

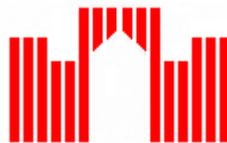
Diplomarbeit zum Thema

Konzeption eines autonomen Segelboots und Realisierung eines Reaktions-Prototyps

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Informatiker (FH)

vorgelegt dem

Fachbereich Informatik und Medien



Fachhochschule Brandenburg

Robert Müller
14.02.2011

Erstbetreuer:
Prof. Dr.- Ing. Jochen Heinsohn

Zweitbetreuer:
Dipl.-Inform. Ingo Boersch

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst habe. Es wurden keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die wörtlich oder sinngemäß übernommenen Zitate habe ich als solche kenntlich gemacht.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung und Abgrenzung der Arbeit.....	2
1.2	Warum ein Segelboot?	3
2	Allgemeine Grundlagen.....	4
2.1	Die Theorie des Segelns.....	4
2.1.1	Kurse zum Wind.....	4
2.1.2	Wahrer und scheinbarer Wind	5
2.1.3	Antrieb durch Widerstand.....	5
2.1.4	Antrieb durch Auftrieb	6
2.1.5	Krängung und Abdrift	7
2.1.6	Form- und Gewichtsstabilität	7
2.2	Steuerung und Manöver.....	9
2.2.1	Anstellwinkel	9
2.2.2	Steuerung	9
2.2.3	Die Wende	10
2.2.4	Die Halse.....	11
2.3	Existente Systeme / Stand der Technik	12
3	Anforderungsanalyse	13
3.1	Ziel.....	13
3.2	Anwendungsszenarien / -gebiete	14
3.3	Risiken und Probleme.....	15
3.3.1	Dynamik der Umgebung.....	16
3.3.2	Wetter	16

3.3.3	Nicht-direkte und suboptimale Kurse	16
3.3.4	Abdrift.....	17
3.3.5	Optimale Segelstellung.....	17
3.3.6	Hindernisse und Verkehr	17
3.3.7	Gefahr des Kenterns	17
3.3.8	Platzbedarf der zusätzlichen Komponenten	18
3.3.9	Zusätzliches Gewicht und dessen Verteilung an Bord.....	18
3.3.10	Elektronik und Wasser.....	18
3.3.11	Wechselwirkungen	18
3.4	Anforderungen an das Boot.....	19
3.5	Anforderungen an die Komponenten.....	21
3.6	Anforderungen an die Software.....	24
3.7	Leistungsaufnahme und Energieversorgung / -erzeugung	25
3.8	Ressourcen	28
3.9	Meilensteine	28
4	Konzeption und Entwurf	30
4.1	Art des Segelboots	30
4.2	Segelformen und Takelungsarten	32
4.2.1	Cat-Takelung.....	32
4.2.2	Slup-Takelung	32
4.2.3	Flettner-Rotor.....	33
4.3	Systementwurf und Auswahl der Komponenten	34
4.3.1	Segelboot.....	35
4.3.2	Computersystem	37
4.3.3	Sensorik	39

4.3.4	Aktorik	43
4.3.5	Fallback-Möglichkeit.....	45
4.3.6	Energieversorgung.....	47
4.3.7	Sonstiges.....	49
4.4	Softwarearchitektur	52
4.4.1	Funktionen.....	52
4.4.2	Aufbau und Struktur.....	53
4.4.1	Schnittstellen, Protokolle und Datenformate	55
5	Realisierung und Implementierung	58
5.1	Hardware.....	58
5.2	Software	66
5.2.1	Voraussetzungen	66
5.2.2	Programm des Aksen-Boards	66
5.2.3	Programm des Hauptcontrollers	69
6	Funktionsnachweis.....	72
7	Zusammenfassung	77
7.1	Einschätzung des Ergebnisses und Kritik	77
7.2	Offene Probleme und Ausblick	77
	Abbildungsverzeichnis.....	IV
	Tabellenverzeichnis.....	VI
	Literaturverzeichnis.....	1
	Glossar	2
	Anlagenverzeichnis	3
	Anhang.....	4

1 Einleitung

Roboter sind in der heutigen Zeit nicht mehr aus unserer Gesellschaft wegzudenken. Man findet sie in nahezu allen Bereichen, ob an Land, im Wasser oder in der Luft. Sie erleichtern uns unbequeme, unliebsame, unzumutbare oder schwere Arbeiten und übernehmen dabei immer komplexere Aufgaben. Sie sind zu jeder Tageszeit unmittelbar und an fast jedem Ort der Welt einsetzbar. Dabei befindet sich ihr Einsatzgebiet meistens an Land, obwohl die Erde davon nur zu gut 29,2 %, dagegen aber zu knapp 70,8 % mit Wasser bedeckt ist [Bey96]. Zudem ist dieser Bereich gerade in größeren Tiefen zum Teil so gut wie gar nicht erforscht, geschweige denn erschlossen oder überwacht. Gerade deshalb ergeben sich hier interessante Einsatzmöglichkeiten für Roboter, die zum einen in ihren Aktionen und der Erfüllung ihrer Aufgaben, zum anderen aber auch in ihrer Energieversorgung völlig oder zumindest weitgehend autonom sind. Einige dieser Aufgaben wären:

- Sammeln von ozeanografischen und atmosphärischen Daten
- Suchen und Beobachten von wild lebenden Tieren

Dabei könnten sie entweder ein festgelegtes Gebiet observieren, eine bestimmte Strecke abfahren oder zum Beispiel der Wanderungsrouten bestimmter Tierarten folgen und diese überwachen. Die aufgezeichneten Daten werden dann an eine zentrale Stelle zur Auswertung und Weiterverarbeitung übermittelt. Von dort aus werden auch neue Aufgaben empfangen. Das Segelboot müsste diesbezüglich mit entsprechender Sensorik für die eigene Autonomie und zum anderen für die Erfüllung seiner Aufgaben ausgestattet werden.

Zusammen mit der Fachhochschule Brandenburg wurde ein Projekt initiiert, dessen Ziel es ist, ein autonomes Segelboot zu realisieren.

1.1 Aufgabenstellung und Abgrenzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll als erster Schritt ein entsprechender Reaktions-Prototyp verwirklicht werden. Eine Anforderungsanalyse soll zeigen, welche Komponenten für ein autonomes Agieren eines Segelboots notwendig sind und wie sie in das Gesamtsystem eingegliedert werden. Dabei ist eine sorgfältige Auswahl der Komponenten zu treffen, wobei besonderes Augenmerk auf Kriterien wie zum Beispiel Platzbedarf, Gewicht oder Stromverbrauch gelegt wird, da in diesen Bereichen Beschränkungen mit der Verwendung eines Segelboots einher gehen. Ist dieser Teil abgeschlossen, muss jede Komponente einzeln auf ihre Funktionalität getestet werden. Bei den der Sensorik oder Aktorik angehörenden Bauteilen muss sichergestellt sein, dass über eine Schnittstelle auf die zur Verfügung gestellten Messwerte zugegriffen bzw. Steuerbefehle an sie übergeben werden können. Anschließend sollen alle Komponenten in geeigneter Form miteinander verbunden und im Segelboot untergebracht werden, wobei auf Wechselwirkungen zu achten ist, welche die Komponenten in ihrer Funktion einschränken könnten. Wichtig ist außerdem die Realisierung einer hardwarebasierten Fallback-Möglichkeit, sodass im Notfall eingegriffen werden kann und von autonomer zu manueller Steuerung gewechselt werden kann. Schließlich soll es ein zentral im Hauptcontroller ausgeführtes Programm ermöglichen, alle von den Sensoren gelieferten Messwerte abzufragen und auszugeben, Steuerbefehle an die Aktoren zu senden und auf eventuelle Eingaben eines Benutzers zu reagieren. Dabei ist bei der Entwicklung der Software darauf zu achten, dass es in Hinblick auf das Gesamtprojekt möglich ist, dessen Weiterentwicklung bezüglich autonomer Handlungen vorzunehmen.

Diese Arbeit bildet die Grundlage für das in Abschnitt 1.1. vorgestellte Projekt, dessen Realisierung Umfang und zeitlichen Rahmen dieser überstreiten würde. Basierend auf nachfolgende Erkenntnisse soll das Projekt durch weitere Abschluss- oder Semesterarbeiten fortgesetzt werden.

1.2 Warum ein Segelboot?

Die durchaus berechtigte Frage - warum ein Segelboot als Basis ausgewählt wurde – lässt sich leicht durch den Vergleich mit anderen Wasserfahrzeugen beantworten. Welche Vorteile hat es diesen gegenüber? Der Wichtigste vorweg:

Es wird durch den Wind und damit durch eine nie versiegende, sogenannte erneuerbare, und umweltfreundliche Energie angetrieben. Ein Segelboot braucht zur Fortbewegung also keinen separaten Antrieb und ist wie Motor- oder U-Boote nicht auf Erdöl basierende Kraftstoffe angewiesen. So ist es angesichts Klimawandel und steigenden Umweltbewusstseins CO₂ – neutral und benötigt lediglich zur Versorgung der Steuerelemente sowie Computer und Elektronik an Bord Energie. Dieser Energiebedarf ist aber vergleichsweise gering und kann auf verschiedene Weise direkt auf dem Schiff/Boot beispielsweise durch Verwendung von Solarzellen gedeckt werden. Somit wäre ein solches Boot vollkommen energieautark und könnte nahezu unbegrenzte Zeit in dem ihm zugewiesenen Einsatzgebiet agieren und seinen Aufgaben nachgehen. Dagegen müssen die Energievorräte anderer Boote in bestimmten Zeitabständen immer wieder aufgefüllt und sie somit angefahren werden oder selbst an Land einen entsprechenden Versorgungspunkt anfahren. Die Antriebsform ist zudem sehr geräuscharm, eignet sich also auch für Aufgaben, wo leises Agieren von Vorteil oder sogar von Nöten ist. Wird das Boot zum Beispiel zum Überwachen oder Erforschen von Tieren auf oder im Wasser eingesetzt, wären Betriebsgeräusche überaus störend und könnten die Tiere verschrecken. Der größte Vorteil bedingt leider auch den größten Nachteil: Wind ist in seinem Vorkommen (Stärke und Richtung) alles andere als konstant und beeinflusst damit Kurs und Geschwindigkeit des Segelbootes entscheidend.

Aufgaben, die bis zu einem genau festgelegten Zeitpunkt oder innerhalb eines genauen Zeitintervalls erledigt werden müssen, eignen sich hierfür also nur bedingt.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Die Theorie des Segelns

An dieser Stelle soll erklärt werden, welche physikalischen Gegebenheiten ein Segelboot in Bewegung versetzen, wie also Wind in Vortrieb umgewandelt wird. Außerdem soll kurz auf die theoretischen Grundlagen eingegangen werden, die zum Verständnis der Thematik Segeln erforderlich sind. Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf [Deu08] und [Gli07].

2.1.1 Kurse zum Wind

Für einen Segler ergeben sich abhängig vom Winkel zum Wind verschiedene Kurse, die ein Segelboot fahren kann. Unter Betrachtung eines Halbkreises reicht das Intervall dabei von etwa 45° - 180° . Dieses unterteilt sich in Am-Wind-, Halbwind-, Raumschot- und Vor-Wind-Kurse, wobei diese fließend ineinander übergehen und ihr Intervall nicht exakt angegeben werden kann. Der Am-Wind-Kurs erstreckt sich über den Bereich, in dem gegen den Wind gesegelt und „auf Höhe gelaufen“ wird. Generell endet er bei etwa 45° . Darüber hinaus definiert sich eine tote Zone, die nicht mehr direkt befahrbar ist. Je nach Bootstyp ist auch ein Unterschreiten dieser Grenze auf bis zu 38° möglich, der Vortrieb ist dabei aber äußerst gering und alles andere als optimal. Einen Kurs querab zum Wind nennt man Halbwind-Kurs. Er ist bei den meisten Booten der schnellste Kurs, der gesegelt werden kann. Fällt der Wind direkt von achtern ein, spricht man von einem Vor-Wind-Kurs. Der dazwischen liegende Bereich wird durch den Raumschot-Kurs abgedeckt.

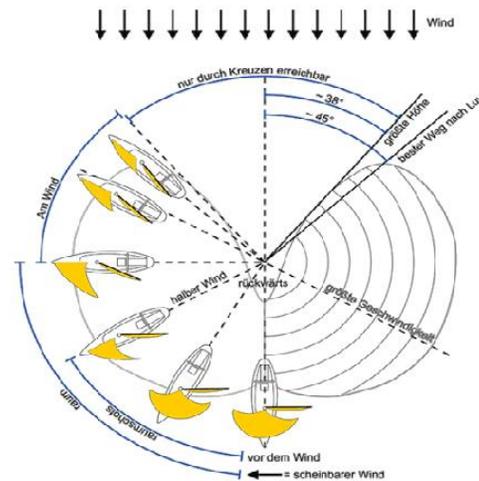


Abbildung 2.1: Übersicht der Kurse zum Wind
Quelle: [Gli07]

2.1.2 Wahrer und scheinbarer Wind

Kenntnisse über den Wind sind notwendig, um als Segler die optimale Richtung und den Trimm der Segel bestimmen zu können. Als wahrer Wind wird der tatsächlich vorherrschende Wind bezeichnet. Er lässt sich in seiner Richtung und Stärke nur an einem festen Punkt bestimmen. Sobald sich ein Boot nun aber bewegt, ist diese Bedingung nicht mehr erfüllt und der dabei auftretende Fahrtwind beeinflusst Richtung und Stärke des wahren Windes. Ab diesem Punkt spricht man deshalb vom scheinbaren Wind, welcher an Bord mess- und spürbar und maßgeblich für den gewählten Kurs ist. Fahrtwind und wahrer Wind beeinflussen sich gegenseitig. Beide Kräfte ergeben in ihrer Summe den scheinbaren Wind. Durch ein Kräfteparallelogramm lässt sich diese Beziehung veranschaulichen.

