,58	0,076
2,002	0,402	1,602	1577	202,7	1576,55	-0,45	-0,058
2,117	0,425	1,694	1667	214,8	1667,07	0,07	0,010
2,223	0,446	1,779	1750	225,6	1750,51	0,51	0,067
2,298	0,461	1,839	1809	233,5	1809,54	0,54	0,072
2,364	0,474	1,892	1862	240,3	1861,49	-0,51	-0,066
2,417	0,485	1,934	1903	245,7	1903,21	0,21	0,028
2,506	0,503	2,005	1973	255,0	1973,27	0,27	0,035
2,625	0,527	2,101	2067	267,4	2066,93	-0,07	-0,009
2,702	0,542	2,164	2128	275,2	2127,54	-0,46	-0,060
2,804	0,563	2,243	2208	285,8	2207,83	-0,17	-0,022
2,863	0,574	2,291	2254	292,0	2254,27	0,27	0,036
2,909	0,584	2,327	2290	296,7	2290,48	0,48	0,063
2,939	0,590	2,351	2314	299,8	2314,09	0,09	0,012
2,982	0,598	2,386	2348	304,2	2347,94	-0,06	-0,008
3,043	0,610	2,434	2396	310,4	2395,95	-0,05	-0,006
3,109	0,624	2,487	2448	317,3	2447,90	-0,10	-0,013
3,199	0,642	2,560	2519	326,7	2518,75	-0,25	-0,033
3,283	0,659	2,626	2585	335,3	2584,86	-0,14	-0,018
3,372	0,677	0,698	2655	344,6	2654,92	-0,08	-0,011
3,440	0,690	2,752	2708	351,7	2708,44	0,44	0,058
3,522	0,706	2,817	2773	0,1	2772,99	-0,01	-0,002
3,581	0,718	2,865	2820	6,3	2819,43	-0,57	-0,075
3,656	0,733	2,925	2878	13,9	2878,46	0,46	0,061
3,701	0,742	2,961	2914	18,6	2913,88	-0,12	-0,015
3,746	0,751	2,996	2949	23,2	2949,30	0,30	0,040
3,791	0,760	3,032	2985	27,9	2984,72	-0,28	-0,036
3,832	0,769	3,065	3017	32,2	3017,00	0,00	0,000
3,895	0,781	3,116	3067	38,7	3066,59	-0,41	-0,055

weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.

Tabelle A.7.: Fortsetzung Positionsmessung des Azimut-Rotors.

Poti OUT [V]	OPV 1 IN [mV]	ADC IN [V]	ADC OUT [UNIT]	Grad [°]	ADC ideal [UNIT]	Differenz ADC [UNIT]	Abweichung [°]
3,940	0,790	3,152	3102	43,3	3102,01	0,01	0,001
4,015	0,805	3,211	3161	51,0	3161,04	0,04	0,005
4,075	0,818	3,260	3209	57,3	3208,27	-0,73	-0,096
4,134	0,829	3,307	3255	63,3	3254,71	-0,29	-0,038
4,194	0,841	3,355	3302	69,6	3301,94	-0,06	-0,008
4,254	0,853	3,403	3349	75,8	3349,16	0,16	0,022
4,299	0,862	3,439	3385	80,5	3384,82	-0,18	-0,024
4,329	0,868	3,463	3408	83,6	3408,36	0,36	0,047
4,359	0,874	3,481	3432	86,7	3431,97	-0,03	-0,004
4,374	0,877	3,499	3444	88,3	3443,62	-0,38	-0,050
4,391	0,881	3,512	3457	90,0	3457,00	0,00	0,000

Ende der Datenreihe.

Tabelle A.8.: Messergebnisse Positionsmessung des Elevations-Rotors.

