

Masterarbeit zum Thema
„Hard- und Softwareintegration der
Sicherungskomponente für Autonome Mobile Serviceroboter (SAMS)
in ein Modellfahrzeug“

Vorgelegt von:

Sven Plaßwich
Matrikelnummer: 1849497

Betreut durch:

Dr. Udo Frese
Dipl.-Inf. Holger Täubig

Gutachter:

Dr. Udo Frese
Dr. Ulrich Hannemann

Abgabetermin: 20. März 2008

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit bis auf die offizielle Betreuung selbst und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Sämtliche aus anderen Veröffentlichungen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Formulierungen bzw. Abbildungen sind als solche kenntlich gemacht worden. Alle weiteren Hilfsmittel sowie verwendete Fremdarbeiten wurden ebenfalls vollständig angegeben.

Bremen, den 20.03.2008

(Sven Plaßwich)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Funktionsweise der SAMS-Sicherungskomponente	5
1.2	Demonstrator	6
1.3	Aufbau der Arbeit	8
2	Stand der Technik	9
2.1	Sensoren	9
2.2	Autonome Systeme	14
3	Gesamtkonzept	19
4	Hardware	21
4.1	Komponenten	21
4.2	Aufbau	42
5	Elektronik	49
5.1	1. Konzept „Stromversorgung“	49
5.2	2. Konzept „Stromversorgung“	52
5.3	Platinen	54
5.4	Spannungsmessung	62
5.5	Stromverbrauch	66
6	Software	67
6.1	Programm	67
7	Experimente und Ergebnisse	86
7.1	Test der Belastbarkeit des Modells	86
7.2	Test der Laufzeit des Antriebsakkus	88
7.3	Vermessung der Drehgeber	90
7.4	Empfangsproblem	92
8	Zusammenfassung und Ausblick	94
9	Anhang	96
9.1	Literaturverzeichnis	96
9.2	Abbildungsverzeichnis	99
9.3	CD	101
9.4	Sicherheitshinweise für Lithium-Polymer-Akkus	102

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll auf der Basis eines fernsteuerbaren Modellautos ein Demonstrator für die Sicherungskomponente des SAMS-Projektes [5, 6, 7, 18, 19] des DFKI Labor Bremen - Fachbereich Sichere Kognitive Systeme[20] - entstehen.

Die Abkürzung SAMS steht für Sicherungskomponente für Autonome Mobile Serviceroboter. Kernvorhaben des SAMS-Projektes ist die Entwicklung einer zulassungsfähigen Fahrwegsicherung für Serviceroboter und fahrerlose Transportsysteme[21]. In aktuell eingesetzten fahrerlosen Transportsystemen (Abbildung 1) wird über einen speziellen Sicherheitslaserscanner ein festes Schutzfeld um das Fahrzeug herum überwacht. Wird dieses Schutzfeld verletzt, das heißt vom Laserscanner wird ein Objekt innerhalb der definierten Schutzzone erfasst, wird ein Nothalt eingeleitet um das Fahrzeug sicher vor dem Hindernis zu stoppen. Durch die begrenzte Anzahl an verfügbaren festen Schutzfeldern und die fehlende Anpassung des Schutzfeldes an den Systemzustand kommt es in vielen Fällen zu einer ineffizienten Bahnführung. Im Rahmen des SAMS-Projektes wird eine Sicherheitskomponente entwickelt, die über dynamische Schutzzonen eine effizientere Bahnführung ermöglichen soll. Dabei wird eine eigenständige Komponente entwickelt, für die eine Sicherheitszulassung angestrebt wird. Ein besonderer Bestandteil des Zulassungsprozesses ist die durch das Projekt angestrebte durchgängige formale Verifikation der Software der Sicherungskomponente [7].



Abbildung 1: Fahrerlose Transportsysteme mit Sicherheitslaserscanner (rote Kreise) [21]

1.1 Funktionsweise der SAMS-Sicherungskomponente

Die Ein- und Ausgabe der Sicherungskomponente sind in Abbildung 2 vereinfacht dargestellt. Für die Funktionsweise der Sicherungskomponente ist es essentiell, dass der Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs gemessen wird. In der aktuellen Version der Sicherungskomponente wird dies über Odometrie-Sensoren realisiert. Diese speziellen Sensoren erlauben es aus der Messung der Raddrehung den Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeuges zu berechnen. Zusätzlich setzt die Sicherungskomponente voraus, dass Hindernisse in der Umwelt über einen Sicherheits-Laserscanner erfasst werden.

In Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeuges wird von der Sicherungskomponente ein angepasstes Schutzfeld berechnet. Es stellt den Gefahrenbereich dar, der für eine kollisionsfreie Fahrt keine Hindernisse enthalten darf. Das Schutzfeld wird von der Sicherungskomponente dynamisch berechnet. Das heißt es vergrößert sich bei zunehmender Geschwindigkeit, um so den verlängerten Bremsweg zu berücksichtigen. Bei langsamen Geschwindigkeiten sind so im Verhältnis zu statischen Schutzfeldern sehr kleine Schutzfelder möglich. Außerdem wird das Schutzfeld der derzeitigen Lenkbewegung des Fahrzeuges angepasst.

Das so entstandene dynamisch berechnete Schutzfeld wird dann mit den Messdaten des Laserscanners verglichen. Befindet sich ein Hindernis innerhalb des Schutzfeldes löst die Sicherungskomponente ein Nothaltssignal aus um eine Kollision zu verhindern.



Abbildung 2: Funktionsweise der Sicherungskomponente SAMS

1.2 Demonstrator

Um die Funktionsweise der SAMS-Komponente dem Publikum auf Messen oder ähnlichen Veranstaltungen näher bringen zu können, wurde in dieser Masterarbeit ein messetaugliches Demonstrationsfahrzeug für die SAMS-Komponente entworfen und aufgebaut. Der Demonstrator ist in Abbildung 3 in einem typischen Einsatzszenario der Sicherungskomponente dargestellt. In dieser Abbildung wird das Schutzfeld (gelb) des Demonstrators durch die anwesende Person verletzt. Zur Vermeidung einer Kollision führt das Fahrzeug eine Notbremsung durch.



Abbildung 3: SAMS-Demonstrator mit illustriertem Schutzfeld (gelb)

Das Haupteinsatzgebiet des Demonstrators werden Präsentationen auf Messen sein. Daraus ergeben sich nachfolgend genannte grundsätzliche Anforderungen, die das Fahrzeug erfüllen muss:

1. Das Gewicht und die Ausmaße des Fahrzeugs sollen möglichst gering gehalten werden, um das Fahrzeug bequem zu den Messen transportieren zu können.
2. Das Fahrzeug muss über eine Fernsteuerung bedienbar sein, um so den Besuchern die Funktionsweise der Sicherungskomponente durch eigene praktische Erfahrungen näher bringen zu können.

3. Das Fahrzeug soll über eine lange Einsatzzeit verfügen, so dass es einen typischen Messetag von acht Stunden durchhält.
4. Das Fahrzeug muss stabil genug sein um das Gewicht der zusätzlichen Komponenten tragen zu können.
5. Aus Sicherheitsgründen muss das Fahrzeug zu jeder Zeit ausgeschaltet werden können.

Neben diesen aus dem Einsatzszenario abgeleiteten Anforderungen müssen noch folgende aus dem SAMS-Projekt vorgegebenen Anforderungen berücksichtigt werden:

6. Verwendung eines Sicherheits-Laserscanners zur Erfassung von Hindernissen in der Umwelt.
7. Erfassung der Geschwindigkeit des Fahrzeuges.
8. Verwendung eines für Sicherheitstechnik zugelassenen Controllers.
9. Kommunikation zwischen Laserscanner und Controller über Ethernet.

1.3 Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit wird in den nun folgenden Kapiteln der Aufbau des Demonstrators im Detail beschrieben.

Zunächst wird in Kapitel 2 ein Überblick über den Stand der Technik in Bezug auf Sensoren zur Positions- und Entfernungsmessung gegeben. Zusätzlich werden beispielhaft drei autonome Systeme dargestellt, die zur Erfassung der Umwelt ebenfalls einen Laserscanner verwenden.

Anschließend wird in Kapitel 3 ein Überblick über das Gesamtsystem gegeben. Darin wird das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten untereinander dargestellt, um so für die folgenden Kapitel einen besseren Überblick über das System zu vermitteln.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Hardware des Systems. Dabei werden die einzelnen verwendeten Komponenten genauer betrachtet und der Aufbau der Hardware im Detail beschrieben.

Im folgenden Kapitel 5 geht es um die einzelnen elektronischen Komponenten des Fahrzeuges. Zu Beginn wird ein Überblick über das elektrische System gegeben, gefolgt von einer Beschreibung der einzelnen Platinen und einer Analyse des Stromverbrauchs.

In Kapitel 6 wird die Software dargestellt. Dabei wird zunächst ein Überblick über die generelle Struktur des Programms gegeben. Anschließend werden kurz einige wesentliche Programmteile genauer erläutert.

Kapitel 7 behandelt spezielle Fahrversuche und Tests, die im Verlauf der Arbeit durchgeführt wurden.

Abschließend werden in Kapitel 8 eine Zusammenfassung und ein Ausblick über die Arbeit gegeben.

Der Anhang zu dieser Arbeit ist in Kapitel 9 zu finden. In ihm ist eine CD mit den wichtigsten Dokumenten und Programm des Demonstrators zu finden.

2 Stand der Technik

Wie bereits in der Einleitung beschrieben setzt die Sicherungskomponente eine gewisse Sensorik voraus. Im Folgenden wird deshalb ein kurzer Überblick über den Stand der Technik zu diesen Sensoren gegeben. Es handelt sich dabei im speziellen um Sensoren die zur Erfassung von Hindernissen oder der Fahrzeuggeschwindigkeit genutzt werden.

Zusätzlich wird im zweiten Teil ein Überblick über den Stand der Technik von Fahrzeugen vermittelt, die eine ähnliche sensorische Ausstattung wie der Demonstrator besitzen. Es soll damit ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten eines Laserscanners zur Erfassung der Umwelt bei autonomen Systemen vermittelt werden. Die Funktionalität dieser Systeme geht dabei teilweise deutlich über die des Demonstrators hinaus, weshalb im Anschluss eine Einordnung des Demonstrators vorgenommen wird.

2.1 Sensoren

Im Bereich der mobilen Robotik kommen unterschiedlichste Arten von Sensoren zum Einsatz. Dabei werden die Sensoren grundsätzlich in propriozeptive und exterozeptive Sensoren eingeteilt. Propriozeptive Sensoren erfassen interne Zustände wie Temperatur, Ladezustand der Akkus oder Drehrichtung der Räder. Exterozeptive Sensoren hingegen erfassen die Umwelt des Systems, wie zum Beispiel die Lichtintensität, die Lautstärke oder die Entfernung zu einzelnen Objekten. Im Folgenden werden die für den Demonstrator relevanten Sensoren vorgestellt. Eine detaillierte Betrachtung der Funktionsweise anderer Sensoren im Bereich der mobilen Robotik kann in [1] und [2] gefunden werden.

2.1.1 Drehgeber

Drehgeber gehören zu den propriozeptiven Sensoren. Sie werden üblicherweise auf der Welle eines Motors oder eines Rades montiert und können so deren Position und Geschwindigkeit erfassen. Dabei wird in Absolut- und Inkrementalgeber unterschieden. Absolutgeber können die absolute Position einer Welle zu jedem Zeitpunkt ausgeben, wohingegen Inkrementalgeber nur Änderungen in der Position erfassen können. Absolutgeber werden überwiegend bei Werkzeugmaschinen in der Industrie eingesetzt. Im Bereich der mobilen Robotik kommen überwiegend Inkrementalgeber zur Erfassung der Drehrichtung und

Geschwindigkeit einzelner Räder zum Einsatz. Im Folgenden wird kurz die Funktionsweise eines optischen Inkrementalgebers erläutert.

Der wesentliche Aufbau eines Drehgebers besteht aus einer Lichtschranke und einem mit der Welle verbundenen Coderad (Abbildung 4). Das Coderad verfügt über eine sich periodisch wiederholende Strichteilung von lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen Abschnitten. Dreht sich die Welle verändert sich die von der Lichtschranke gemessene Lichtintensität in Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit und der Auflösung der Strichteilung. Das Ausgangssignal der Lichtschranke entspricht dann einer Sinuswelle. Durch eine nachgeschaltete Elektronik wird das Signal jedoch meistens zu einem Rechtecksignal diskretisiert, da die heutige Auswerteelektronik überwiegend digital arbeitet.

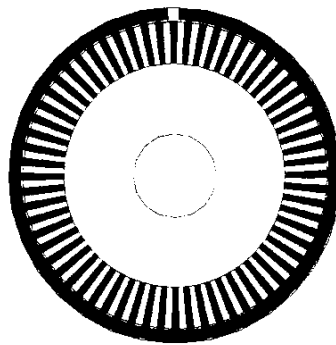


Abbildung 4: Coderad eines Inkrementalgebers[1]

Die meisten Coderäder verfügen zudem noch über eine so genannte Index-Spur. Diese besteht bis auf ein kleines Fenster aus einem komplett lichtundurchlässigen Bereich. Diese Spur wird über eine separate Lichtschranke erfasst und kann für bestimmte Anwendungen als Nullposition verwendet werden.

Das Auflösungsvermögen eines Encoders definiert sich aus der Auflösung der Strichteilung des Coderads und wird in der Einheit CPR (Cycles Per Revolution) angegeben. Da die Strichteilung nicht beliebig fein gestaltet werden kann, wird in heutigen Encodern die so genannte Quadraturamplitudenmodulation (QAM) angewendet. Dafür wird eine zusätzliche Lichtschranke benötigt, die im Vergleich zur ersten um eine viertel Periode versetzt ist. Man erhält somit zwei Rechtecksignale, wodurch die Auflösung verdoppelt wird. Der Signalverlauf ist in Abbildung 5 dargestellt.

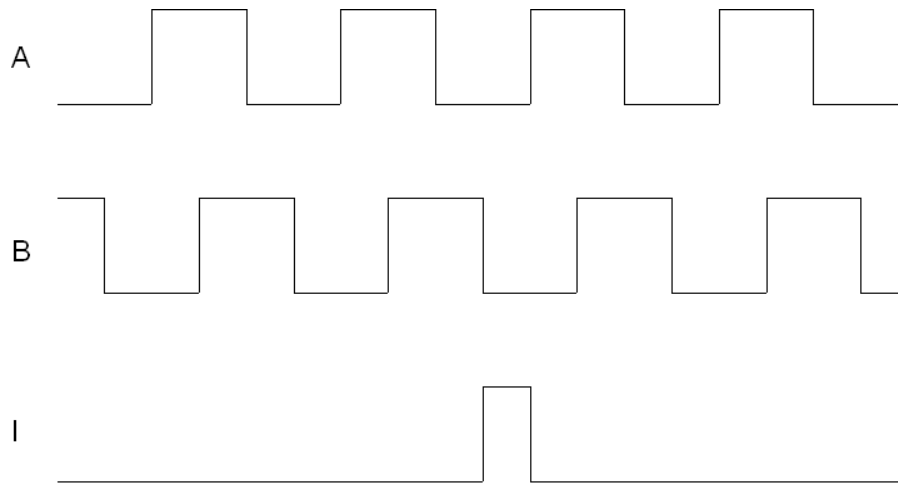


Abbildung 5: Signalverlauf Inkrementalgeber bei konstanter Geschwindigkeit (vorwärts)

Signal I liefert bei jeder vollständigen Umdrehung des Coderads einen kurzen Puls, der zur absoluten Positionsbestimmung genutzt werden kann.

Signal A und B liefern ein um eine viertel Periode versetztes Rechtecksignal, welches bei einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit aus gleichlangen Pulsen und Pulspausen besteht. Wird die Geschwindigkeit variiert, verlängert (langsamer) oder verkürzt (schneller) sich sowohl die Länge der Pulse wie auch der Pulspausen.

Die QAM bietet zudem den Vorteil, dass sich aus der Phasenverschiebung der Signale A und B die Drehrichtung eindeutig bestimmen lässt. Bei jeder steigenden oder fallenden Flanke von Signal A oder B lässt sich über den Zustand des komplementären Signals eine eindeutige Aussage über die Drehrichtung treffen (Tabelle 1).

Flanke	Zustand	Drehrichtung
A steigend	B positiv	rückwärts
A steigend	B negativ	vorwärts
A fallend	B positiv	vorwärts
A fallend	B negativ	rückwärts
B steigend	A positiv	vorwärts
B steigend	A negativ	rückwärts
B fallend	A positiv	rückwärts
B fallend	A negativ	vorwärts

Tabelle 1: Bestimmung der Drehrichtung

2.1.2 Ultraschallsensoren

Ultraschallsensoren gehören zu den exterozeptiven Sensoren. Durch sie können Distanzen zu Objekten in der Umgebung berührungslos gemessen werden. Dazu werden Ultraschallimpulse ausgesendet, die von Gegenständen reflektiert werden, um dann wieder vom Sensor empfangen zu werden. Die Zeit zwischen dem Versenden und dem Empfangen eines Pulses wird als Laufzeit bezeichnet und von dem Sensor gemessen. Die Distanz d zu einem Objekt lässt sich damit, bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Ultraschallwellen im umgebenden Medium (meistens Luft), durch folgende Formel berechnen:

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad \text{mit } c = 343 \frac{m}{s} \text{ in Luft bei } 20^\circ \text{ C}$$

Ultraschallsensoren können im Unterschied zu vielen anderen Entfernungssensoren auch noch kleinste Objekte erfassen, weshalb sie häufig in der Automobilindustrie als Parksensoren eingesetzt werden. Zudem sind sie, bei entsprechendem Schutz der Elektronik, auch unter Wasser einsetzbar.

Größter Nachteil der Ultraschallsensoren ist sicherlich der eingeschränkte Entfernungsmessbereich. Dieser liegt bei heutigen Sensoren typischerweise im Bereich von 12 cm bis zu 5 m. Dabei wird der messbare Bereich über die Frequenz (40 bis 180 kHz) des Ultraschallimpulses bestimmt. Niedrige Frequenzen ermöglichen es lange Distanzen zu messen, wohingegen mit hohen Frequenzen nur kurze Distanzen gemessen werden können. Kurze Distanzen können mit niedrigen Frequenzen nicht erfasst werden, da die niedrige Frequenz ein ausgeprägtes Nachschwingen der Membrane zur Folge hat. Um dieses Nachschwingungen nicht fälschlicherweise als empfangenes Signal zu interpretieren wird der Anfangsbereich einfach ausgeblendet, wodurch ankommende Signale nicht erfasst werden können.

Daneben haben Ultraschallsensoren auch Probleme bei Temperatur- oder Dichteänderungen des umgebenden Mediums, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen dadurch verändert wird. Werden diese Änderungen nicht erfasst, führt dies automatisch zu Fehlern bei der Distanz-Berechnung. Zusätzlich können Probleme bei Mehrfachreflexionen auftreten, da dann eine Zuordnung zu einem Startimpuls nicht mehr möglich ist, auch dies führt zu Fehlmessungen.

2.1.3 2D-Laserscanner

2D-Laserscanner gehören zu den exterozeptiven Sensoren. Ebenso wie die Ultraschallsensoren sind sie in der Lage, Entfernungen berührungslos über Laufzeitmessung zu bestimmen. Dabei wird anstatt des Schalls aber ein Laserstrahl ausgesendet. Dieser wird von einem Objekt reflektiert und vom Scanner wieder empfangen. Aus der Laufzeit lässt sich somit genau wie beim Ultraschallsensor die Entfernung zu dem betreffenden Objekt bestimmen. Aufgrund der Verwendung eines Laserstrahls anstelle von Schallwellen ergeben sich bei der Messung signifikante Vorteile. So ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts wesentlich höher als die des Schalls, es ist deshalb möglich mit einer sehr viel höheren Frequenz zu messen. Zudem lässt sich der Laserstrahl fokussieren, wodurch auch größere Distanzen von über 50 m problemlos gemessen werden können.

Der spezielle Aufbau von 2D-Laserscannern ermöglicht es, die Umgebung in einer zweidimensionalen Ebene zu messen. Dazu befindet sich im Inneren des Scanners ein rotierender Spiegel, der den Laserstrahl ablenkt. So werden nacheinander die Entfernungen zu mehreren Punkten in einer Ebene durch einzelne Laufzeitmessungen bestimmt, wodurch die Entfernungen zu einzelnen Objekten gemessen werden (Abbildung 6).

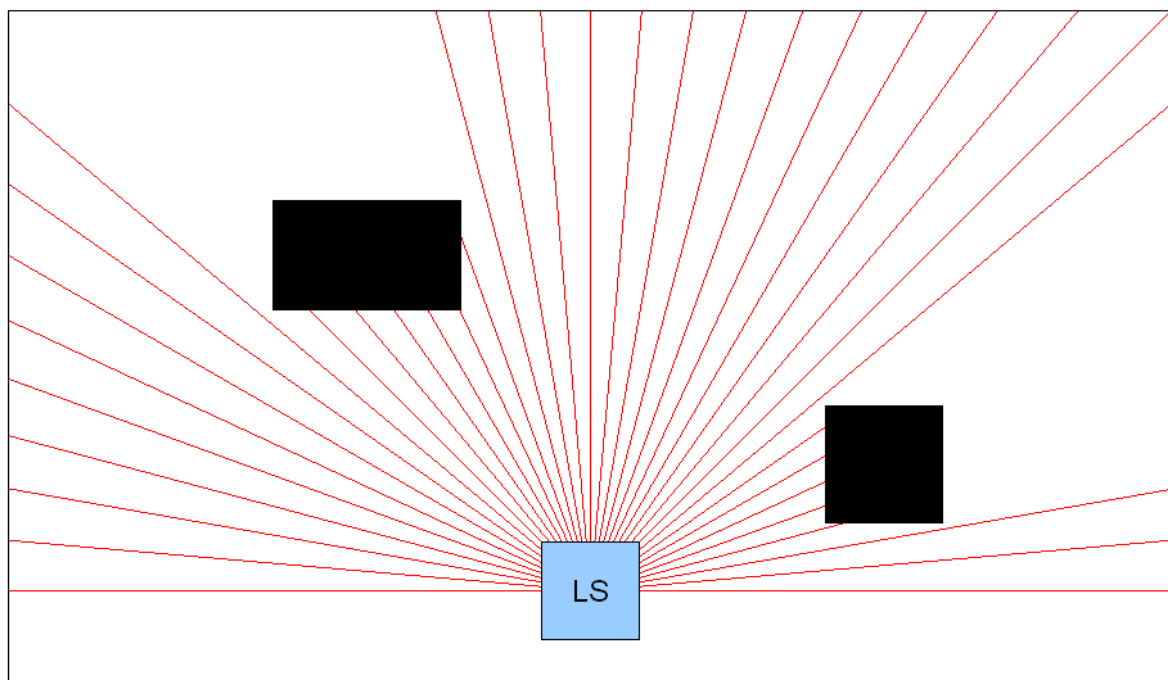


Abbildung 6: Messprinzip eines 2D-Laserscanners

Im Vergleich zu dem Messprinzip der Ultraschallsensoren besitzt der Laserscanner durch seinen im Vergleich zur Schallwelle fokussierten Laserstrahl eine sehr viel höhere Ortsauflösung. Deshalb kommen im Bereich der Sicherheitstechnik ausschließlich Laserscanner zum Einsatz.

2.2 Autonome Systeme

Zusätzlich wird im zweiten Teil ein Überblick über den Stand der Technik von Fahrzeugen vermittelt, die eine ähnliche sensorische Ausstattung wie der Demonstrator besitzen. Es soll ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten eines Laserscanners zur Erfassung der Umwelt bei autonomen Systemen vermittelt werden. Die eigentliche Funktionsweise der Systeme geht dabei teilweise deutlich über die Funktionalität des Demonstrators hinaus, weshalb im Anschluss eine Einordnung des Demonstrators vorgenommen wird. Eine detaillierte Übersicht über andere, vor allem im Bereich der Servicerobotik eingesetzten Systeme, ist in [1] und [11] zu finden.

2.2.1 VW Golf GTI 53+1

Beim Golf GTI 53+1 [22] handelt es sich um ein Versuchsfahrzeug des Volkswagen Konzerns. In einen Serien-Golf GTI wurde im Bereich der vorderen Stoßstange ein 2D-Laserscanner eingebaut. Zusätzlich wurde im Kofferraum des Fahrzeugs ein Rechner samt zugehöriger Elektronik implementiert. Der Wagen wurde zudem so umgerüstet, dass der Rechner die volle Kontrolle über das Fahrzeug hat. Das heißt der Rechner ist in der Lage sowohl die Geschwindigkeit wie auch den Lenkwinkel des Fahrzeuges zu steuern. Sinn und Zweck dieses Projektes war es jedoch nicht ein autonomes Fahrzeug für den allgemeinen Straßenverkehr zu entwickeln, vielmehr sollten durch den autonomen Fahrbetrieb reproduzierbare Ergebnisse auf Teststrecken für zum Beispiel Fahrwerks- oder Reifentests ermöglicht werden.

Als Streckenbegrenzung für den Testparcours werden Pylonen verwendet. Daraus kann ein beliebiger Rundkurs aufgebaut werden. Anschließend fährt der Golf im Schritttempo durch die Pylonengasse und vermisst die Position jeder einzelnen Pylone mittels Laserscanner. Nachdem er die Runde einmal komplett vermessen hat, beginnt der Rechner aus den gesammelten Messdaten die Ideallinie durch den Parcours zu berechnen. Dazu werden unter anderem die auf den einzelnen Abschnitten erreichbaren Geschwindigkeiten, die exakten Lenkeinschläge sowie das Bremsverhalten für jeden Punkt der Strecke berechnet. Aufgrund

der vielen Messdaten benötigt der Rechner für diese Berechnung derzeit noch ungefähr eine halbe Stunde. Danach kann das Fahrzeug gestartet werden und fährt dann völlig autonom und immer auf der Idealline durch den Parcours, immer auf die gleiche Art und in der gleichen Zeit. Die einzelnen Fahrten sind dabei so gleichförmig, wie das selbst von professionellen Testfahrern nicht erreicht werden könnte. Auf der beigelegten CD (Kapitel 9.3) befindet sich im Ordner „Videos“ ein Video einer Testfahrt des Golf ([Golf GTI 53plus1.wmv](#)).

2.2.2 Stanley

Bei Stanley[12] handelt es sich um ein autonom fahrendes Fahrzeug auf der Basis eines VW Touareg. Entwickelt wurde das Fahrzeug vom Stanford Racing Team der Stanford Universität in Kalifornien unter Leitung von Sebastian Thrun in Hinblick auf die Teilnahme an der Grand Challenge. Bei dieser Veranstaltung, die im Jahre 2005 zum zweiten Mal vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium (Defense Advanced Research Projects Agency) ausgerichtet wurde, geht es darum, mit einem völlig autonom agierenden Fahrzeug eine vorgegebene Strecke in einer Wüstelandschaft in einem festen Zeitlimit zu absolvieren. Dabei erhielt das bei der zweiten Grand Challenge siegreiche Team der Stanford Universität ein Preisgeld von einer Million US-Dollar. Sie legten die Strecke von 212,76 km in einer Zeit von knapp unter sieben Stunden zurück. Von insgesamt 22 angetretenen Fahrzeugen erreichten nur fünf das Ziel.

Zur sicheren Navigation verfügt Stanley über verschiedenste Arten von Sensoren. Unter anderem befinden sich auf einem Dachträger fünf Laserscanner, die das Terrain vor dem Fahrzeug erfassen (Abbildung 7 linke Grafik). Die Scanner sind dabei alle unterschiedlich stark geneigt, um so unterschiedliche Distanzen messen zu können. Durch die Bewegung des Fahrzeugs kann so über die Zeit durch die fortlaufenden Messungen der einzelnen Laserscanner aus den zweidimensionalen Messungen ein dreidimensionales Bild des Untergrunds erzeugt werden (Abbildung 7 rechte Grafik).

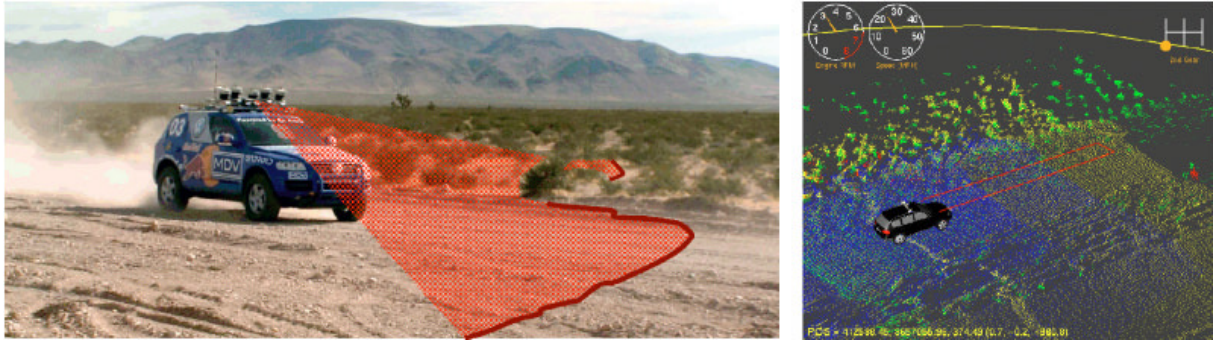


Abbildung 7: Illustration der Abtastung des Terrains durch einen Laserscanner (linke Abbildung) generierte dreidimensionale Karte aus den Messdaten der Laserscanner (rechte Abbildung)[12]

Auf der beigegefügte CD (Kapitel 9.3) befindet sich im Ordner „Videos“ ein Unterordner Stanley mit verschiedenen Videos von Fahrten während der Grand Challenge.