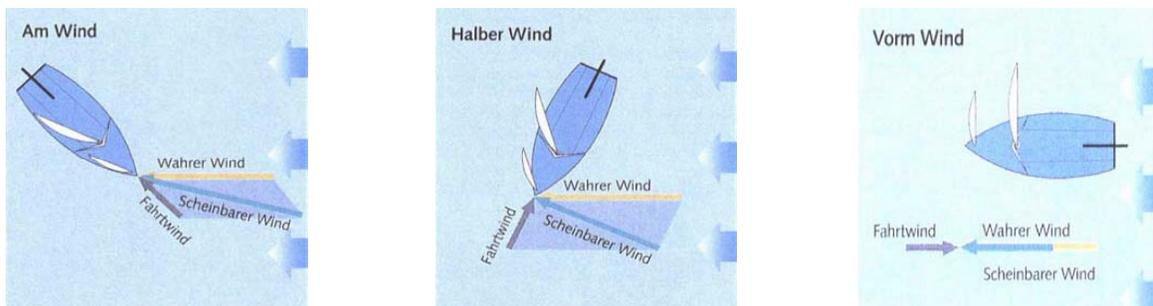


Abbildung 2.2 a - c:

Kräfteparallelogramm zu unterschiedlichen Windrichtungen

Quelle: [Gli07]

Segelboote nutzen bekanntermaßen in den meisten Fällen nur die Windkraft zur Fortbewegung. Dabei ist der Vortrieb zum einen auf den Effekt des Auftriebs, zum anderen auf den Effekt des Widerstands zurückzuführen. Welcher der beiden Effekte zum Tragen kommt, ist vom Kurs abhängig, meistens überlagern sie sich aber und unterscheiden sich in ihrer Wichtigung.

2.1.3 Antrieb durch Widerstand

Gerade bei Vor-Wind-Kursen, aber auch bei Raumschot-Kursen bilden die Segel einen Widerstand, der die Luftströmung abbremst und unterbricht. Das Boot wird dadurch vorangeschoben. Je größer die Angriffsfläche und somit der Widerstand ist, desto mehr Luftmasse wird abgebremst und umso größer ist der vorantreibende Schub. Eine hohle Halbkugel hätte diesbezüglich den besten Effekt, daher wird das Segel möglichst bauchig gefahren.

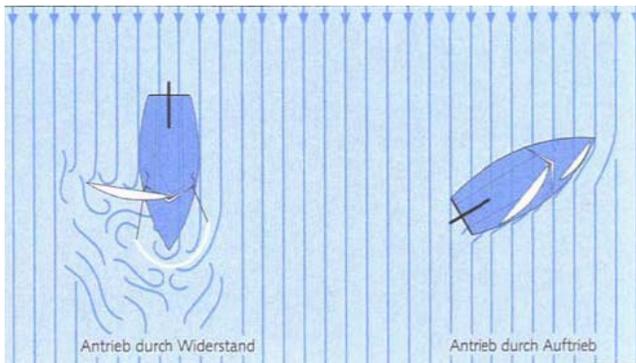
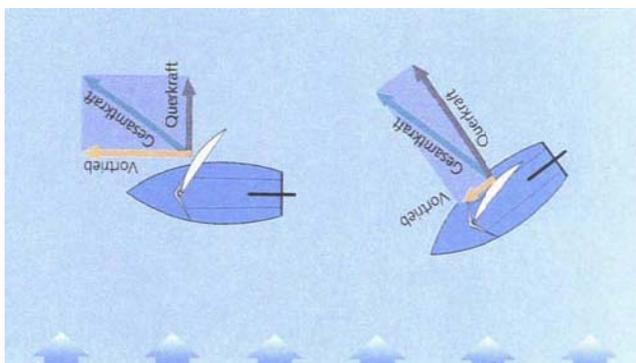


Abbildung 2.3: Antriebsarten beim Segelboot
Quelle: [Gli07]

2.1.4 Antrieb durch Auftrieb

Bei Am-Wind- und Halbwind-Kursen dagegen entsteht der Vortrieb durch den physikalischen Effekt des dynamischen Auftriebs. Die Segel sind in ihrer Form der Tragfläche eines Flugzeugs sehr ähnlich und funktionieren nach demselben Prinzip. Die an der Luvseite des Segels vorbeiströmende Luft wird verlangsamt und an der Leeseite auf Grund des längeren Weges beschleunigt. Es entsteht in Lee ein Über- und in Luv ein Unterdruck. Durch diesen Druckunterschied entsteht eine Kraft, die senkrecht zur Richtung der Segellinie wirkt. Der Wind liefert dem Boot also nicht sofort einen nach vorn gerichteten Vortrieb, sondern zunächst einen quer zur Windrichtung orientierten Auftrieb. Dieser Auftrieb, auch als Gesamtkraft zu bezeichnen, bildet zugleich die Summe aus der senkrecht zur Längsachse des Bootes wirkenden Querkraft und dem Vortrieb des Bootes. Auf die Querkraft entfällt dabei gerade auf Am-Wind-Kursen ein sehr großer Anteil der Gesamtkraft und ist für die Krängung und die Abdrift des Bootes



verantwortlich. Dem gegenüber steht der sich aus Schwert, Ruder und Unterwasserschiff zusammensetzende Lateralwiderstand, der zum einen durch hydrodynamische Wirkung einen Teil des Auftriebs in wirklichen Vortrieb umsetzen kann und zum anderen der Krängung und Abdrift des Bootes entgegenwirkt.

Abbildung 2.4: Aufteilung der Gesamtkraft auf verschiedenen Kursen
Quelle: [Gli07]

2.1.5 Krängung und Abdrift

Wie bereits erwähnt, resultieren Krängung und Abdrift aus der senkrecht zum Boot wirkenden Querkraft. Die Krängung ist dabei nichts anderes als die Neigung des Bootes um seine Längsachse. Ihr wirkt zum einen der Lateralwiderstand – die sich unter Wasser befindende Fläche des Bootes, zum anderen die Gewichtsverlagerung der Crew zur Luvseite entgegen. Je länger und tiefer die Lateralfäche, also die unter Wasser liegende Fläche des Bootes ist, desto wirksamer ist sie gegen die beiden Kräfte. Die Abdrift sorgt dafür, dass das Boot stets nach Lee versetzt wird, also der gesteuerte Kurs nicht dem gesegelten Kurs entspricht. Die Abweichung ist auf allen Kursen existent und kann abhängig von der Windstärke bis etwa 8° betragen.

2.1.6 Form- und Gewichtsstabilität

Eng verwandt mit dem Thema Krängung ist der Begriff der Stabilität. Darunter versteht man die Fähigkeit eines (segelnden) Bootes, „sich aus einer durch Winddruck erzeugten gekrängten Lage wieder aufzurichten. Je größer die Stabilität, umso größer ist das Segeltragevermögen und umso höher die Geschwindigkeit.“ [Deu08, S.161] Dabei unterscheidet sich bei den einzelnen Bootstypen die Art der Stabilität. Einrumpfsegelboote sind meist mit einem nicht unerheblichen Ballast am Kiel ausgestattet. Dieser bildet unter der Wasserlinie einen aufrichtenden Hebelarm. Je mehr ein solches Segelboot krängt, desto größer wird daher die aufrichtende Kraft. Es hat eine hohe Endstabilität. Diese verringert die Gefahr des Kenterns und macht es sogar möglich, dass mit einem Ballastkiel versehene Boote sich nach dem Kentern mehr oder weniger schnell von selbst wieder aufrichten können. Mehrrumpfboote sowie auch kleine Segeljollen gewinnen ihre Stabilität ausschließlich aus ihrer mehr oder weniger breiten Form des Rumpfes. Während Jollen eine eher geringe Formstabilität besitzen und zusätzliche Stabilität aus dem Gewicht der Mannschaft mit entsprechender Verlagerung beziehen, haben Multihull-Konstruktionen durch ihre weit auseinander liegenden Rümpfe eine sehr hohe Anfangsstabilität. Sie krängen dadurch sehr wenig und können die Energie des Windes nicht zuletzt auch wegen mehr Segelfläche und weniger Reibungswiderstand schneller und effektiver in Geschwindigkeit umsetzen. Allerdings erreicht ein Katamaran schon bei etwa 15° Neigung seine maximale Stabilität. Krängt er darüber hinaus, steigt die Gefahr des Kenterns stark an. Ist ein Katamaran gekentert, kann er sich aus eigener Kraft nicht wieder aufrichten. Gleiches gilt auch für eine Jolle, die aber einen größeren Kenterwinkel besitzt und dadurch mehr Krängung zulässt.

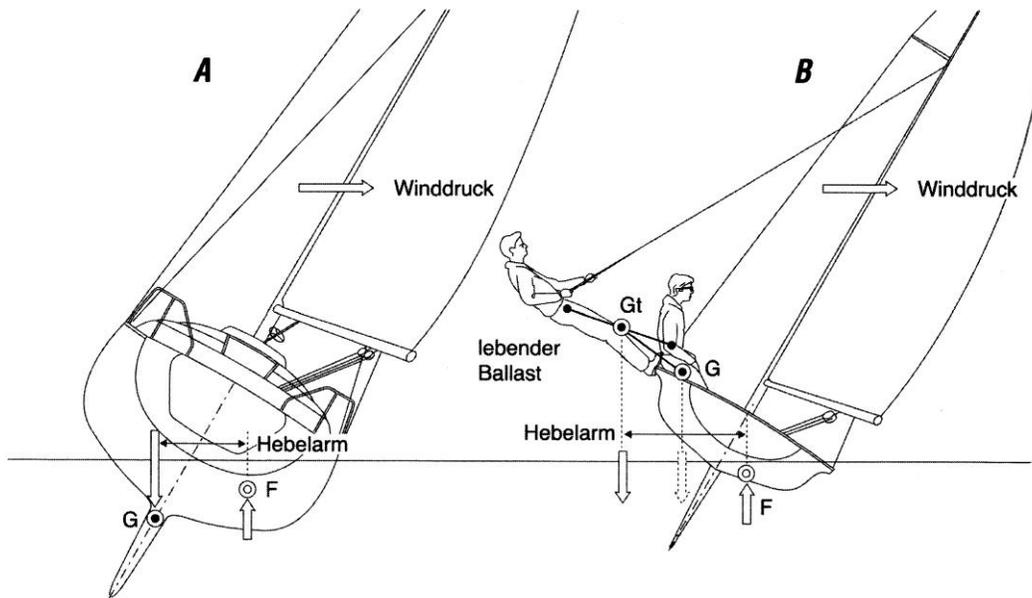


Abbildung 2.5: Verdeutlichung von Gewichts- (A) und Formwiderstand (B)
 Quelle: [Deu08, 162]

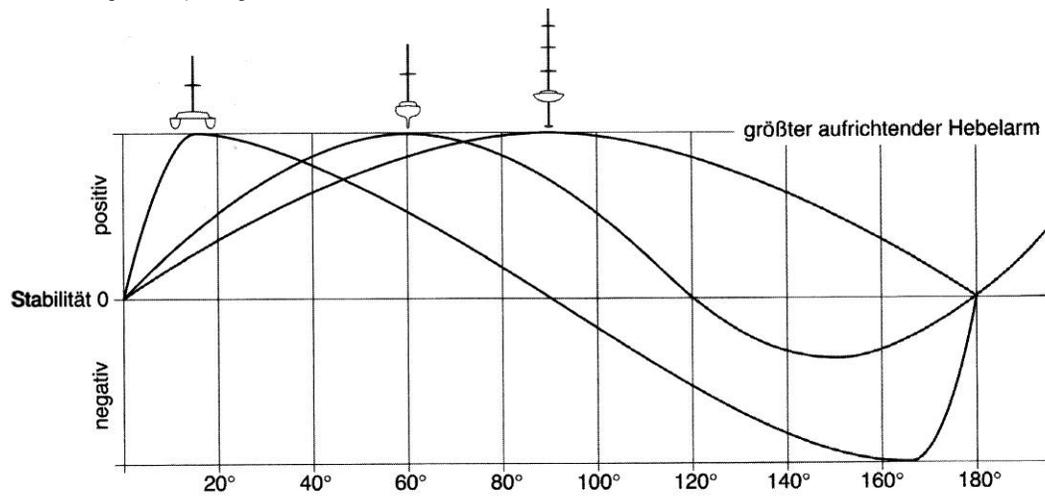


Abbildung 2.6: Übersicht über die Stabilitätsverteilung der Bootstypen Katamaran, Kielyacht und Hightech-Racer bei zunehmender Krängung
 Quelle: [Deu08, 163]

2.2 Steuerung und Manöver

Nachdem nun bekannt ist, warum sich ein Segelboot fortbewegt, soll der folgende Abschnitt beschreiben, wie man es dazu bringt, also wie die einzelnen Kurse gesegelt werden. Dabei soll insbesondere auf die Segelstellung eingegangen werden, die sich durch Fieren oder Dichtholen der Schoten ändern lässt. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Anstellwinkel.

2.2.1 Anstellwinkel

Im Allgemeinen ist der Anstellwinkel der Winkel, in dem eine Strömung auf eine Fläche trifft. Bezogen auf das Segeln ist es der Winkel zwischen der Richtung des scheinbaren Windes und der Sehne des Segels.¹ Ist er zu klein oder zu groß, reißt die Luftströmung am Segel ab. Zusätzlich zum fehlenden Auftrieb sorgen dann Verwirbelungen für eine Verlangsamung der Fahrt. Die Wahl des richtigen Winkels hängt dabei von der Erfahrung und dem Gefühl des Seglers ab, verschiedene optische Anhaltspunkte wie ein Gegenbauch am Vorliek, killende Segel oder die Trimmfäden unterstützen ihn dabei aber.

2.2.2 Steuerung

Wie groß der Anstellwinkel sein muss, ist von Windrichtung und zu fahrendem Kurs abhängig. Bei einem Am-Wind-Kurs ist der Winkel zum Wind bekanntlich mit ca. 45° recht klein. Gleiches gilt für den Anstellwinkel, er beträgt etwa 10°. Die Schoten müssen demnach dichtgeholt sein. Je achterlicher der Wind nun einfällt, desto größer muss der Anstellwinkel werden und desto offener sind die Segel. Bei halbem Wind beträgt der Winkel in etwa 45°. Wanten und stehendes Gut begrenzen den maximalen Winkel, so dass er selbst auf Vor-Wind-Kurs selten 90° erreicht, weil vermieden werden muss, dass Großbaum oder Wanten durch Kontakt Schaden nehmen. Das Kurshalten unterliegt beim Segeln einer ständigen Dynamik, da sich Windstärke und -richtung fortlaufend minimal verändern und eine entsprechende Reaktion des Seglers erforderlich machen. Änderungen in der Windrichtung werden in der Fachsprache als Raumen und Schralen bezeichnet. Raunt der Wind, fällt er etwas achterlicher ein, man luvt entweder an und verändert damit den Kurs oder fiert die Schoten, behält aber den Kurs bei. Schralt der Wind dagegen, fällt er vorlicher ein. Abfallen bildet hier die einzige Möglichkeit. Kleine Kursänderungen können aber auch aus taktischen Gründen oder zum Ausweichen statischer oder dynamischer Hindernisse erforderlich werden.