Poti OUT [V]	OPV 1 IN [mV]	ADC IN [V]	ADC OUT [UNIT]	Grad [°]	ADC ideal [UNIT]	Differenz ADC [UNIT]	Abweichung [°]
0,371	0,076	0,300	292	0,0	292,00	0,00	0,0000
0,418	0,085	0,338	329	-1,8	329,29	0,29	0,0357
0,493	0,100	0,399	389	-4,7	388,80	-0,20	-0,0239
0,539	0,019	0,435	425	-6,4	425,30	0,30	0,0370
0,596	0,121	0,481	471	-8,7	470,53	-0,47	-0,0570
0,670	0,136	0,541	530	-11,5	529,49	-0,51	-0,0625
0,745	0,151	0,602	589	-14,5	588,76	-0,24	-0,0293
0,819	0,166	0,661	648	-17,3	647,48	-0,52	-0,0638
0,894	0,181	0,721	707	-20,2	706,59	-0,41	-0,0499
0,998	0,202	0,806	790	-24,2	789,51	-0,49	-0,0599
1,073	0,217	0,866	849	-27,1	849,02	0,02	0,0022
1,207	0,244	0,974	955	-32,3	955,34	0,34	0,0419
1,296	0,263	1,046	1026	-35,7	1025,96	-0,04	-0,0045
1,371	0,278	1,106	1086	-38,6	1085,47	-0,53	-0,0641
1,496	0,303	1,208	1185	-43,4	1184,66	-0,34	-0,0417
1,554	0,315	1,255	1231	-45,7	1230,68	-0,32	-0,0391
1,639	0,332	1,323	1298	-49,0	1298,12	0,12	0,0152
1,723	0,349	1,391	1365	-52,1	1364,78	-0,22	-0,0272
1,778	0,360	1,435	1409	-54,3	1408,42	-0,58	-0,0709
1,898	0,384	1,532	1504	-58,9	1503,63	-0,37	-0,0445
1,957	0,396	1,580	1551	-61,2	1550,45	-0,55	-0,0671

weitere Ergebnisse siehe nächste Seite.

Tabelle A.8.: Fortsetzung Positionsmessung des Elevations-Rotors.

Poti OUT [V]	OPV 1 IN [mV]	ADC IN [V]	ADC OUT [UNIT]	Grad [°]	ADC ideal [UNIT]	Differenz ADC [UNIT]	Abweichung [°]
2,047	0,414	1,652	1622	−64,7	1621,86	−0,14	−0,0168
2,136	0,432	1,724	1693	−68,1	1692,48	−0,52	−0,0632
2,227	0,451	1,798	1765	−71,7	1764,69	−0,31	−0,0381
2,323	0,470	1,875	1841	−75,4	1840,86	−0,14	−0,0170
2,381	0,482	1,922	1887	−77,6	1887,20	0,20	0,0243
2,428	0,491	1,959	1924	−79,4	1924,18	0,18	0,0213
2,468	0,500	1,992	1956	−80,9	1955,91	−0,09	−0,0105
2,524	0,511	2,043	2001	−83,4	2000,35	−0,65	−0,0793
2,644	0,535	2,134	2096	−87,8	2095,57	−0,43	−0,0529
2,704	0,547	2,182	2143	90,0	2143,17	0,17	0,0212
2,764	0,559	2,231	2191	87,6	2190,78	−0,22	−0,0265
2,904	0,588	2,344	2302	82,2	2301,87	−0,13	−0,0160
3,083	0,624	2,488	2444	75,3	2444,06	0,06	0,0072
3,212	0,650	2,592	2546	70,3	2546,26	0,26	0,0315
3,412	0,690	2,753	2705	62,6	2704,95	−0,05	−0,0057
3,452	0,699	2,785	2737	61,1	2736,69	−0,31	−0,0375
3,496	0,707	2,821	2771	59,4	2771,60	0,60	0,0737
3,542	0,717	2,858	2808	57,5	2808,10	0,10	0,0128
3,588	0,726	2,896	2845	55,8	2844,84	−0,16	−0,0192
3,631	0,735	2,930	2879	54,1	2878,80	−0,20	−0,0240
3,707	0,750	2,992	2939	51,2	2939,03	0,03	0,0034
3,831	0,775	3,091	3037	46,4	3037,42	0,42	0,0510
3,917	0,793	3,161	3106	43,1	3105,82	−0,18	−0,0224
3,992	0,808	3,222	3165	40,2	3165,17	0,17	0,0204
4,087	0,827	3,298	3240	36,6	3240,55	0,55	0,0667
4,130	0,836	3,333	3275	34,9	3274,67	−0,33	−0,0405
4,203	0,851	3,392	3333	32,2	3332,59	−0,41	−0,0498
4,310	0,872	3,478	3418	27,9	3417,49	−0,51	−0,0618
4,430	0,897	3,576	3513	23,2	3512,71	−0,29	−0,0354
4,581	0,927	3,697	3633	17,4	3632,52	−0,48	−0,0580
4,689	0,949	3,784	3718	13,1	3718,22	0,22	0,0267
4,776	0,966	3,854	3787	9,8	3787,25	0,25	0,0306
4,852	0,982	3,916	3848	7,0	3847,56	−0,44	−0,0542
4,928	0,997	3,977	3908	4,0	3907,86	−0,14	−0,0171
4,958	1,003	4,002	3932	2,8	3931,66	−0,34	−0,0410
5,029	1,018	4,059	3988	0,0	3988,00	0,00	0,0000

Ende der Datenreihe.

## Anhang B.

### Schaltpläne



# B.1. Schematik und Layout des neuen Motortreibers