2.2.3 Rolland III

Im Rahmen des Projektes „Bremer Autonomer Rollstuhl“ – Projektname Rolland - der Universität Bremen, wird seit 1995 an der Entwicklung eines intelligenten Rollstuhls gearbeitet. Ziel des Projektes ist, älteren oder behinderten Menschen den Umgang mit einem elektrischen Rollstuhl durch eine kollisionsvermeidende Steuerung zu erleichtern. Dies wird erreicht, indem bekannte Karten als Navigationshilfe eingesetzt werden und eine aktive Kollisionsvermeidung durch Auswertung der die Umgebung erfassenden Sensoren betrieben wird. Die Kollisionsvermeidung beschränkt sich dabei nicht nur auf das Anhalten vor einem Hindernis sondern umfasst auch automatisierte Ausweichmanöver.

Im Laufe der Projektlaufzeit sind dabei bisher drei Versionen des „Rolland“ entstanden. Während die ersten beiden Versionen zur Erfassung des Umfeldes noch mehrere Ultraschallsensoren verwandt haben, werden in der aktuellen Version Rolland III [13] zwei Laserscanner eingesetzt. Diese befinden sich im unteren vorderen und hinteren Bereich des Rollstuhls (Abbildung 8). Dadurch ist der Rollstuhl in der Lage, sein Umfeld sowohl vor als auch hinter sich sicher zu erfassen.

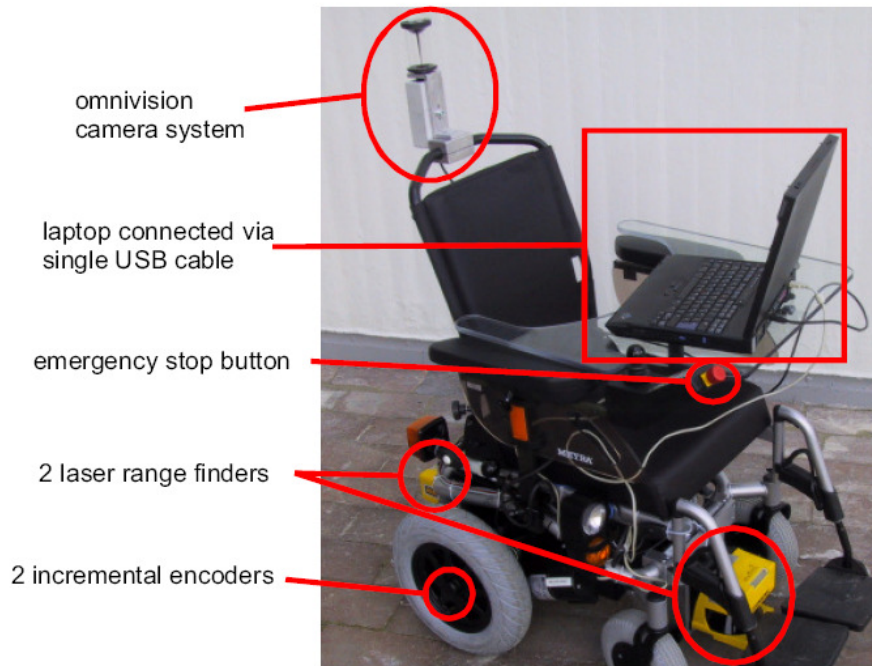


Abbildung 8: Rolland III der Universität Bremen[13]

Neben den Laserscannern verfügt der Rollstuhl zudem über zwei Inkrementalgeber an den Antriebsachsen zur Erfassung der Eigenbewegung aufgrund der Rotation der Räder, sowie eine Omnivision-Kamera an der Rückenlehne. Diese spezielle Kamera ist in der Lage über einen konischen Spiegel ein 360°-Bild der Umgebung aufzunehmen. Der Rollstuhl kann über einen handelsüblichen Laptop gesteuert werden. Zum Anschluss an den Rollstuhl wird dafür lediglich ein USB-Port benötigt.

Eine genauere Beschreibung des Rollstuhls kann in [8, 10, 13] gefunden werden. Ein generellerer Überblick über aktuell verfügbare intelligente Rollstühle wird in [9] gegeben.

2.2.4 Einordnung des Demonstrators

Alle vorgestellten Systeme verfügen ebenso wie der Demonstrator über Odometrie-Sensoren zur Erfassung der Fahrzeugbewegung. Bezüglich ihrer Steuerung unterscheiden sie sich jedoch signifikant von einander. Alle vorgestellten Systeme werden autonom gesteuert, wohingegen der Demonstrator, durch seine Aufgabenstellung bedingt, über eine Fernsteuerung gesteuert wird.

Die größten Übereinstimmungen, sowohl was die Aufgabenstellung wie auch die eingesetzte Sensorik betrifft, besitzt der Demonstrator mit dem autonomen Rollstuhl Rolland. Beide Systeme bieten eine Kollisionsvermeidung, die im Rollstuhl jedoch zusätzlich um eine

Ausweichfunktionalität ergänzt ist. Auf der Seite der Sensoren wird in beiden Systemen ein Laserscanner zur Erfassung der Hindernisse vor dem Fahrzeug eingesetzt. Der Rollstuhl besitzt im Vergleich zum Demonstrator jedoch einen zweiten rückwärts gerichteten Laserscanner, so dass auch beim rückwärts fahren eine Absicherung des Rollstuhls möglich ist. Der Demonstrator sichert lediglich Vorwärtsfahrten.

Der von VW umgerüstete Golf besitzt ebenso wie der Demonstrator ein Laserscanner um den vorderen Teil des Fahrzeuges zu erfassen. Die Aufgabenstellung der beiden Fahrzeuge unterscheidet sich jedoch signifikant. Die Messwerte des Laserscanners werden im Golf nicht zur Hindernisvermeidung, sondern zur Vermessung einer fest vorgegebenen Strecke verwendet. Da die Messdaten des Laserscanners nur vor der Fahrt bei der Vermessung der Strecke ausgewertet werden, ist das Fahrzeug im Gegensatz zum Demonstrator nicht in der Lage auf plötzlich auftretende Hindernisse oder Änderungen in der Streckenführung zu reagieren. Dies ist, durch seine spezialisierte Aufgabe bedingt, allerdings auch nicht notwendig.

Die Hauptaufgabenstellung des autonomen Fahrzeugs Stanley besteht, im Unterschied zur Hindernisvermeidung des Demonstrators, in der autonomen Navigation. Seine Fähigkeit zur Kollisionsvermeidung bildet dabei nur einen Teil des komplexen Gesamtsystems. Durch die im Vergleich zum Demonstrator komplexere Aufgabenstellung besitzt Stanley zudem deutlich mehr Sensoren zur Erfassung der Umwelt. Die Scannebenen der fünf eingesetzten Laserscanner verlaufen außerdem nicht wie im Demonstrator parallel zum Untergrund, sondern schneiden diese in unterschiedlichen Abständen vor dem Fahrzeug. Die Laserscanner können dadurch verwendet werden, um die Struktur des Untergrundes in verschiedenen Distanzen zu erfassen. Durch die Bewegung des Fahrzeuges kann somit eine dreidimensionale Karte des Untergrundes aufgebaut werden. Diese Karte wird dann unter anderem auch zur Erkennung von Hindernissen verwendet.

3 Gesamtkonzept

Im Folgenden wird das grundlegende Konzept des Demonstrators (Abbildung 9) kurz dargestellt, um einen Gesamtüberblick über das System zu geben.

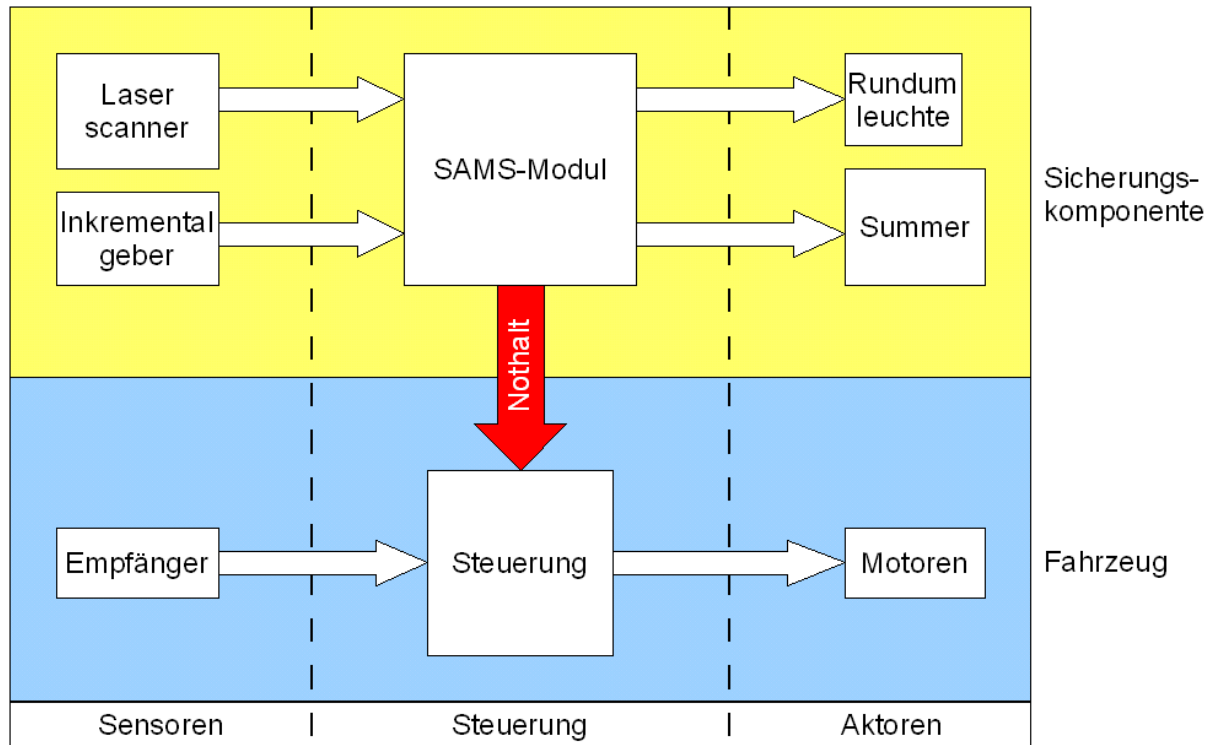


Abbildung 9: Funktionelle Darstellung des Gesamtkonzeptes

Die Funktionalität des Demonstrators teilt sich in zwei Kernbestandteile: die bereits beschriebene Funktionalität der Sicherungskomponente und die Steuerung des Fahrzeuges. Dies umfasst sowohl den Empfang der Fernsteuerungssignale als auch die Ansteuerung der Motoren.

Hardware-Integration

Zur hardwareseitigen Realisierung des Demonstrators müssen neben Modellfahrzeug, Controller und Akkus zum Betrieb aller Komponenten speziell die geforderten Sensoren und Aktoren zur Verfügung gestellt werden. Zur Realisierung der Funktionalität von SAMS-Modul und Fahrzeugsteuerung wird derselbe Controller verwendet. Dieser ist redundant ausgelegt (siehe Kapitel 4.1.5).

Abbildung 10 gibt eine Übersicht der insgesamt benötigten Komponenten (ohne Akkus). Die Auswahl der einzelnen Komponenten wird im Kapitel 4 vorgestellt. Die Elektronik zur

Beschaltung der Komponenten, sowie die benötigte Energieversorgung wird in Kapitel 5 beschrieben.

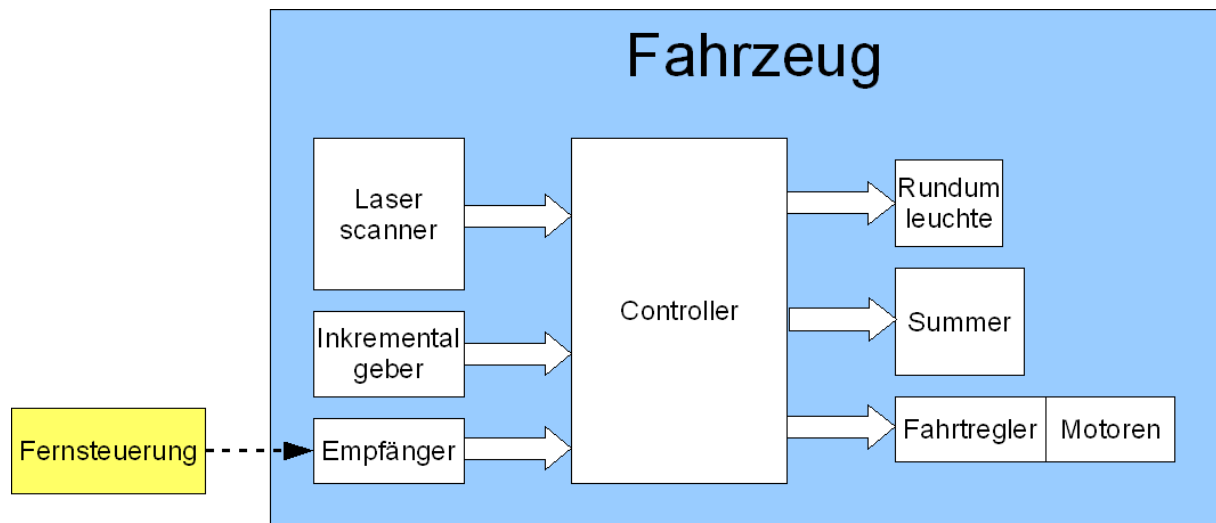


Abbildung 10: Komponenten des Demonstrators

Software-Integration

Zur Realisierung der Funktionalität von SAMS-Modul und Fahrzeugsteuerung auf einem Controller sind folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Einlesen der Sensorinformationen und Bereitstellung für das SAMS-Modul.
- Steuerung der Motoren in Abhängigkeit der Signale der Fernsteuerung, wenn kein Nothalt ausgelöst ist.
- Bei Nothaltssignal Fernbedienung ignorieren und Notbremsung einleiten.
- Signalisierung des Zustandes des SAMS-Moduls, durch einen Summer und eine Leuchte

Die Details der Softwarerealisierung sind in Kapitel 6 zu finden.

4 Hardware

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Komponenten im Einzelnen genauer dargestellt. Dabei wird auf die Sensorik (Laserscanner und Drehgeber), die Steuerung (Controller) sowie die Energieversorgung (Akkus) genauer eingegangen.

4.1 Komponenten

4.1.1 Modellfahrzeug



Abbildung 11: Reely Kaiman 6x6 [34]

Anforderungen:

1. Elektrischer Antrieb
2. Genügend Platz für Laserscanner und Controller
3. Stabil genug um zusätzliches Gewicht zu tragen

Das Modell soll später als Demonstrator für das SAMS-Projekt dienen und wird deshalb hauptsächlich auf Messen oder ähnlichen Veranstaltungen eingesetzt werden. Somit kommt als Antrieb für das Modell ein Verbrennungsmotor nicht in Frage, da diese wegen der Abgase in den meisten geschlossenen Räumen verboten sind. Zudem handelt es sich bei den im Modellbau eingesetzten Motoren fast ausschließlich um 2-Takt-Motoren, die bauartbedingt immer einen gewissen Ölverlust haben. Deshalb wurde ein Modell mit einem elektrischen Antrieb verwendet.

Die Größe und das Gewicht der Komponenten stellte das größte Problem dar, denn die meisten im Handel erhältlichen Modelle sind darauf ausgelegt, ein möglichst geringes Gewicht zu haben, um möglichst gute Fahreigenschaften zu erreichen. Normale Modelle im Maßstab 1:10 liegen im Bereich von ein bis zwei Kilogramm. Zudem sind die verbauten Federungen auf dieses Gewicht ausgelegt, so dass allein durch das zusätzliche Gewicht des verwendeten Laserscanners von 2,3 kg (Kapitel 4.1.2) das Chassi völlig überfordert wäre.

Aufgrund dieser Anforderungen fiel die Wahl nach ausführlicher Recherche auf den Kaiman 6x6 der Firma Reely. Dabei handelt es sich um ein sechsrädriges Modell mit starren Achsen, welches offroad- und sogar schwimmfähig ist. Das Modell verfügt über zwei getrennt ansteuerbare Elektromotoren, die jeweils drei Räder einer Seite über einen Zahnriemen antreiben. Kurven werden bei dieser Art von Antrieb (Differentialantrieb) durch Abbremsen der kurveninneren oder durch beschleunigen der kurvenäußeren Räder gefahren. Durch entgegengesetzte Ansteuerung der Elektromotoren sind so auch Wendemanöver auf engstem Raum möglich.

Die Grundstruktur des Modells besteht im Wesentlichen aus einer Art Wanne, an der an der Seite eine Achsträgerplatte mit den Achsaufnahmen der einzelnen Räder befestigt ist. Im Inneren befinden sich neben den beiden Elektromotoren noch die beiden elektronischen Fahrtregler, der Akku und der Empfänger. Darüber kommen noch eine Abdeckung mit nachgebildetem Cockpit und die Karosserie-Abdeckung aus Plexiglas. Diese beiden letztgenannten Elemente dienen rein der Optik und haben keinerlei Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des Modells.

Das Modell mit seinen Innenmaßen von 350 mm in der Länge und 160 mm in der Breite bietet genügend Raum um selbst den Laserscanner sicher unterzubringen. Trotzdem ist es dabei noch recht kompakt in seinen Ausmaßen, so dass es bequem mit auf Messen genommen werden kann. Der für die Steuerung des Fahrzeuges eher nachteilige Differentialantrieb wurde für die positiven Eigenschaften in Punkto Abmessungen und Robustheit dabei in Kauf genommen.

4.1.2 Laserscanner

Wie schon in der Einleitung beschrieben ist eine wesentliche Komponente des SAMS-Projektes ein Laserscanner zur Detektion von Hindernissen. Der Laserscanner tastet dazu mit einem Laserstrahl die Umgebung in einer Ebene ab. Dabei werden die Entfernungen zu einzelnen Punkten über die Laufzeit eines Laserpulses bestimmt. Eine genauere Beschreibung des Messprinzips eines 2D-Laserscanners ist in Kapitel 2.1.3 zu finden.

Durch die Anforderung von Seiten des SAMS-Projektes einen **Sicherheits**laserscanner zu verwenden (Kapitel 1 Punkt 6), kamen überhaupt nur zwei Hersteller infrage, da nur sie sicherheitszugelassene Laserscanner herstellen. Durch eine enge Projekt-Kooperation mit der Firma Leuze electronic[28] fiel die Wahl schließlich auf den rotoScan ROD 4plus[22] (Abbildung 12).



Abbildung 12: Laserscanner rotoScan ROD 4plus

Mit entscheidend für die Auswahl des Laserscanners war zudem, dass er wie vom SAMS-Projekt gefordert über eine Ethernetschnittstelle zur Kommunikation der Messdaten verfügt (Kapitel 1 Punkt 9). Bei dem ausgewählten Modell handelt es sich jedoch noch nicht um die eigentliche Sicherheitsbaureihe des Herstellers, da ein Sicherheitslaserscanner mit Ethernetkommunikation zurzeit noch nicht verfügbar. Der verwendete Scanner ist aber in der

Hardware identisch zu der Sicherheitsvariante. Da für das Fahrzeug als Gesamtsystem keine Sicherheitszulassung angestrebt wird, hat dies keinen weiteren Einfluss auf die Funktionalität des Gesamtsystems.

Der Scanner ist in der Lage einen Winkelbereich von 190° zu erfassen. Der Spiegel im Inneren des Scanners rotiert dazu mit einer Frequenz von 25 Hz. Somit steht in einem Intervall von 40 ms jeweils der Scan einer kompletten Ebene zur Verfügung. Eine Ebene besteht dabei aus 529 einzelnen Entfernungsmessungen, was eine Auflösung von 0,36° ergibt. Weitere technische Details sind in Tabelle 2 zu finden.

Optische Daten	
Messbereich	0 .. 65 m
Winkelbereich	max. 190°
Winkelauflösung	0,36°
Scanrate	25 Scans/s bzw. 40 ms/Scan
Objekterkennung	
Remissionsvermögen	ab min. 1,8% (matt-schwarz)
Objektgröße	> 20 mm in 4 m Distanz > 100 mm in 15 m Distanz
Ansprechzeit	mindestens 40 ms (1 Scan)
Wiederholungsgenauigkeit	10 ... 90% Remission bei 4m Reichweite: ±15 mm / ±20 mm
Elektrische Daten	
Spannungsversorgung	+16,8 ... +28,8 V DC
Stromaufnahme	ca. 1 A
Mechanische Daten	
Gewicht	2,3 kg
Außmaße	
<i>Länge</i>	168 mm
<i>Breite</i>	140 mm
<i>Höhe</i>	167 mm
Umgebungsdaten	
Umgebungstemperatur	
<i>Betrieb</i>	-0°C ... +50°C
<i>Lager</i>	-20°C ... +50°C
Schutzart	IP 65

Tabelle 2: Technische Daten für rotoScan ROD 4plus [23]

Sowohl die Ausmaße wie auch das Gewicht des Laserscanners sind (vgl. Kapitel 4.1.1) ein nicht unerhebliches Problem für ein Modellfahrzeug. Im Bereich der Sicherheitslaserscanner sind jedoch keine leichteren oder kompakteren Modelle verfügbar. Bestände die Anforderung eines Sicherheitslaserscanners nicht, hätte man auf einen wesentlich kleineren und vor allem leichteren Laserscanner zurückgreifen können. Der wohl zurzeit kompakteste Laserscanner

auf dem Markt ist der Hokuyo URG-04LX[23] (Abbildung 13). Dieser Laserscanner wiegt gerade einmal 160 g und besitzt eine Grundfläche von nur 50x50 mm. Seine Winkelauflösung liegt ebenfalls bei $0,36^\circ$ über einen Messbereich von insgesamt 240° . Nachteilig bei diesem Scanner sind auch die im Vergleich kurze Scannreichweite von gerade einmal 4 m und die geringe Scangeschwindigkeit von 10 Hz. Da der Scanner aber wie bereits erwähnt keine Sicherheitszulassung besitzt, bestand die Möglichkeit der Nutzung für den Demonstrator nicht.



Abbildung 13: Laserscanner Hokuyo URG-04LX[24]

Problem: Vermeintlich hoher Stromverbrauch durch die Ethernet-Schnittstelle

Bei dem verwendeten Laserscanner ROD 4plus handelt es sich im Prinzip nur um einen modifizierte Variante des Standard-Laserscanner ROD 4. Im Datenblatt war ein Stromverbrauch von 1 A bei 24 V angegeben. Dieser schien im Vergleich zu den 400 mA der Standardvariante aber unrealistisch. Ansonsten würde die Elektronik, die die Standard-Schnittstelle RS232/422 in eine Ethernet-Schnittstelle umwandelt, mit 600 mA ungleich mehr Strom verbrauchen als der Laserscanner an sich.

Aus diesem Grund wurde der reale Stromverbrauch des Laserscanners überprüft. Er wurde mittels eines Multimeter im Betrieb gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass während der Anlaufphase der Stromverbrauch des Systems kurzzeitig bei ca. 400mA liegt. Während des Betriebs reduziert er sich dann auf ca. 370mA. Die Messungen widerlegten somit die Angaben des Datenblattes und lagen sogar noch unter den Verbrauchswerten des Standardscanners. Damit war der Scanner zur Verwendung auf dem Demonstrator geeignet.

4.1.3 Drehgeber



Abbildung 14: Drehgeber HEDL-5640#A13 [36]

Für die derzeit noch von der Sicherungskomponente benötigten Odometriesensoren (Messung der Eigenbewegung aufgrund der Raddrehung) wird je Antriebsseite des Fahrzeuges ein Inkrementalgeber der Firma Avago Technologies[30] vom Typ HEDL-5640#A13[25] verwendet. Als Ausgabe erzeugt dieser ein für Inkrementalgeber typisches QAM-Signal, welches sowohl Informationen über die Rotationsgeschwindigkeit wie auch über die aktuelle Drehrichtung enthält. Eine genauere Beschreibung des allgemeinen Aufbaus eines Inkrementalgebers sowie die Struktur des QAM-Signal wurde bereits in Kapitel 2.1.1 ausführlich beschrieben.

Der verwendete Inkrementalgeber-Typ ist für Wellen mit einem Durchmesser von bis zu 8 mm geeignet, verfügt über einen optischen Encoder mit 500 CPR (Cycles Per Revolution) und ist für Eingangsspannungen von -0,5 V bis zu 7 V zugelassen. Seine maximal zulässige Geschwindigkeit liegt bei 30.000 RPM (Rotation Per Minute).

Der Inkrementalgeber wurde direkt auf einer der drei Antriebsachsen montiert und ist über die seitlich hervorstehenden „Befestigungsöhren“ am Gehäuse mit den zusätzlich im Fahrzeug installierten Winkeln (siehe Kapitel 4.2 Aufbau) verschraubt. Das Gehäuse ist somit fest mit dem Fahrzeug verbunden und bildet so den Bezugspunkt für die Messung. Das im Inneren des Gehäuses befindliche Coderad ist über eine Madenschraube fest mit der rotierenden Achse verbunden.

4.1.4 Fernsteuerung



Abbildung 15: Modelcraft 3-Kanal Fernsteuerungsanlage [34]

Die verwendete Fernsteuerung verfügt über drei getrennt schaltbare Kanäle, zwei proportionale und einen digitalen. Die zwei proportionalen Kanäle liegen auf den beiden Steuerknüppeln für vorwärts/rückwärts bzw. links/rechts. Der digitale Kanal liegt auf einem Schalter im oberen linken Bereich der Fernbedienung und verfügt über drei Zustände. Diese drei Zustände sind äquivalent zu der Neutral- und den beiden Extremstellungen der Steuerknüppel.

Das zwischen Fernsteuerung und Empfänger übertragene Signal wird über die so genannte Pulse Position Modulation[25] (PPM) codiert. Die Informationen über die Position der drei Kanäle werden dabei jeweils zeitlich in Intervalle zwischen 1 und 2 ms codiert. 1 ms entspricht einer Position von ganz rechts bzw. unten, 2 ms einer Position von ganz links bzw. oben und 1,5 ms der Neutralposition. Die Pulse bestehen dann aus High-Phasen von 0,7 bis 1,7 ms, gefolgt von einer festen Low-Phase von 0,3 ms. Die High-Phase entspricht dabei einer Frequenz von $f+b$ und die Low-Phase einer Frequenz von $f-b$, wobei f gleich der Sendefrequenz der Fernsteuerung ist und b einer festen Frequenz von 1,5 kHz entspricht. Die Sendefrequenz ist abhängig vom in der Fernsteuerung eingesetzten Quarz. Für ferngesteuerte Fahrzeuge sind in Deutschland Betriebsfrequenzen im Bereich 27 und 40 MHz zugelassen

Die Pulse der drei Kanäle werden aneinander gereiht und um einen Startpuls geeigneter Breite ergänzt, so dass sich eine feste Framelänge von 22,5 ms ergibt. Der Startpuls dient dazu, den Frame immer auf diese konstante Länge zu bringen. Somit kann er bei drei Kanälen, je nach Lage der Steuerknüppel, zwischen 16,5 ms und 19,5 ms betragen. Ein kompletter Sendeframe ist in der obersten Grafik in Abbildung 16 beispielhaft dargestellt.

Dieser Sendeframe wird periodisch wiederholt und so an den Empfänger gesendet. Dieser dekodiert den Sendeframe und erzeugt daraus wieder drei einzelne Signale, die über drei externe Ausgänge abgegriffen werden können. Das erste Signal, das nach dem Startpuls kommt, ist das Ausgangssignal des ersten Kanals, das zweite Signal ist das Ausgangssignal des zweiten Kanals und das dritte Signal ist das Ausgangssignal des dritten Kanals. Jeder Kanal erhält somit alle 22,5 ms einen Puls zwischen 1 ms und 2 ms. Der High-Pegel entspricht der Versorgungsspannung des Empfängers (maximal 7 V) und der Low-Pegel 0 V.