¹ Quelle: http://www.maritimes.modellskipper.de/Masten_Segel_und_Takelage/Anstellwinkel.htm, 12.02.2011

In manchen Fällen reichen kleine Kursänderungen aber nicht mehr aus, sollte z.B. kein Platz mehr vorhanden sein, eine Boje umrundet oder einem anderem Boot ausgewichen werden. In diesem Fall sind beim Segeln prinzipiell zwei Manöver bekannt, die Wende und die Halse. Darüber hinaus existieren davon abgewandelte Formen wie die Q-Wende oder die Gefahren-Halse, die hier aber nicht in ihrer Einzelheit erläutert werden sollen.

2.2.3 Die Wende

Voraussetzung für eine Wende ist ein Kurs des Bootes $\leq 90^\circ$ zum Wind, also von vorn bis maximal genau seitlich. Mit ihr wird eine Kursänderung von ca. 90° vollzogen, abhängig von den gegebenen Bedingungen, etwa dem danach zu fahrenden Kurs, kann es aber durchaus etwas mehr oder weniger sein. Eingeleitet wird das Manöver mit einem Anluven des Bootes, also einer Bewegung in Richtung des Windes, durch einen konsequenten Lenkeinschlag des Ruders. Zeitgleich wird die Großschot dichter geholt, bis das Boot mit dem Bug genau im Wind steht. Fällt der Wind nun von der anderen Seite ins Segel, drückt er dieses herum und lässt den Baum umschlagen. Ab diesem Zeitpunkt kann die Schot wieder gefiert werden, bis der Anstellwinkel des Segels zur Richtung des Windes passt.

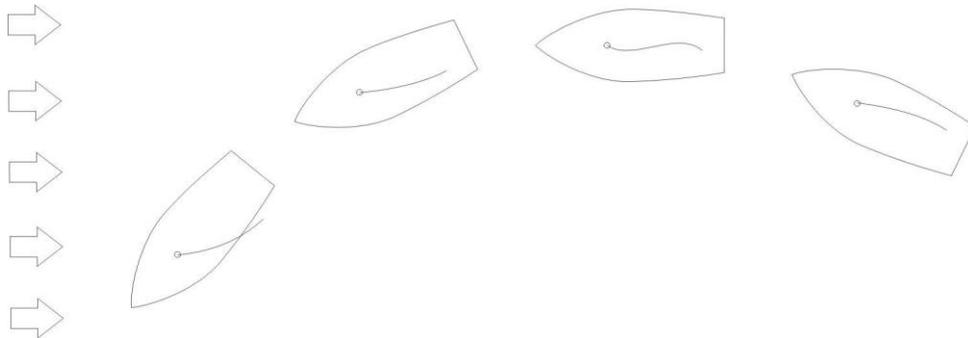


Abbildung 2.7: Ablauf einer Wende

Quelle: eigene

Die Halse

Die Halse ist in ihrem Ablauf etwas umfangreicher, dadurch komplizierter in der Ausführung und wegen der dabei wirksam werdenden Kräfte für Segler gerade bei höheren Windstärken etwas gefährlicher. Im Gegensatz zur Wende, bei der das Boot mit dem Bug durch den Wind dreht, ist es bei der Halse das Heck. Ausgangspunkt ist dabei ein Kurs mit raumachterlichem Wind, also mit einem Winkel von ca. 135° zum Wind. Als Erstes werden nun die Schoten gefiert und es wird bis auf einen Vor-Wind-Kurs abgefallen. Ist dieser Punkt erreicht, muss insbesondere die Großschot wieder so schnell wie möglich dicht geholt werden. Da das Boot weiter dreht, fällt auch hier der Wind ab einem bestimmten Punkt von der anderen Seite ins Segel und drückt es auf die Leeseite herüber. Hat der Großbaum an dieser Stelle zu viel Spiel, sorgen sein Umschlagen und der jetzt wieder vorhandene Druck im Segel für eine plötzliche, nicht unerhebliche und vor allem nicht ungefährliche Krängung des Bootes. Hat der Großbaum die Seite gewechselt, wird die Großschot sofort wieder gefiert, da der Anstellwinkel des Segels viel zu klein ist und dem neuen Kurs entsprechend angepasst werden muss.

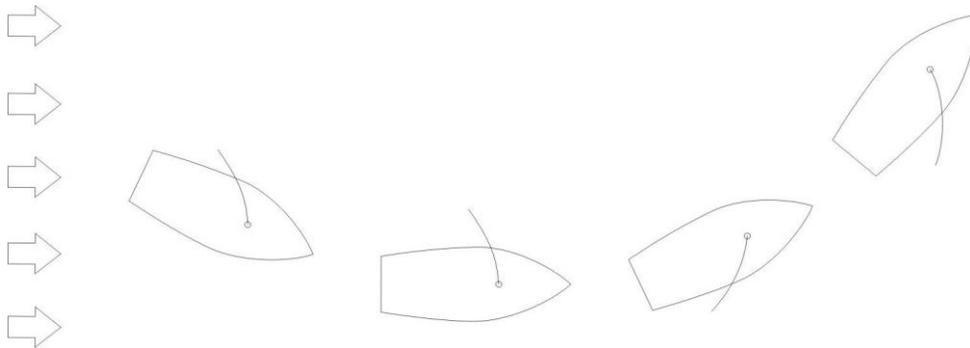


Abbildung 2.8: Ablauf einer Halse

Quelle: eigene

2.3 Existente Systeme / Stand der Technik

Die Idee, Fahrzeuge dahingehend umzurüsten, dass sie computergesteuert ihre Umgebung wahrnehmen und sich selbstständig darin bewegen können, ist nicht neu. Dies beweisen entwickelte und im Rahmen der DARPA-Challenge² 2005 - 2007 vorgestellte Projekte wie „Stanley“ oder „CarOLO“. Am 8. Oktober 2010 fuhr ein „Leonie“ getauftes Automobil der TU Braunschweig vollkommen autonom durch die Straßen von Braunschweig.

Auf das Einsatzgebiet Wasser und ein Segelboot als Fahrzeug umzusteigen, ist ein verhältnismäßig neuer Ansatz. Aktuell existieren nur wenige Projekte, von denen umfangreichere Informationen vorliegen. Dabei sind es zumeist Entwicklungen europäischer und internationaler Universitäten und Institute, wie der United States Naval Academy, der University of Wales, der ETH Zürich oder der INNOC (Österreichische Gesellschaft für innovative Computerwissenschaften), aber auch zwei Projekte aus Deutschland. Besonders erwähnenswert dabei sind die beiden Boote der Universität Lübeck, die in diesem Jahr erstmalig an der WRSC, der World Robotic Sailing Championship, teilgenommen haben und die Kategorie Navigation für sich entscheiden konnten. Die WRSC ist ein Wettbewerb³, an der bis zu vier Meter lange autonome und unbemannte Segelboote teilnehmen können, um bei mehreren Regatten das beste System zu ermitteln. Seit diesem Jahr existieren zusätzlich Disziplinen wie Navigation, Langstreckensegeln oder Vermeidung von Kollisionen. Die WRSC stellt ein Ableger der „Microtransat Challenge“ dar, deren Ziel die Überquerung des Atlantiks mit einem autonom agierenden Segelboot ist. Auf diesem Wege soll die Entwicklung selbstständiger, computergesteuerter Systeme vorangetrieben werden.

² Die Defense Advanced Research Projects Agency ist die Technologieabteilung des US-Verteidigungsministeriums und Initiator dieses Wettbewerbs, durch den die Entwicklung vollkommen autonom agierender Fahrzeuge vorangetrieben werden soll

³ <http://paginas.fe.up.pt/~jca/wrsc/> , 12.02.2011

3 Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse soll erläutern, welche Ziele mit dieser Arbeit verfolgt werden und welche Anwendungsszenarien für dieses autonome System denkbar sind. Desweiteren sollen die Funktionen, die zum Erreichen der Ziele erforderlich, und die Probleme, die während der Realisierungsphase zu erwarten sind, betrachtet werden.

3.1 Ziel

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Segelboot für den autonomen Betrieb vorzubereiten. Dazu soll zunächst geprüft werden, welcher Typ sich eignet und welche Größe erforderlich ist, um alle Komponenten aufzunehmen, die für das selbstständige Agieren nötig sind. Hierfür müssen die für die Wahrnehmung der Umgebung notwendigen Messdaten klassifiziert und geeignete Geräte für deren Messung gefunden werden. Diese Daten sollen einem Computersystem zur weiteren Verarbeitung über eine gemeinsame, möglichst einheitliche Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Zudem soll gewährleistet sein, dass die erfassten Messwerte zur Überprüfung auf eine adäquate Weise ausgegeben werden können. Um über die Segel ein optimales Maß an Vortrieb erzeugen zu können, müssen diese in ihrer Position einstellbar sein. Sich für diesen Zweck gut eignende Motoren sollen ebenfalls an das Computersystem angebunden und mit von diesem generierten Befehlen gesteuert werden. Da alle elektrischen und elektronischen Bauteile für ihren Betrieb Energie benötigen, gehört zu den zu erweiternden Komponenten auch eine entsprechende Spannungsquelle in Form eines Akkumulators. Dieser soll das System solange wie möglich, idealerweise durch Wiederaufladung während des Betriebs sogar unbegrenzt, mit Energie versorgen. Außerdem muss das Boot ungeachtet seiner Entfernung vom Überwachungsorgan/Auftraggeber ständig eine Kommunikationsverbindung aufrecht erhalten, um neue Befehle/Aufgaben empfangen oder gemessene Daten übermitteln zu können. Diesbezüglich sind ebenfalls separate Komponenten erforderlich. Sollte die Steuerung des Bootes durch das Computersystem versagen, muss das Boot aus Sicherheitsgründen neben dem autonomen auch über einen ferngesteuerten Modus verfügen, so dass der Mensch jederzeit die Kontrolle übernehmen kann. Über die Software soll die Grundfunktionalität des Systems gezeigt werden. Sie bietet als eine Art Bibliothek die Basis für zukünftige Erweiterungen. Die Erweiterbarkeit auf Software- aber auch auf Hardwareebene ist ein wichtiger, zu berücksichtigender Aspekt, da die Umsetzung von Funktionen wie Navigation, Routenplanung und Hinderniserkennung zunächst außen vor bleiben. Als Einsatzgebiet bieten sich vorläufig die brandenburgischen Seen rund um die Stadt an, sodass anfangs ein Echolot zur Messung der Wassertiefe an Bord unterbracht wird.

3.2 Anwendungsszenarien / -gebiete

In Kapitel 1 sind mögliche Anwendungsszenarien bzw. –gebiete bereits stichpunktartig erwähnt worden und sollen an dieser Stelle ausführlicher erläutert, vertieft und erweitert werden. Dabei sind denkbare Szenarien für das autonome Segelboot respektive der zu Grunde liegenden Technologie vom jeweiligen Einsatzgebiet abhängig.

1. Über zwei Drittel unserer Planetenoberfläche sind von Wasser bedeckt, der größte Teil davon durch Meere, die bis heute nur ansatzweise erforscht sind und noch viele Geheimnisse in sich bergen. Genau an diesem Punkt kann das Konzept eines autonomen Segelbootes ansetzen, welches sich dazu eignet, ozeanografische und atmosphärische Daten wie zum Beispiel Wasser- und Lufttemperatur, Salz-, Sauerstoff und Schadstoffgehalt, Wasserströmung, Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit nahezu jedem beliebigen Punkt der Weltmeere zu messen und zur Auswertung direkt ans Festland zu übermitteln. Durch die Nutzung von Wind- und Sonnenenergie zur Fortbewegung und Energieversorgung ist es dahingehend völlig autark und kann über einen nahezu unbegrenzten Zeitraum kostengünstig agieren. Dabei ist nicht wie eine Boje an einem festen Ort verankert, sondern kann entweder eine vorgegebene Route, falls erforderlich auch zyklisch, absegeln oder Punkte, die von größerer Bedeutung oder Interesse zum Beispiel zum Zwecke von Vorhersagen zeitnah anfahren. So wäre es auch möglich, Fische oder andere Meeresbewohner aufzuspüren, deren Bestand zu ermitteln und ihren Wanderwegen zu folgen um weiteren Aufschluss über ihre Lebensweise zu bekommen. Auch auf weitgehend erforschte Gewässer wie Binnenseen könnte ein solches System zum Einsatz kommen um beispielsweise Vermessungen durchzuführen, die Wasserqualität zu überprüfen oder Änderungen der Wassertiefe festzustellen.
2. Das System kann als Nachrüstung für Segelboote und -schiffe aller Art verwendet werden um damit Komfort und Sicherheit auf diesen zu erhöhen. So könnten dadurch Gefahrensituationen erkannt, auf solche hingewiesen und zur Not automatisch abgewendet werden. Desweiteren lässt sich das System als eine Art Autopilot einsetzen um Skipper und Crew eine Zeit lang zu entlasten, damit diese anderen Aufgaben oder auch Notwendigkeiten wie Schlafen oder Essen nachgehen könnten. Dabei kann der Skipper selbst entscheiden, ob alle oder nur ein Teil der Aufgaben in die Hand des Systems gelegt werden. Damit lassen sich Situationen wie eine durch Krankheit dezimierte Crew kompensieren und die volle Einsatzbereitschaft des Schiffes erhalten.
3. Setzte man noch bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts nicht zuletzt mangels besserer Technik auf die Verwendung von Segelschiffen zur Beförderung von Frachten aller Art, wurden diese sehr zügig durch größere, stabilere, leistungsfähigere und schnellere mit Dampf oder Diesel betriebene Schiffe ersetzt. Durch stetig steigende Treibstoffpreise und die zunehmende Knappheit von Erdöl als Grundstoff, geht man heute wieder dazu über, moderne Frachtschiffe mit einem Segel ähnlich eines Drachens oder eines Gleitschirms, dem sogenannten „SkySail“, auszurüsten um damit bis zu 50% Treibstoff einsparen zu

wollen. In Anbetracht des Klimawandels und die Erschöpfung der Erdölreserven könnten Umweltbewusstsein und Suche nach alternativen Energie- und Antriebsquellen eine Renaissance für die „alte“, aber CO₂-neutrale Segeltechnik bedeuten. Anders als früher, als man auf Segelschiffen noch eine große Besatzung brauchte, könnte nahezu alles, angefangen von der Segelsteuerung bis hin zur Routenplanung, vom autonomen System übernommen werden.

4. Die Technik eignet sich desweiteren für die Unterstützung bei professionellem Segeltraining. Als passives System zeichnet es unzählig viele Messwerte während eines Trainings auf, welche dann im Nachhinein zur Analyse jedes einzelnen Manövers herangezogen werden können.
5. Viele Orte, zum Beispiel in abgelegenen oder dünn besiedelten Regionen, werden heute aus Kostengründen nicht oder nicht mehr angefahren. Ein autonomes, energieautarkes Segelboot (-schiff) könnte diese Aufgabe übernehmen und als Versorgungs- oder Passagierschiff fungieren.
6. Nicht zuletzt kann ein solches System ähnlich der „Predator“-Drohne in der Luft zu Aufklärungs- und Überwachungszwecken genutzt werden, da es nahezu lautlos und energieautark agieren kann. Zudem ist es unbemannt und stellt so eine ungefährliche und kostengünstige Alternative zu bisher verwendeten Methoden dar.
7. Betrachtet man nun die regionalen Einsatzmöglichkeiten auf den brandenburgischen Gewässern besteht, abgesehen von der Nutzung beim Segeltraining, nach Rücksprache mit dem hier ansässigen Wasser- und Schifffahrtsamt eine mögliche Anwendung in der Überwachung und Kartografierung der Wassertiefe abseits der durch die Berufsschiffahrt genutzten Wasserstraßen. Auch die Entnahme von Proben zur Analyse der Wasserqualität ist denkbar.

3.3 Risiken und Probleme

Wie in Kapitel 1 erwähnt, müssen Roboter ihre Aufgaben unter verschiedenen Bedingungen und in unterschiedlichsten Umgebungen erfüllen und auf unvorhersehbare Situation so gut wie möglich reagieren, ohne dabei ihrer Funktion nicht mehr nachzukommen oder den Dienst zu quittieren. Dazu ist eine entsprechende Programmierung von Nöten, die potenziell auftretende Probleme berücksichtigt und eine Reaktion darauf ermöglicht. Das Wasser als Einsatzgebiet bietet in Kombination mit der Verwendung eines Segelboots einige Kriterien, die im Projekt berücksichtigt und nachfolgend betrachtet werden sollen.

3.3.1 Dynamik der Umgebung

Während viele Roboter in geschlossenen Räumlichkeiten mit insbesondere klimatisch gleichbleibenden Bedingungen agieren, ist ein autonomes Segelboot diesen doppelt unterlegen, da sie nicht nur beachtet, sondern zur eigenen Fortbewegung genutzt werden müssen. Grundvoraussetzung ist deshalb, dass zumindest Windrichtung und –stärke ständig und so genau wie möglich gemessen werden müssen. Desweiteren agiert das Segelboot nicht auf einer ebenen, gleichmäßigen Fläche, sondern auf einer Wasseroberfläche, auf der, beeinflusst durch die Windstärke, ein nicht unerheblicher Wellengang herrscht. Dieser hat Einfluss auf die physische Stabilität des Systems und auf die Genauigkeit der Sensordaten, wie zum Beispiel Geschwindigkeit oder Position.

3.3.2 Wetter

Das Wetter ist der Faktor, der über Windstärke und Richtung entscheidet und dadurch festlegt, ob überhaupt gesegelt werden kann oder nicht. Darüber hinaus hat es entscheidenden Einfluss auf die Wahl des Kurses bzw. der Routenplanung bei längeren Fahrten. Die Wettervorhersage ist heute immer noch ein Unsicherheitsfaktor, da sie noch nicht hinreichend genau möglich ist. Erschwerend kommt außerdem hinzu, dass sich das Einsatzgebiet des Projekts zumindest zunächst einmal auf die Größe einer der umliegenden Seen beschränkt und eine Vorhersage für so ein kleines Gebiet nur sehr ungenau oder überhaupt nicht möglich ist.

3.3.3 Nicht-direkte und suboptimale Kurse

In Kapitel 2.1.1 wurden die Kurse zum Wind bereits kurz erläutert und erwähnt, dass das Segeln mit einem Winkel von weniger als 45° zum Wind nicht möglich ist. Es bildet sich also eine etwa 90° breite „tote“ Zone, die nicht direkt befahren werden kann und deshalb auch als „No-Go-Zone“ [Ste10] bezeichnet wird. Das Erreichen eines in dieser Zone liegenden Ziel- oder Wegpunktes erfordert also eine besondere Fortbewegungsweise, die allgemein hin als Kreuzen bekannt ist. Dabei wird der zu fahrende Weg auf einem Am-Wind-Kurs mit einer variablen Anzahl an Wenden zurückgelegt. Wie oft und an welchen Stellen gewendet werden muss oder kann, muss durch den entsprechenden Algorithmus bestimmt werden, der bei der Wegfindungsroutine implementiert werden muss.

Segelboote erreichen zudem auf verschiedenen Kursen unterschiedlich hohe Geschwindigkeiten, Diese sind bootspezifisch und lassen sich in einem Polardiagramm darstellen. Während auf Halbwind-Kursen in den meisten Fällen die höchste Geschwindigkeit erreicht wird, ist bei Vor-Wind-Kursen physikalisch bedingt eher das Gegenteil der Fall. Auch dieser Sachverhalt muss bei der Berechnung des optimal zu fahrenden Kurses bzw. Route berücksichtigt werden.

3.3.4 Abdrift

Die Abdrift ist auf Grund ihrer Abhängigkeit von der Windstärke einer starken Dynamik unterworfen und stellt eine nicht zu vernachlässigende Größe dar, da ein Segelboot durch sie um bis zu 8° vom anliegenden Kurs abweichen kann. Um einen optimalen Kurs berechnen und die Zeitpunkte eines Manövers richtig bestimmen zu können, muss sie als Parameter in die Berechnung mit einfließen.

3.3.5 Optimale Segelstellung

Kapitel 2.2 deutet bereits an, dass sich Steuerung und Segelstellung nur sehr schwer konkret beschreiben lassen und stark von Erfahrungen und Gefühl des Seglers abhängig sind. Hier muss nun nach geeigneten Möglichkeiten gesucht werden, die das System erkennen lassen, ob die Segelstellung optimal zum anliegenden Kurs passt oder noch verändert werden muss.

3.3.6 Hindernisse und Verkehr

Im Gegensatz zu Einsatzgebieten wie zum Beispiel im Straßenverkehr bietet ein See oder sogar das Meer eine wesentlich geringere Verkehrsdichte. Nichts desto trotz trifft man auch hier auf andere sowohl unbewegliche als auch bewegliche und zumeist größere Hindernisse wie Uferzonen, Bojen, andere Boote und ähnliches, denen zum Wohle der eigenen Unversehrtheit lieber ausgewichen werden sollte. Folglich müssen solche Hindernisse erkannt und dementsprechend mit einem Ausweichkurs reagiert werden. Um die Möglichkeit einer solchen Erkennung überhaupt zu haben, wird die Verwendung weiterer entsprechender Sensoren wie zum Beispiel Radar nötig.

3.3.7 Gefahr des Kenterns

Diese Gefahr stellt eines der größten Probleme dar und muss so gering wie möglich gehalten oder besser noch komplett ausgeschlossen werden. Kentert ein Boot, kann es dadurch stark beschädigt werden, Bezogen auf das autonome Segelboot würde das bedeuten, dass es seinen Aufgaben nicht mehr nachgehen könnte. In jedem Fall sollte das Boot in der Lage sein, sich nach einer Kenterung von selbst wieder aufzurichten, da sonst die Funktionalität vollkommen eingeschränkt und ein menschliches Eingreifen unvermeidlich werden würde.

3.3.8 Platzbedarf der zusätzlichen Komponenten

Eine so umfangreiche Erweiterung, wie sie bei dieser Arbeit mit einher geht, erfordert ein nicht unerhebliches Maß an zusätzlichem Platz. Der Großteil der Komponenten kann und muss im Rumpf untergebracht werden, zum Teil beschränken aber auch Größe, Gewicht oder Aufgabe eines einzelnen Bauteils die mögliche Position an Bord. So muss zum Beispiel der Sensor für die Messung der Windrichtung an einer Stelle angebracht sein, an der diese nicht vorher abgelenkt wurde. Dies ist fast ausschließlich oberhalb der Mastspitze der Fall.

3.3.9 Zusätzliches Gewicht und dessen Verteilung an Bord

Neben dem Platzbedarf spielt auch das Gewicht eine erhebliche Rolle. Zum einen verringert es den Auftrieb und Abhängigkeit von der Position auch die Stabilität des Bootes, zum anderen sorgt eine unausgeglichene Verteilung für Krängung und Veränderung der Segeleigenschaften des Bootes.

3.3.10 Elektronik und Wasser

Da bei der Umrüstung und Erweiterung viele unterschiedliche Komponenten, ist die Resistenz gegen Wasser zwar ein Auswahlkriterien, diese aber bei nicht allen Bauteilen möglich. Dadurch muss versucht werden, kein Wasser in das Innere des Bootes dringen zu lassen, empfindliche Teile aber auch durch zusätzliche Maßnahmen zu schützen.

3.3.11 Wechselwirkungen

Eine Anordnung elektronischer Bauteile auf engstem Raum kann zu unerwünschten Wechselwirkungen führen. Ein Magnetkompass zum Beispiel wird durch Magnete, eisenhaltige Metalle oder stromdurchflossene Leiter in seiner Funktion beeinflusst. Oftmals treten diese Wechselwirkungen unerwartet oder nur unter bestimmten Bedingungen auf, so dass dadurch Fehler verursacht werden können, die zum einen schwerwiegende Folgen haben können, zum anderen auch schwer zu finden sind.

3.4 Anforderungen an das Boot

Die in Kapitel 3.2 aufgeführten Anwendungsmöglichkeiten stellen einige Anforderungen an die Beschaffenheit und die Eigenschaften des Segelboots. Diese sollen hier näher betrachtet werden.

Der wohl wichtigste Aspekt ist zu verhindern, dass das Boot kentert und an Rigg oder Bootskörper Schaden nimmt. Einrumpfboote mit einem Ballastkiel haben den Vorteil, dass sie nur bei sehr widrigen Witterungsbedingungen und durch Fehler des Skippers überhaupt kentern. Da die Aufgaben des Skippers von einer elektronischen Steuerung übernommen werden soll, kann man hier die maximal zulässige Krängung entsprechend begrenzen und die Gefahr des Kippens somit minimieren.

Sollte der Fall dennoch eintreten, sind gerade Einrumpfboote in der Lage, sich durch die positive Stabilität selbst bei Krängungswinkeln über 90° aus eigener Kraft wieder aufzurichten. Diese Eigenschaft gewinnt gerade dann enorm an Bedeutung, wenn das Segelboot in Regionen fernab des Festlands operieren soll, wo ein menschliches Eingreifen ausgeschlossen bzw. nur sehr schwer möglich ist.

Der große Vorteil der Kentersicherheit bedingt aber einen nicht unerheblichen Nachteil. Um einen möglichst großen Hebelarm für die Stabilität zu haben, ist das Ballastgewicht am Ende des Kiels sehr weit unter dem Rumpf angebracht und erhöht damit den Tiefgang des Bootes entscheidend. Gerade Binnengewässer haben aber zum Teil sehr flache Uferzonen. Sollen hier also alle Bereiche erreichbar sein oder das Boot zum Beispiel zum Messen von Untiefen eingesetzt werden, ist möglichst geringer Tiefgang von Vorteil oder sogar Bedingung. Mehrumpfboote wie Katamarane oder Trimaranen haben diesen tiefen Kiel nicht und verteilen ihr Gewicht auf mehrere Rümpfe. Dadurch haben sie den erwünschten niedrigen Tiefgang. Sie haben aber den entscheidenden Nachteil, dass sie mit zunehmender Krängung einen aufmerksamen Steuermann fordern und sich die Gefahr des Kenterns, bedingt durch die fehlende Gewichtsstabilität deutlich erhöht. Kentert ein Mehrumpfboot, bleibt es auf der Seite oder im Falle des Durchkenterns kieloben liegen und richtet sich nicht mehr von selbst wieder auf.

Bei einem autonomen Segelboot soll die Ausführung der Manöver und damit die Steuerung von Segel und Ruder in die „Hände“ eines Computers gelegt werden. Ein guter Steuermann gewinnt mit zunehmender Erfahrung ein Gefühl für das Boot, kennt deren Grenzen und weiß, wie er in gefährlichen Situationen reagieren muss bzw. kann diese bereits im Voraus erkennen und präventive Maßnahmen ergreifen. Gerade ein Mehrumpfboot segelt mit nur noch einem im Wasser befindlichen Rumpf/Schwimmer am absoluten Limit seiner Stabilität. Eine Abbildung dieses Gefühls auf die Computersteuerung ist sehr kompliziert und so sollte gerade für den Anfang ein Bootstyp bevorzugt werden, der etwas „gutmütiger“ reagiert und eventuell den einen oder anderen Fehler verzeiht.