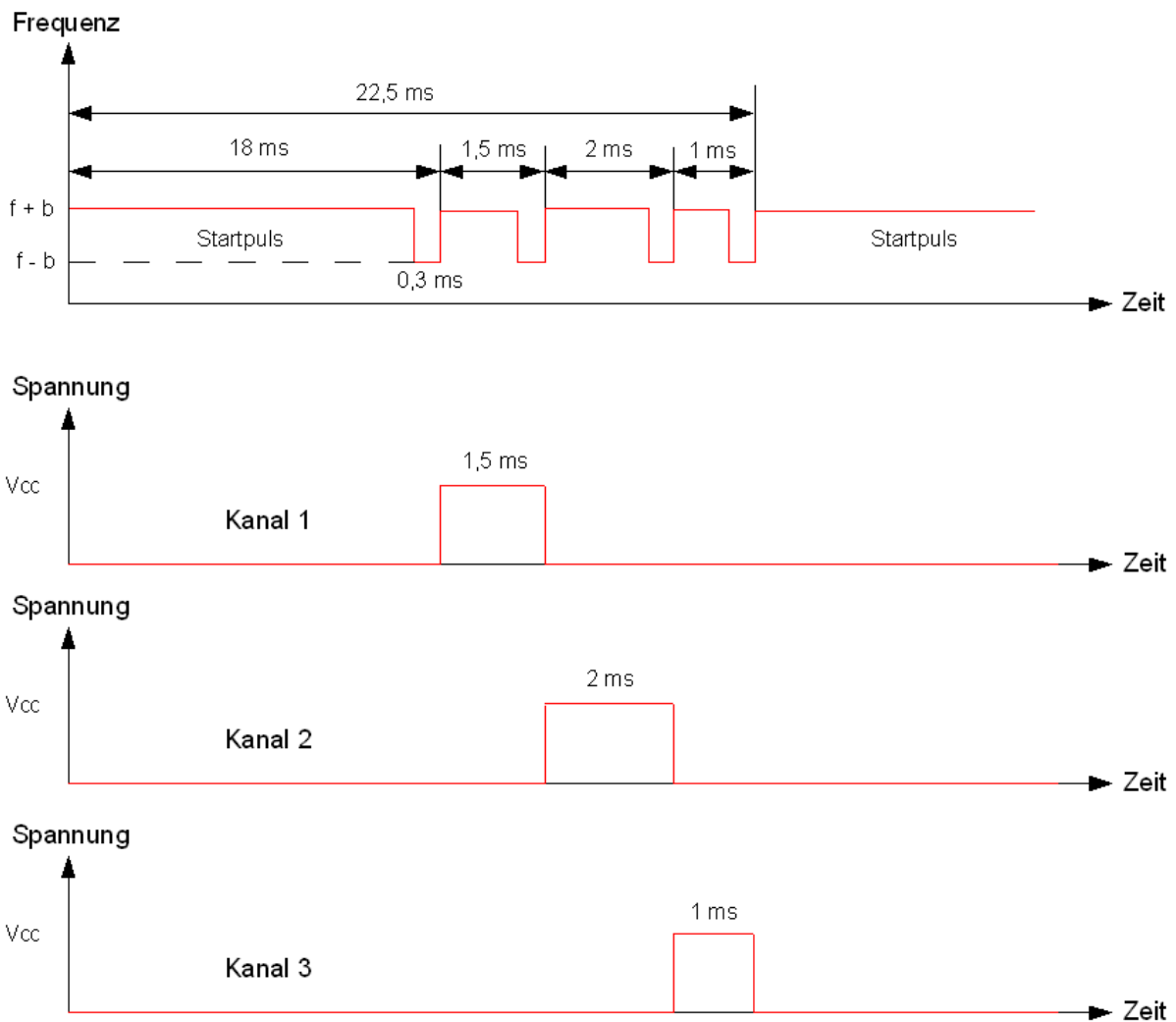


Abbildung 16: PPM-Signal

Wie sich noch im späteren Verlauf dieser Arbeit zeigt, ist die PPM nicht in der Lage Fehler zu registrieren, wodurch sie sehr störanfällig in Bezug auf falsch empfangene Pulse ist. Das liegt zum großen Teil in der Art der Dekodierung des Sendeframes durch den Empfänger. Diese geschieht wie oben beschrieben, indem der Empfänger zunächst auf den Startpuls wartet und anschließend die folgenden drei Pulse der Reihe nach auf die drei Kanäle zu verteilen. Kommt es nun zu einer Störung des Signals, beispielsweise durch eine zusätzlich auftretende Pulspause während des ersten Pulses, wird dieser einzelne Puls vom Empfänger fälschlicherweise als zwei getrennte Pulse interpretiert. Somit werden auf den ersten und zweiten Kanal fehlerhafte Pulse gegeben. Zusätzlich erhält der dritte Kanal die Pulsbreite des zweiten korrekt empfangenen Pulses, da die Zuordnung der Pulse zu den einzelnen Kanälen rein über die Reihenfolge ihres Eingangs geschieht. Das bedeutet, dass sobald ein Puls gestört ist, automatisch alle folgenden Kanäle ebenfalls falsche Signale erhalten.

4.1.5 Controller

Für die Kontrolle des Fahrzeuges wird aufgrund des Sicherheitsaspektes des Projektes ein redundantes System (Abbildung 17) eingesetzt. Das heißt, das Board verfügt über zwei von einander unabhängige Recheneinheiten. Dadurch können Berechnungen parallel von beiden Recheneinheiten ausgeführt und die Ergebnisse anschließend über eine intern verschaltete Ethernet-Schnittstelle kommuniziert werden. Somit ist jede Recheneinheit in der Lage, ihre eigenen Berechnungen mit den Ergebnissen der anderen Recheneinheit zu vergleichen und so auf ihre Korrektheit zu überprüfen.

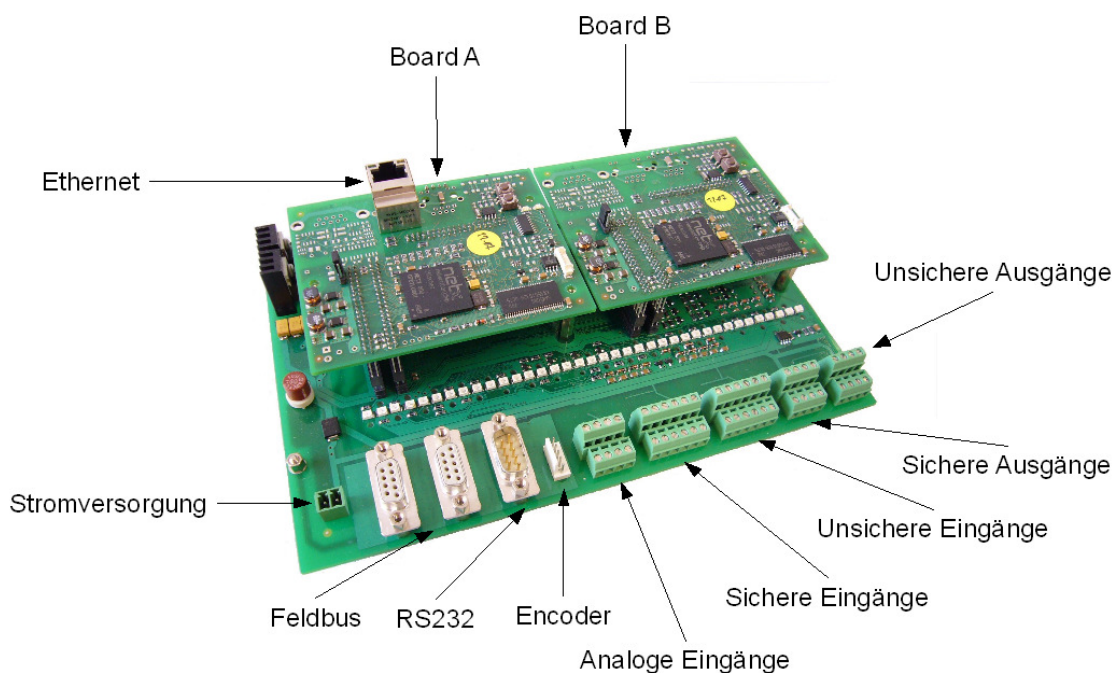


Abbildung 17: SafetyBoard der Firma innotec

Der im Demonstrator verwendete Controller stammt von der Firma innotec [31] und ist speziell für den Einsatz im Bereich der Sicherheitstechnik entwickelt worden. Die Firma innotec ist darauf spezialisiert, Unternehmen in Fragen der Sicherheitstechnik zu beraten. Mit dem SafetyBoard will das Unternehmen eine sicherheitszertifizierte Plattform für Firmen bieten, die einen Controller in sicherheitskritischen Bereichen einsetzen wollen. Da die Kernkompetenz des SAMS-Projektes rein in der Softwareverifikation liegt, bietet dieses Board eine ideale Plattform für das SAMS-Modul.

Das eigentliche Einsatzgebiet des Boards befindet sich im industriellen Umfeld, deshalb sind alle Ein- und Ausgänge den Industrienormen angepasst. Somit verfügt das Board ebenso wie der Laserscanner über eine Spannungsversorgung von 24 V. Das Board besteht aus einer Hauptplatine, auf der sich neben der Stromversorgung auch sämtliche Ein- und Ausgänge befinden. Auf der Hauptplatine befinden sich zwei redundant ausgelegte Boards mit je einer Recheneinheit, die bis auf die bei Board B fehlende Ethernetschnittstelle absolut identisch aufgebaut sind. Als Recheneinheit wird ein netX500 der Firma hilscher [33] verwendet, bei dem es sich um die Implementation eines ARM 926EJ-S mit 200 MHz Taktrate handelt. Für die Kommunikation der beiden Boards untereinander wird jeweils die erste (eth0) der beiden zur Verfügung stehenden Ethernet-Schnittstellen verwendet.

Sowohl die Ein- wie auch die Ausgänge verfügen über einen Logikpegel von 24 V. Im Einzelnen verfügt das Board standardmäßig über folgende Ein- und Ausgänge bzw. Schnittstellen:

- 1 Ethernetschnittstelle (10/100 MBit) zur externen Kommunikation
- 2 Feldbus (industrielle Kommunikationsschnittstelle)
- 1 RS232 (Kommunikationsschnittstelle)
- 1 Encoder-Eingang zur direkten Verarbeitung der Signale von Inkrementalgebern
- 6 analoge Eingänge zur Spannungsmessung
- 8 sichere Eingänge
- 10 unsichere Eingänge
- 4 sichere Ausgänge
- 6 unsichere Ausgänge

Board A verfügt dabei über alle unsicheren Ein- und Ausgänge sowie alle sicheren Ausgänge. Von den sicheren Eingängen können 4 und von den analogen Eingängen 3 direkt verwendet werden. Board B hingegen verfügt lediglich über den direkten Zugriff auf 4 der sicheren Eingänge und 3 der analogen Eingänge.

Um die Sicherheit der sicheren Ein- und Ausgänge zu erreichen, kann Board B jederzeit den Zustand der von Board A verwendeten Ausgänge überprüfen. Die sicheren Eingänge können vom jeweils komplementären Board über einen Testausgang geschaltet werden. Zusätzlich besitzt Board B die Möglichkeit, alle sicheren Ausgänge bei einer Störung abzuschalten.

Problem: Nur eine Encoder-Schnittstelle vorhanden

Als problematisch erwies sich die Encoder-Schnittstelle, da diese aus Sicherheitsgründen auf beide Boards gelegt ist. Somit stehen beiden Boards die Informationen vom selben Drehgeber zur Verfügung. Für eine Odometrie ist es jedoch essentiell, dass die Informationen von zwei Drehgebern verarbeitet werden können. Da dies standardmäßig auf dem Board jedoch nicht möglich ist, musste das Board modifiziert werden. Glücklicherweise ist pro Board jeweils eine Encoder-Schnittstelle über eine Verbindungsbrücke zur Hauptplatine geführt. Um nun zwei Drehgeber anschließen zu können, wurde die Verbindungsbrücke von Board B an den entsprechenden Stellen aufgetrennt, so dass keine leitende Verbindung mehr zwischen dem Board und den auf der Hauptplatine befindlichen Anschlüssen besteht. Anschließend wurden an den entsprechenden Verbindungsstellen Drähte mit einem dreipoligen Stecker angebracht. Über diesen ist es nun möglich einen zweiten Drehgeber am Board anzuschließen. Allerdings stehen so jedem Board immer nur die Informationen eines Drehgebers zur Verfügung, so dass die Werte über die interne Ethernetschnittstelle kommuniziert werden müssen.

4.1.6 Fahrtregler



Abbildung 18: Elektronischer Fahrtregler Robbe Rocar No. 8619[32]

Der im Fahrzeug eingesetzte elektronische Fahrtregler (Abbildung 18) dient zur gezielten Ansteuerung der Motoren im Modell. Zu diesem Zweck wird er zwischen dem Akku und dem Motor installiert. Durch ihn kann der Motor mit verschiedenen Geschwindigkeiten angesteuert werden anstatt nur mit voller Drehzahl, was bei einem direkten Anschluss des Motors an den Akku der Fall wäre. Die Steuerung der Drehzahl erfolgt dabei über die Begrenzung der maximalen Spannung am Motor.

In einem normalen Modellfahrzeug erhält der Fahrtregler seine Signale direkt vom Empfänger der Fernsteuerung. Der Fahrtregler benötigt als Steuerungssignal also ein PPM-Signal wie es schon in Kapitel 4.1.4 bei der Fernsteuerung beschrieben wurde. Da in unserem Fall jedoch der Fahrtregler über den Controller gesteuert werden soll, muss dieser das notwendige PPM-Signal erzeugen.

Als Besonderheit verfügt der Fahrtregler über ein automatisches Programmiersystem (aps). Dabei handelt es sich um einen automatischen Abgleich der Neutralstellung beim Einschalten des Fahrtreglers. Das heißt, dass das Signal, welches beim Einschalten des Fahrtreglers anliegt, zukünftig als Neutralstellung betrachtet wird. Somit müssen sich beim Einschalten alle Kanäle in der Neutralposition befinden, da sonst eine Steuerung des Systems aufgrund der verschobenen Neutralstellung nicht mehr möglich ist.

Der Fahrtregler ist für Spannungen zwischen 7,2 V und 8,4 V geeignet. Kurzzeitig dürfen über ihn 25 A fließen.

4.1.7 Akkus

Bei der Auswahl der Akkus kam es zunächst darauf an, sich für eine Akkutechnologie zu entscheiden. Entscheidendes Kriterium bei der Auswahl war eine möglichst lange Einsatzzeit des Fahrzeuges, die später auf Messen erreicht werden sollte (Kapitel 1 Punkt 3).

Im Modellbaubereich wird im Wesentlichen auf Nickel-Cadmium-(NiCd), Nickel-Metallhydrid-(NiMH) und seit neustem auch auf Lithium-Polymer-Akkus(LiPo) gesetzt.

NiCd-Akkus sind heutzutage nur noch im unteren Preissegment zu finden, da sie aufgrund ihrer geringen Kapazitätswerte von 1,5Ah bis 2,5Ah nur kurze Einsatzzeiten ermöglichen.

Standard sind zurzeit NiMH-Akkus, die mit Kapazitätswerten zwischen 3Ah und 4,5Ah deutlich über den NiCd-Akkus liegen. Genau wie bei NiCd-Akkus liegt die Zellspannung bei 1,2V. Im Modellbaubereich werden üblicherweise sechs Zellen in Reihe zu einem Akkupack zusammengeschlossen. Somit liegt die Nennspannung bei 7,2V.

Relativ neu im Modellbaubereich sind LiPo-Akkus. Im Aufbau unterscheiden sie sich deutlich, da ihre Zellespannung bei 3,7V liegt. Somit müssen nur zwei Zellen in Reihe geschaltet werden, um auf die nötige Spannung von 7,4V zu kommen. Bei den Kapazitätswerten erreichen heutige LiPo-Akkus mit bis zu 8Ah fast doppelt so hohe Werte wie NiMH-Akkus. Zudem besitzen sie eine drei- bis viermal höhere Energiedichte, wodurch sie bei gleicher Kapazität wesentlich leichter sind. Größter Nachteil ist der im Moment noch hohe Preis.

Bei der Verwendung von LiPo-Akkus gilt es jedoch besondere Sicherheitsvorschriften zu beachten, da ein unsachgemäßer Gebrauch schwere Folgen haben kann. In Kapitel 9.4 sind genauere Informationen zum sachgerechten Umgang mit LiPo-Akkus aufgeführt.

Um die LiPo-Akkus sicher transportieren und laden zu können, wurden spezielle Liposäcke (Abbildung 19) angeschafft. Diese Säcke bestehen aus einem feuerfesten Gewebe und verhindern beim Brand eines LiPo-Akkus, dass die dabei entstehende Hitze nach außen dringen kann und so andere Gegenstände in Brand steckt. Die Öffnung an der Oberseite des Liposackes wird nur durch einen Klettverschluss versiegelt und besitzt zudem Öffnungen an den Seiten. Somit kann der bei einem Brand entstehende Druck entweichen. Die dabei entstehenden Dämpfe sind jedoch hoch giftig, so dass im Schadensfall in geschlossenen Räumen sofort gelüftet werden muss.



Abbildung 19: LipoSack

Um auf eine möglichst lange Einsatzzeit zu kommen und um das Gesamtgewicht möglichst gering zu halten, fiel trotz der beschriebenen Gefahren die Wahl auf LiPo-Akkus. Dabei wurden aufgrund der unterschiedlichen Spannungsniveaus der einzelnen Komponenten zwei unterschiedliche Akkus im Fahrzeug verwendet. Ein Akku mit 7,4 V liefert den Strom für die Motoren des Fahrzeuges (Fahrakku). Zwei in Reihe geschaltete Akkus mit je 11,1 V Spannung liefern den Strom für die restlichen Komponenten des Systems wie Controller und Laserscanner (Controllerakku). Theoretisch hätte für die Spannungsversorgung der Motoren auch die Spannung der Controllerakku über einen Spannungswandler gewandelt werden können. Dies hätte jedoch einen erheblichen Energieverlust bei der Spannungswandlung zur Folge gehabt. Zudem hätten vom Motor ausgehende Störpulse die restliche Elektronik beeinflussen und stören können.

4.1.7.1 Fahrakku



Abbildung 20: Fahrakku Thunder Power 8000mAh Lipo Pack 2s4p ProLite

Als Fahrakku wird ein LiPo-Akku der Firma Thunder Power verwendet. Er besteht aus vier parallel geschalteten Zellenpaaren, wobei jedes Zellenpaar einer Reihenschaltung von zwei Zellen entspricht. Somit besteht der Akku aus insgesamt acht Zellen, von denen jede Zelle eine Kapazität von 2Ah bei 3,7V besitzt.

Die wichtigsten technischen Daten des Akkus sind:

Nennkapazität:	8000mAh
Nennspannung:	7,4V
maximale Entladerate (Continuous):	80-96A (10-12C)
maximale Entladerate (Burst):	144A (18C)
Peak Rate:	96A (12C)
Entladeschlussspannung:	6V
Ladestrom (max.):	8A (1C)
Gewicht:	320g
Maße (LBH):	128 x 50 x 29 mm

Die Hauptgründe für die Auswahl des Akkutyps waren:

1. Die sehr hohe Kapazität von 8000mAh
2. Das sehr gute Verhältnis von Kapazität zu Gewicht
3. Die geringen Ausmaße

Wie in Tabelle 3 zu sehen ist, liegen die heute erhältlichen LiPo-Akkus mit durchschnittlich 19 mAh/g deutlich über den 10 mAh/g von vergleichbaren NiMH-Akkus. Zudem sind bei gleicher Bauform fast doppelt so große Kapazitäten erhältlich.

Der Durchschnitt der Lithium-Polymer-Akkus liegt bei ca. 19 mAh/g. Einzig die Akkus der ProLite-Serie der Firma Thunder Power übertreffen mit bis zu 25 mAh/g den Durchschnitt deutlich. Zudem sind Kapazitäten von bis zu 8Ah erhältlich, wohingegen der Rest über Kapazitäten von maximal 5,2Ah verfügt. Damit sollten im späteren Einsatz Fahrzeiten von über eineinhalb Stunden möglich sein (siehe auch Kapitel 7.2 Test der Laufzeit des Antriebsakkus).

	Kapazität [mAh]	Gewicht [g]	Kapazität/ Gewicht [mAh/g]
Lipo			
Thunder Power 8000mAh Lipo Pack 2s4p ProLite	8000	320	25,00
Thunder Power 6000mAh LiPo Pack 2s3p ProLite	6000	255	23,53
LIPO PolyQuest PQ5000XP 20C 2er Akkupack	5000	242	20,66
Robitronic LiPo 5000 25C Akku - Details	5000	265	18,87
VTEC LIPO 5000 mAh 7,4 Volt	5000	268	18,66
LIPO RACING-PACK 7,4 V / 5200 MAH / 15C	5200	300	17,33
NiMH			
GP NIMH RACING PACK 7,2 V/4300 MAH	4300	420	10,24

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Akkutypen

4.1.7.2 Controllerakku



Abbildung 21: Controllerakku Lipopower 8.000 mA 11,1 V

Aufgrund der für Controller und Laserscanner benötigten Spannung von 24V werden zwei in Serie geschaltete Lithium-Polymer-Akkus mit je 11,1V verwendet. Dies ergibt zwar nur eine Nennspannung von 22,2V, jedoch beträgt die Spannung bei voll geladenen Akkus 25,2V und bei leeren Akkus 18V. Dieser Spannungsbereich von 7,2V liegt innerhalb der Spezifikation für die Eingangsspannung des Controllers (Kapitel 4.1.5) und des Laserscanners (Kapitel 4.1.2) von -30% (16,8V) bis +20% (28,8V).

Theoretisch hätte man auch einen einzelnen Akku mit 22,2V verwenden können, jedoch ist dieser Akkutyp in den Abmessungen so groß, dass er nicht ohne Probleme im Modell hätte untergebracht werden können. Durch die zwei getrennten Akkus ist man zudem wesentlich flexibler bei der Einbaulage und hat noch eine größere Auswahl an Herstellern. Außerdem können die meisten Ladegeräte nur bis zu maximal fünf Zellen in Reihe laden.

Um mit einem Akkusatz möglichst einen Messetag ohne Wechsel der Akkus auszukommen, wurde aufgrund der erwarteten durchschnittlichen Stromaufnahme der Komponenten von 687mA (Kapitel 5.5) ein Akku der Firma Lipopower mit 8Ah ausgewählt. Damit sollte die spätere Einsatzzeit mit einer Akkuladung bei über elf Stunden liegen. Somit müssen die

Akkus während eines Messtages nicht gewechselt und nur abends zum Laden aus dem Modell genommen werden.

4.1.8 Ladegerät



Abbildung 22: Ladegerät xBase Deluxe [34]

Zum Aufladen der Akkus kommt ein Universalladegerät xBase Deluxe von Ansmann Racing zum Einsatz. Es bietet gegenüber den meisten anderen erhältlichen Lipo-Ladegeräten den Vorteil, dass es neben der sonst nur üblichen 12V Gleichspannung auch mit 230V Wechselspannung betrieben werden kann. Der maximal zulässige Ladestrom liegt bei 5A. Es können sowohl NiCd-, NiMH-, Blei-, Lion- wie auch Lipo-Akkus geladen werden.

Bevor man den Ladevorgang starten kann, müssen zunächst die korrekten Parameter eingestellt werden. Diese umfassen neben dem Akku-Typ auch die Nennspannung und die Kapazität. Anders als jedoch beim Laden von NiCd- oder NiMH-Akkus kann beim Laden von Lion- oder Lipo-Akkus der Ladestrom nicht gesondert eingestellt werden. Dieser entspricht in diesem Fall der eingestellten Kapazität, wodurch die Akkus automatisch mit 1C geladen werden. Durch den begrenzten Ladestrom von maximal 5A kann somit auch nur eine maximale Kapazität von 5Ah eingestellt werden. Sowohl der Fahrakku (Kapitel 4.1.7.1) wie auch der Controllerakku (Kapitel 4.1.7.2) verfügen jedoch über eine Kapazität von 8 Ah. Das bedeutet, dass es bei leeren Akkus nicht möglich ist die Akkus in einem Schritt zu laden, da das Ladegerät über einen Sicherheitstimer verfügt, der die eingeladene Kapazität überwacht und bei einer zu großen Abweichung den Ladevorgang beendet. Somit müsste in diesem Fall der Ladevorgang einmal neu gestartet werden.

Beim Laden von LiPo-Akkus kommt das so genannte IU-Ladeverfahren (oder auch CCCV für Constant Current Constant Voltage) zum Einsatz. Dabei wird der Ladevorgang in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wird der Akku mit einem konstanten Strom geladen. Beim Erreichen der maximal zulässigen Akkuspannung (4,2V pro Zelle) wird dann in die zweite Phase umgeschaltet und der Akku wird weiter mit einer konstanten Spannung geladen. Im weiteren Verlauf des Ladevorgangs sinkt somit der Ladestrom kontinuierlich bis dieser einen minimalen Ladestrom unterschreitet. Der Ladevorgang ist damit abgeschlossen. In Abbildung 23 ist das IU-Ladeverfahren schematisch dargestellt.

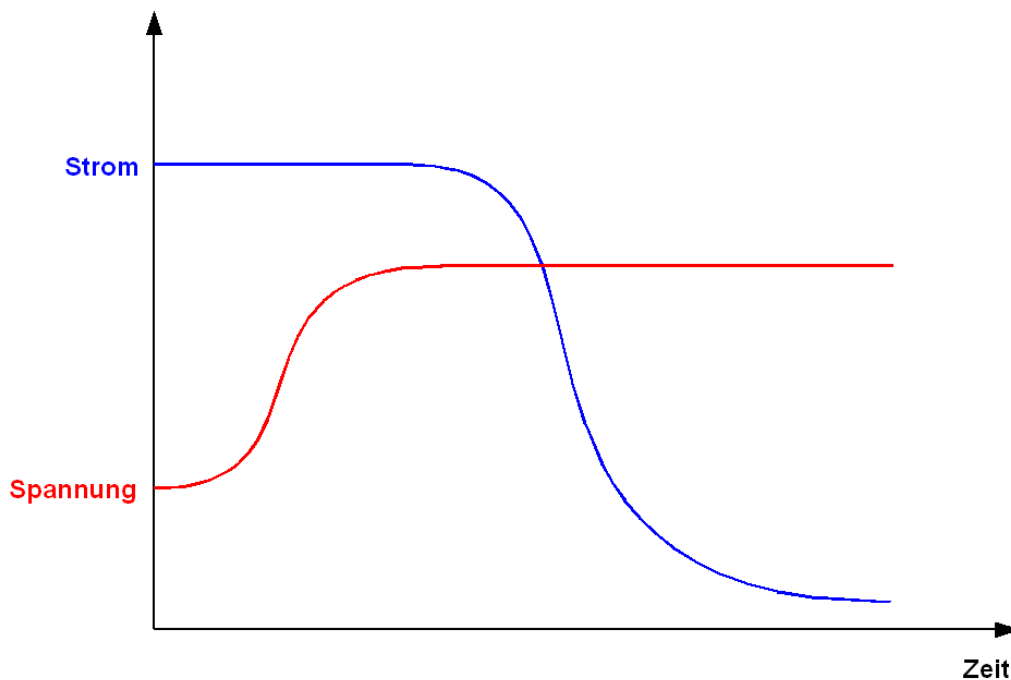


Abbildung 23: IU-Ladeverfahren

Bei mehrmaligen Laden und Entladen von in Reihe geschalteten Lipo-Akkus können die Spannungen der einzelnen Zellen mit der Zeit auseinander driften. Beim Laden oder Entladen wird immer nur die Gesamtspannung kontrolliert, so dass es bei zu großen Spannungsdifferenzen zwischen den Zellen zu einer Über- bzw. Unterspannung einzelner Zellen kommen kann. Da dies bei Lipo-Akkus zur Zerstörung des gesamten Akkus führen kann ist es erforderlich, die einzelnen Zellspannungen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren. Bei einer Spannungsdifferenz von mehr als 0,1 V pro Zelle sollten die Zellspannungen durch einen Equalizer (Abbildung 24) wieder angeglichen werden. Dabei wird durch gezieltes Entladen der Zelle mit der jeweils höchsten Spannung die Spannung aller Zellen mit der Zeit angeglichen.

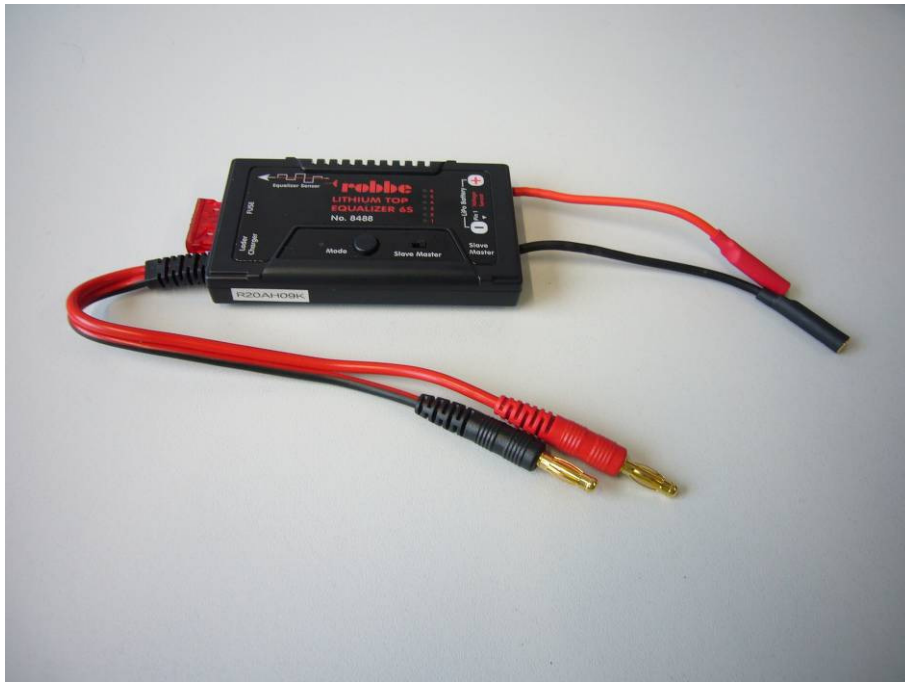


Abbildung 24: Equalizer Robbe Lithium Top Equalizer 6S

4.2 Aufbau



Abbildung 25: Einzelteile des Bausatzes

Abbildung 25 zeigt die einzelnen Bestandteile des Bausatzes für das Modellauto. Zu Beginn wurde das Modell genau nach Anleitung aufgebaut. Nur die Abdeckung mit nachgebildetem Cockpit und die Karosserie-Abdeckung aus Plexiglas wurden nicht verwendet, da diese für die spätere Funktion des Modells nicht benötigt werden.

Nachdem das Grundgerüst fertig aufgebaut war, wurde es den neuen Anforderungen entsprechend angepasst und modifiziert. Im Inneren der Wanne wurden Aluminium-Winkel vor den Zahnriemen montiert, so dass keine Kabel oder ähnliches mehr zwischen Zahnriemen und Zahnräder gelangen können. Zudem können sie zur Befestigung der elektronischen Fahrtregler und der Drehgeber genutzt werden. Im oberen Bereich der Wanne dienen zwei zusätzliche Aluminium-Winkel als Aufnahme für einen Zwischenboden.

Die zur Steuerung der Motoren nötigen elektronischen Fahrtregler (Kapitel 4.1.6) wurden für den Einbau in das Modell ein wenig modifiziert. Das Anschlusskabel für den Akku blieb unverändert, wurde jedoch statt mit dem Akku mit dem Relais verbunden. Die standardmäßigen Tamiya-Stecker blieben am Regler. Die Anschlussseite zum Motor wurde fest verlötet und nicht wie sonst üblich über die 4mm-Goldstecker verbunden. Diese Lösung

wurde hauptsächlich wegen der beengten Platzverhältnisse im Inneren des Fahrzeuges gewählt, da der Fahrtregler sehr dicht an Motor sitzt und sonst die langen Kabel nur unnötig Platz im Fahrzeug verbraucht hätten.

Das Anschlusskabel zum Empfänger wurde ebenfalls eingekürzt. Zudem wurde an dem Fahrtregler, der die linke Antriebsseite ansteuert, ein anderes Steckersystem befestigt. Durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Steckersystemen wird so die Gefahr des Vertauschens der Fahrtregler für die rechte und die linke Seite unterbunden. In Abbildung 26 sind die beiden unterschiedlichen Steckersysteme illustriert.

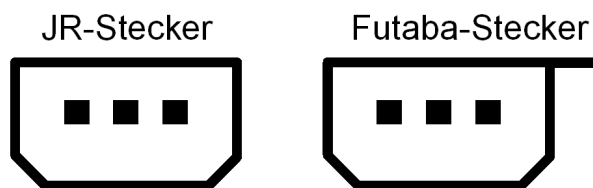


Abbildung 26: JR- und Futaba-Stecker

Beim Anschluss des Fahrtreglers an den Motor musste im Vorfeld die richtige Polarität herausgefunden werden, da die Anschlusskabel des Motors rot und schwarz und die des Fahrtreglers weiß und blau waren. Um herauszufinden welche Farbe beim Fahrtregler den positiven Ausgang darstellt und somit mit dem roten Kabel des Motors verbunden werden musste, wurde der Fahrtregler direkt mit dem Akku und dem Empfänger verbunden. In der Vorwärtsstellung wurde über ein Multimeter am blauen Kabel ein positives Potential gegenüber dem weißen Kabel gemessen. Somit wurden das blaue mit dem roten Kabel und das weiße mit dem schwarzen Kabel verbunden.

Problem: Polung der Motoren

Bei späteren Tests stellte sich heraus, dass diese Verschaltung aufgrund des Differentialantriebs mit dem eingesetzten Fahrtregler nicht praktikabel ist. Dies beruht auf der Tatsache, dass der Fahrtregler über eine Art Bremse verfügt. Wird der Motor also vorwärts angesteuert und bekommt dann ein Rückwärts-Signal, verzögert der Fahrtregler den Motor zunächst nur und dreht nicht sofort rückwärts. Die Räder werden beim Bremsen somit erst eine gewisse Zeit verzögert. Nach dieser Verzögerung fangen die Motoren dann unmittelbar an rückwärts zu drehen. Diese Verzögerung tritt auch dann auf, wenn der Motor sich nicht bewegt und zuletzt vorwärts angesteuert wurde. Steuert man ihn dann rückwärts an, dreht der Motor erst verzögert rückwärts.

Da die Motoren zu Beginn genau gleich verpolt waren, wurde ein Motor somit falsch angesteuert. Versuche zeigten, dass der Motor, der die rechte Antriebsseite steuert, richtig mit dem Fahrtregler verbunden war. Somit musste die Polung des Motors, der die linke Seite ansteuert, vertauscht werden. Also wurde das weiße mit dem roten Kabel und das blaue mit dem schwarzen Kabel verbunden.

Die für die Odometrie nötigen Drehgeber (Kapitel 4.1.3) wurden direkt mit der Achse des rechten vorderen und des linken hinteren Rades verbunden. Dabei war es nicht wie ursprünglich geplant möglich den Drehgeber vor dem Winkel zu montieren, da die Achse dafür zu kurz war. Die Madenschraube, die das Coderad auf der Achse hält, war in diesem Zustand genau über der Fase der Achse, so dass ein sicherer Halt nicht gegeben war. Somit musste der Drehgeber hinter dem Winkel befestigt werden. Hierfür wurde aus dem Winkel die Kontur des Drehgebers ausgeschnitten und ein Gewinde in die „Ohren“ des Drehgebers geschnitten, um so ihn am Winkel von außen befestigen zu können (Abbildung 27).

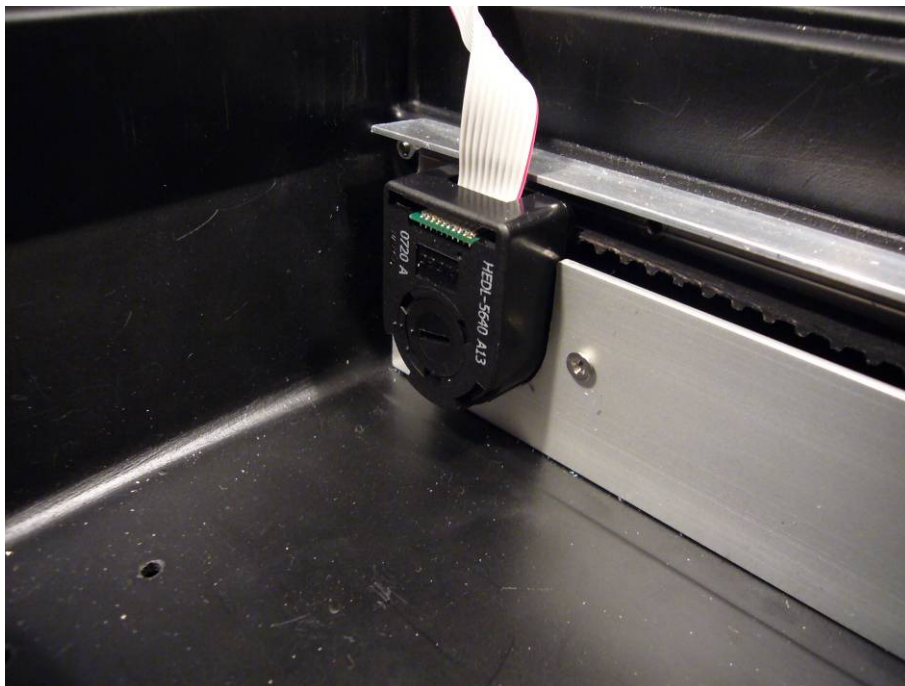


Abbildung 27: Montierter Drehgeber

Im hinteren Bereich wurden zwei von außen erreichbare Taster installiert. Ein grüner zum Einschalten und ein roter zum Ausschalten des Modells. Im Zwischenraum zwischen den beiden Motoren wurden zudem noch die Platine für die Spannungswandlung (Kapitel 5.3.1), das Zeitverzögerungsrelais (Kapitel 5.3.2) und das Relais für den Fahrkreis fest mit dem Boden verschraubt. In Abbildung 28 ist der gesamte Aufbau der ersten Ebene zu sehen.

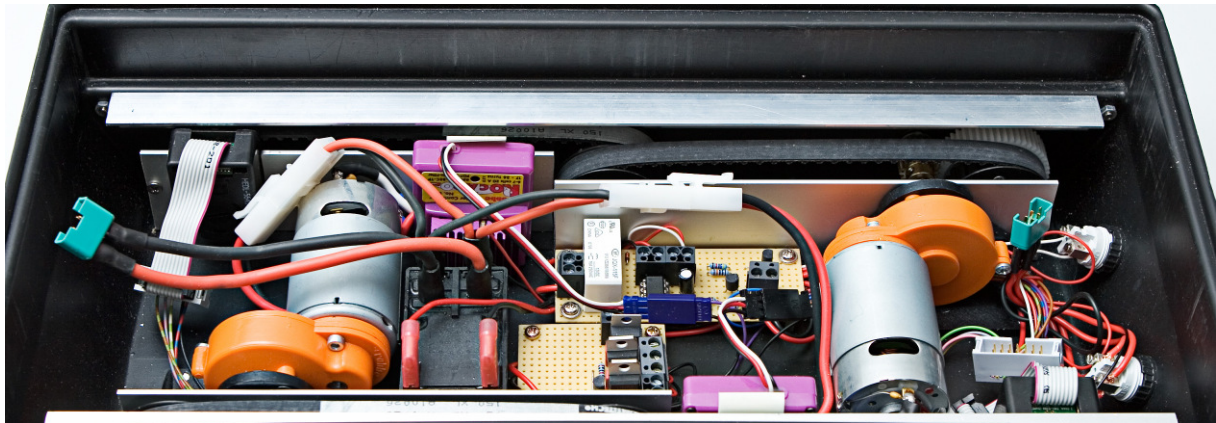


Abbildung 28: 1. Ebene

Um die notwendige zweite Ebene zu erhalten, wurde eine Aluminiumplatte passgenau zugeschnitten, damit sie exakt in den oberen Teil der Wanne passt. Als Auflagefläche dienen die im oberen Bereich zusätzlich installierten Aluminiumwinkel. Im hinteren Bereich wurde aus Aluminiumwinkeln ein Kasten konstruiert, um die Controllerakkus sicher unter dem Controller unterbringen zu können. Am hinteren Winkel wurden zwei Scharniere mit der Bodenplatte des Controllergehäuses verbunden (Abbildung 29). Somit kann zum Laden der Akkus einfach das Controllergehäuse nach hinten geklappt werden.



Abbildung 29: Kasten für Controllerakkus

Problem: Befestigung des Laserscanners

Der Laserscanner (Kapitel 4.1.2) verfügt in der Bodenplatte über keinerlei Befestigungsmöglichkeiten, so dass die Befestigungslöcher in der Rückplatte verwendet werden mussten. Um den Scanmittelpunkt möglichst nah an die Fahrzeugmitte zu bringen, wurde der Scanner zunächst am vorderen Winkel des Kastens für die Controllerakkus befestigt (Abbildung 30). Nach Eintreffen der Controllerakkus stellte sich jedoch heraus, dass die im Internet angegebenen Maße nicht ganz stimmten, so dass durch die vorstehenden Schraubenköpfe der Platz im Inneren des Kastens zu gering war. Somit war es nötig einen zusätzlichen Winkel zwischen Kasten und Laserscanner zur Befestigung zu installieren (Abbildung 31).

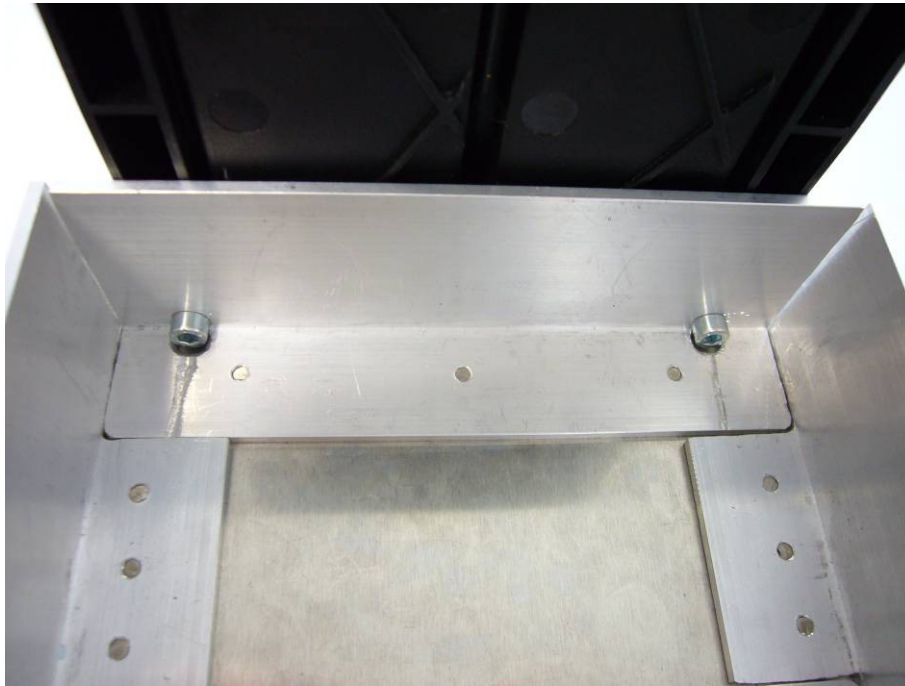


Abbildung 30: Befestigung des Laserscanners



Abbildung 31: Befestigungswinkel für Laserscanners

Auf der Grundplatte des Controllergehäuses befinden sich neben dem Controller noch zusätzlich der Summer, der Empfänger samt Antenne sowie die Platine für die Pegelwandlung (Abbildung 32).

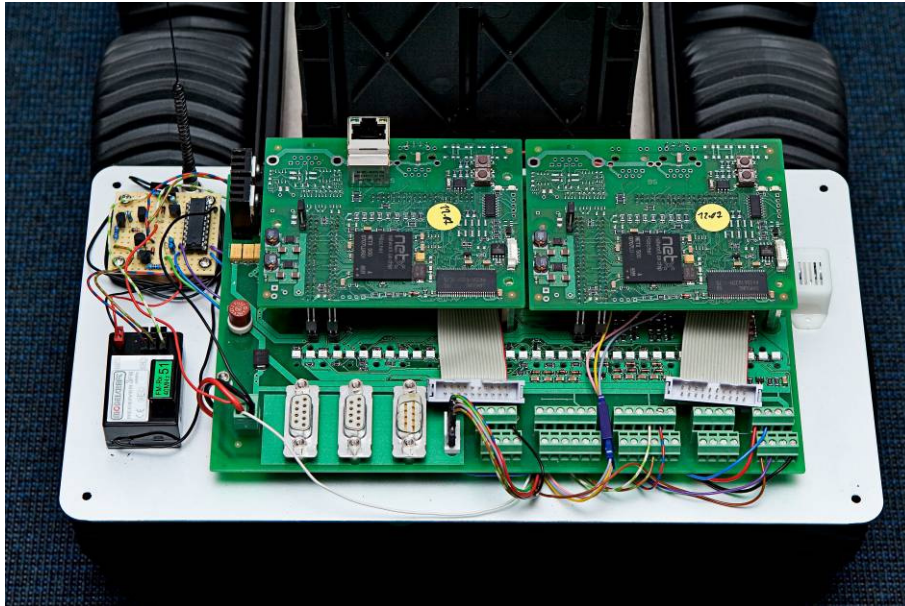


Abbildung 32: Controllergehäuse

5 Elektronik

Im Folgenden werden die verwendete Elektronik und das elektrische Konzept des Fahrzeugs genauer erläutert.

5.1 1. Konzept „Stromversorgung“

Das erste elektrische Konzept (Abbildung 33) entstand noch vor der Verfügbarkeit der endgültigen Daten des Controllers, so dass einige Details noch umgeändert werden mussten. Diese wurden dann bei der Erstellung des zweiten und finalen Konzeptes (Kapitel 5.2) berücksichtigt.

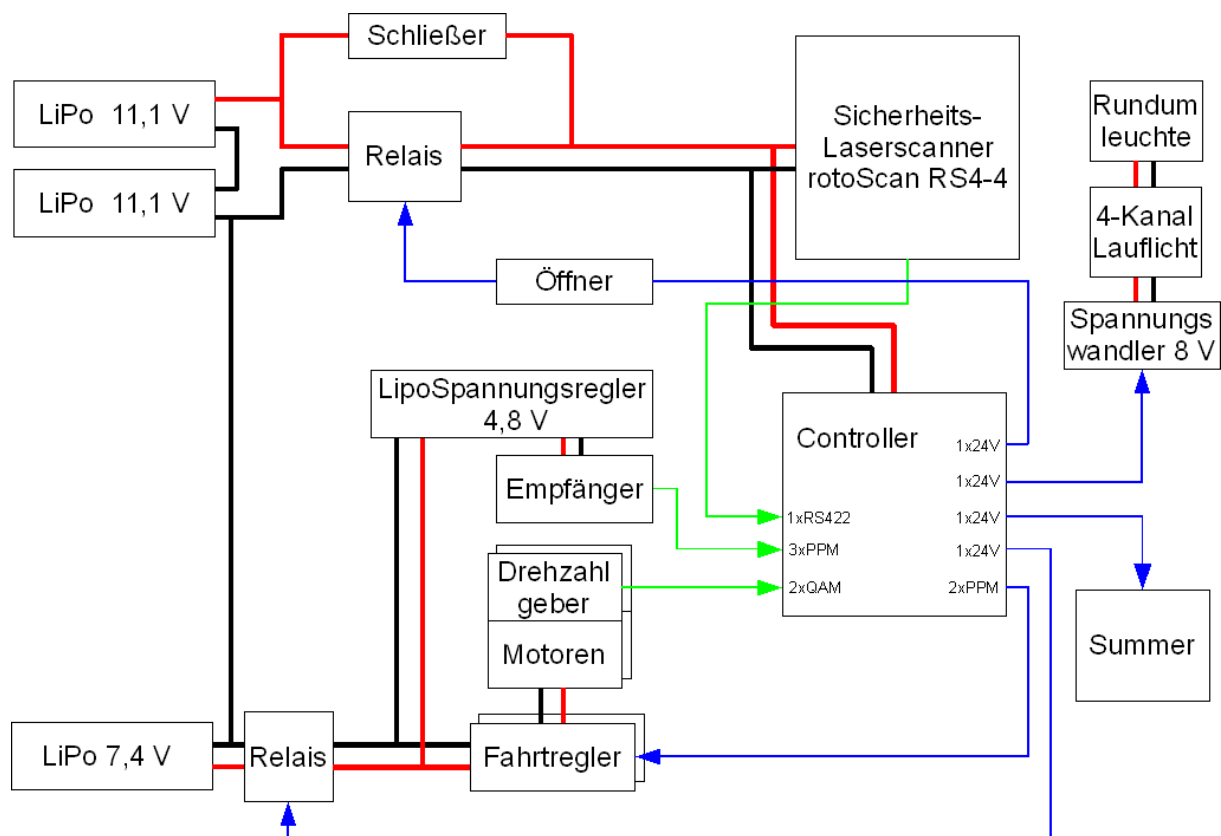


Abbildung 33: 1. elektrisches Konzept

Aufgrund der unterschiedlichen Spannungsversorgung für Controller und Laserscanner von 24 V und den Motoren von 7,2 V wurden zwei unterschiedliche Akkus verwendet. Zum einen ein LiPo-Akku mit 7,4 V (zwei Zellen) für den Fahrkreis (Kapitel 4.1.7.1) zum anderen zwei in Reihe geschaltete LiPo-Akkus mit je 11,1 V (drei Zellen) für den Controllerkreis (Kapitel 4.1.7.2).

Die Akkus werden jeweils durch ein Relais vom übrigen Stromkreis getrennt. Somit ist der Rest des Systems im ausgeschalteten Zustand vollkommen geschützt. Zudem gibt es so auch keine Verbraucher mehr, die die Akkus langsam weiter entladen und so durch Tiefenentladung zerstören (siehe auch Kapitel 4.1.7).

Beide Relais werden über je einen separaten Ausgang des Controllers gesteuert, so dass sie aufgrund der Industrieausgänge (Kapitel 4.1.5) für eine Steuerspannung von 24 V geeignet sein müssen. Bei dem Relais für den Fahrkreis handelt es sich dabei um ein spezielles Leistungsrelais, welches für große Ströme ausgelegt ist. Der Einschalttaster überbrückt das Relais und versorgt dadurch den Controller mit Strom, der danach das Relais selbst aktiv hält. Dies geschieht über einen Schließer (Taster der im gedrückten Zustand leitend ist) der parallel zum Relais installiert wird. Zum Einschalten des Systems wird der Taster gedrückt, der Controller wird mit Strom versorgt, aktiviert die beiden Ausgänge für die Relais, diese ziehen an und man kann den Taster wieder loslassen.

Ausgeschaltet werden kann das Modell zum einen über den Controller, der einfach die Ausgänge für die Relais deaktiviert, oder durch Drücken eines Öffners (Taster der im gedrückten Zustand nicht leitend ist), der sich zwischen Controller und Relais befindet und so die Steuerspannung hardwareseitig unterbrechen kann. Somit kann auch bei einem abgestürzten Controller das Fahrzeug immer noch sicher ausgeschaltet werden.

Um verschiedene Zustände des Systems nach außen darstellen zu können, kann der Controller über je einen Ausgang einen Summer und eine Rundumleuchte ansteuern. Der Summer ist für den Betrieb mit 24 V geeignet und kann damit direkt an den Ausgang des Controllers angeschlossen werden. Die Rundumleuchte besteht aus vier einzelnen Glühlampen, die für den realistischen Effekt einer Rundumleuchte über einen 4-Kanal-Lauflicht-Baustein angesteuert werden. Dieser Baustein benötigt eine Eingangsspannung zwischen 6 V und 12 V. Um das Licht über den Controller schalten zu können muss hier ein Spannungswandler zwischengeschaltet werden.

Der Empfänger verträgt maximal eine Versorgungsspannung von 7 V. Speziell für den Einsatz von LiPo-Akkus im Modellbau gibt es so genannte LiPo-Spannungsregler, die die Spannung (bis zu 8,4 V) des Fahrakkus auf 4,8 V runterregeln. Die Signale der drei Kanäle

werden auf die Eingänge des Controllers gelegt, so dass dieser die Signale auswerten kann. Nach der Auswertung des Zustandes des Systems wird das zulässige Steuerungssignal generiert und an die Fahrtregler gesendet. Der Controller dient somit als Schnittstelle zwischen Empfänger und den Fahrtreglern, so dass er die Bewegungen des Fahrzeugs kontrollieren kann.

Die Drehgeber (Kapitel 4.1.3), die die Drehrichtung und Geschwindigkeit der Räder erfassen, generieren ein QAM-Signal (Quadrature Amplitude Modulation) welches direkt über einen speziellen Encoder-Eingang des Controllers verarbeitet werden kann.

Die Signale des Empfängers, der Fahrtregler und der Drehgeber besitzen jeweils einen Logikpegel von 5 V. Der Controller verarbeitet aber aufgrund des Industriestandards nur 24 V Signale. Auf Grund dieser unterschiedlichen Pegel ist eingangsseitig eine Pegelwandlung von 5 V auf 24 V und ausgangsseitig von 24 V auf 5 V notwendig. Die dafür nötige Elektronik ist in Kapitel 5.3.3 genauer beschrieben.

5.2 2. Konzept „Stromversorgung“

Das zweite elektrische Konzept (Abbildung 34) ist nach dem Erhalt des Controllers mit seiner endgültigen Spezifikation entstanden. Dabei haben sich einige Details gegenüber dem im vorherigen ersten Konzept verändert, die im Folgenden beschrieben werden. Bei dem dargestellten Konzept handelt es sich zudem um den endgültigen Aufbau des Fahrzeugs.

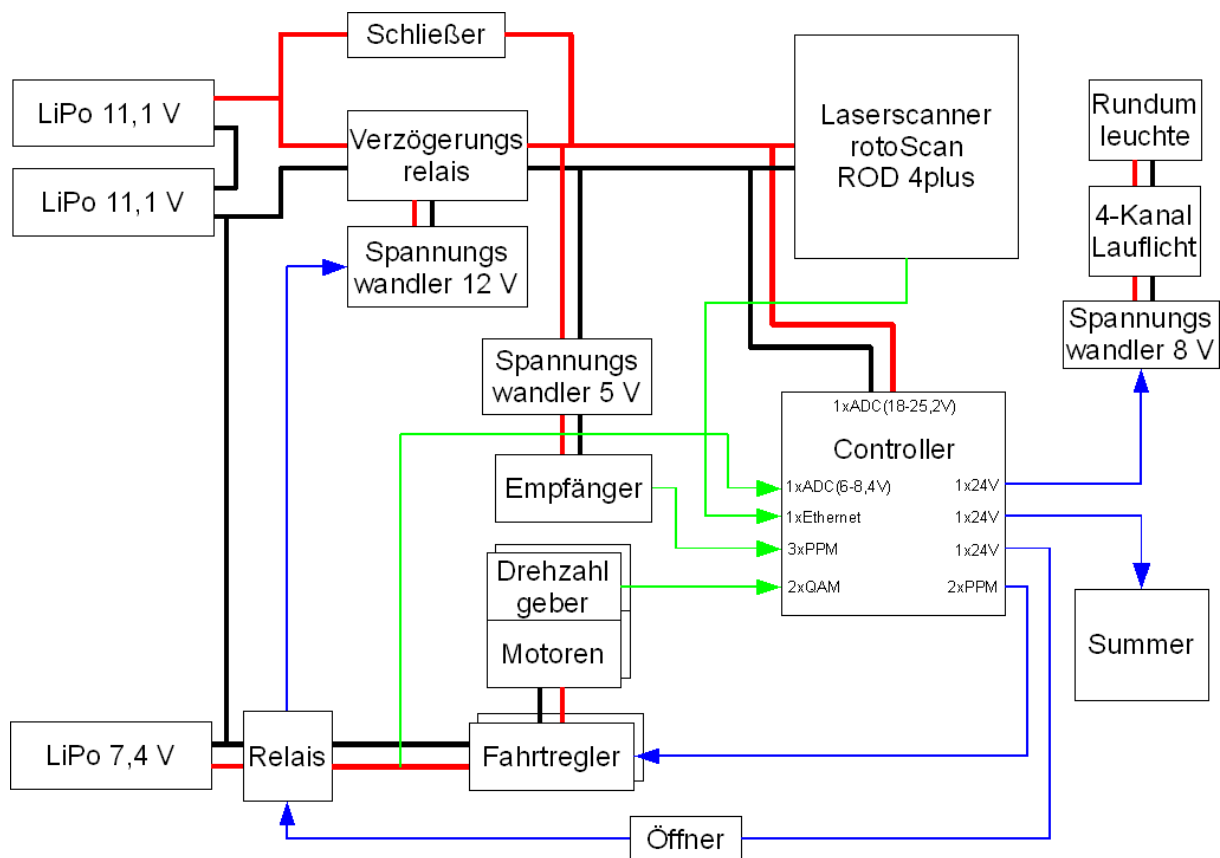


Abbildung 34: 2. elektrisches Konzept

Der Sicherheits-Laserscanner wurde gegenüber dem ersten Konzept durch die Standard-Variante ohne Sicherheitszulassung ersetzt, da für den Demonstrator an sich keine Sicherheitszertifizierung angestrebt wird. Zudem erfolgt die Ansteuerung nun nicht mehr über eine RS422-Schnittstelle sondern über Ethernet.

Das Relais des Controllerkreises wurde durch ein Verzögerungsrelais (Kapitel 5.3.2) ersetzt. Dieses Relais fällt erst nach einer gewissen Verzögerung ab und versorgt so den Controllerkreis beim Abschalten noch für eine kurze Zeit mit Strom. Dadurch wird sichergestellt, dass beim Ausschalten des Modells die Motoren sicher vor dem Controller

ausgeschaltet werden, um so ein kurzzeitiges undefiniertes Steuerungssignal der Motoren zu verhindern. Zudem können beide Relais jetzt über einen gemeinsamen Ausgang des Controllers angesteuert werden. Diese Änderung wurde hauptsächlich zur Erhöhung der Sicherheit des Systems eingeführt. Im ersten Konzept war es durch die getrennte Ansteuerung der Relais noch möglich, dass erst das Relais des Controllerkreises und danach erst das Relais des Fahrkreises abfallen. Da der Controller aber die Ansteuerung der Fahrtregler übernimmt, ergibt sich so für einen kurzen Zeitabschnitt folgender kritischer Zustand:

- Der Controller ist abgeschaltet, wodurch die Fahrtregler ein undefiniertes Signal erhalten.
- Das Relais des Fahrkreises ist noch nicht abgefallen, wodurch das Fahrzeug noch unvorhersehbare Bewegungen durchführen kann.

Um diesen kritischen Zustand zu umgehen, wurden die oben beschriebenen Änderungen durchgeführt. Jetzt werden beide Relais immer gleich angesteuert. Zudem fällt das Relais des Controllerkreises immer verzögert im Vergleich zum Relais des Fahrkreises ab. Somit erhalten die Fahrtregler ein sauberes Steuerungssignal bis das Relais des Fahrkreises abgefallen ist. Somit kann kein unkontrolliertes Verhalten mehr auftreten. Da das Verzögerungsrelais mit 12 V betrieben wird, musste zudem noch ein zusätzlicher Spannungswandler installiert werden.

Der Empfänger wird jetzt ebenfalls über einen Spannungswandler vom Controllerkreis aus versorgt. Dieser Schritt erschien sinnvoll, um mögliche Störungen, die vom Motor ausgehen können, von vornherein zu unterbinden.

Zudem fällt die Pegelwandlung für die Drehgeber weg, da die Encodereingänge des Controllers wider Erwarten mit 3,3 V arbeiten. Die Drehgeber können somit direkt an die Encodereingänge angeschlossen werden.

Um die Spannung der Akkus kontrollieren zu können, werden sowohl die Spannung des Fahrakkus wie auch die Spannung der Controllerakkus über den ADC (Analog Digital Converter) des Controllers gemessen. Die Spannung des Fahrakkus kann direkt an den ADC angeschlossen werden, da dieser Spannungen zwischen 0 V und 10 V messen kann und der Fahrakku maximal 8,4 V erreicht. Die beiden Controllerakkus mit einer Spannung von bis zu 25,2 V müssen somit über einen Spannungsteiler angeschlossen werden, um so die maximal anliegende Spannung auf unter 10 V zu begrenzen.

5.3 Platinen

5.3.1 Spannungswandlung

Für die unterschiedlichen Komponenten im Fahrzeug wurden zum Teil unterschiedliche Spannungen benötigt. Hierfür wurde eine Platine zur Spannungswandlung (Abbildung 35) entworfen, die im Folgenden genauer erläutert wird.