Neben allem spielt auch die Größe eine nicht unbedeutende Rolle. Das Segelboot muss lang und breit genug sein, dass Sensoren und Computersystem für die autonome Steuerung Platz finden. Zudem soll das Boot mit den Messgeräten und Komponenten ausgerüstet werden, die für die Erfüllung seiner Aufgaben erforderlich sind. Sind sie zu groß, passen sie nicht in oder auf das Boot, sind sie zu schwer, erhöht sich sein Tiefgang und verringert sich unter Umständen seine Stabilität. Die bereits erwähnte und auch nötige Energieautarkie macht außerdem erforderlich, dass zusätzliche Komponenten verbaut werden können müssen, um die gesamte Steuerungselektronik mit Energie zu versorgen bzw. um vorhandene Akkumulatoren ständig aufladen zu können. Welche Möglichkeiten für die Energiegewinnung bestehen und welche Elemente dafür an Bord platziert werden müssen, soll an späterer Stelle erläutert werden. Einer nicht so hohen Gewichtung, aber dennoch Berücksichtigung muss dem Aspekt der Seetauglichkeit beigemessen werden, da viele Anwendungsgebiete den Einsatz auf hoher See vorsehen. Dementsprechend müssen Form und Größe auf Seetauglichkeit ausgerichtet sein, um rauere See und hohen Wellengang unbeschadet überstehen zu können. Hinsichtlich des sicherlich sehr ambitionierten Vorhabens, große Frachtschiffe mit Zusatzsegeln zur Unterstützung konventioneller Antriebe auszustatten oder sogar eine Renaissance der alten Frachtensegler zu initiieren, werden die Größe und die Geschwindigkeit zu den entscheidendsten Faktoren. Ladungskapazität und schneller Transport sind in dieser Branche maßgeblich. Obwohl sehr interessant und zukunftsweisend bleibt dieser Aspekt im weiteren Rahmen dieser Arbeit vollkommen außen vor.

3.5 Anforderungen an die Komponenten

Um eine Entscheidung bezüglich der Größe des Bootes treffen zu können, muss zunächst untersucht werden, welche Anforderungen an die Komponenten gestellt werden. Diese lassen sich grob den Kategorien Sensorik, Computersystem, Aktorik und Kommunikation, Energie und Sicherheit zuordnen. Es lässt sich hier das bekannte EVA-Prinzip ablesen. Für die Funktion eines autonomen Segelbootes sind zunächst die Messung von Geschwindigkeit, Position und Lage des Bootes, sowie Geschwindigkeit und Richtung des Windes erforderlich. Zudem soll die Möglichkeit bestehen, die Wassertiefe an der Position des Bootes zu ermitteln. Die nachfolgende Tabelle zeigt den notwendigen Wertebereich und die für die Messgröße geeigneten Sensoren. Die Aktorik besteht aus mindestens zwei Elementen, die die Steuerung von Segel und Ruder übernehmen. Hierzu eignen sich zum Beispiel Gleichspannungsmotoren. Für die der Fortbewegung dienenden Aktoren muss aus Sicherheitsgründen die Möglichkeit bestehen, im Falle des Versagens der autonomen Steuerung, manuell die Kontrolle zu übernehmen. Dazu muss eine Fernsteuerung mit in das System eingebunden werden. An alle Komponenten können zunächst allgemeine Anforderungen gestellt werden. Darüber hinaus können für jedes Teil einer Kategorie spezielle Kriterien definiert werden. Diese sind im Anschluss an die Tabelle aufgelistet.

Messgröße	Erwarteter Wertebereich	Geeigneter Sensor
Geschwindigkeit des Bootes	0 – 5 m/s	GPS, Sumlog, Staudruckmesser
Position des Bootes	Längen- & Breitengrad (Grad => ± 90 , Minute => 0-59, Sekunde => 0-5999)	GPS
Ausrichtung des Bootes	0 – 360°	Kompass (wegen Krängung lagekompensiert)
Krängung des Bootes	$\pm 90^\circ$	Neigungssensor, 3-Achsen- Kompass
Windgeschwindigkeit	0 – 15 m/s	Windrad , Anemometer
Windrichtung	0 – 360 °	Windfahne , Anemometer
Wassertiefe	0 – 50 m	Echolot

Tabelle 1: Übersicht der zu messenden Größen, ihren Wertebereich und geeigneter Sensoren

Generelle Anforderungen:

- geringe Größe und Gewicht
- möglichst wasserdicht
- geringe Leistungsaufnahme
- möglichst einheitliche, gebräuchliche Schnittstelle und Protokoll
- geeignete Betriebsspannung

Position und Geschwindigkeit des Bootes:

- Positionsgenauigkeit < 5m für Länge und Breite
- Update-Rate 4-5 Hz, besser 10 Hz
- NMEA-Ausgabeformat oder gut dokumentiertes Binärformat
- EGNOS-Unterstützung bzw. gleichwertiges Korrektursystem

Ausrichtung und Krängung/Neigung des Bootes:

- Ungenauigkeit < 5° für Richtung und Neigung (Roll)
- möglichst hohe Abtastrate (10 Hz oder mehr)
- NMEA-Ausgabeformat oder gut dokumentiertes Binärformat

Windgeschwindigkeit und -richtung:

- möglichst hohe Abtastrate (10 Hz oder mehr)
- Ungenauigkeit < 5 % bei Windgeschwindigkeit und < 5° bei Windrichtung
- NMEA-Ausgabeformat oder gut dokumentiertes Binärformat

Wassertiefe:

- hohe Genauigkeit
- wenn möglich, Fächerecholot
- Installation inner- oder außerhalb des Rumpfes ohne ein Loch bohren zu müssen
- Anpassbar an die Neigung des Rumpfes / Kiels
- NMEA-Ausgabeformat oder gut dokumentiertes Binärformat

Manuelle Fernsteuerung:

- hohe Reichweite
- mindestens 2, besser 4 Kanäle
- möglichst wasserdichter Empfänger mit geringem Gewicht

Kommunikation:

- hohe Reichweite (mehrere Kilometer)
- möglichst verschlüsselte Übertragung
- wenig anderweitig genutzte Frequenz mit hoher maximaler Sendeleistung

Computersystem:

- ausreichend Rechenleistung
- Schnittstellen für serielle Punkt-zu-Punkt oder Bus-Verbindung
- eigene Stromversorgung
- WLAN integriert oder leicht nachrüstbar
- leicht programmierbar
- Möglichkeit, Aktoren anzusteuern

Aktoren:

- ausreichend Kraft, um Ruder und Segel bei Belastung verstellen zu können
- Möglichkeit der genauen Positionierung
- Wiederholbarkeit der angefahrenen Positionen
- verschleißarm und langlebig

3.6 Anforderungen an die Software

Für das Computersystem soll ein Programm geschrieben werden, das die softwareseitige Einbindung aller Komponenten in das System realisiert. Diese sollen bei Programmstart über ihre Schnittstellen initialisiert werden, sodass mit ihnen eine Kommunikation über ein geeignetes Protokoll möglich ist.

Sollte es bei den Komponenten technisch möglich und vorgesehen sein, Änderungen an der Konfiguration des Bauteils vorzunehmen, soll diese Funktion hinsichtlich der Weiterentwicklung des Projekts zur Verfügung gestellt werden. In Frage kommt hierbei unter anderem die Einstellung der Abtastrate. Diese gibt an, mit welcher Frequenz die von Sensor gemessenen Werte an das System weitergegeben werden können. Da sich die Messwerte hinsichtlich Anzahl und Komplexität unterscheiden, arbeiten die Sensoren mit unterschiedlichen Abtastraten. Die Software muss daher in mehrere Module unterschiedlicher Funktion und Arbeitsgeschwindigkeit aufgetrennt werden.

Um eine solche Funktionalität umsetzen zu können, ist bei der Wahl der Programmiersprache eine Unterstützung der objektorientierten Programmierung sinnvoll.

Ein Demo-Programm soll die Interaktion mit einem Benutzer ermöglichen. Über ein Kommandozeilenfenster können eine Reihe von Informationen angezeigt, oder aber die Aktorik über einen entsprechenden Modus selbst durch Eingabe von Befehlen angesteuert werden. Es soll zudem das Zusammenspiel von Sensorik und Aktorik veranschaulicht werden.

Die Software soll außerdem eine Art Bibliothek darstellen, mit deren Hilfe ein einfacher Zugriff auf die Bestandteile des Systems während der Weiterentwicklung des Projekts ermöglicht wird. Gerade deshalb ist es wichtig, dass die Funktionalität der einzelnen Module gut dokumentiert wird.

3.7 Leistungsaufnahme und Energieversorgung / -erzeugung

Grundvoraussetzung für den autonomen Betrieb des Segelboots ist eine eigene Energiequelle an Bord. Sie soll das System solange wie möglich, mindestens jedoch mehrere Stunden mit Energie versorgen. Außerdem muss sie wiederaufladbar sein. Wie in Kapitel 3.5 gezeigt, besteht das angestrebte System aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten. Um die Leistungsfähigkeit der Energiequelle abschätzen zu können, ist es notwendig, die Leistungsaufnahme des gesamten Systems zu betrachten. Die nachfolgende Tabelle zeigt den erwarteten Maximalwert für jede einzelne Komponente. Es muss natürlich hohen Wert auf einen möglichst geringen Energiebedarf gelegt werden, so dass davon auszugehen ist, dass der Durchschnittswert in der Praxis erheblich niedriger sein wird.

Modul	maximale Leistung
GPS	1 W
Kompass	0,1 W
Anemometer	2 W
Echolot	0,5 W
Funkmodul	0,5 W
Computersystem	15 W
Servos	10 W
Summe	29,1 W

Tabelle 2: Schätzung der maximalen Leistungsaufnahme

Bei der Auswahl des geeigneten „Stromlieferanten“ spielt zudem das Gewicht eine entscheidende Rolle, da dieses einen ausschlaggebenden Faktor bei der Wahl des Segelboots darstellt. Des Weiteren sollte sich die Ausgangsspannung an den Betriebsspannungen der einzelnen Komponenten orientieren und die Bordspannung zwischen 6 und 12 V bewegen. Idealerweise könnte man so auf eine Aufwärts- oder Abwärtswandlung verzichten. Falls unumgänglich, sollte aber die Anzahl sowie der dabei entstehende „Energieverlust“ so gering wie möglich gehalten werden.

Für die Versorgung von mobilen Systemen mit moderaten Anforderungen bezüglich der Leistungskapazität der Energiequelle bieten sich in erster Linie bekannte und weit verbreitete Akkumulator-Technologien an. Die bekanntesten Vertreter dafür sind Blei-Gel-, Nickel-Cadmium- (NiCd), Nickel-Metallhydrid- (NiMH), sowie Lithium-Ionen- (Li-Ion) Lithium-Polymer- (Li-Poly) und Lithium-Eisen-Phosphat- (LiFePo) Akkumulatoren. Tabelle 3 zeigt die unterschiedlichen Leistungswerte jedes einzelnen Typs.

Technologie	Blei-Gel	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Poly	LiFePO	Zn-Luft
Zellen-Spannung (V)	2,0	1,2	1,2	3,6-3,7	3,6- 3,7	3,3	1,4
Kapazität (mAh)	>1000	1000	2000	<1000	<1000	?	?
Spezifische Energie (Wh/kg)	30 -50	40 – 60	60 – 80	100 - 120	90 – 110	90 – 110	200-350
Energiedichte (Wh/l)	60-100	80-200	200-300	250-350	250-350	250-350	Bis 500
Entladeschluss (V)	1,7	0	0,8	2,5	2,5	2,5	?
Ladeschluss (V)	2,4	n.d.	n.d.	4,1-4,2	4,1-4,2	4,1-4,2	?
Ladezyklen	200-300	500-800	300-500	500-800	500-800	Bis 5000	?
Verlauf Entladespannung	Stark fallend	Fallend	Gering fallend	Nahezu waagrecht	Nahezu waagrecht	Nahezu waagrecht	?
Selbstentladung	< 10 %	20 %	15 -25 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	?
Entladerate/ Belastbarkeit	10	20	10	3	3	3	hoch
Schnellladung (min)	?	10	20	120	120	120	?
Mech. Belastbarkeit	Hoch	Sehr hoch	Mittel	Sehr gering	Sehr gering	?	?

Tabelle 3: Vergleich der unterschiedlichen Akkumulator-Technologien

Quelle: [Hal05]

Ein Akkumulator auf Zink-Luft-Basis liefert beeindruckende Leistungsdaten, befindet sich im Gegensatz zur einmal verwendbaren Zink-Luft-Batterie aber immer noch im Entwicklungsstadium, da eine Umkehrung des Entladeprozesses zu einer Vielzahl von Problemen führt⁴.

Da jede Technologie zudem spezifische Vor- und Nachteile hat, sollen diese in Kapitel 4 näher betrachtet werden. Daraufhin kann eine Entscheidung getroffen werden, welcher Art von Akkumulator für die Energieversorgung zum Einsatz kommt.

Ist die Energiequelle nach entsprechender Betriebszeit des Systems erschöpft, kann sie viele Male wiederaufgeladen werden. Da sie zur Energieversorgung mit in das System integriert ist, muss sie für jeden Ladezyklus entweder aus dem Rumpf des Bootes entnommen werden oder aber eine entsprechende Steckverbindung dafür sorgen, dass der Rumpf aus diesem Grund nicht geöffnet werden muss.

⁴ <http://www.computerwoche.de/hardware/notebook-pc/1909814/> , 12.02.2011

Hinsichtlich der vorgestellten Anwendungsszenarien mit entlegenen Einsatzgebieten und langen Fahrtwegen wäre es von Vorteil, das System so auszustatten, dass ein Aufladen der Energieressourcen und ein damit verbundenes Anfahren eines Versorgungspunktes an Land vollständig entfallen würde. Diese Energieautarkie setzt voraus, dass das System über entsprechende Einrichtungen und Möglichkeiten in der Lage ist, die zum Betrieb benötigte Energie selbst an Bord zu erzeugen.

Die wohl naheliegendste Variante dafür ist die Verwendung von Solarzellen für die Umwandlung von Sonnen- in elektrische Energie. Da der Wirkungsgrad solcher Zellen abhängig von der zu Grunde liegenden Technologie momentan nur etwa 10-20 Prozent⁵ beträgt, ist allerdings eine relativ große, unverdeckte Fläche nötig. Starre Module ließen sich dann nur auf dem Deck montieren. Wären sie flexibel, könnten sie auch den Platz der Segel einnehmen und somit für Energie für Vortrieb des Bootes und Betrieb des autonomen Systems erzeugen.