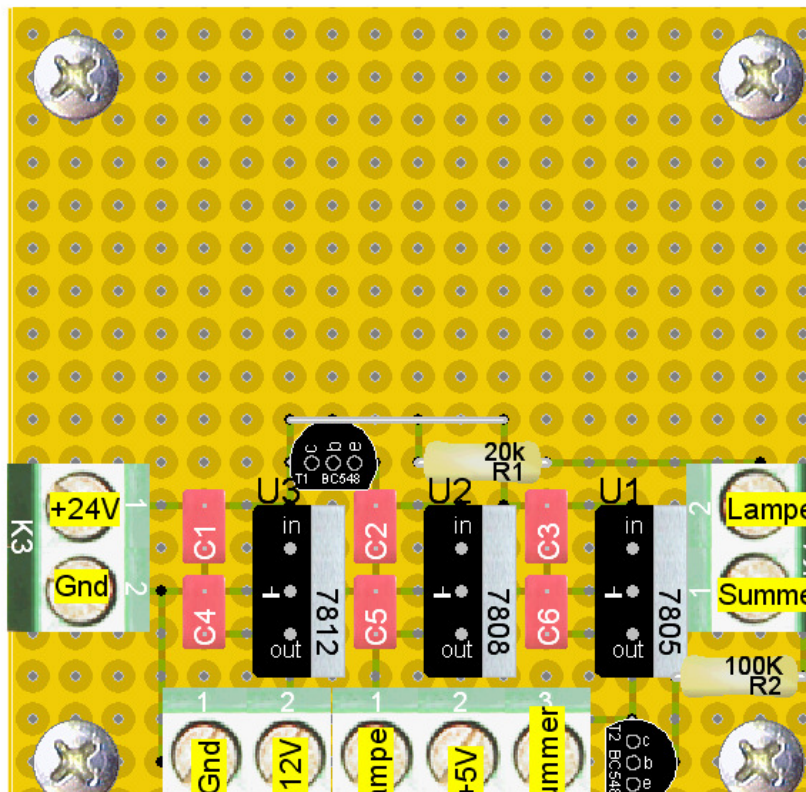


Abbildung 35: Platine zur Spannungswandlung

Eingangseitig besitzt die Platine einen Anschluss für die 24 V des Controllerkreises. Diese Spannung wird dann durch Festspannungsregler auf feste 12 V für das Verzögerungsrelais (Kapitel 5.3.2), 8 V für die Rundumleuchte und 5 V für den Empfänger gewandelt. Zwischen Spannungseingang und Ground sowie zwischen Ground und Spannungsausgang werden jeweils kleine Kondensatoren von 0,1 μF und 0,33 μF gesetzt, um mögliche kurzzeitige Spannungsschwankungen zu filtern und so eine saubere und konstante Ausgangsspannung zu erhalten.

Der 8 V sowie ein zusätzlicher 5 V Ausgang können zudem über zwei separate Anschlussklemmen durch ein 24 V Signal geschaltet werden. Der 8 V Ausgang wird wie schon erwähnt zum Schalten der Rundumleuchte verwendet. Über die schaltbaren 5 V sollte ursprünglich der Summer betrieben werden. Da nun jedoch ein Modell verwendet wird, das für 24 V geeignet ist, erfolgt die Ansteuerung direkt über den Controller, so dass dieser Ausgang der Platine überflüssig geworden ist. Die Ansteuerung erfolgt dabei über zwei Transistoren, die entsprechend dem erwarteten Stromverbrauch (Kapitel 5.5) einen geeigneten Vorwiderstand besitzen.

Der obere ungenutzte Teil der Platine war ursprünglich für die Pegelwandlung der Drehgebersignale vorgesehen. Da diese jedoch nicht benötigt wurde, ist der Platz ungenutzt, die Platine hätte damit um gut die Hälfte kleiner ausfallen können.

5.3.2 Zeitverzögerungsrelais

Um das Relais des Controllerkreises, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, verzögert abfallen lassen zu können, wurde eine Schaltung für ein Zeitverzögerungsrelais benötigt. Als erste Schaltung diente ein Bausatz von Conrad. Nach dem Aufbau der Schaltung stellte sich jedoch schnell heraus, dass der „Verzögerungs-Ein-/Ausschalter Bausatz“ nicht den Erwartungen entsprach und für das Einsatzzweck nicht zu verwenden war. Als Ausschalter wird in der Schaltung ein Abfallen des Relais nach einer eingestellten Zeitdauer verstanden. Da dieses Verhalten absolut nicht für das System zu verwenden war, musste somit eine eigene Schaltung aufgebaut werden.

Die neue Schaltung basiert auf einer im Internet veröffentlichten Schaltung (Abbildung 36) für die zeitverzögerte Ansteuerung einer Glühlampe im Inneren eines Autos über einen Kontaktschalter in der Tür.

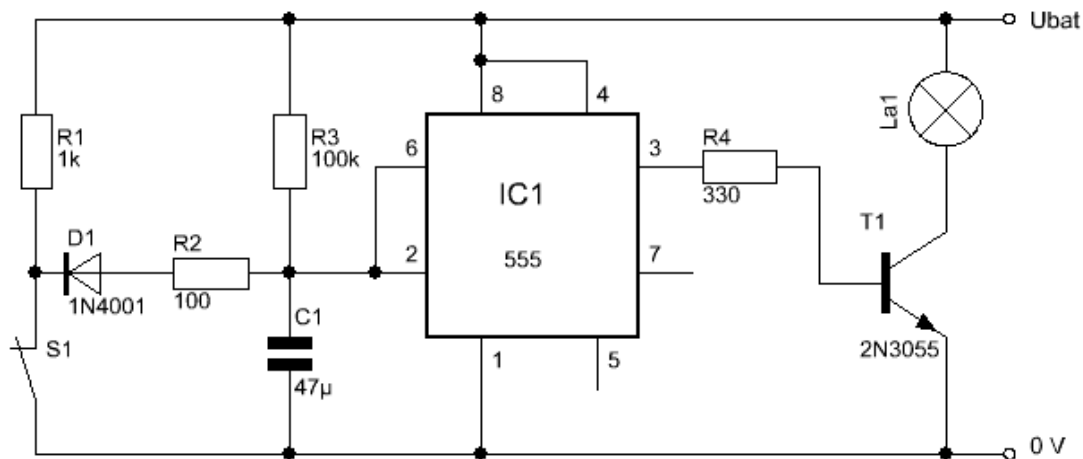


Abbildung 36: Ausschaltverzögerung mit NE 555 [27]

Das wesentliche Bauteil der Steuerung ist der Timer-Baustein NE 555. Dieser universell einsetzbare Timer-Baustein wird in unterschiedlichsten Schaltungen verwendet, da er sehr robust und günstig ist. Bei anlegen einer Versorgungsspannung und geschlossenem Schalter S1 brennt die Lampe. Öffnet man den Schalter brennt die Lampe weiterhin und der Kondensator C1 lädt sich langsam auf. Dieser Spannungsanstieg wird über Pin 2 des NE 555 registriert. Ab einem bestimmten Spannungsniveau schaltetet dieser den Ausgang ab, wodurch die Glühlampe erlischt.

Für den Einsatz im Demonstrator wurde diese Schaltung den speziellen Gegebenheiten angepasst. Die verwendete Schaltung ist in Abbildung 37 dargestellt.

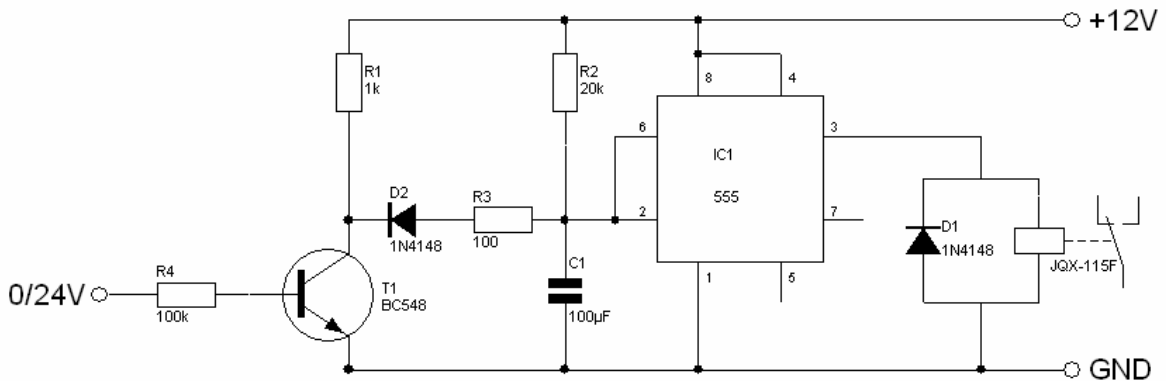


Abbildung 37: Adaptierte Ausschaltverzögerung

Der Schalter wurde durch einen Transistor ersetzt, damit die Schaltung direkt über den Ausgang des Controllers angesteuert werden kann. Zudem wird das Relais nicht über einen Transistor sondern direkt über den Ausgang des NE 555 geschaltet. Dies ist möglich, da das Relais nur eine Stromaufnahme von 33 mA hat. Der zulässige Ausgangsstrom des NE 555 liegt bei 100 mA. Die Verzögerungszeit wird durch den Widerstand R2 und den Kondensator C1 bestimmt. Sie berechnet sich aus der Zeitkonstante des Ladevorgangs. Die Formel dafür lautet $t = R2 \times C1$. Da bereits ein Kondensator mit einer Kapazität von 100 µF vorhanden war und die Ausschaltverzögerung bei ca. 0,5 s liegen sollte, wurde hierfür der passende

$$\text{Widerstand berechnet. } R2 = \frac{t}{C1} = \frac{0,5s}{0,0001F} = 5k\Omega$$

Da dieser Widerstand nicht verfügbar war, wurde stattdessen der nächst kleinere Widerstand von 4,7 kOhm verwendet. Daraus ergibt sich dann eine Verzögerungszeit von 0,47 s.

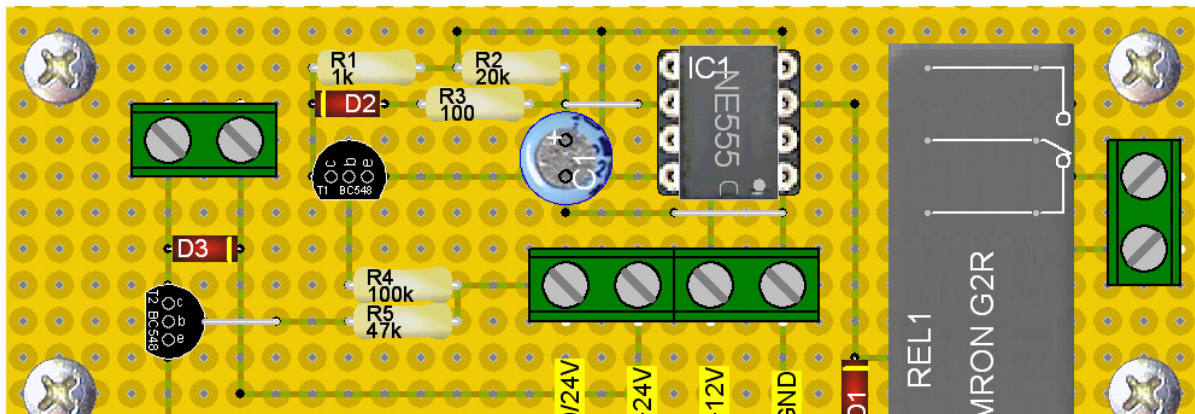


Abbildung 38: Platine der Ausschaltverzögerung

5.3.3 Pegelwandlung

Wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert, wurde eine Pegelwandlung der Signale von 5 V auf 24 V sowie von 24 V auf 5 V benötigt. Nachfolgend werden die beiden Schaltungen dargestellt, die hierfür im Verlauf der Arbeit aufgebaut wurden.

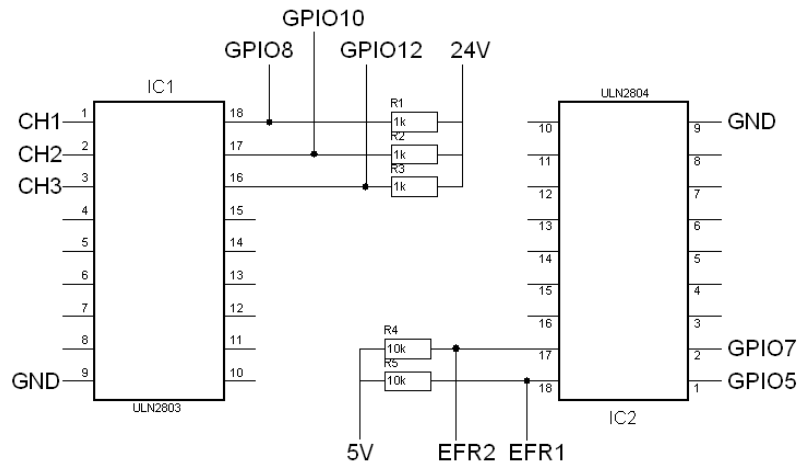


Abbildung 39: Schaltplan der ersten Pegelwandlung

Abbildung 39 zeigt die erste aufgebaute Schaltung, die im Wesentlichen aus zwei Treiberbausteinen des Typs ULN 2803 und ULN 2804 besteht. Diese Treiberbausteine bestehen jeweils aus 8 integrierten Darlington-Schaltungen, die über die Pins 1 bis 8 geschaltet werden können. Die jeweils zugehörigen Open-Collector-Ausgänge befinden sich auf den Pins 11 bis 18. Pin 9 dient als Ground für die komplette Schaltung und Pin 10 wird nur beim Schalten von induktiven Lasten benötigt.

Die Darlington-Schaltung besteht aus zwei hintereinander geschalteten Transistoren. Der erste kleinere Transistor wird zum Schalten des zweiten größeren Transistors verwendet. Dadurch wird eine sehr viele höhere Stromverstärkung im Vergleich zur Verwendung eines einzelnen Transistors möglich. Es wird also nur ein sehr kleiner Steuerstrom benötigt, um vergleichsweise große Ströme schalten zu können.

Die Wahl fiel auf diese Treiberbausteine, da sie die komplette Ansteuerlektronik in einem sehr kleinen Gehäuse vereinen, so dass der Aufbau der gesamten Schaltung, im Vergleich zum Aufbau der einzelnen Komponenten, auf einer sehr geringen Fläche erfolgen kann. Zudem bieten sie den Vorteil, dass sie direkt mit den Logikpegeln angesteuert werden können. Der Treiberbaustein ULN 2803 verfügt über TTL (High-Pegel >2V) kompatible

Eingänge, wohingegen der Treiberbaustein ULN 2804 über PMOS (High-Pegel >14 V) kompatible Eingänge verfügt.

Da es sich bei den Ausgängen um Open-Collector-Ausgänge handelt, müssen die Signale jeweils über einen Pullup-Widerstand mit der gewünschten Ausgangsspannung verbunden werden, um ein verwertbares Signal zu erhalten. Durch diese Art der Beschaltung wird das Eingangssignal jedoch invertiert, da bei einem Low-Pegel am Eingang der Transistor nicht durchgeschaltet wird, wodurch das Signal über den Pullup-Widerstand auf die Ausgangsspannung gezogen wird. Bei einem High-Pegel wird der Transistor durchgeschaltet, wodurch das Signal auf Ground gezogen wird. Somit liegen bei einem Low-Pegel am Eingang am Ausgang die Ausgangsspannung und bei einem High-Pegel am Eingang am Ausgang 0 V an. Dieses Verhalten der Schaltung muss somit bei der späteren Interpretation der Signale berücksichtigt werden.

Als Pullup-Widerstände wurden 10 kOhm verwendet, um den Stromverbrauch möglichst gering zu halten. Die Ausgangssignale wurden mit Hilfe eines Oszilloskops auf ihr Schaltverhalten hin überprüft. Es zeigte sich, dass das Signal sauber ohne eine Verzerrung der Flanken gewandelt wurde.

Problem: Controller kann Signale der Pegelwandlung von 5 V auf 24 V nicht verarbeiten

Nach dem Anschluss an den Controller zeigte sich jedoch schnell, dass die Pegelwandlung von 24 V auf 5 V zwar problemlos funktionierte, jedoch die Pegelwandlung von 5 V auf 24 V keine für den Controller verwertbaren Signale lieferte. Es zeigte sich, dass die direkt an den Eingängen des Controllers gemessene Spannung ein viel zu geringes Spannungsniveau besaß, so dass die benötigten 11 V zur Detektion eines High-Pegels nicht erreicht wurden. Da dieses Verhalten am Oszilloskop nicht erkennbar war, musste der Spannungsabfall in der internen Verschaltung der Eingänge des Controllers begründet sein. Um das Spannungsniveau anzuheben, wurden die ursprünglich verwendeten 10 kOhm Pullup-Widerstände durch 1 kOhm Pullup-Widerstände ersetzt. Danach wurde das Signal dann sauber vom Controller erkannt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit stellte sich dann jedoch heraus, dass die Signale nur solange sauber erkannt werden, wie die Spannung über 23,7 V liegt. Sinkt die Spannung unter dieses Niveau, wird die Pegelwandlung von 5 V auf 24 V nicht mehr sauber vom Controller erkannt, da das an den Eingängen liegende Spannungsniveau wieder zu gering ist. Da im späteren Fahrbetrieb die Versorgungsspannung jedoch bis auf 18 V absinken kann, ist diese Schaltung leider aufgrund der internen Beschaltung der Controllereingänge nicht für den Einsatz im

Fahrzeug geeignet. Man könnte zwar die Pullup-Widerstände weiter verkleinern, jedoch steigt damit auch der Stromverbrauch dramatisch an. Versuche zeigten, dass ein Pullup-Widerstand von maximal 100 Ohm hätte eingesetzt werden dürfen, um auch bei 18 V (Kapitel 4.1.7.2) noch ein sauberes Signal am Eingang zu erhalten. Bei drei zu wandelnden Signalen hätte dies jedoch einen Stromverbrauch von bis zu 756 mA im durchgeschalteten Zustand der Transistoren bedeutet, was für den Gesamtstromverbrauch (Kapitel 5.5) absolut inakzeptabel war. Zudem vertragen die Treiberbausteine nur einen Schaltstrom von maximal 500 mA.

Da die Probleme offensichtlich durch die Pullup-Widerstände in Kombination mit der internen Verschaltung der Eingänge verursacht wurden, musste somit eine alternative Schaltung für die Pegelwandlung von 5 V auf 24 V gefunden werden, die ohne Pullup-Widerstand auskommt.

Die verwendete Schaltung (Abbildung 40) wurde einem Beitrag [28] im Forum <http://www.mikrocontroller.net> entnommen. Da sie bereits für die richtigen Spannungsniveaus ausgelegt war, mussten keine Modifikationen vorgenommen werden.

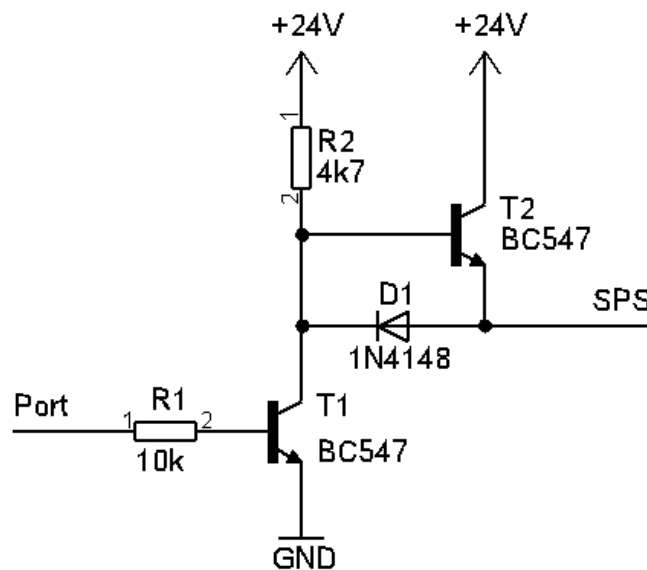


Abbildung 40: Schaltung für Pegelwandlung von 5 V auf 24 V [28]

Die Schaltung besteht aus zwei hintereinander geschalteten Transistoren. Liegt am Eingang (Port) kein Signal an, ist Transistor 1 (T1) nicht durchgesteuert. Durch den Pullup-Widerstand an der Basis von Transistor 2 (T2) steuert dieser durch und am Ausgang (SPS) liegen 24 V an. Liegt nun am Eingang ein High-Pegel an, steuert der Transistor 1 durch, wodurch die Basis von Transistor 2 auf Ground gezogen wird. Transistor 2 steuert somit nicht mehr durch, der Ausgang wird auf Ground gezogen. Somit invertiert auch diese Schaltung das Eingangssignal.



Mit der neuen Schaltung erhält man ein sauberes Eingangssignal, unabhängig von der Versorgungsspannung oder einem erhöhtem Stromverbrauch.

5.4 Spannungsmessung

Der netX besitzt zwei 10 bit Analog-Digital-Wandler mit jeweils vier schaltbaren Kanälen. Von jedem Board sind jeweils die ersten drei Kanäle des zweiten AD-Wandlers auf die äußeren Anschlussklemmen geführt. Über sie werden sowohl die Spannung des Fahrakkus wie auch die Spannung der Controllerakkus von beiden Controllern parallel gemessen und die Ergebnisse zur Kontrolle untereinander kommuniziert. Die Spannung des Antriebsakkus wird über den ersten Kanal, die Spannung der Controllerakkus über den zweiten Kanal gemessen.

An die Eingänge kann eine Spannung zwischen 0 V und 10 V angeschlossen werden. Da die Akkuspannung des Fahrakkus im voll geladenem Zustand maximal 8,4 V (Kapitel 4.1.7.1) beträgt, kann die Spannung direkt und ohne Spannungsteiler an die Eingänge gelegt werden. Anders sieht es bei den Controllerakkus aus. In voll geladenem Zustand besitzen sie eine Spannung von 25,2 V (Kapitel 4.1.7.2) und liegen somit deutlich über den Spezifikationen der Eingänge. Somit können sie nur über einen zusätzlichen Spannungsteiler (Abbildung 41) angeschlossen werden.

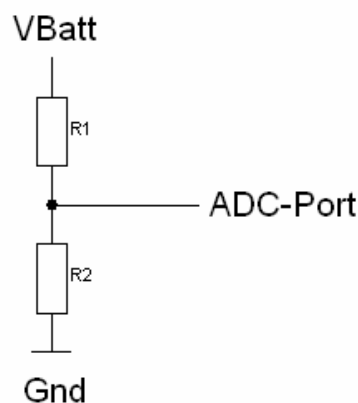


Abbildung 41: Spannungsteiler

Für den Spannungsteiler wurden zwei Widerstände mit $R_1 = 8,2 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$ verwendet. Daraus ergibt sich für die Spannung, die am Eingang des ADC abfällt, ein Faktor

$$\text{von } 0,3643 \left(U_{ADC-Port} = U_{Batt} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{Batt} \times \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{8,2 \text{ k}\Omega + 4,7 \text{ k}\Omega} = U_{Batt} \times 0,3643 \right).$$

Das bedeutet, dass eine gemessene Spannung von 3,643 V einer Batteriespannung von 10 V gegenübersteht. Die maximal messbare Spannung liegt so bei 36,43 V.

Die ersten Messungen nach Anschluss des Spannungsteilers zeigten jedoch schnell, dass die über den Faktor berechnete Spannung weit unter der real anliegenden Spannung lag. Dies lag jedoch nicht an einem falsch berechneten Faktor oder einer falschen Umrechnung, sondern an der am Eingang des ADC-Ports anliegende Spannung. Diese fiel viel geringer aus, als dass sie alleine durch den verwendeten Spannungsteiler hätte verursacht werden können. Nach der Durchsicht der Schaltpläne des Controllers zeigte sich, dass das Problem in der internen Verschaltung der Eingänge begründet lag. In Abbildung 42 ist diese mit dem extern angeschlossenen Spannungsteiler dargestellt.

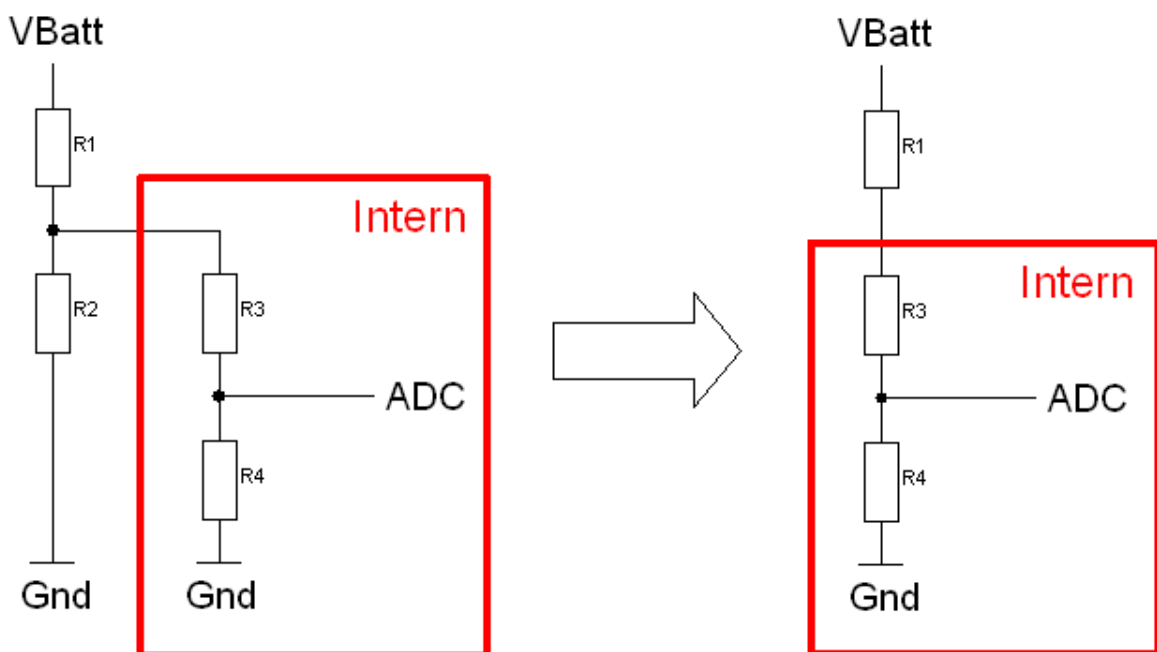


Abbildung 42: Spannungsteiler mit interner Verschaltung (links) neue Verschaltung (rechts)

Der AD-Wandler des Boards kann nur bis zu einer maximalen Spannung von 2,5 V messen. Zur Messung einer externen Spannung von bis zu 10 V wird intern ebenfalls ein Spannungsteiler verwendet. Dadurch wird der extern angelegte Spannungsteiler zu einem belasteten Spannungsteiler (Abbildung 42 links), wodurch sich die Berechnung des Spannungsteilers wesentlich ändert.

Der Widerstand R2 befindet sich parallel zu den in Reihe geschalteten internen Widerständen R3 und R4. Der daraus resultierende Ersatzwiderstand R_E lässt sich wie folgt berechnen:

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} = \frac{R_3 + R_4 + R_2}{R_2 \times (R_3 + R_4)} \Rightarrow R_E = \frac{R_2 \times (R_3 + R_4)}{R_3 + R_4 + R_2}$$

Mit dem Ersatzwiderstand gilt jetzt die normale Formel für den Spannungsteiler wieder, so dass zur Berechnung der Spannung am ADC-Port folgende Formel gilt:

$$U_{ADC-Port} = U_{Batt} \times \frac{R_E}{R_1 + R_E} = U_{Batt} \times \frac{\frac{R_2 \times (R_3 + R_4)}{R_3 + R_4 + R_2}}{R_1 + \frac{R_2 \times (R_3 + R_4)}{R_3 + R_4 + R_2}} = U_{Batt} \times \frac{\frac{R_2 \times (R_3 + R_4)}{R_3 + R_4 + R_2}}{\frac{R_1 \times (R_3 + R_4 + R_2) + R_2 \times (R_3 + R_4)}{R_3 + R_4 + R_2}}$$

$$U_{ADC-Port} = U_{Batt} \times \frac{(R_2 \times (R_3 + R_4)) \times (R_3 + R_4 + R_2)}{(R_3 + R_4 + R_2) \times (R_1 \times (R_3 + R_4 + R_2) + R_2 \times (R_3 + R_4))}$$

$$U_{ADC-Port} = U_{Batt} \times \frac{R_2 \times (R_3 + R_4)}{R_1 \times (R_3 + R_4 + R_2) + R_2 \times (R_3 + R_4)}$$

$$U_{ADC-Port} = U_{Batt} \times \frac{R_2 R_3 + R_2 R_4}{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_2 R_4}$$

Durch Einsetzen der bekannten Werte der Widerstände mit $R_1 = 8,2 \text{ kOhm}$, $R_2 = 4,7 \text{ kOhm}$, $R_3 = 6,8 \text{ kOhm}$ und $R_4 = 2,2 \text{ kOhm}$.

$$U_{ADC-Port} = U_{Batt} \times 0,2735$$

Somit fällt der Faktor für den belasteten Spannungsteil 0,0908 unter den des unbelasteten Falls. Eine Batteriespannung von 10 V entspricht somit nicht mehr einer Spannung von 3,643 sondern von 2,735 V am ADC-Port.

Durch den internen Spannungsteiler kann der externe Spannungsteiler auch durch einen einzelnen Widerstand ersetzt werden (Abbildung 42 rechts). Der einzelnen Widerstand R_1 ist somit in Reihe zu R_3 geschaltet, wodurch sich deren Widerstände addieren. Das beeinflusst somit direkt das Teilungsverhältnis des internen Spannungsteilers. Dabei gilt, je größer der Widerstand von R_1 desto weniger Spannung fällt am ADC ab, wodurch größere externe Spannungen gemessen werden können.