Einen wesentlich höheren Wirkungsgrad haben Brennstoffzellen. Dieser liegt momentan zwischen 35 und 45 Prozent⁶. Brennstoffzellen nutzen zumeist Methanol oder Wasserstoff, um über eine chemische Reaktion mit Sauerstoff elektrische Energie zu erzeugen. Als Nebenprodukte entstehen Wärme, Wasser und in einigen Fällen Kohlenstoffdioxid. Für den Einsatz in kleineren mobilen Systemen befinden sich entsprechende Produkte noch überwiegend in der Entwicklungsphase. Eine der wenigen verfügbaren Lösungen liefern bei ca. 6 kg Gewicht eine Nennleistung von 25 W und eine Ladekapazität von 600 Wh pro Tag⁷. Allerdings muss auch hier von Zeit zu Zeit „nachgetankt“ werden.

Da die Energie des Windes schon für den Vortrieb des Bootes genutzt wird, könnte sie auch gleichermaßen in elektrische Energie umgewandelt werden. Klassische Segel sind dazu ungeeignet. Es müssten also ein System realisiert werden, das entweder beide Umwandlungen zeitgleich vornehmen kann oder parallel zu den vorhandenen Segeln installiert wird. Für letzteres würden sich Bauarten von Windkraftkonvertern mit einer vertikalen Rotorachse wie zum Beispiel Darrieus- oder Savonius-Rotoren eignen. Diese haben mit 30 bis 40 Prozent zwar einen leicht geringeren Wirkungsgrad als Vertreter mit horizontaler Rotorachse, sind aber im Gegensatz zu diesen von der Windrichtung unabhängig und können auch in Bodennähe eingesetzt werden, wo der Wind bzw. die Luftströmung oftmals stark verwirbelt wird.

⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle> , 12.02.2011

⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle> , 12.02.2011

⁷ <http://www.efoy.com/images/stories/pdf/Marineflyer/081216%20flyer%20marine%20de.pdf>, 12.02.2011

3.8 Ressourcen

Mit diesem Projekt in vielerlei Hinsicht Neuland betreten. Vor allem der Ansatz ein Segelboot zu einem autonomen System, also zu einem Roboter weiter zu entwickeln, ist an der Fachhochschule Brandenburg neu. Demnach stehen nur wenige Hardware-Ressourcen zur Verfügung, auf die ein solches System aufgebaut werden könnte. Der überwiegende Teil muss über ein Auswahlverfahren nach den in Kapitel 3.5 aufgeführten Kriterien erst recherchiert, dann selektiert und anschließend akquiriert werden. Dazu kann auf ein ausreichendes finanzielles Budget zurückgegriffen werden. Bei dem Prozess der Auswahl und Beschaffung ist als weiteres Kriterium zu berücksichtigen, dass folgende Komponenten vorhanden sind und verwendet werden können:

1. Netbook mit 10,1“- Display und Atom-Prozessor

Der EeePC verfügt somit über geringe Größe und eine moderne Rechner-Architektur, die genügend Rechenleistung bereitstellt. Zudem ist er auf eine geringe Leistungsaufnahme ausgerichtet ist relativ leicht, verfügt über einen eigenen, ausdauernden Akku, zahlreiche Schnittstellen und ein Display zur Anzeige wichtiger Daten oder Informationen.

2. Aksen-Board

Das Aksen-Board wurde an der Fachhochschule Brandenburg entwickelt und kann unter anderem als eigenständiger Controller eingesetzt werden. Es verfügt über einen Microcontroller der 8051-Familie, zahlreiche digitale und analoge Ein-, sowie digitale Ausgänge und einem CAN-Bus-Interface. Servomotoren sowie zahlreiche Sensoren lassen sich hier also problemlos anschließen.

3. USB-to-Serial Adapter

Dieser Adapter ermöglicht es, an einen USB-Port angeschlossen, zwei serielle Schnittstellen (RS232) mit D-Sub-Stecker zur Verfügung zu stellen. Die schon betagte RS-232 – Schnittstelle ist gerade im Bereich der Microcontroller und der Sensorik noch häufig anzutreffen.

4. Servomotoren

Servomotoren verfügen bereits über ein Getriebe und eine Elektronik, über die sie sich leicht ansteuern lassen. Sie stehen in verschiedenen Größen und Spezifikationen zur Verfügung.

3.9 Meilensteine

Um einen geordneten Ablauf bei der Realisierung des Projekts zu schaffen, sollen nachfolgende Meilensteine definiert werden.

1. Festlegung auf Bootstyp und -größe

Zu allererst muss abgewogen werden, welche Art von Segelboot hinsichtlich Technik und Takelung als Basis dient, und welche Größe für das Projekt am geeignetsten ist.

2. Präzisierung und Auswahl der nötigen Komponenten und anschließende Beschaffung

Anschließend muss präzise formuliert werden, welche Komponenten benötigt werden um die gewünschte Funktionalität erreichen zu können. Dann kann anhand der vorgegebenen Kriterien eine Liste der in Frage kommenden Teile erstellt und davon ausgehend eine Auswahl getroffen werden. Diese können dann bestellt oder direkt gekauft werden.

3. Separate Inbetriebnahme und Funktionstest der einzelnen Komponenten

Sind alle Komponenten verfügbar, müssen sie zunächst einzeln in Betrieb genommen und getestet werden. Erst nachdem dieser Schritt erfolgreich abgeschlossen ist, kann die Kombination zum gewünschten Gesamtsystem vorgenommen werden.

4. Anpassung auf die Gegebenheiten des Systems

Bei diesem müssen alle Bauteile mit den richtigen Anschlüssen bzw. Steckverbindungen versehen werden, ein Plan erstellt werden, wo welche Komponente platziert werden soll, die Anschlusskabel entsprechend dimensioniert und empfindliche Bestandteile gegen äußere Umwelteinflüsse, insbesondere gegen Wasser, geschützt werden.

5. Funktionstest als abgeschlossenes Systems

Ist jedes Teil an seinem Platz und korrekt angeschlossen, muss das System als Ganzes getestet werden. Dabei ist besonders auf Wechselwirkungen zu achten, die beim Betrieb mehrerer elektronischer Bauteile auf engem Raum auftreten können.

6. Programmierung der Software

Wenn das System komplett und einsatzbereit ist, kann nun das Programm geschrieben werden, das die Kommunikation aller Komponenten untereinander und die Interaktion mit dem Benutzer realisiert.

7. Funktionstest unter realen Bedingungen

Sind erste Navigations- oder Steuerungsalgorithmen in die Software implementiert, somit eine grundlegende Funktionalität der Software gewährleistet und das System in seiner Funktion auch auf Hardwareebene stabil, kann ein Funktionstest abseits der Entwicklungsumgebung unter realen Bedingungen vorgenommen werden.

4 Konzeption und Entwurf

In diesem Kapitel soll betrachtet werden, welche Überlegungen und Entscheidungen im Vorfeld der Realisierung notwendig sind und getroffen werden müssen. Dazu sollen die entsprechenden Techniken und Möglichkeiten aufgezeigt und vorgestellt werden. Ausgehend von einem groben Systementwurf, ist zunächst zu klären, welche Art Segelboot sich als Grundlage für das Projekt eignet. Dort bieten sich zum einen mehrere Techniken, den Wind zur Fortbewegung zu nutzen, zum andern verschiedene Bootstypen an. Des Weiteren kann das Segelboot unabhängig davon verschieden groß sein – mit dementsprechenden Vor- und Nachteilen. Danach kann der Systemaufbau immer weiter präzisiert werden. Dieser zeigt auf, aus welchen Teilen es sich später zusammensetzen wird. Hierbei sollen vorhandene Ressourcen mit einbezogen werden. Im Anschluss werden potenzielle Kandidaten der benötigten Komponenten in tabellarischer Form miteinander verglichen, um festlegen zu können, welche für das Vorhaben am besten geeignet sind. Dabei muss auch Berücksichtigung finden, dass ein Fallback-Modus zum Übernehmen der Steuerung des Bootes realisiert und fest in das System zu integrieren ist. Bedingt durch die vorangegangenen Selektionen kann die Systemstruktur jetzt genauer aufgezeigt werden. Es kann zum Beispiel die Art der Energieversorgung, die Schnittstellen und die Anordnung innerhalb des Bootes präzisiert werden. Da nun erforderliche Komponenten und damit auch die von ihnen verwendeten Schnittstellen und Protokolle definiert sind kann darauf aufbauend ein Konzept für die Architektur der Software entwickelt werden.

4.1 Art des Segelboots

Segelboot ist nicht gleich Segelboot. Jeder Typ hat bauartbedingt seine Vor- und Nachteile. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Monohull- und Multihull-Konstruktionen, also Booten mit einem oder mehreren, parallel zueinander liegenden Rümpfen. Bei Multihull-Booten unterscheidet man zudem in Katamaran, Trimaran und Proa. Der Katamaran hat zwei gleich große Rümpfe, der Trimaran drei Rümpfe, wobei der mittlere meist etwas größer ist. Die Proa hingegen besteht aus einem größeren Rumpf und einem kleineren Ausleger, der entweder nach Luv (polynesischer Bauweise) oder nach Lee (atlantischer Bauweise) ausgerichtet ist. Die Proa bildet bezüglich ihrer Steuerung eine Ausnahme, da die Manöver Wende und Halse nicht auf die gleiche Art und Weise stattfinden, wie es in Kapitel 2.2.3 und 2.2.4 beschrieben wird. Sie ist, von der Bauart gesehen, dem Katamaran ähnlich und wird deshalb im Vergleich der Bootstypen auch nicht einzeln betrachtet. Einer durchaus interessanten Technik stehen die abweichende Steuerung und die mangels Verfügbarkeit erforderliche, komplette Eigenkonstruktion gegenüber. Gerade der letzte Aspekt hat zur Folge, dass auf die Proa im weiteren Verlauf nicht mehr näher eingegangen werden soll.

„konventionelles“ Segelboot	Katamaran	Trimaran
Pro	Pro	Pro
<ul style="list-style-type: none"> • gewichts- (end-) stabil, Ballastkiel macht kentern unwahrscheinlich • geringer Wendekreis • sehr gute Am-Wind-Eigenschaften • richtet sich nach Kentern von selbst wieder auf • bei gleicher Länge günstiger in der Anschaffung • verhältnismäßig leicht zu steuern 	<ul style="list-style-type: none"> • form- (anfangs-) stabil, daher wenig Krängung => mehr Komfort • nahezu unsinkbar • Zuladungskapazität • geringer Tiefgang • großes Platzangebot wenn Rümpfe durch Cockpit verbunden • mit 2 Motoren gut zu manövrieren • meist schneller als Monohull • 2 Ruder für mehr Sicherheit • viel Fläche für zusätzliche Energieerzeuger 	<ul style="list-style-type: none"> • form- (anfangs-) stabil, daher wenig Krängung => mehr Komfort • Leichtwindeigenschaften • nahezu unsinkbar • viel Fläche für zusätzliche Energieerzeuger • meist schneller als Monohull und Katamaran • relativ großes Platzangebot
Contra	Contra	Contra
<ul style="list-style-type: none"> • langsamer • weniger Platz, weniger Zuladungskapazität, weniger Fläche für zusätzliche Energieerzeuger • mehr Krängung => weniger Komfort • nur ein Motor und ein Ruder • höherer Tiefgang 	<ul style="list-style-type: none"> • Leichtwindeigenschaften • schwer zu steuern; hohe Aufmerksamkeit erforderlich; Leerumpf kann eintauchen => kann zum Kentern führen • nicht kentersicher, durchkentern möglich • nicht so gute Am-Wind-Eigenschaften • bei gleicher Länge teurer • größerer Wendekreis 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuladungskapazität • schwer zu steuern; hohe Aufmerksamkeit erforderlich; Leerumpf kann eintauchen => kann zum Kentern führen • nicht kentersicher, durchkentern möglich • nicht so gute Am-Wind-Eigenschaften • bei gleicher Länge teurer • größerer Wendekreis

Tabelle 4: Auflistung von Vor- und Nachteilen der einzelnen Bootsklassen

Quelle: [Deu08], [War11], eigene

Es bleiben trotzdem noch drei Bootstypen übrig, bei denen man entscheiden muss, welcher die beste Basis für das Projekt „autonomes Segelboot“ bietet. Ausgehend von der Tabelle hat ein Katamaran offensichtlich die meisten Vorteile zu bieten, beinhaltet diese allerdings noch keinerlei Wichtung und hat deshalb nur bedingt Aussagekraft. Weitere Betrachtungen sollen erst zeigen, welche Punkte für das Projekt eine besonders wichtige Rolle spielen und deshalb unbedingt erfüllt sein müssen und welcher Vorteil sich letztendlich vernachlässigen lässt bzw. vernachlässigt werden muss.

4.2 Segelformen und Takelungsarten

Neben der konventionellen und allgemein bekannten Form, Wind mit Hilfe eines aufgespannten Segeltuchs für die Fortbewegung zu nutzen, existieren mitunter interessante und effiziente Alternativen. Bei der erstgenannten, weitaus verbreiteteren Methode haben sich zudem unterschiedlichste Varianten entwickelt, das oder die Segel zu positionieren. Diese werden Takelungsarten genannt. Dieses Kapitel stellt für das Projekt verwendbare Formen kurz vor.

4.2.1 Cat-Takelung

Diese Takelung ist die Einfachste ihrer Art. Dabei verfügt das Boot über einen Mast, an deren Rückseite ein Hauptsegel angebracht werden kann. Dies kann die Form eines Dreiecks (Bermudasegel) oder seltener die eines Trapezes (Gaffelsegel) haben. Sie ist ausschließlich bei Jollen anzutreffen. Das Segel kann über eine Schot verstellt werden. Dies ermöglicht eine einfache Bedienung.

4.2.2 Slup-Takelung

Die Slup-Takelung ist die gebräuchlichste Takelungsart bei Segeljollen und kleinen bis mittelgroßen Jachten, wird also bei form- wie auch gewichtsstabilen Booten verwendet. Sie zeichnet sich durch ein auf der Rückseite des (einzigen) Mastes angebrachtes Haupt- oder auch Großsegel und ein davor befindliches Vorsegel aus. Beide haben eine zumeist dreieckige Form, beim Großsegel auch Hochsegel genannt. An der Unterseite, dem Unterliek, ist das Hauptsegel am Großbaum befestigt. Die Segel können mit Hilfe von Schoten in ihrer Position verstellt werden.

Dies ist auch zwei der Vorteile dieser Takelungsart. Sie zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau aus und ist dadurch leicht zu bedienen. Im Normalfall ist pro Segel nur eine Schot notwendig. Zudem ermöglichen es die auf der Längsachse des Bootes angebrachten Segel, allgemein Schratsegel genannt, sowie die Kombination aus Vor- und Großsegel, höhere Am-Wind-Kurse fahren, also mit spitzerem Winkel zum Wind fahren zu können.

4.2.3 Flettner-Rotor

Der Flettner-Rotor basiert auf einem einfachen, dadurch aber nicht weniger interessanten und effizienten Prinzip und ist dabei eine alles andere als neue Entdeckung. Er basiert auf den Magnus-Effekt, welcher besagt, dass ein senkrechter, um seine Achse rotierender Zylinder eine seitlich wirkende Kraft erfährt, wenn er einem waagerechten Luftstrom ausgesetzt ist. Reibungseffekte sorgen dafür, dass den Zylinder umgebene oberflächennahe Luftteilchen durch dessen Rotation in eine ebenso gerichtete Bewegung versetzt werden. Der auftreffende Luftstrom wird dadurch an der Seite, auf der Strömungs- und Drehrichtung übereinstimmen, beschleunigt. Es entsteht ein Unterdruck. Auf der gegenüberliegenden Seite wird der Luftstrom durch die entgegengesetzten Bewegungsrichtungen abgebremst. Es entsteht ein Überdruck. Analog zu Tragflügel und Segel resultiert daraus eine quer zur Strömung wirkende Kraft, die sich zum Vortrieb nutzen lässt.

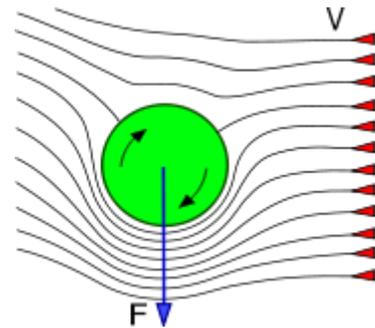


Abbildung 4.1:
Verdeutlichung des Magnuseffekts
Quelle: [Bar08]

Anton Flettner machte sich diesen Effekt 1924 zu Nutze, um damit Schiffe anzutreiben. Er entdeckte, dass die Drehzahl des Rotors in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit Einfluss auf den daraus resultierenden Vortrieb hat. Der entscheidende Faktor wird nach der Formel

$$\lambda = \frac{\text{Geschwindigkeit der Rotoroberfläche}}{\text{Windgeschwindigkeit}} = \frac{u}{v_0} \text{ berechnet.}$$

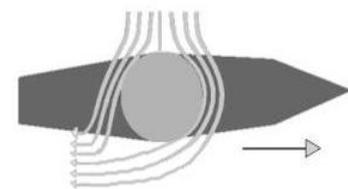


Abbildung 4.2:
Nutzung des Magnuseffekts
zum Vortrieb
Quelle: [Wes06]

Nach Angaben von Anton Flettner [Fle26] selbst ist dabei der Faktor 3,5 ideal und sorgt für das 10fache der Segelleistung. Das heißt, dass der Wirkungsgrad des Flettner-Rotors um bis zu 10mal höher als der eines normalen Segels ist. Es reicht also ein Zehntel der Fläche, um die gleiche Leistung zu erreichen.

Daraus resultiert der Vorteil, dass man dem Wind nur den 30. Teil des Widerstandes eines normalen Segels bietet, was gerade bei Stürmen von enormem Vorteil ist. Darüber hinaus ist die Technik robust, verschleißarm und betriebskostengünstig und bietet zudem bessere Am-Wind-Eigenschaften und Manövrierfähigkeit.

Nachteile sind der geringe Widerstand auf Vorwind-Kursen, sowie die aus der Drehung des Rotors resultierende Eigenrotation des Schiffes.

4.3 Systementwurf und Auswahl der Komponenten

Basierend auf den in Kapitel 3.5 definierten Kategorien Sensorik, Computersystem, Aktorik, Kommunikation und Energieversorgung lässt sich bereits ein grober Überblick ihrer Zusammenhänge darstellen. Die Linien deuten entweder eine Verbindung für den Austausch von Informationen oder aber für die Versorgung mit Energie an. Da aus Gründen der Sicherheit die Möglichkeit gegeben sein muss, jederzeit auf manuelle Steuerung zurückschalten zu können (Fallback), ist dieser bereits zu Beginn mit aufgeführt und dem Computersystem und der Aktorik zwischengeschaltet. Abbildung 4.3 stellt bisherige Überlegungen grafisch dar. Für die weitere Präzisierung sollen nachfolgend alle Komponenten Schritt für Schritt genau definiert und selektiert werden. Begonnen wird mit der Auswahl des geeigneten Segelboots.

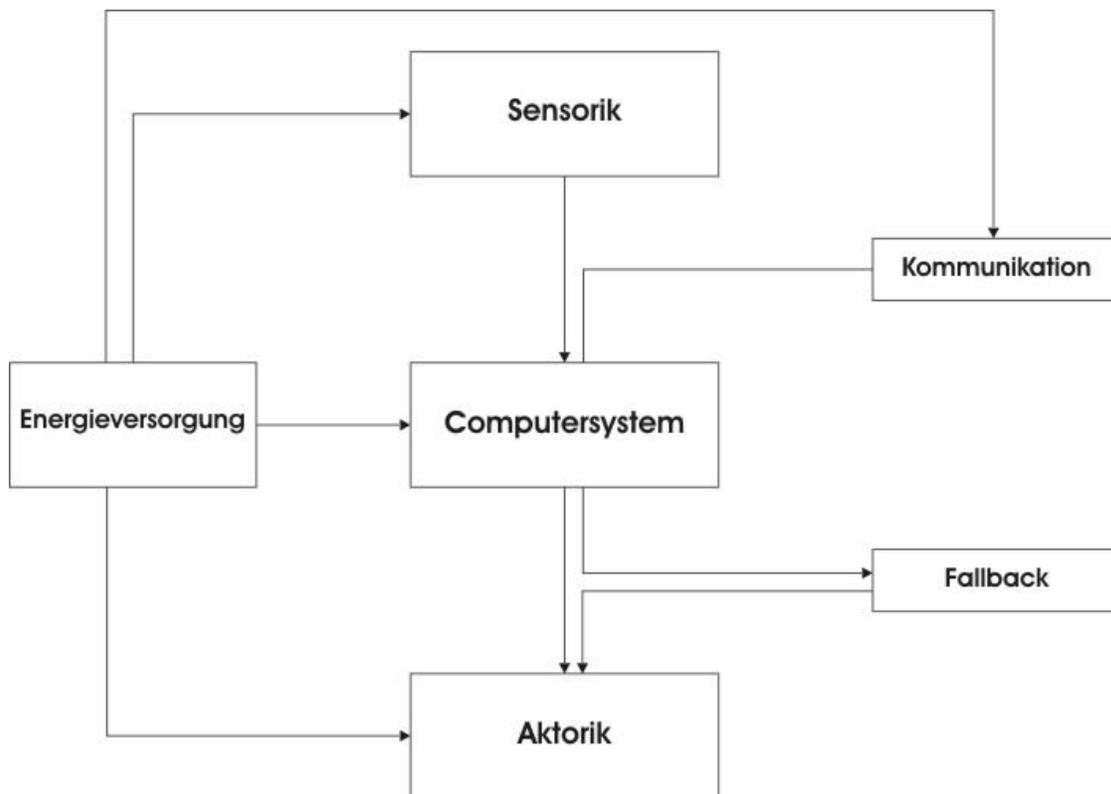


Abbildung 4.3: schematische Darstellung des groben Systementwurfs

4.3.1 Segelboot

So interessant die Technik hinter dem Flettner-Rotor auch ist und obwohl viele Aspekte für seine Verwendung als Antrieb sprechen, existieren zwei Gründe, die diese Vorteile aufwiegen und im Endeffekt für die Entscheidung gegen einen Einsatz bei diesem Projekt verantwortlich sind. Zum einen macht diese Antriebsform eine komplette Neukonstruktion des Zylinders an sich und auch des Bootes notwendig. Angesichts des zu erwartenden Aufwands, fehlender Berichte über eine Bewährung in der Praxis und aktuell nur einem kommerziell genutzten Schiff weltweit, das mit dieser Technik ausgestattet ist, sind die Risiken zu hoch und die verfügbare Zeit zu knapp. Zum anderen war selbst ihr Erfinder der Überzeugung, dass diese Technik nur als zusätzlicher Antrieb, nicht aber für den alleinigen Einsatz geeignet ist [Fle26].

Die Unterschiede zwischen Cat- und Slup-Takelung sind weit weniger stark ausgeprägt, als die zwischen der flettner'schen und der „konventionellen“ Segeltechnik, sodass diesbezüglich eine Festlegung von anderen Faktoren, wie zum Beispiel die Anzahl der Rümpfe, abhängig gemacht werden kann. Ausgehend von der in Kapitel 4.1 vorgestellten Vor- und Nachteile kann den Aspekten der Sicherheit, insbesondere gegen ein mögliches Kentern, der einfachsten Steuerung und der geringsten Kosten die höchste Gewichtung zugesprochen werden. Folglich ist ein Einrumpfboot als geeignete Basis für das Projekt anzusehen. Vorausgesetzt es gewinnt seine Stabilität gegen die Krängung aus seinem Gewicht, verfügt also über einen Ballastkiel.

Bleibt noch die Frage offen, wie groß das Segelboot sein darf oder muss. Da eine komplette Eigenkonstruktion oder ein Bausatz einen zu großen zeitlichen Aufwand bedeuten würde, soll auf ein fertig montiertes und startklares Segelboot zurückgegriffen werden. Aufgrund dieser Einschränkung verbleiben noch zwei Auswahlmöglichkeiten. Entweder eine kleine Segeljolle, die für die Besetzung mit einer Person ausgelegt ist, oder ein großes Modellsegelboot, das ursprünglich für den ferngesteuerten Einsatz vorgesehen ist. Die nachfolgende Tabelle eine Auswahl der Modelle, die der Markt unter den genannten Kriterien zur Verfügung stellt.

Modell	Smaragd	Atlantis	Cyclon13	Cadet	Optimist	Zoom8	Splash
Hersteller	Robbe	Robbe	-	-	-	-	-
Länge	138 cm	138 cm	396 cm	322 cm	230 cm	265 cm	355 cm
Breite	36 cm	34 cm	150 cm	127 cm	113 cm	145 cm	130 cm
Masthöhe	180 cm	142cm	?	522 cm	235 cm	465 cm	?
Verdrängung	12 kg	17,5 kg	66 kg	54 kg	45 kg	44 kg	?
Tiefgang (ohne/mit Schwert)	-/ 30 cm	-/24 cm	? / 66 cm	16 / 110cm	? / 65 cm	?	? / 72 cm
Segelfläche	~0,8 qm	?	9,2 qm	5,16 qm	3,5 qm	4,8 qm	5,5 qm
Art des Segels (Takelung)	Slup	Zweimast- schoner	Cat	Slup	Cat	Cat	Cat

Tabelle 5: Liste möglicher Segelboote

Um hieraus ein Modell selektieren zu können, müssen wieder Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden. Es sei im Vorfeld angemerkt, dass bei Modellsegelbooten grundsätzlich Servomotoren für die Verstellung von Segel und Ruder zu Einsatz kommen und diese per Fernsteuerung bedient werden können. Bei einer Segeljolle müssen aufgrund größerer Abmessungen stärkere Motoren eingesetzt werden. Hierzu eignen sich in erster Linie Schrittmotoren und Linearaktuatoren.

Komponente	Vorteile	Nachteile
Modellsegelboot	<ul style="list-style-type: none"> - Steuerung über Servos vorhanden - Fernsteuerung vorhanden - Transportabel, standortunabhängig - bessere Entwicklungsmöglichkeiten - Relativ günstig 	<ul style="list-style-type: none"> - Raum und Gewicht für Zusatzkomponenten eingeschränkt - Meist nur als Bausatz erhältlich (fertig zu klein oder gebraucht)
Kleine Jolle (z.B. Optimist)	<ul style="list-style-type: none"> - Mehr Platz für Zusatzkomponenten 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ teuer, falls nicht gebraucht - Größere, stärkere Komponenten für die Steuerung notwendig - Fernbedienung ist nachzugerüsten - Schwer zu transportieren - schlechtere Entwicklungsmöglichkeiten
Schrittmotor	<ul style="list-style-type: none"> - Information über zurückgelegte Strecke durch Schrittzähler - Lastunabhängig - Stromgeregelt, daher maximales Haltemoment auch im Stillstand - Verstärkung des Drehmoments durch Getriebe möglich - wartungsfrei und langlebig 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Stromverbrauch - Drehmoment nimmt mit steigender Drehzahl ab - Verlust der Position bei Überlastung möglich - Induktion durch ständige Umpolung - Zusätzlicher Regler/Treiber erforderlich
Linearaktuator	<ul style="list-style-type: none"> - Steuerelektronik integriert - Siehe Vorteile Schrittmotor - Direkt an Pinne anschließbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenn Schrittmotor integriert, dann auch dieselben Nachteile
Servo	<ul style="list-style-type: none"> - Getriebe bereits integriert - Einfache Steuerung - Billig, klein 	<ul style="list-style-type: none"> - Begrenzter Bewegungsspielraum (Arbeitsweg) - Max. Drehmoment ca. 250 Ncm

Tabelle 6: Vergleich von Segeljolle und Modellsegelboot mit den dazugehörigen Komponenten

Alle oben aufgelisteten Segeljollen haben zudem einen weiteren, gravierenden Nachteil. Keine von ihnen ist mit einem Ballastkiel, sondern nur mit einem absenkbaaren Schwert ausgestattet. Sie gewinnen ihre Stabilität über ihre Form und können bei stärkerem Wind oder kräftigen Böen leichter kentern, da keine Person an Bord ist, die die Krängung mit Verlagerung ihres Gewichtes ausgleicht.

Des Weiteren setzt die Realisierung des Fallback-Modus‘ zwingend die Verwendung einer Fernsteuerung voraus, die so umgerüstet werden muss, dass die verwendeten Motoren damit gesteuert werden können.