Für die Spannungsmessung der Controllerspannung wird ein Widerstand von $R_1 = 20 \text{ kOhm}$ verwendet. Somit ergibt sich für den neuen Umrechnungsfaktor ein Wert von 0,0759

$$(U_{ADC} = U_{Batt} \times \frac{R_4}{R_1 + R_3 + R_4} = U_{Batt} \times \frac{2,2 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega + 6,8 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = U_{Batt} \times 0,0759).$$

Das bedeutet, dass eine von ADC gemessene Spannung von 0,759 V einer Batteriespannung von 10 V gegenübersteht. Da am ADC eine maximale Spannung von 2,5 V anliegen darf, ergibt sich somit eine maximal messbare Spannung von 32,95 V.

Als Ergebnis einer ADC-Messung erhält man je nach anliegender Spannung einen Wert zwischen 0 und 1023 (10 bit Auflösung). Der Wert 0 entspricht dabei einer am ADC gemessenen Spannung von 0 V und der Wert 1023 der maximalen Spannung von 2,5 V. Das

entspricht einer Auflösung von 2,4438 mV pro Messwert. Wie schon erwähnt befindet sich zwischen dem externen Eingang und dem ADC-Port ein interner Spannungsteiler, der es erlaubt, eine externe Spannung von 10 V anzulegen. Dieser ist so dimensioniert, dass jeder Messwert des ADC einer externen Spannung von 10 mV entspricht. Für die Spannung des Fahrakkus bedeutet dies, dass der Messwert des ADC mit zehn multipliziert werden muss um seine Spannung in mV zu erhalten.

Für die Controllerakkus gilt dieser Umrechnungsfaktor nicht, da wie oben beschrieben der Vorwiderstand am Eingang den internen Spannungsteiler verändert. Hier entspricht ein Messwert des ADC von 1023 einer extern angelegten Spannung von 32,95 V. Dies entspricht einer Auflösung von 32,2092 mV pro Messwert. Das bedeutet, dass der Messwert des ADC mit einem Faktor von 32,2092 mV multipliziert werden muss, um so auf die Spannung der Controllerakkus zu kommen.

5.5 Stromverbrauch

Um den Stromverbrauch der einzelnen Komponenten abschätzen zu können, wurde beim Testen der einzelnen Komponenten jeweils der Stromverbrauch über ein Multimeter ermittelt. Im Einzelnen wurden folgende Werte ermittelt:

Summer:	18,54 mA	bei 24 V
Rundumleuchte:	72 mA	bei 8 V
	24 mA	bei 24 V
Relais + Spannungswandlung:	121 mA	bei 24 V
Pegelwandlung:	42 mA	bei 24 V
Laserscanner:	370 mA	bei 24 V (Betrieb)
	422 mA	bei 24 V (Startphase)
Controller:	144mA	bei 24 V

Das ergibt rechnerisch einen konstanten Stromverbrauch von 677 mA bei 24 V plus einen variablen Anteil von 43 mA bei 24 V bei Aktivierung des Summers und der Rundumleuchte. Der erhöhte Stromverbrauch des Laserscanners kann vernachlässigt werden, da dieser nur für ungefähr 5 s beim Einschalten des Modells auftritt.

Der Gesamtverbrauch des Systems wurde zudem nach der Fertigstellung separat gemessen, um die rechnerischen Werte zu bestätigen. Mit gemessenen 687 mA bei 24 V liegt das Ergebnis bis auf 10 mA am rechnerischen Wert. Dieser leicht erhöhte Stromverbrauch kann auf Leitungswiderstände oder in der Rechnung nicht berücksichtigte Komponenten, wie zum Beispiel die Drehgeber, zurückgeführt werden. Die Laufzeit lässt sich über folgende Formel berechnen:

$$t = \frac{C}{I} = \frac{8Ah}{0,687A} = 11,65h$$

Die theoretische Einsatzzeit unter Verwendung von 8 Ah Akkus beläuft sich somit auf 11,65 h und liegt damit deutlich über den Anforderungen eines Messtages von durchschnittlich Einsatzdauer acht Stunden Einsatzdauer.

6 Software

Im folgenden Kapitel wird die Software des Demonstrators im Einzelnen dargestellt. Dabei wird zunächst ein Überblick über die generelle Struktur des Programms gegeben. Anschließend werden dann einige spezielle Programmteile genauer erläutert.

Zur Erzeugung der Projektstruktur wurde das Programm StartEasy in der derzeit aktuellsten Version 1.3.0011 verwendet. Als Entwicklungsumgebung wurde das Programm HiTOP52-ARM in der Version 05.20.0310 eingesetzt. Beide Programme stammen von der Firma Hitex Development Tools GmbH und wurden speziell für die Programmierung von ARM-Mikrocontrollern entwickelt.

Bei der Programmierung wurden verschiedene Dokumentationen zum netX verwendet. Sie sind unter den Quellen [14] bis [17] zu finden.

6.1 Programm

Auf dem verwendeten Sicherheitsboard (Kapitel 4.1.5) stehen zwei voneinander unabhängige Recheneinheiten für die Programmierung zur Verfügung. Zur Erhöhung der Sicherheitsintegrität der SAMS-Komponente durch Redundanz besteht die Anforderung das SAMS-Sicherungsprogramm auf beiden Recheneinheiten parallel ablaufen zu lassen. Die dabei berechneten Ergebnisse werden zum Vergleich untereinander ausgetauscht. Diese Redundanz der Software musste, bei der Integration in den Demonstrator beibehalten werden, so dass letztlich auf beiden Recheneinheiten bis auf kleine Ausnahmen das gleiche Programm abläuft. Aufgrund der Hardwarevoraussetzungen, die nicht alle Signale auf beiden Recheneinheiten zur Verfügung stellt, ist es außerdem nicht nur notwendig die Rechenergebnisse sondern ebenfalls die Inputs der SAMS-Komponente (Geschwindigkeit, Laserscan) zwischen den Recheneinheiten auszutauschen.

Die in Abbildung 43 dargestellte Programmstruktur ist für beide Recheneinheiten identisch. Es ergeben sich nur Unterschiede in den einzelnen Unterpunkten, die in Tabelle 4 aufgezeigt sind.

Der Wesentliche Programmablauf sieht wie folgt aus. Nach dem Start des Controllers wird dessen Interruptbehandlung zunächst deaktiviert, um anschließend die ersten Initialisierungen durchzuführen. In dieser ersten Initialisierungsphase werden unter anderem die Interrupts konfiguriert, da dies nur bei ausgeschalteten Interrupts durchgeführt werden kann. Zusätzlich werden hier auch zeitkritische Initialisierungen durchgeführt, die zwingend direkt nach dem

Systemstart ausgeführt werden müssen. Danach werden die Interrupts wieder freigegeben und anschließend in einer zweiten Initialisierungsphase alle weiteren Initialisierungen durchgeführt, die bei aktivierten Interrupts durchgeführt werden können oder auch müssen. Während dieser und aller folgenden Phasen kann durch auftretende Interrupts der Programmablauf kurzzeitig durch die Interruptroutine blockiert werden.

In der sich nun anschließenden Verbindungsaufbauphase wird zu Beginn auf das Bestehen einer physischen Verbindung der beiden intern verschalteten Ethernetcontroller von Controller A und B gewartet. Danach wird auf Controller A noch zusätzlich die TCP-Verbindung zum Laserscanner aufgebaut und die beiden Controller synchronisieren ihren Programmablauf durch den Austausch eines Paketes. In der nun folgenden dritten und letzten Initialisierungsphase werden noch letzte zeitkritische Initialisierungen vorgenommen, die erst kurz vor Beginn der Hauptschleife gestartet werden dürfen. Nachdem nun erfolgtem Abschluss aller Initialisierungen wird das eigentliche Hauptprogramm in einer Endlosschleife gestartet.

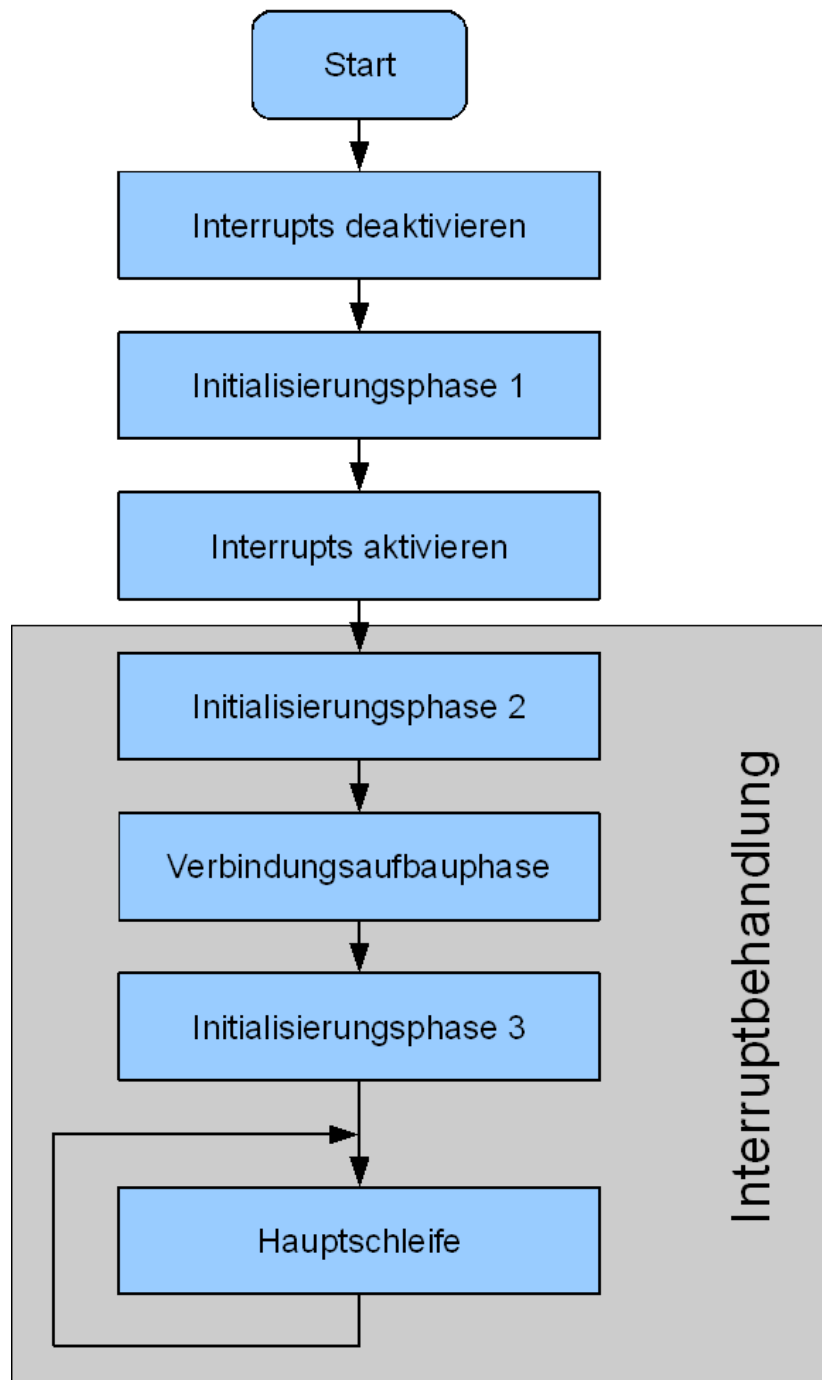


Abbildung 43: Programmstruktur

Phase	Controller A	Controller B
Initialisierung 1	GPIOs initialisieren	
	Motoren Neutralstellung senden	
	Ethernetschnittstelle init. (Teil 1) -> Hardware init.(PHYs, xMAC, xPEC)	Ethernetschnittstelle init. (Teil 1) -> Hardware init.(PHYs, xMAC, xPEC)
Initialisierung 2	Ethernetschnittstelle init. (Teil 2) -> Netzwerkparameter (MAC Adresse)	Ethernetschnittstelle init. (Teil 2) -> Netzwerkparameter (MAC Adresse)
	Input initialisieren	Input initialisieren
	Output initialisieren	Output initialisieren
	TCP-Stack initialisieren	
	SAMS init. (Schutzfelder berechnen)	SAMS init. (Schutzfelder berechnen)
Initialisierung 3	Neutralstellung der Fernbedienung messen und speichern	
	Encoder initialisieren	Encoder initialisieren

Tabelle 4: Bedeutung der drei Initialisierungsphasen

Der Unterschied in den einzelnen Initialisierungsphasen von Controller A und B entsteht durch die zusätzliche Steuerungsaufgabe von Controller A im Vergleich zu Controller B. Zudem besitzt Controller B nicht die Möglichkeit auf alle Schnittstellen zuzugreifen. Da die Steuerung des Fahrzeugs nicht sicherheitsrelevant ist, ist es aber auch nicht notwendig die Steuerung auf beiden Controllern zu berechnen.

In der ersten Initialisierungsphase werden somit nur auf Controller A die für das Empfangen und Erzeugen der PPM-Signale nötigen GPIOs (General Purpose Input Output) des Controllers konfiguriert. Da die Erfassung der PPM-Signale Interrupts voraussetzt, muss diese Konfiguration zwingend vor der Aktivierung der Interrupts geschehen. Zusätzlich wird von Controller A gleich zu Beginn die Neutralstellung für die Ansteuerung der Motoren gesendet, da der für die Steuerung zuständige Fahrtregler (Kapitel 4.1.6) gleich nach dem Einschalten das anliegende Signal für den weiteren Verlauf als Neutralstellung interpretiert. Die nun folgende erste Initialisierung der Etherneyschnittstelle erfolgt auf beiden Controllern gleichermaßen, da sie für deren interne Kommunikation zuständig ist. In diesem ersten Schritt werden nur die benötigten Hardwarekomponenten initialisiert.

Nachdem nun die Interrupts aktiviert sind, erfolgt auf beiden Controllern der zweite Teil der Initialisierung der Etherneyschnittstelle zu Beginn der zweiten Initialisierungsphase. Dabei werden unter anderem die MAC Adresse und verschiedene Netzwerkparameter gesetzt. Darauf folgt eine Initialisierung verschiedener für die Kommunikation benötigter Variablen. Der für die Kommunikation mit dem Laserscanner benötigte TCP-Stack wird anschließend wiederum nur auf Controller A initialisiert, da auf die zweite Etherneyschnittstelle von Controller B kein externer Zugriff möglich ist. Auf beiden Controllern folgt nun die Berechnung der Schutzfelder der SAMS-Software, da zum jetzigen Zeitpunkt eine

Kommunikation zwischen Konfigurationsprogramm und Sicherungskomponente noch nicht realisiert ist. Aufgrund der Menge und Komplexität der Berechnungen dauert dieser Vorgang etwa drei Minuten.

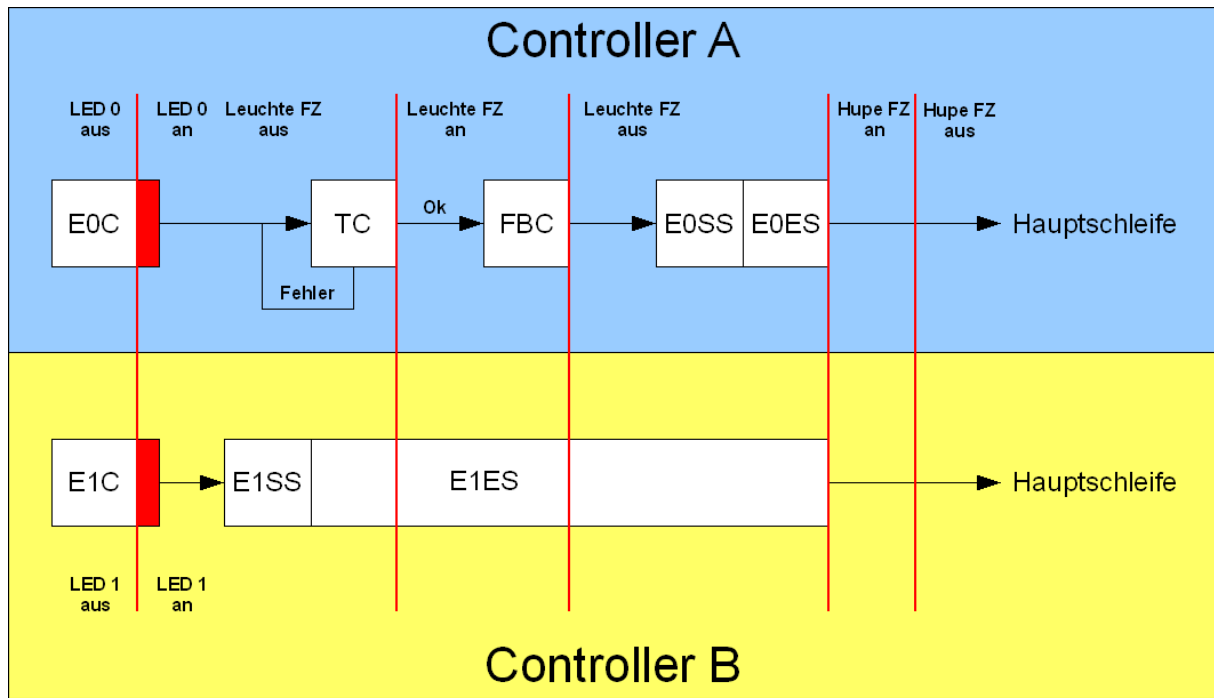
In der dritten und letzten Initialisierungsphase werden schließlich auf Controller A die Signale des Empfängers der Fernsteuerung eingelesen und als Neutralstellung abgespeichert. Zuletzt werden dann noch die Encodereingänge beider Controller initialisiert. Dies geschieht erst kurz vor dem Start des Hauptprogramms, da nach dem Start die Funktion zur Berechnung der Geschwindigkeit jede Sekunde mindestens einmal aufgerufen werden muss, damit keine falschen Messwerte entstehen.

6.1.1 Verbindungsaufbau

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Ablauf der Synchronisation (Abbildung 44) der beiden Controller untereinander näher beschrieben. Dazu werden zum besseren Verständnis der nachfolgenden Abbildung zunächst die für eine bessere Übersicht verwendeten Abkürzungen in Tabelle 5 erläutert.

Abkürzung	Bedeutung
EiC	Controller i wartet auf (physikalische Ethenetverbindung (blockierend))
TC	TCP Connect (blockierend)
FBC	Fernbedienung Connect (blockierend)
EiSS	Ethernetpaket senden-Start auf Controller i
EiES	Ethernetpaket empfangen-Start auf Controller i (blockierend)

Tabelle 5: Abkürzungen



Warte 1 Sekunde

Abbildung 44: Ablauf der Synchronisation der beiden Controller

Zu Beginn warten beide Controller darauf, dass eine physikalische Verbindung der beiden intern verschalteten Ethernetschnittstellen erfolgt. Nachdem die physikalische Verbindung etabliert ist, warten beide Controller eine Sekunde lang, um der Ethernet-Hardware die nötige Zeit für die Initialisierung zu geben. Ohne diese Wartezeit kann es am Anfang zu Paketverlusten kommen. Nachdem nun auch die Hardware beider Controller initialisiert ist, sendet Controller B das erste Paket an Controller A und blockiert danach, bis auch Controller A ein Paket geschickt hat.

Controller A hingegen initialisiert nach der erfolgreich hergestellten internen physikalischen Verbindung, den TCP-Stack, um die Messdaten des Laserscanners empfangen zu können. Nach der Initialisierung wird versucht eine Verbindung zu etablieren. Bei keiner oder einer fehlerhaften Verbindung wird der Verbindungsaufbau solange neu gestartet, bis eine erfolgreiche Verbindung hergestellt wurde. Um den erfolgreichen Aufbau der Verbindung zu signalisieren wird im Anschluss die Rundumleuchte des Fahrzeuges aktiviert. Das ist gleichzeitig das Signal für den Benutzer die Fernsteuerung einzuschalten, damit Controller A in der Lage ist, die gesendete Neutralposition der einzelnen Kanäle (Initialisierungsphase 3) zu messen und zu speichern. Nachdem Controller A die Neutralpositionen erfolgreich

gespeichert hat, wird die Rundumleuchte wieder ausgeschaltet. Da nun Controller A alle Initialisierungen vorgenommen hat, sendet auch er ein Ethernetpaket an Controller B.

Nachdem Controller B das Paket empfangen hat, kann er seinen blockierenden Zustand verlassen und in die Hauptschleife übergehen. Controller A geht ebenfalls in die Hauptschleife über, da er nach dem Senden des Paketes direkt aus seinem Empfangspuffer das von Controller B gesendet Paket auslesen kann. Dies erklärt außerdem die Bedeutung der Wartezeit am Anfang der Synchronisation. Würde diese fehlen, könnte das erste Paket, das gleich zu Beginn von Controller B gesendet wird, verloren gehen, falls Controller A noch nicht vollständig initialisiert und deshalb noch nicht in der Lage ist, das Paket zu empfangen und in seinem Empfangspuffer zu speichern. Controller B geht danach wie schon beschrieben in den blockierenden Zustand und verlässt diesen erst wieder, wenn er ein Paket von Controller A empfängt. Dieser befindet sich jedoch ebenfalls in einem blockierenden Zustand und wartet wiederum auf ein Paket von Controller B. In diesem Fall würde ein Deadlock entstehen.

Durch die Verwendung einer ausreichenden Wartezeit tritt diese Phänomen jedoch nicht auf und beide Controller beginnen gleichzeitig mit der Hauptschleife, in der sie sich dann regelmäßig synchronisieren. Um dem Benutzer und den übrigen Personen zu signalisieren, dass das Fahrzeug jetzt betriebsbereit ist, wird für einen kurzen Augenblick der Summer von Controller A eingeschaltet. Der Ablauf der Hauptschleife wird nun im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

6.1.2 Hauptschleife

Das Hauptprogramm wird direkt nach der Initialisierung aufgerufen und läuft von da an in einer Endlosschleife ab. Die dabei ablaufenden einzelnen Verarbeitungsschritte werden in Abbildung 45 illustriert. Die blau hinterlegten Kästen stehen für Verarbeitungsschritte, die von beiden Controllern durchgeführt werden, wohingegen die gelb hinterlegten Kästen Verarbeitungsschritte sind, die nur von Controller A durchgeführt werden.

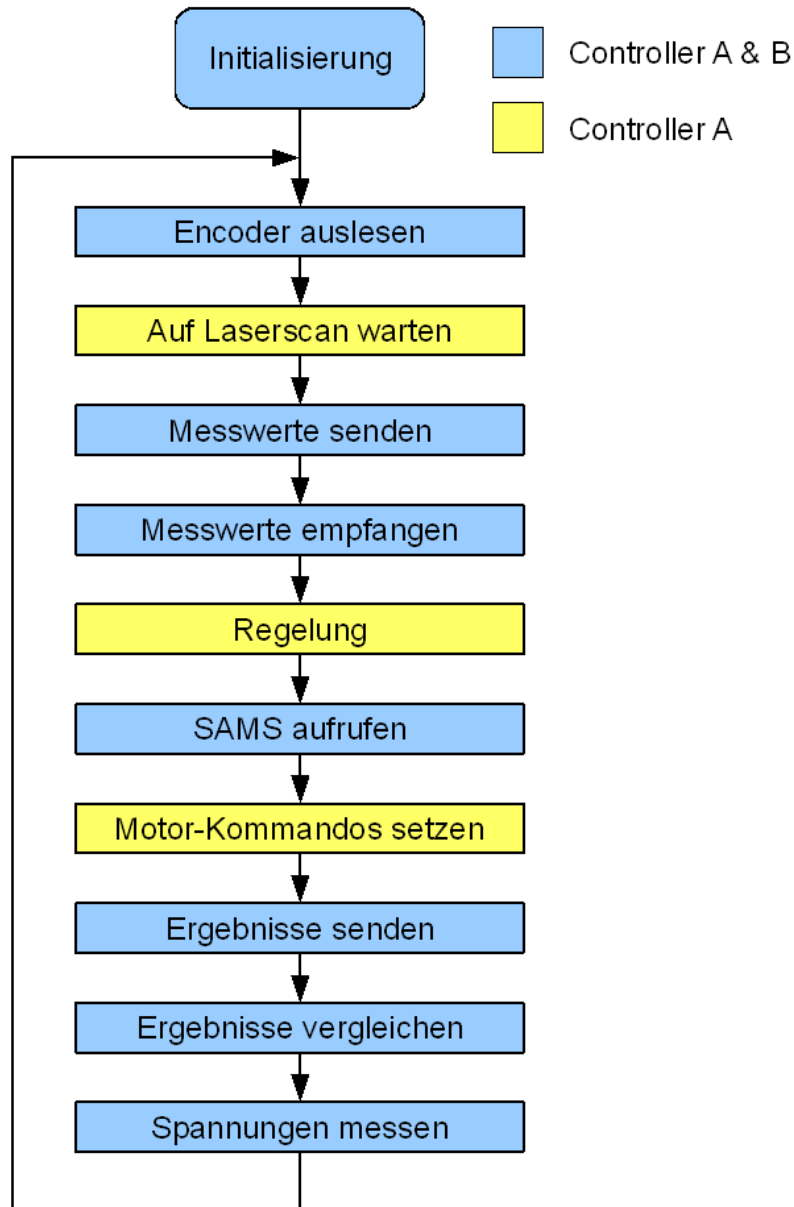


Abbildung 45: Hauptschleife

Zu Beginn der Hauptschleife liest jeder Controller die Position des an ihm angeschlossenen Drehgebers aus (näheres dazu ist in Kapitel 6.1.4 zu finden). Während Controller B bereits seine Messdaten verschickt und anschließend auf ein Paket von Controller A wartet, wartet dieser auf die Messdaten des Laserscanners. Nach dem Erhalt der Daten schickt auch Controller A ein Paket mit den kompletten Messdaten, also Laserscan und Drehzahlgebermeßwerte, an Controller B. Durch das blockierende Warten beim Empfangen des Pakets werden die beiden Controller an dieser Stelle wieder synchronisiert.

Nachdem beide Controller die Messdaten des jeweils anderen Controllers empfangen haben, berechnet Controller A die Ansteuerungssignale der Motoren. Anschließend wird von beiden Controllern der SAMS-Sicherungszyklus aufgerufen und berechnet ob ein Nothalt durchgeführt werden muss. Danach aktualisiert Controller A die Werte mit denen die Motoren angesteuert werden. Dabei werden die im Vorfeld berechneten Ansteuerungssignale mit einem Bremsbefehl überschrieben, falls ein Nothalt ausgelöst wurde.

Um die Redundanz des Systems zu nutzen, tauschen die beiden Controller die Ergebnisse der Berechnungen untereinander aus, um anschließend die erhaltenen Messwerte mit den eigenen Werten zu vergleichen. Stellt ein Controller abweichende Ergebnisse fest, ist das System nicht mehr sicher und ein Nothalt wird ausgelöst.

Abschließend überprüft jeder Controller für sich noch die Spannung der Fahrakkus und der Controllerakkus. Sollte einer der Controller einen kritischen Wert für die Spannung feststellen wird ebenfalls ein Nothaltssignal ausgelöst. Nach Stillstand des Fahrzeuges wird dieses dann zum Schutz der Akkus abgeschaltet. Falls kein Nothaltssignal ausgelöst wurde beginnt die Hauptschleife wieder von vorne.

In den nun folgenden Abschnitten werden die einzelnen Programmteile zum Auslesen und Setzen der Signale sowie die Berechnung der Steuerung im Detail beschrieben

6.1.3 Einlesen der Fernsteuersignale

Um den Fahrwunsch des Benutzers mit dem Controller erfassen zu können, muss der Controller in der Lage sein, die speziellen Signale des Empfängers dekodieren zu können. Wie schon ausführlich in Kapitel 4.1.4 beschrieben, ist die Stellung des Steuerknüppels der Fernbedienung dabei direkt in der Pulsbreite eines sich periodisch wiederholenden Rechtecksignals codiert. Um das Signal mit dem Controller interpretieren zu können, muss dieser die Länge der Pulsdauer des Signals messen.

Die speziellen GPIO-Eingänge (General Purpose Input Output) des Controllers ermöglichen es, die Länge der Pulsdauer, die sich üblicherweise zwischen 1 ms und 2 ms bewegt, mit einer hohen Genauigkeit zu messen. Ihr Vorteil gegenüber normalen Eingängen liegt in den zahlreichen Sonderfunktionen. So besitzt jeder GPIO ein eigenes Capture-Register. In diesem speziellen Register kann der Wert eines Timers beim Auftreten eines bestimmten Events am GPIO-Eingang automatisch gesichert werden. Das Event muss vorher konfiguriert werden und kann entweder eine steigende oder fallende Signalflanke sein. Zudem besteht die Möglichkeit bei auftreten eines Events ein Interrupt auszulösen, um eine zeitnahe Verarbeitung des Signals zu ermöglichen.

Da der Anfang eines Pulses durch eine steigende und das Ende durch eine fallende Flanke gekennzeichnet ist, kann diese Funktionalität der GPIOs für die Messung der Pulsbreite ausgenutzt werden. Dazu werden in der Initialisierung die betreffenden GPIOs so konfiguriert, dass sie als erstes auf eine steigende Flanke reagieren, um so den Beginn eines Pulses zu erfassen.

Tritt nun eine positive Flanke an einem der drei GPIOs auf, wird der zu dem Zeitpunkt aktuelle Timerwert automatisch in das Capture-Register des betreffenden GPIOs geschrieben. Bei Auftreten einer positiven Flanke wird in der Abarbeitung des Interrupts lediglich der aktuelle Wert des Capture-Registers gespeichert und das Event, auf das beim nächsten Mal getriggert werden soll, auf eine negative Flanke geändert werden. Über die Pulsbreite kann an dieser Stelle noch keine Aussage getroffen werden, da der Puls gerade erst begonnen hat.

Löst der Interrupt nun bei einer fallenden Flanke aus, wurde bereits automatisch der Timerwert der steigenden Flanke durch den der fallenden Flanke ersetzt. Somit stehen zu diesem Zeitpunkt die Timerwerte vom Beginn und vom Ende des Pulses zur Verfügung. Durch eine einfache Subtraktion der beiden Werte lässt sich damit die Pulsbreite bestimmen. Dabei müssen auftretende Timerüberläufe beachtet werden. Außerdem wird der GPIO wieder so konfiguriert, dass er auf eine steigende Flanke reagiert.

Für die weitere interne Verarbeitung der Signale ist die Pulsbreite aber eher ungeeignet, da aus ihr nicht direkt auf die Stellung der Steuerknüppel der Fernbedienung geschlossen werden kann. Zum einen liegt das an der Verstellbarkeit der Neutralstellung an der Fernbedienung. Über einen kleinen Schalter kann die Pulsbreite Neutralposition vergrößert oder verkleinert werden, wodurch eine feste Interpretation nicht möglich ist. Zum anderen entsprechen die vom Empfänger erzeugten PPM-Signale nicht den Standardwerten. In unserem Fall erzeugt der Empfänger alle 19 ms Pulse die je nach Stellung der Steuerknüppel im Bereich von 1 ms bis 1,8 ms. Damit weichen sie doch deutlich von den Standard-Pulsbreiten von 1 ms bis 2 ms in einem Sendeintervall von 22,5 ms ab.

Um nun bei der weiteren Verarbeitung ein eindeutiges Signal zu haben wurde eine Funktion implementiert, die die gemessene Pulsbreite in einen Wertebereich zwischen -100 und +100 überführt. Dabei entspricht -100 unten/rechts, +100 oben/links und 0 der Neutralstellung. Für die Umrechnung müssen die minimale und die maximale Pulsbreite, sowie die Pulsbreite der Neutralstellung jedes einzelnen Kanals bekannt sein. Die mini- und maximale Pulsbreite ist dabei fest und nur von der Genauigkeit des Empfängers abhängig. In unserem Fall liegen die minimale Pulsbreite bei 1 ms und die maximale Pulsbreite bei 1,8 ms. Die Neutralstellung hingegen ist variabel und muss so bei jedem Start des Programms für jeden einzelnen Kanal ermittelt werden. Dazu wird davon ausgegangen, dass sich die Steuerknüppel während der Initialisierung alle in der Neutralstellung befinden. Ist dies nicht der Fall wird als Neutralposition die aktuelle Position des Steuerknüppels erfasst, wodurch eine gezielte Steuerung des Modells nicht mehr möglich ist.

Die Umrechnung einer gemessenen Pulsbreite X geschieht für alle Werte die kleiner oder gleich der Neutralstellung sind durch die Formel $Sig = \frac{(X - Neutral) \times 100}{Neutral - Min}$. Für alle Werte größer der Neutralstellung wird folgende Formel verwendet $Sig = \frac{(X - Neutral) \times 100}{Max - Neutral}$.

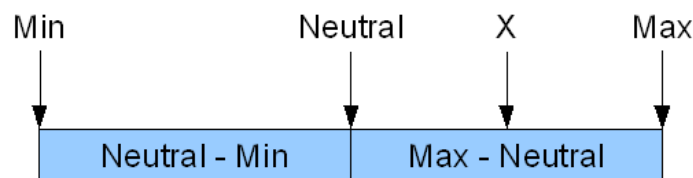


Abbildung 46: Aufteilung des PPM-Signals

6.1.4 Einlesen der Encoderschnittstelle

Der Controller verfügt über eine spezielle Encoderschnittstelle, die die speziellen Ausgangssignale von Drehgebern direkt verarbeiten kann. Dieses so genannte QAM-Signal und dessen Aufbau wurde bereits detailliert in Kapitel 2.1.1 beschrieben.

Die genaue Struktur des Signals ist für die Verwendung der Encoderschnittstelle jedoch nicht relevant, da der Controller das QAM-Signal bereits automatisch in einen Positionswert umwandelt, der einfach nur aus einem Register gelesen werden muss. Der Positionswert wird automatisch bei einer Rotation der Räder je nach Drehrichtung in- oder dekrementiert. Um aus dem Positionswert auf die zurückgelegte Distanz schließen zu können, muss der Umrechnungsfaktor von Positionswert in Distanz ermittelt werden. Dieser Faktor wurde in einem Fahrversuch ermittelt und kann in Kapitel 7.3 nachgeschlagen werden.

6.1.5 Ansteuern der Fahrtregler

Die Regelung der Geschwindigkeit der beiden Motoren erfolgt jeweils über einen elektronischen Fahrtregler (Kapitel 4.1.6). Beide werden durch den Controller direkt angesteuert, so dass dieser zu jedem Zeitpunkt die volle Kontrolle über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs besitzt.

Der Controller muss dafür zwei PPM-Signale (Kapitel 4.1.4) generieren, um so den Fahrtreglern die gewünschte Geschwindigkeit übermitteln zu können. Die Ansteuerung der Fahrtregler erfolgt, ebenso wie das Empfangen der Fernsteuerungssignale, über die GPIO-Pins des Controllers (General Purpose Input Output). Sie sind in der Lage ein PWM-Signal zu generieren, wenn sie als Ausgang definiert sind. Ein PWM-Signal ist im Prinzip eine allgemeinere Variante eines PPM-Signals. PWM-Signale sind im Wesentlichen sich periodisch wiederholende Rechtecksignale mit einer frei einstellbaren Pulsbreite und Periodendauer. Ein PWM-Signal mit einer festen Periodendauer von 22,5 ms und wählbaren Pulsbreiten von 1 ms bis 2 ms entspricht somit genau der Definition des PPM-Signals.

Damit die GPIO-Ausgänge das PPM-Signal generieren können, muss zunächst einer der Timer auf die gewünschte Periodendauer von 22,5 ms eingestellt und gestartet werden. Dieser inkrementiert dann fortlaufend seinen Zähler bis er das eingestellte Maximum von 22,5 ms erreicht und wieder bei null beginnt. Um nun ein PPM-Signal zu generieren, muss lediglich die gewünschte Pulsbreite in ein spezielles Threshold-Register geschrieben werden. Dabei verfügt jeder GPIO-Ausgang über ein eigenes Threshold-Register. Der Wert in diesem Register dient als Vergleichswert für den Zählerstand des Timers. Liegt der Zählerstand des Timers unter dem Schwellwert ist der Ausgang auf High geschaltet. Überschreitet der Timer den Schwellwert wird der Ausgang bis zum nächsten Reset des Timers auf Low geschaltet. Dieser Vorgang wird vom Controller automatisch wiederholt durchgeführt, so dass zur Aktualisierung des erzeugten PPM-Signals lediglich der Wert des Threshold-Registers aktualisiert werden muss.

6.1.6 Bewegungsmodell

Da das Fahrzeug über einen Differentialantrieb verfügt, müssen die Signale der Fernsteuerung für Geschwindigkeit und Lenkwinkel in entsprechende Motorkommandos umgerechnet werden. Aufgrund besonderer Gegebenheiten des Fahrzeuges stellte sich dies jedoch als ein komplexeres Problem heraus als zunächst vermutet wurde.

Aufgrund des zusätzlichen Gewichts durch die Komponenten, muss für Kurvenfahrten das kurveninnere Rad immer aktiv verzögert werden. Geschieht dies nicht fährt das Fahrzeug auch bei unterschiedlich starker Ansteuerung der Motoren der linken und rechten Räder weiter geradeaus. Zudem führt die spezielle Bremsfunktion des Fahrtreglers (Kapitel 4.1.6) zu unterschiedlichen Reaktionen auf gleiche Ansteuerungen.

Im Folgenden werden nun drei verschiedene Ansätze dargestellt, um aus den Signalen der Fernsteuerung Motorkommandos zu generieren.

Die ersten beiden Ansätze generieren die Motorkommandos dabei nur aus den Signalen der Fernsteuerung, da zum Zeitpunkt ihrer Implementation noch nicht die Möglichkeit bestand, die Werte des Drehgebers über die interne Ethernetschnittstelle auszutauschen.

Bei dem dritten Ansatz handelt es sich um eine aktive Regelung der Motoren unter Verwendung der Messwerte der Drehgeber. Aufgrund des am Ende der Arbeit aufgetretenen Problems beim Empfangen der Signale der Fernbedienung, welches noch in Kapitel 7.4 beschrieben wird, konnte der implementiert Regler nicht mehr am Modell getestet werden.

6.1.6.1 Kreuzmischer

Die Kreuzmischer-Funktion wurde nach dem Vorbild der im Modellbaubereich üblichen Lösung zur Steuerung von Modellen mit Differentialantrieb implementiert. Die Idee dabei ist, die Stellgröße der beiden Motoren aus je einem Anteil von Lenkung (Kanal1) und Geschwindigkeit (Kanal2) zu berechnen.

Die implementierte Funktion ist recht einfach strukturiert und besteht im Wesentlichen nur aus der Berechnung der Motorwerte anhand folgender Formeln:

$$motor_{links} = kanal2 + 2 \times kanal1 \quad motor_{rechts} = kanal2 - 2 \times kanal1$$

Da bei den Berechnungen Werte größer 100 oder kleiner -100 entstehen können, werden sie bevor sie auf die Motoren gegeben werden noch auf die Maximalwerte begrenzt. In der nun folgenden Abbildung 47 wird dargestellt, wie die Motoren bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Kanal2) in Abhängigkeit vom Lenkwunsch (Kanal1) angesteuert werden.

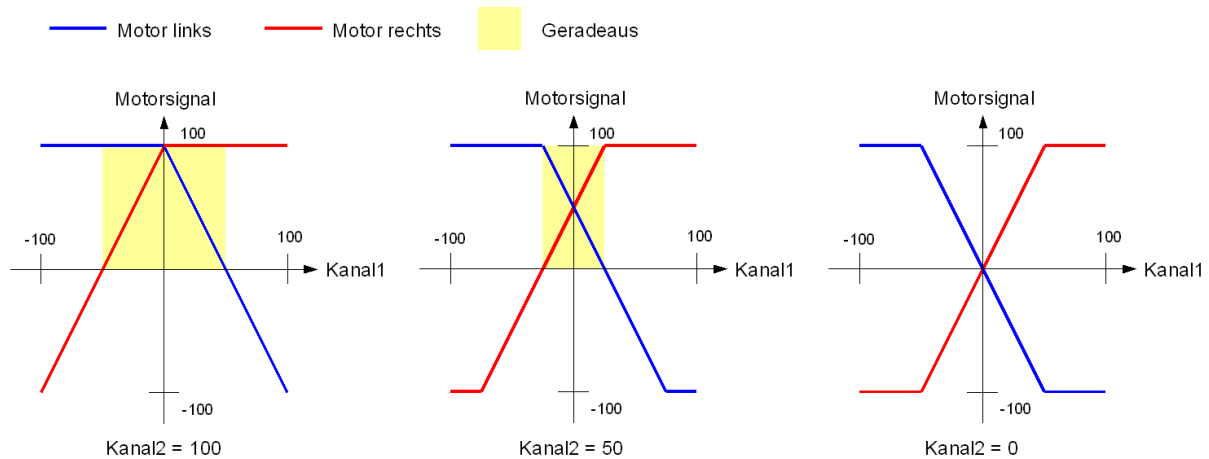


Abbildung 47: Kreuzmischersteuerung

Die Abbildung 47 zeigt drei Graphen für jeweils feste Werte der Geschwindigkeit (Kanal2): Vorwärtsbewegung mit Maximalgeschwindigkeit (100) und halber Maximalgeschwindigkeit (50) sowie Drehung auf der Stelle (0).

Die Graphen stellen die Werte mit denen die Motoren angesteuert werden in Abhängigkeit des Wertes von Kanal1 (Lenkwunsch) dar. Die blaue Kurve entspricht der Ansteuerung des linken Motors wohingegen die rote Kurve der Ansteuerung des rechten Motors entspricht. Der gelb hinterlegte Bereich soll dabei zeigen, in welchem Bereich das Fahrzeug aufgrund seiner Trägheit noch geradeaus fährt.

In der Abbildung ist zu erkennen, der Bereich für die Geradeausfahrt am größten ist, wenn die vom Fahrer gewünschte Geschwindigkeit maximal ist. Mit abnehmendem Geschwindigkeitswunsch verringert sich dieser Bereich stetig, bis er schließlich bei einem Geschwindigkeitswunsch von 0 nicht mehr existiert. Dadurch reagiert das Fahrzeug auf Lenkbefehle bei hohen Geschwindigkeiten nur träge, während bei niedrigen Geschwindigkeiten die Lenkbefehle schneller umgesetzt werden. Ist der Geschwindigkeitswunsch gar gleich 0, wird jeder Lenkwunsch sofort umgesetzt und das Fahrzeug dreht sich auf der Stelle.

Das Fahrverhalten wurde mit dem Fahrzeug getestet, brachte jedoch keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Hauptgrund dafür war, dass bei mittleren Geschwindigkeiten bei einem Lenkwunsch nicht nur das kurveninnere Rad verlangsamt sondern auch gleichzeitig das kurvenäußere Rad beschleunigt wurde. Da eine verzögernde Wirkung aber erst bei einer negativen Ansteuerung des Motors geschieht, beschleunigt das Fahrzeug bei Geschwindigkeitswünschen größer 50% zunächst auf die maximale Geschwindigkeit bevor es einlenkt. Um dieses problematische Kurvenverhalten zu umgehen wurde eine zweite nun im Folgenden beschriebene Variante der Ansteuerung entwickelt.

6.1.6.2 Zustandsbasierte Steuerung

Bei der zustandsbasierten Steuerung werden je nach Zustand von Kanal1 und Kanal2 die Stellgrößen der beiden Motoren auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt. Eine Übersicht über die Motorkommandos in Abhängigkeit der Zustände von Kanal1 und Kanal2 ist in der folgenden Tabelle 6 gegeben.

Kanal2	Kanal1	Motor links	Motor rechts
kleiner 0	kleiner 0	Kanal2	Kanal2
	0	Kanal2	Kanal2
	größer 0	Kanal2	Kanal2
0	kleiner 0	0	0
	0	0	0
	größer 0	0	0
größer 0	kleiner 0	Kanal2	Kanal1
	0	Kanal2	Kanal2
	größer 0	$(-1) \cdot \text{Kanal1}$	Kanal2

Tabelle 6: Steuersignale der Motoren in Abhängigkeit der Zustände von Kanal1 und Kanal2

Der mögliche Wertebereich von Kanal1 und Kanal2 von -100 bis +100 wird in die in Tabelle 7 dargestellten drei Bereiche eingeteilt.

Bereich	Kanal1	Kanal2
größer 0	links	vorwärts
gleich 0	neutral	stopp
kleiner 0	rechts	rückwärts

Tabelle 7: betrachtete Zustände

Die erste Entscheidung wird immer anhand des Zustandes von Kanal2 getroffen. Ist der Zustand von Kanal2 kleiner 0, das heißt der Fahrer möchte rückwärts fahren, werden die Motoren einfach mit dem Wert von Kanal2 angesteuert. Da das Fahrzeug bei Rückwärtsfahrten jedoch nicht über den Laserscanner abgesichert werden kann, wird die Geschwindigkeit auf einen Maximalwert begrenzt. Kanal1 hat dabei keinen Einfluss auf die gesetzten Motorsignale. Aus Sicherheitsgründen werden beim Zurücksetzen somit keine Lenkbefehle akzeptiert.

Ist der Zustand von Kanal2 gleich 0, das heißt der Fahrer will auf der Stelle stehen bleiben, dann werden die Motoren automatisch und unabhängig des Zustandes von Kanal1 auf 0 gesetzt.

Ist der Zustand von Kanal2 größer 0, das heißt der Fahrer möchte vorwärts fahren, muss zur Bestimmung der Steuersignale der Motoren zusätzlich der Zustand von Kanal1 berücksichtigt werden. Ist dieser gleich 0 bedeutet das, dass kein Lenkwunsch des Fahrers vorliegt, wodurch beide Motoren mit dem Wert von Kanal2 angesteuert werden können. Liegt ein Lenkwunsch vor (Wert von Kanal1 ungleich 0) wird das kurvenäußere Rad auf den Wert von Kanal2 gesetzt, um so eine vom Lenkeinschlag unabhängigen Wert zu haben. Um eine Kurvenfahrt zu ermöglichen muss das kurveninnere Rad verzögert werden. Da dies erst ab einem Motorsignal kleiner 0 passiert, wird der Motor des kurveninneren Rades mit einem zum Lenkeinschlag proportionalen negativen Wert angesteuert. Dadurch wird erreicht, dass auch bei kleineren Lenkeinschlägen eine Kurvenfahrt möglich ist.

Ähnlich dem Kreuzmischer zeigten die Fahrversuche jedoch keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Dies lag hauptsächlich in der Bremsfunktion des Fahrtreglers begründet. Beim ansteuern der Motoren mit einem Wert kleiner 0 verzögert der Fahrtregler zunächst den entsprechenden Motor. Nach einer gewissen Zeit endet diese Bremsung jedoch und der Motor wird mit einer negativen Spannung von Fahrtregler angesteuert. Dadurch steigt die Bremswirkung des Motors sprunghaft an. Ein konstantes fahren von Kurven bei gleich bleibendem Lenkeinschlag ist somit nicht möglich. Aufgrund der Bremsfunktion der Fahrtregler ist eine gezielte Steuerung ohne Informationen über die tatsächliche Geschwindigkeit der Räder nicht möglich. Um dieses Problem zu beheben, muss somit eine Regelung der Motoren unter Verwendung der Informationen der Drehgeber über die tatsächliche Geschwindigkeit der Räder erfolgen. Nachfolgend wird kurz der zu diesem Zweck implementierte Regler dargestellt.

6.1.6.3 Regelung über Drehgeber

Bei der nachfolgend beschriebenen Funktion zur Ansteuerung der Motoren über einen Regler handelt es sich um eine theoretische Betrachtung, da aufgrund der am Ende aufgetretenen Probleme mit dem Empfänger, die noch in Kapitel 7.4 beschrieben werden, ein praktischer Test der Funktion nicht mehr durchgeführt werden konnte.

Um den Begriff der Regelung von dem der Steuerung abzugrenzen wird zunächst die allgemeine Grundstruktur eines Regelkreises und deren Unterschied zu einer einfachen Steuerung erläutert. Die Grundstruktur eines Regelkreises ist in der nachfolgenden Abbildung 48 dargestellt.

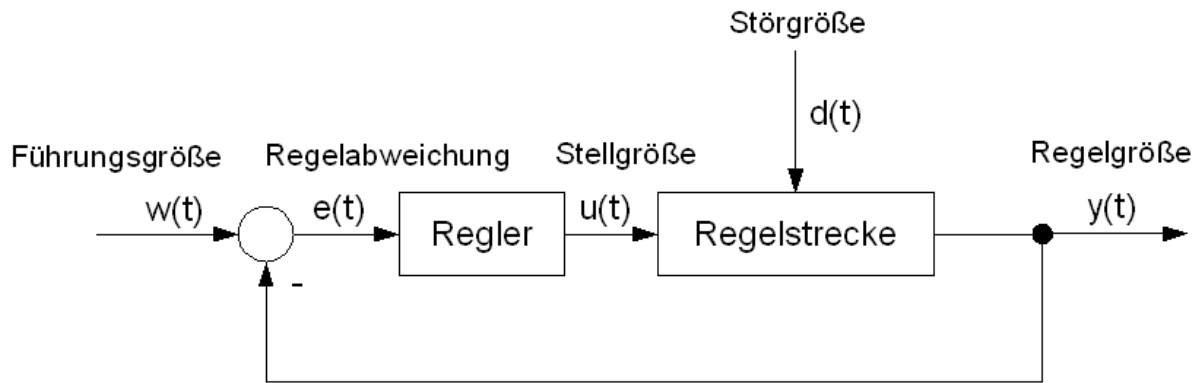


Abbildung 48: Grundstruktur eines Regelkreises[4]

Wie aus Abbildung 48 hervorgeht, hängt die Regelgröße $y(t)$ von der Stellgröße $u(t)$ und der Störgröße $d(t)$ ab. Die Störgröße beschreibt eine extern auftretende Störung, die von dem Regelkreis nicht beeinflusst werden kann. Das Ziel einer Regelung ist es die Regelgröße in jedem beliebigen Zeitpunkt t dem Wert der Führungsgröße $w(t)$ anzupassen, so dass im idealen Fall keine Abweichung zwischen ihnen auftritt ($y(t) = w(t)$). Um den Einfluss der Störgröße auf die Regelgröße zu kompensieren, muss der Regler seine Stellgröße $u(t)$ dementsprechend anpassen. Als Informationen erhält der Regler neben der gewünschten Ausgangsgröße $w(t)$, zusätzlich auch die zurückgeführte Regelgröße $y(t)$. Der Regler bestimmt aus der Differenz der Führungsgröße und der Regelgröße die Regelabweichung $e(t)$, also die Abweichung zwischen dem Sollwert $w(t)$ und der Istwert $y(t)$. Anhand dieser Regelabweichung beeinflusst der Regler die Stellgröße so, dass sich diese Differenz null annähert.

Der Unterschied von einer Regelung zu einer einfachen Steuerung liegt einzig in der fehlenden Rückführung der Regelgröße, wodurch eine Steuerung auch als offener Regelkreis bezeichnet werden kann. Seine Grundstruktur entspricht bis auf die fehlende Rückführung der Regelgröße der Struktur aus Abbildung 48. Der Steuerung steht somit nur der Sollwert $w(t)$ zur Verfügung, wodurch auch die Regelabweichung nicht bestimmt werden kann. Durch die der Steuerung nicht bekannte Regelabweichung, kann bei der Bestimmung der Stellgröße die Störgröße nicht berücksichtigt werden. Somit können auftretende Störungen von der Steuerung nicht erfasst und kompensiert werden, wodurch es zu einer bleibenden Regelabweichung kommt.

In unserem konkreten Fall sind die einzelnen Größen wie folgt definiert:

- $w(t)$ gewünschte Geschwindigkeit der Räder

- $u(t)$ Stellgröße der Motoren
- $d(t)$ Störung durch Trägheit des Modells und durch Bremsfunktion des Fahrtreglers
- $y(t)$ über die Drehgeber gemessene Geschwindigkeit der Räder

Für die Steuerung des Fahrzeuges wurde eine Funktion implementiert, die als Übergabeparameter die Sollgeschwindigkeit und die Istgeschwindigkeit erhält. Als Rückgabewert erhält man die nötige Änderung der Stellgröße des Motors. Bei dem implementierten Regler wurde ein PID-Regler gewählt, um eine schnelle Reaktion auf die auftretenden Störungen ermöglichen zu können. Der Regler wurde nach folgender Formel implementiert:

$$u(t) = \underbrace{k_p e(t)}_{P\text{-Anteil}} + \underbrace{k_I \int_0^t e(\tau) d\tau}_{I\text{-Anteil}} + \underbrace{k_D \frac{de(t)}{dt}}_{D\text{-Anteil}}$$

Über die Konstanten k_p, k_I, k_D kann bestimmt werden wie stark das proportionale, das integrale und des differentiale Verhalten des Reglers mit in die Regelung eingeht.

Der P-Anteil beeinflusst dabei die Stellgröße proportional zur Regelabweichung.

Der I-Anteil verändert die Stellgröße solange wie eine Regelabweichung auftritt.

Der D-Anteil verändert die Stellgröße besonders stark, bei sehr abrupten Änderungen in der Regelabweichung.

Eine genauere Betrachtung zu einem PID-Regler kann in [4] nachgelesen werden.

7 Experimente und Ergebnisse

7.1 Test der Belastbarkeit des Modells

Um vor der Bestellung des Bausatzes die Belastbarkeit des ausgewählten Modells in Bezug auf das zusätzlich erwartete Gewicht von ca. 4 kg zu testen, wurde im Vorfeld ein im Privatbesitz befindliches Modell mit 3,2 kg schweren Büchern beschwert (Abbildung 49). Beim Test-Modell handelt es sich um die Vorgängerversion, die noch unter dem Namen Rodeo durch die Firma Robbe vertrieben wurde. Bis auf die durch modernere elektrische Fahrtregler ersetzten mechanischen Fahrtregler haben sich sowohl die Materialien als auch der Aufbau nicht verändert. Somit bot der Fahrttest mit diesem Modell gute Anhaltspunkte über die Auswirkungen des zusätzlichen Gewichts auf das Modell.

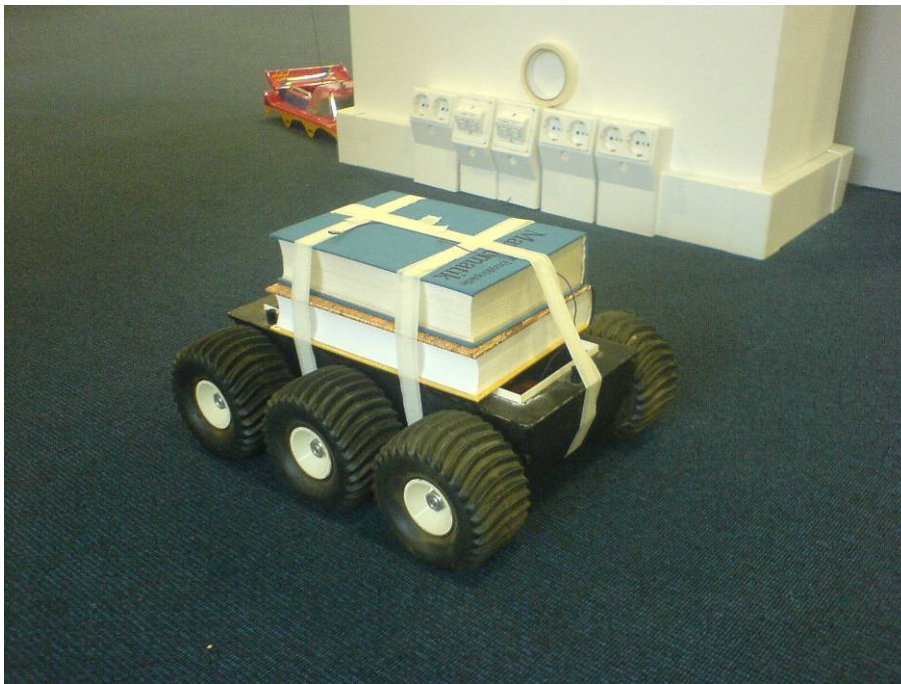


Abbildung 49: Fahrversuch zum Test der Belastbarkeit

Durch das zusätzliche Gewicht war rein äußerlich keine merkliche Veränderung bezüglich der Struktur feststellbar. Die anschließenden Fahrttests ergaben, dass durch das zusätzliche Gewicht die Kurvenfahrt etwas eingeschränkt wurde, da durch das hohe Gewicht die Reibung der Reifen auf dem Untergrund zugenommen hatte. Die Auswirkungen waren jedoch nicht so gravierend, als dass im späteren Fahrbetrieb mit nennenswerten Beeinträchtigungen

gerechnet werden musste. Zudem besteht bei dem späteren Modell die Möglichkeit, das Ansteuerungsverhalten der Motoren individuell je nach Lenkeinschlag durch den Controller zu steuern. So kann für die Kurvenfahrten die kurveninnere Seite stärker abgebremst oder die kurvenäußere Seite beschleunigt werden. Der Test zeigt, dass das Fahrzeug die Anforderungen erfüllt und wurde somit gekauft.

7.2 Test der Laufzeit des Antriebsakkus

Um eine Aussage über die spätere Laufzeit des Modells in Bezug auf den Antriebsakku machen zu können, wurde mit dem bis auf den fehlenden Controller und Controller-Akku fertigen Modell ein Fahrtstest unternommen. Aus der Testlaufzeit von 10 min und dem gemessenen Spannungsunterschied des Akkus vor und nach dem Test, sollte eine Prognose der Akkulaufzeit erstellt werden.

Der Antriebsakku wurde direkt mit den elektronischen Fahrtreglern über ein Y-Kabel verbunden, da durch den fehlenden Controller-Akku das Relais für den Antriebskreis noch nicht durchgeschaltet werden konnte. Durch den fehlenden Controller gestaltete sich die Steuerung des Modells allerdings relativ schwierig, da die Mischung der Kanäle fehlte. Im normalen Modell übernimmt diese Aufgabe entweder die Fernsteuerungsanlage, falls diese über einen eingebauten Kreuzmischer verfügt, oder ein zusätzliches Kreuzmischer-Modul zwischen Empfänger und Fahrtregler. Ein Kreuzmischer mischt bei einem Fahrzeug mit einem Differentialantrieb die beiden Kanäle der Fernsteuerung für die Geschwindigkeit und den Lenkwinkel, um die Signale zur Ansteuerung der einzelnen Motoren zu erhalten. Im fertigen Modell wird diese Aufgabe vom Controller übernommen. Da zum Fahrtstest aber wie schon erwähnt der Controller aufgrund der fehlenden Controller-Akkus nicht zu verwenden war, musste jede Antriebsseite über einen eigenen Kanal gesteuert werden. So wurde mit dem Steuerknüppel für „vor und zurück“ die linke Antriebsseite und mit dem Steuerknüppel für „links und rechts“ die rechte Antriebsseite gesteuert. Somit war eine rein intuitive Steuerung nicht möglich. Für den Fahrtstest war diese Steuerung jedoch ausreichend.

Zu Beginn des Fahrttests wurde die Spannung des Fahrakkus über ein Multimeter am Balancer-Anschluss gemessen. Diese lag zu Beginn des Fahrttests bei 8,03V, da der Akku nicht vollständig geladen war. Normalerweise besitzt der Akku im voll geladenen Zustand eine Spannung von 8,4V.

Während des sich anschließenden Fahrtstest wurde das Modell zehn Minuten lang stark beansprucht, um so eine möglichst gute Abschätzung der minimalen Laufzeit des Modells zu erhalten. Auf der beigelegten CD (Kapitel 9.3) befindet sich im Ordner „Videos“ ein kurzes Video des Fahrttests ([Fahrtstest.MOV](#)).



Abbildung 50: Fahrttest zur Bestimmung der Laufzeit der Antriebsakkus

Nach einer Fahrzeit von 10 Minuten betrug die Spannung des Antriebsakkus direkt nach Fahrtende noch 7,72V. Nach einer zweiten Messung eine Stunde später hatte sich die Spannung auf 7,76V stabilisiert. Somit lag der reale Spannungsverlust während der zehnminütigen Fahrt bei 0,27V. Der nutzbare Spannungsbereich des Lipo-Akkus liegt zwischen 6V und 8,4V. Bezogen auf die 0,27V Spannungsverlust in 10 Minuten bedeutet das für den nutzbaren Spannungsbereich von 2,4V eine Nutzungsdauer von ungefähr 90 Minuten. Da der Akku mehr als zwei Stunden zum Laden braucht, wurden nach dem Fahrttest zwei zusätzliche Antriebsakkus bestellt, um so eine lückenlose Versorgung auf Messen oder ähnlichen Veranstaltungen gewährleisten zu können.

7.3 Vermessung der Drehgeber

Um aus den Werten der Drehgeber auf die zurückgelegte Distanz schließen zu können, muss der Umrechnungsfaktor zwischen Position des Drehgebers und der zurückgelegten Distanz ermittelt werden. Dieser Faktor kann entweder aus dem Raddurchmesser berechnet werden oder in einem Fahrversuch gemessen werden.

Für die Berechnung benötigt man neben dem Raddurchmesser nur noch die Anzahl der Pulse, die der Drehgeber bei einer ganzen Umdrehung erzeugt. In unserem Fall liegt der Raddurchmesser bei 125 mm und der Drehgeber erzeugt 500 Pulse pro Umdrehung. Der Drehgeber ist direkt mit der Radachse verbunden. Somit entspricht eine Radumdrehung genau einer Umdrehung des Drehgebers. Um die zurückgelegte Distanz einer Radumdrehung zu bestimmen benötigt man den Umfang des Rades. Dieser liegt bei $U = \pi \times d = 392,6991$ mm. Eine Umdrehung des Drehgebers entspricht somit einer zurückgelegten Distanz von 392,7 mm. Der Controller inkrementiert die Position bei jeder ankommenden Flanke der Signale A und B. Pro Puls des Drehgebers wird die Position so je nach Drehrichtung um 4 in- oder dekrementiert. Die interne Position des Drehgebers verändert sich somit bei einer ganzen Umdrehung nicht um 500 sondern gleich um 2000. Einer zurückgelegten Distanz von 392,7 mm steht somit einer Positionsänderung von 2000 gegenüber. Daraus ergibt sich ein rechnerischer Faktor von 0,1964 mm pro Positionsänderung.

Bei diesem Wert handelt es sich jedoch nur um einen theoretischen Wert, da die Verringerung des Raddurchmessers durch das Gewicht des Fahrzeugs nicht berücksichtigt wird. Bessere Werte liefert ein Fahrttest, bei dem die Positionswerte in festen Abständen bestimmt werden.

Zur genaueren Bestimmung des Umrechnungsfaktors wurde eine kleine Teststrecke aufgebaut. Sie bestand aus fünf Schaumstoffwürfeln, die in einem Abstand von einem Meter entlang einer Linie ausgelegt wurden. Somit ergab sich eine Teststrecke von insgesamt vier Metern. An die Vorderkante des Würfels wurde ein Lineal angelegt, welches als Anschlagpunkt für die Räder des Modells diente, um so im weiteren Verlauf bei jeder Messung immer einen gleichen Bezugspunkt zu haben. Nach dem Ausrichten des Modells am ersten Würfel wurde die Messung gestartet. Anschließend wurde das Lineal an den zweiten Würfel angelegt und das Modell bis zum Kontakt der Räder mit dem Lineal geschoben. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich das Fahrzeug auf einer geraden Linie bewegte um so Abweichungen bei der zurückgelegten Strecke zu vermeiden. Nach dem Erreichen des

Bezugspunktes wurde der Positionswert des Drehgebers ausgelesen und notiert. Dieser Vorgang wurde dreimal wiederholt, so dass am Ende vier Messungen für die Distanz von einem Meter aufgenommen wurden. Da zu diesem Zeitpunkt die Positionswerte noch nicht unter den beiden Boards kommuniziert werden konnten, musste die gesamte Messung für das zweite Board wiederholt werden, um so auch die Werte der zweiten Seite zu erhalten. Die dabei aufgenommen Messwerte sind in Tabelle 8 dargestellt.

rechte Seite (Board A)		
Entfernung [m]	Messwert [pos]	Differenz
0	0	
1	5439	5439
2	10942	5503
3	16394	5452
4	21844	5450

linke Seite (Board B)		
Entfernung [m]	Messwert [pos]	Differenz
0	0	
1	60146	5390
2	54680	5466
3	49280	5400
4	43777	5503

Tabelle 8: Messwerte der Testfahrt

Zum Zeitpunkt der Testfahrt war die Messrichtung der linken Seite noch entgegen der Laufrichtung der Räder eingestellt, wodurch die Position kleiner statt größer wurde. Da bei diesem Test die relative und nicht die absolute Position von Interesse war, hat dies jedoch keinen Einfluss auf die Aussagekraft der Messergebnisse. Inzwischen wurde die Encoderschnittstelle des netX so konfiguriert, dass beide Boards identisch zu interpretieren Messwerte erhalten.

Die Messwerte zeigen eine gleich bleibende Differenz im Bereich von minimal 5390 und maximal 5503. Der Mittelwert über die Messungen der rechten Seite ergibt einen Wert von 5461 und der der linken Seite einen Wert von 5439,75. Daraus ergibt sich ein Mittelwert für alle Messwerte von 5450,375. Das bedeutet, dass sich die Position bei einer zurückgelegten Distanz von einem Meter um gerundete 5450 erhöht. Daraus ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 0,1835 mm pro Positionswert im Zähler. Damit liegt der gemessene Faktor um 0,0129 mm unter dem rechnerisch ermittelten Faktor von 0,1964 mm. Auf eine Radumdrehung bezogen hätte dies einen Fehler in der Distanz von 25,8 mm bedeutet.

7.4 Empfangsproblem

Gegen Ende der Arbeit traten vermehrt Probleme beim sauberen Einlesen der Signale des Empfängers durch den Controller auf. Diese äußerten sich in falsch gemessenen Pulsbreiten, die völlig außerhalb der Spezifikationen der PPM-Signale (Kapitel 4.1.4) lagen. Nach einer intensiven Überprüfung des Programmteils, der für das Einlesen der Signale zuständig ist, konnte ein Fehler in der Software nahezu ausgeschlossen werden. Somit musste die Störung hardwareseitige Ursachen haben.

Über ein Oszilloskop wurde zunächst das Signal direkt an den Eingängen des Boards abgegriffen. Die Messungen zeigten, dass das Signal teilweise stark gestört am Board ankam. Um eine Beeinflussung der vorgeschalteten Elektronik zur Pegelwandlung ausschließen zu können, wurde eine weitere Messung direkt an einem der Ausgänge des Empfängers gemacht. Diese wiesen die gleichen Störungen auf was bedeutet, dass das Problem bereits beim Empfangen der Signale auftritt. In Abbildung 51 sind exemplarisch drei gestörte Signale (B,C,D) und als Vergleich ein ungestörtes Signal (A) des Empfängers dargestellt.

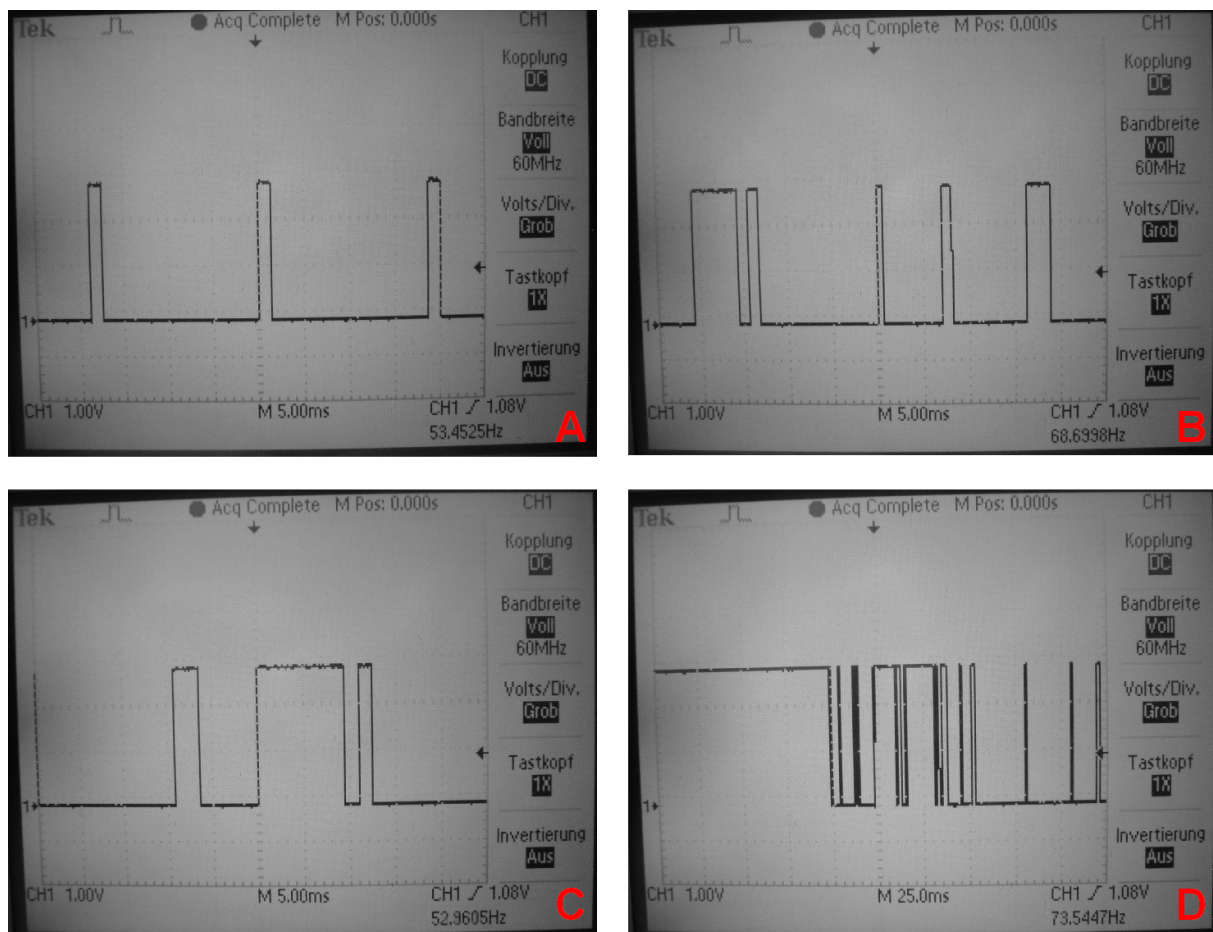


Abbildung 51: Ausgangssignal des Empfängers (A ungestört; B-D gestört)

Abbildung 51 A zeigt ein ungestörtes Signal des Empfängers. Man kann erkennen, dass die Pulse in regelmäßigen Intervallen mit einer gleich bleibenden Pulsbreite empfangen werden. Die gestörten Signale in den Bildern B bis D weisen weder eine feste Pulsbreite noch ein festes Intervall auf. Dabei treten sogar Pulsbreiten von bis zu 100 ms (Bild D erster Puls) auf, die laut der Spezifikationen des PPM-Signal nicht auftreten dürften. Da das Signal an sich schon falsch ist, kann es somit auch nicht durch softwareseitige Filter oder Fehlerkorrekturen im Nachhinein korrigiert werden.

Nach weiteren Versuchen stellte sich schließlich heraus, dass die Störung hauptsächlich durch die elektromagnetische Strahlung des nicht geschirmten Controllers hervorgerufen wird. Misst man das Signal bei ausgeschaltetem Controller, sind die wesentlichen Störungen verschwunden. Es traten nur noch vereinzelte Störungen bei ganz bestimmten Positionen der Fernsteuerung im Raum auf. Dies lag aber an der Geometrie des Raumes, wodurch in bestimmten Positionen der Fernsteuerung die Reflektionen von den Wänden sich so überlagern, dass das Signal nicht mehr sauber vom Empfänger verarbeitet werden kann. Da das Einsatzgebiet des Demonstrators aber in großen Messehallen liegt, ist dieses Problem zu vernachlässigen.

Um das Problem zu beheben wurden zwei verschiedene Modifikationen durchgeführt. Zum einen wurde versucht das Controllergehäuse provisorisch mit Alufolie abzuschirmen, zum anderen wurde das Kabel zwischen Antenne und Empfänger gekürzt. Die Alufolie zeigte keinerlei Wirkung. Das Kürzen des Antennenkabels hingegen behob das Problem nahezu vollständig. Die Erklärung dafür ist, dass der überschüssige Teil des Antennenkabels sich vorher aufgewickelt und direkt neben dem Controller befand. Durch die Wicklung und die Länge des Antennenkabels wurden die Störeinflüsse des Controllers noch verstärkt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein lauffähiger und voll messetauglicher Demonstrator für die Sicherungskomponente des SAMS-Projektes aufgebaut. Die Messetauglichkeit umfasst zum einen die im Vergleich zur Größe des Laserscanners kompakten Ausmaße des Fahrzeuges. Zum anderen konnte die Erwartung an eine lange Einsatzzeit mit einer Laufzeit von knapp eineinhalb Stunden des Fahrakkus und knapp elf Stunden des Controllerakkus erfüllt werden. Zudem sind beide Akkus leicht erreichbar im Fahrzeug untergebracht, so dass sie während der Messe leicht gewechselt werden können. Darüber hinaus wurden alle geforderten Sensoren (Laserscanner, Odometrie) und Komponenten (Controller, Signaleinrichtungen) erfolgreich in das Modellfahrzeug integriert.

Auf Seiten der Elektronik werden alle Signale zuverlässig zwischen den verschiedenen Spannungsniveaus gewandelt. Das An- und Ausschalten des Fahrzeuges funktioniert zudem zu jedem Zeitpunkt problemlos.

Auf Softwareseite können die Werte der Sensoren eingelesen und das SAMS-Modul ausgeführt werden. Zudem wurde eine Steuerung des Fahrzeuges realisiert. Aufgrund des mittlerweile gelösten Empfangsproblem (Kapitel 7.4) und der begrenzten Zeit, war es am Ende nicht mehr möglich den zur Steuerung bereits implementierten Regler erfolgreich zu testen.

Kameras sind im Bereich der mobilen Robotik heutzutage schon fast als Standard-Sensor anzusehen. Der Demonstrator könnte deshalb in Zukunft um ein Kamerasystem erweitert werden, um seine Einsatzmöglichkeiten zu erweitern. Auf verwendeten Hardware wäre ein Anschluss über USB sinnvoll, da der Controller grundsätzlich für einen solchen Anschluss vorbereitet ist. Der Anschluss ist allerdings nicht bestückt, so dass hier eine Modifikation der Hardware vorgenommen werden müsste.

Neben dieser Erweiterung der Hardware, könnte auch das aktuelle Programm des Demonstrators noch abgeändert werden, so dass möglichst wenig Interrupts verwendet werden, da eine Unterbrechung des Programmflusses immer eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt. Dies ist gerade aus Sicht sicherheitstechnischer Geräte relevant. Auch wenn der Demonstrator an sich kein Sicherheitsgerät ist, dient er doch zur Demonstration einer Sicherheitskomponente. Zurzeit werden Interrupts für das Empfangen der Signale der Fernsteuerung und der Ethernetpakete verwendet. Der Empfang der Fernsteuersignale kann auf der verwendeten Hardware nicht ohne Interrupts realisiert werden. Für die

Implementation zum Empfang der Ethernetpakete bestünde aber die Möglichkeit einer Realisierung durch Polling.

In einem weiteren Schritt könnten die Odometrie-Daten der Inkrementalgeber zusätzlich über den Laserscanner verifiziert werden. Dazu würde zunächst aus den Odometrie-Daten eine Prognose für die Veränderungen des aktuellen Laserscans berechnet. In einem zweiten Schritt würde dann der tatsächlich gemessene Laserscan mit der Prognose verglichen. Ist die Abweichung zu groß kann auf einen fehlerhaften Sensor geschlossen werden, was zu einem Nothalt der Sicherungskomponente führen muss.

Eine weitere Möglichkeit wäre ganz auf die Hardware-Odometrie zu verzichten und stattdessen direkt aus den Messdaten des Laserscanners die Geschwindigkeit zu ermitteln. Dies hätte den Vorteil, dass die Sicherungskomponente nur noch die Messdaten des Laserscanners als sensorischen Input voraussetzen würde. Die recht aufwendige Integrationsarbeit der Hardware-Odometrie könnte so bei dem Einsatz der SAMS-Komponente in anderen Fahrzeugen entfallen und wäre somit flexibler in der Anwendung.

9 Anhang

9.1 Literaturverzeichnis

Bücher

- [1] Siegwart, R. and Nourbakhsh, I.R. (2004). **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. Massachusetts Institute of Technology Press.
- [2] Borenstein, J. and Everett, H.R. and Feng, L. (1996). **Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning**. University of Michigan.
- [3] Linse, H. and Fischer, R. (2002). **Elektrotechnik für Maschinenbauer Grundlagen und Anwendungen**. Teubner Verlag Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden.
- [4] Lunze, J. (2005). **Regelungstechnik 1**. Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York.

Papers

- [5] Frese, U. and Hausmann, D. and Lüth, C. and Täubig, H. and Walter, D. (2008). **SAMS Sicherheitskomponente für Autonome Mobile Serviceroboter**. In VDI-Bericht, Vol. 2012. VDI-Verlag.
- [6] Frese, U. and Hausmann, D. and Lüth, C. and Täubig, H. and Walter, D. (2008). **Zertifizierung einer Sicherungskomponente mittels durchgängig formaler Modellierung**. In Software Engineering 2008, Lecture Notes in Informatics.
- [7] Frese, U. and Hausmann, D. and Lüth, C. and Täubig, H. and Walter, D. (2008). **The Importance of Being Formal**. In Hardi Hungar (Ed.), Proc. SoftCert'08, Electronic Notes in Theoretical Computer Science.
- [8] Gollub, J. (2007). **Umsetzung und Evaluation eines mit Laserscannern gesicherten Rollstuhls als Interaktives Museumsexponat**. Masterthesis, Universität Bremen.
- [9] Simpson, R.C. (2005). **Smart wheelchairs: A literature review**. In Journal of Rehabilitation Research, Magazine 42 No. 4. Page 423-438.
- [10] Lankenau, A. and Röfer, T. (2001). **A Safe and Versatile Mobility Assistant**. In IEEE Robotics and Automation Magazine 7 No. 1, Page 29-37.
- [11] Siegwart, R. (2003). **Robox at Expo.02: A Large Scale Installation of Personal Robots**. In IEEE Robotics and Automation Magazine 42 No. 1, Page 203-222.
- [12] Thrun, S. et al. (2006). **Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge**. In Journal of Field Robotics Magazine 23 No. 9, Page 661-692.

- [13] Mandel, C. and Huebner, K. and Vierhuff, T. (2005). **Towards an Autonomous Wheelchair: Cognitive Aspects in Service Robotics**. In Proceedings of Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2005), Page 165-172.

Dokumentationen

- [14] Hilscher GmbH (20.04.2007). **netX Product Overview**. Document PB0410, Revision 0.9, <http://www.hilscher.com>
- [15] Hilscher GmbH (11.02.2008). **netX – The Insider’s Guide to netX**. <http://www.hilscher.com>
- [16] Hilscher GmbH (20.04.2007). **netX – Program Reference Guide**. Document PR0504, Revision 0.4, <http://www.hilscher.com>
- [17] ARM Limited (01.12.2002). **ARM PrimeCell Vectored Interrupt Controller (PL192) – Technical Reference Manual**. Document ARM DDI 0273A, Revision A, <http://www.arm.com>
- [18] Walter, D. and Täubig, H. and Hausmann, D. (07.02.2008). **SAMS – Anforderungen (Lastenheft)**. Version 2.1, Revision 1152

Weblinks (letzter Zugriff erfolgte am 17.03.2008)

- [19] Homepage des SAMS-Projekts:
<http://www.informatik.uni-bremen.de/dfki-sks/sams/>
- [20] Homepage des DFKI-Labor Bremen Fachbereich Sichere Kognitive Systeme:
<http://www.informatik.uni-bremen.de/dfki-sks/>
- [21] Wikipediaeintrag über Fahrerlose Transportsysteme (FTS):
http://de.wikipedia.org/wiki/Fahrerloses_Transportsystem
- [22] VW Golf GTI 53+1:
http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/content/de/innovation/research_vehicles/automatic_gti.html
- [23] Laserscanner Leuze ROD 4plus technisches Datenblatt:
http://www.leuze.de/downloads/los/db/28_brods/ROD4_plus_01de.pdf
- [24] Laserscanner Hokuyo URG-04LX technische Daten:
<http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg.html>
- [25] Drehgeber technisches Datenblatt:
<http://www.avagotech.com/assets/downloadDocument.do?id=2470>

- [26] Rother, P., **PCM oder PPM? Was können sie, was leisten sie?**:
http://www.aerodesign.de/peter/2000/PCM/PCM_PPM.html
- [27] Ausschaltverzögerung mit NE 555:
<http://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0206241.htm>
- [28] PUSH-PULL Ausgangstreiber TTL -> 24V 10mA:
<http://www.mikrocontroller.net/topic/76843>

Hersteller

- [29] Laserscanner: <http://www.leuze.de/>
- [30] Drehgeber: <http://www.avagotech.com/>
- [31] Sicherheitsboard: <http://www.innotecsafety.de>
- [32] Fahrtregler: <http://de.robbe-online.net>
- [33] Entwicklungsumgebung: <http://de.hilscher.com/>

Shops

- [34] Modellbau/Elektronik: <http://www.conrad.de/>
- [35] LiPo-Akkus: <http://www.rc-lipo-shop.de/>
- [36] Elektronik: <http://de.farnell.com>

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fahrerlose Transportsysteme mit Sicherheitslaserscanner (rote Kreise) [21].....	4
Abbildung 2: Funktionsweise der Sicherungskomponente SAMS	5
Abbildung 3: SAMS-Demonstrator mit illustriertem Schutzfeld (gelb)	6
Abbildung 4: Coderad eines Inkrementalgebers[1]	10
Abbildung 5: Signalverlauf Inkrementalgeber bei konstanter Geschwindigkeit (vorwärts)....	11
Abbildung 6: Messprinzip eines 2D-Laserscanners	13
Abbildung 7: Illustration der Abtastung des Terrains durch einen Laserscanner	16
Abbildung 8: Rolland III der Universität Bremen[13]	17
Abbildung 9: Funktionelle Darstellung des Gesamtkonzeptes	19
Abbildung 10: Komponenten des Demonstrators	20
Abbildung 11: Reely Kaiman 6x6 [34]	21
Abbildung 12: Laserscanner rotoScan ROD 4plus	23
Abbildung 13: Laserscanner Hokuyo URG-04LX[24]	25
Abbildung 14: Drehgeber HEDL-5640#A13 [36]	26
Abbildung 15: Modelcraft 3-Kanal Fernsteuerungsanlage [34].....	27
Abbildung 16: PPM-Signal	28
Abbildung 17: SafetyBoard der Firma innotec	30
Abbildung 18: Elektronischer Fahrtregler Robbe Rocar No. 8619[32]	33
Abbildung 19: Liposack	35
Abbildung 20: Fahrakku Thunder Power 8000mAh Lipo Pack 2s4p ProLite	36
Abbildung 21: Controllerakku Lipopower 8.000 mA 11,1 V	38
Abbildung 22: Ladegerät xBase Deluxe [34].....	39
Abbildung 23: IU-Ladeverfahren	40
Abbildung 24: Equalizer Robbe Lithium Top Equalizer 6S	41
Abbildung 25: Einzelteile des Bausatzes	42
Abbildung 26: JR- und Futaba-Stecker	43
Abbildung 27: Montierter Drehgeber	44
Abbildung 28: 1. Ebene	45
Abbildung 29: Kasten für Controllerakkus	46
Abbildung 30: Befestigung des Laserscanners	47
Abbildung 31: Befestigungswinkel für Laserscanners	47
Abbildung 32: Controllergehäuse	48
	99

Abbildung 33: 1. elektrisches Konzept	49
Abbildung 34: 2. elektrisches Konzept	52
Abbildung 35: Platine zur Spannungswandlung	54
Abbildung 36: Ausschaltverzögerung mit NE 555 [27].....	56
Abbildung 37: Adaptierte Ausschaltverzögerung	57
Abbildung 38: Platine der Ausschaltverzögerung	57
Abbildung 39: Schaltplan der ersten Pegelwandlung	58
Abbildung 40: Schaltung für Pegelwandlung von 5 V auf 24 V [28].....	60
Abbildung 41: Spannungsteiler	62
Abbildung 42: Spannungsteiler mit interner Verschaltung	63
Abbildung 43: Programmstruktur	69
Abbildung 44: Ablauf der Synchronisation der beiden Controller	72
Abbildung 45: Hauptschleife	74
Abbildung 46: Aufteilung des PPM-Signals	77
Abbildung 47: Kreuzmischersteuerung.....	81
Abbildung 48: Grundstruktur eines Regelkreises[4].....	84
Abbildung 49: Fahrversuch zum Test der Belastbarkeit.....	86
Abbildung 50: Fahrttest zur Bestimmung der Laufzeit der Antriebsakkus.....	89
Abbildung 51: Ausgangssignal des Empfängers (A ungestört; B-D gestört)	92



9.3 CD

9.4 Sicherheitshinweise für Lithium-Polymer-Akkus

Die folgenden Sicherheitshinweise sollten vor der Verwendung von Lithium-Polymer-Akkus unbedingt zur Kenntnis genommen werden, da ein unsachgemäßer Gebrauch schwere Auswirkungen haben kann. Die Sicherheitshinweise entstammen dem dem Fahrakku (Kapitel 4.1.7.1) beigelegten Sicherheitsblatt des Onlineshops www.rc-lipo.de.

Sicherheitshinweise

LiPo Akkus reagieren ähnlich wie alle anderen Akkutypen. Überladung führt zur übermäßigen Erwärmung und letztendlich zum Platzen der Zelle, da LiPo Akkus kein Überdruckventil besitzen. Gleiches passiert beim Kurzschluss. Der sehr hohe Kurzschlussstrom erhitzt die Zelle in kurzer Zeit so stark, dass akute Berstgefahr besteht. Das in LiPo Akkus zum Einsatz kommende Element Lithium ist zudem sehr reaktiv, so neigen geplatze LiPo Zellen zur Selbstentzündung. Daher sind unbedingt diese Sicherheitshinweise von RC-LiPo zu befolgen!

Allgemeines:

- Lagern und laden Sie Akkuzellen nur auf feuerfesten, nicht brennbaren Untergründen oder Behältnissen!
- Stellen Sie sicher, dass Sie immer die geeigneten Ladegeräte für die Zellen verwenden!
- Durch die enorme Reaktionsfähigkeit der verwendeten Stoffe können LiPo-Zellen bei Beschädigung zu brennen beginnen. Solche mechanische Beschädigung kann z.B. durch einen Absturz verursacht werden!
- Es ist extrem wichtig, dass Sie den Ladevorgang überwachen!
- Niemals LiPo Zellen in geschlossenen Räumen oder Fahrzeugen unbeaufsichtigt laden!

LiPo-Akkus Laden:

- Die Zellen haben eine Ladeschlussspannung von 4.2 Volt pro Zelle. Diese darf unter keinen Umständen überschritten werden. Niemals mit einem Lader oder Ladeprogramm für NiCd, NiMh oder LiIonen Akkus einen LiPo Akku laden!
- Niemals den maximalen Ladestrom von 1C Ladestrom überschreiten!
- D.h. eine 1500mAh Zelle darf mit maximal 1500mA geladen werden!
- Um Verwechslungen oder Fehler bei der Ladereinstellung sicher zu vermeiden empfehlen wir, die Verwendung eines speziellen LiPo-Laders und die Verwendung eines anderen Steckersystems. So ist sichergestellt, dass Sie Ihre LiPo Zellen nie am falschen Lader oder mit falschem Programm laden.

LiPo-Akkus Entladen:

- Der Entladestrom darf die angegebene Entladerate nicht überschreiten!
- LiPo-Zellen nie unter 3V pro Zelle entladen!
- Kurzschlüsse oder andere Fehler im Modell, z.B. nach Absturz des Modells, können zur Überlastung der Zellen führen.

Wenn doch etwas passiert ist:

- Egal was passiert ist, denken Sie zuerst an Ihre Sicherheit!
- Sollten Sie versehentlich einen LiPo Akku mit falschem Lader oder Programm geladen haben, so besteht akute Brandgefahr. Bedecken Sie den Akku mit Sand, Erde oder einem anderen feuerfesten Behältnis um sich selbst zu schützen, bevor Sie den Akku vom Lader trennen. Einmal falsch geladene Akkus dürfen nicht mehr verwendet werden.
- Sollte ein mit LiPo Zellen betriebenes Modell abstürzen, so dürfen Sie sich diesem nur mit äußerster Vorsicht nähern. Sichern Sie sich bei der Bergung des Modell selbst, indem der Akku feuerfest bedeckt wird. - Einen irgendwie geschädigten Akku, sei es durch Überladen, Überlastung oder durch Absturz, nur noch in feuerfesten Behältnissen transportieren. Niemals z.B. ein abgestürztes Modell mit Akku ins Auto legen!!
- Sollte ein Akku schon überhitzt sein oder gar brennen, niemals mit Wasser kühlen oder löschen. Das enthaltene Lithium reagiert mit Wasser. Wasser verschlimmert den Brand. Löschen Sie durch Ersticken z.B. mit Sand.