Betrachtet man zudem den Aspekt, dass die Kosten so gering wie möglich gehalten werden sollen, und die Tatsache, dass diese proportional zur Größe des Bootes ansteigen, liegt es nahe, sich für ein ferngesteuertes Modellsegelboot zu entscheiden.

Ausgehend davon, möglichst viel Platz für die nachfolgenden Erweiterungen zu haben, muss ein Modell gefunden werden, das über eine entsprechende Größe verfügt. Diesbezüglich bietet der Handel Boote bis maximal 150 cm Länge an. Die Wahl fiel letzten Endes auf das Modell „Smaragd“, da es Slup getakelt ist, neben einer Länge von 138 cm auch über eine Breite von fast 40 cm verfügt, der Ballastanteil mit 8000 g zwei Drittel der Gesamtverdrängung einnimmt und der Rumpf über eine große Decksöffnung zugänglich ist. Ein Servomotor ist dabei für die Verstellung der beiden Segel, ein weiterer für die Steuerung des Ruders vorgesehen.

Leider ist ein solches Segelboot im Handel nur als Bausatz erhältlich. Es muss also eine andere Lösung gefunden werden, um zu umgehen, dass zunächst mindestens 100 Arbeitsstunden für den Aufbau investiert werden müssen.

4.3.2 Computersystem

In Kapitel 3.5 wurden zahlreiche Anforderungen an das Computersystem definiert. Es hat primär die Aufgabe, die auf ihm beherbergte Steuerungssoftware zuverlässig und schnell ausführen zu können. Da diese in Zukunft aber noch um mehrere Funktionen, wie zum Beispiel Navigation oder Routenplanung erweitert werden soll, muss dafür genügend Rechenleistung zur Verfügung stehen. Es stellt zudem einen Knotenpunkt dar, mit dem alle Sensoren verbunden werden sollen, sodass hierfür ausreichend Schnittstellen bereit gestellt werden müssen.

Kapitel 3.8 deutet an, dass gerade in diesem Bereich Ressourcen vorhanden sind, die die überwiegende Anzahl an Kriterien erfüllt. Es handelt sich dabei aber um zwei voneinander getrennte Komponenten, die zusammen genommen den Anforderungen gerecht werden. Das Netbook stellt in diesem Fall den Hauptcontroller dar, während sich das Aksen-Board aufgrund seiner Anschlüsse für Servomotoren, sowie vielen weiteren Ein- und Ausgängen hervorragend als Zweitcontroller eignet.

Das Netbook verfügt über mehrere serielle Schnittstellen in Form von USB-Ports, für die es zahlreiche Adapter auf andere Schnittstellen existieren. Außerdem ist bereits ein WLAN-Adapter integriert. Das Aksen-Board als Servocontroller ist ebenfalls mit einer seriellen Schnittstelle ausgestattet, entspricht aber dem RS232-Standard. Über diese Verbindung ist zum einen die Programmierung des Microcontrollers, zum anderen aber auch die Kommunikation mit dem verbundenen Gerät möglich. Zudem kann zusätzlich auf ein CAN-Bus Interface zurückgegriffen werden. Somit sind beide Controller leicht zu programmieren, der EeePC sogar recht komfortabel über das eigene Display. Dies ist, falls nötig, direkt am Einsatzort möglich.

Abbildung 4.4 zeigt die Erweiterung um die beiden Controller. Dabei sind sie untereinander über die serielle Schnittstelle verbunden. Das Netbook ist Empfänger für die von den Sensoren gelieferten Daten. Zudem wird über ihn die Kommunikation mit dem Festland realisiert. Das Aksen-Board ist vorwiegend für die Ansteuerung der Aktorik zuständig.

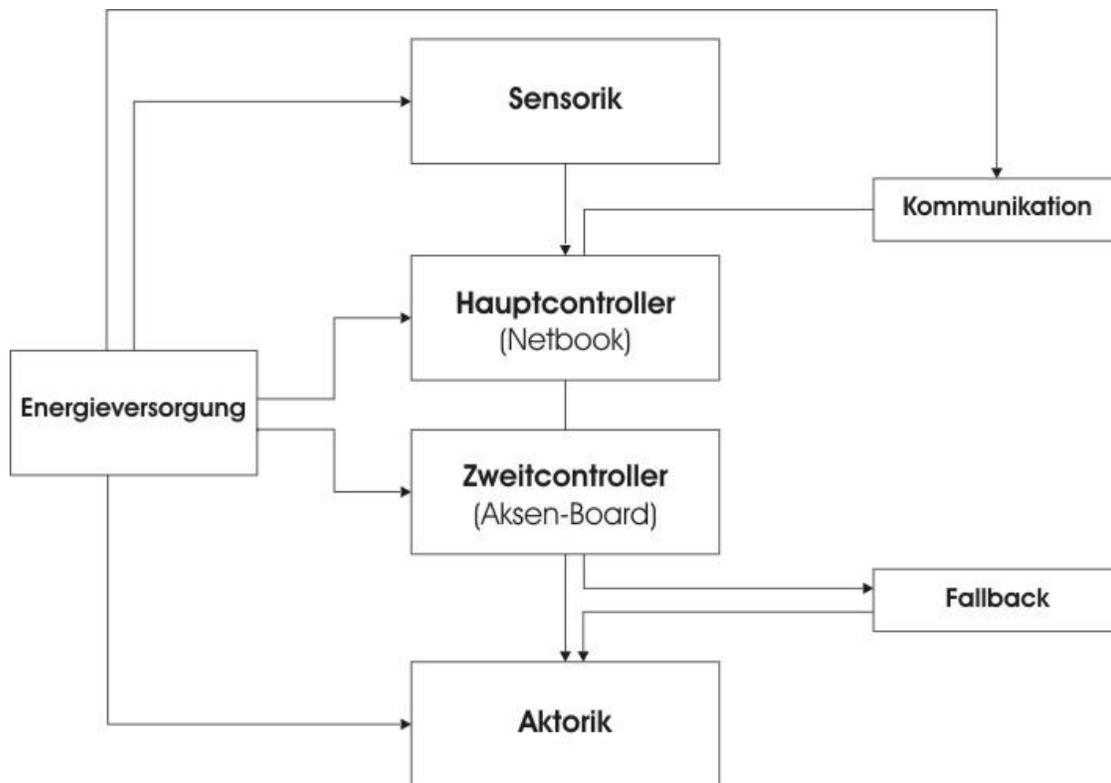


Abbildung 4.4: schematische Darstellung des Entwurfs mit geteiltem Computersystem

4.3.3 Sensorik

Die Sensorik umfasst in erster Linie alle Komponenten, die dazu dienen, dem Roboter die Wahrnehmung seiner Umgebung zu ermöglichen und in ihr agieren zu können. Zu anderen ist sie notwendig, um das System und damit sich selbst kontrollieren zu können. So muss ihm zum Beispiel bekannt sein, wo er sich aktuell befindet oder wie viel Energie ihm noch zur Verfügung steht. Eine spezielle Form stellen Bauteile dar, die eine Kommunikationsverbindung ermöglichen, da sie oft Sensor als auch Aktor sind, wenn sie Daten empfangen, aber auch versenden können. Da die Menge der relevanten Messgrößen recht hoch ist, soll versucht werden, so viele wie möglich von ihnen mit einem Gerät zu erfassen.

Benötigt werden Position, Geschwindigkeit, Ausrichtung und Neigung des Bootes, zudem die Wassertiefe, sowie Stärke und Richtung des Windes. Darüber hinaus ist es wichtig kontrollieren zu können, über wie viel Ladekapazität der Akkumulator noch verfügt. In Hinblick auf die Realisierung der Fallback-Möglichkeit müssen außerdem die Steuersignale einer Funkfernsteuerung (RC) empfangen werden können.

Insgesamt sind hierfür sechs Komponenten notwendig, die nachfolgend kurz beschrieben und ein geeigneter Vertreter ausgewählt werden soll. Die für die Entscheidung maßgeblichen Vergleichstabellen sind im Anhang hinterlegt.

1. GPS

Der einfachste Weg, seine Position weltweit bestimmen zu können, ist durch Nutzung des Global Positioning System (GPS). Gleichzeitig kann aus zwei Positionsbestimmungen in Abhängigkeit der Zeit die eigene Geschwindigkeit errechnet werden.

Benötigt wird ein Empfänger, der eine hohe Genauigkeit bietet, dazu muss unter anderem Differential GPS (DGPS) unterstützt werden. Des Weiteren ist Assisted GPS (A-GPS) von Vorteil, um die Position nach längerer Inaktivität des Empfängers vor allem schneller bestimmen zu können. Insbesondere für autonome Systeme ist es wichtig, Veränderungen in den gemessenen Daten durch eine hohe Abtastfrequenz (min. 10 Hz) schnell zu detektieren, um entsprechend darauf reagieren zu können. Typischerweise liegt diese Frequenz bei Geräte in dieser Kategorie bei 4 Hz. Außerdem stellen nahezu alle Empfänger im Vergleich ihre Daten über das in diesem Bereich weit verbreitete NMEA 0183 - Protokoll zur Verfügung. Dazu müssen sie entweder über Bluetooth, USB oder eine RS232- Schnittstelle angeschlossen bzw. verbunden werden.

Ein Gerät, das nahezu allen Anforderungen entspricht, über USB direkt mit dem Netbook verbunden werden kann, zudem wasserdicht und bereits zum zukünftigen GALILEO-System kompatibel ist, findet man mit dem Modell „NL-402U“.

2. Windsensor / Anemometer

Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind entscheidende Messgrößen, um ein Segelboot steuern zu können. Durch sie bedingt sind die Stellung des Segels und der zu fahrende Kurs, um ein Ziel möglichst schnell zu erreichen.

Am Gebräuchlichsten sind in diesem Bereich Schalensternanemometer (für die Messung der Geschwindigkeit), kombiniert mit einer Windfahne für die Bestimmung der Windrichtung. Darüber hinaus existieren Systeme, die Ultraschall oder temperatursensitive Elemente als zu Grunde liegende Techniken verwenden.

Ein solcher Sensor muss frei angeströmt werden können. Jedes davor befindliche Objekt würde Turbulenzen erzeugen, die das Messergebnis verfälschen. Ideale Position an Bord eines Segelbootes wäre die Mastspitze. Die dortige Anbringung setzt aber ein geringes Gewicht voraus, da der Einfluss auf die Stabilität gegenüber der Krängung durch den großen Hebel nicht zu unterschätzen ist.

Dieses Kriterium reduziert die Auswahl deutlich. Die Abtastfrequenz liegt bis auf eine Ausnahme bei maximal fünf Hertz. Ähnlich wie bei den GPS-Geräten ist auch hier das NMEA 0183 - Protokoll weit verbreitet. Ein Auslesen der Sensordaten ist bei nahezu allen Modellen über eine serielle Schnittstelle nach RS232-, RS422- oder RS485-Standard möglich. Die Ungenauigkeit sollte fünf Grad bei der Richtung und fünf Prozent bei der Geschwindigkeit nicht überschreiten, wobei ersterem eine höhere Wichtung zuzuordnen ist. Schalensterne in Kombination mit Windfahnen disqualifizieren sind zumeist bei dieser Anforderung. Sensoren, bei denen Ultraschall zum Einsatz kommt, liegen bei gewünschter Genauigkeit über dem Budget oder sind zu schwer.

Verbleibt das Modell „MW22“, das temperatursensitive Elemente zur Messung einsetzt und mit 200 Gramm das Leichteste im gesamten Vergleich ist. Neben dem angegebenen RS422- wird auch die Übertragung nach RS232-Standard unterstützt.

3. Kompass

Ein Kompass kann die Ausrichtung eines Objektes bezogen auf den magnetischen Nordpol bestimmen. Sobald eine Kursänderung, also eine Drehung um die vertikale Achse des Bootes, vollzogen wird, ändert sich dementsprechend der Messwert. Da sich das Segelboot bei Wind und Wellengang aber auch um die beiden anderen Achsen, vorwiegend um die horizontale Längsachse, dreht, führt dies zu starken Abweichungen bei der Bestimmung der Ausrichtung. Aus diesem Grund gibt es lagekompensierende Kompass, die dagegen unempfindlich sind und auch die Neigung in die besagten zwei Richtungen messen können (Pitch und Roll). Das Rollen entspricht dabei dem Krängen des Bootes.

Die geforderte Genauigkeit und Abtastfrequenz bieten fast alle gelisteten Modelle, sodass andere Eigenschaften für eine Entscheidung ausschlaggebend sind. In Hinblick auf ein einheitliches Gesamtsystem sollte zum einen das NMEA 0183 - Protokoll, zum anderen die Anbindung über eine serielle Schnittstelle (USB oder RS232) unterstützt werden.

Da das Modell „OS-5000US“ bei letzterem sogar beides anbietet, sehr klein und vergleichsweise günstig ist, bietet es sich für die Verwendung im Projekt an.

4. Echolot

Mit einem Echolot ist man in der Lage die Wassertiefe über ein akustisches Verfahren zu ermitteln. Für eine der zahlreichen Anwendungen soll es dem Segelboot möglich sein, eine solche Messung vornehmen zu können.

Um die Elektronik im Rumpfinnenen nicht einem zusätzlichen Risiko auszusetzen, soll das Gerät installiert werden können, ohne ein Loch in den Rumpf schneiden zu müssen. Zudem sollte es individuell an die Neigung des Rumpfes/Kiels anpassbar sein. Darüber hinaus ist das Gewicht ein entscheidender Aspekt. Modelle, die mehrere Kilogramm wiegen, sind ungeeignet. Fächerecholote gehören zu dieser Kategorie. Auch bei Echoloten wird ausschließlich das NMEA-Protokoll für die Datenübertragung genutzt. Für dieses Projekt sind Modelle von Interesse, die dem NMEA 0183-Standard unterstützen. Die Ungenauigkeit beträgt typischerweise $\pm 0,3$ Prozent.

Angesichts der seiner Montageeigenschaften und einem Minimalwert von 0,5 Meter beim Messwertbereich ist das Modell „P79“ am besten geeignet.

5. Fernsteuerung mit RC-Receiver

In Kapitel 354.3.1 ausgewähltes Modell ist für die Steuerung per Fernbedienung ausgelegt. An Bord wird dafür normalerweise ein entsprechender Receiver verbaut. In erster Linie soll das Segelboot zwar vollkommen selbstständig agieren, für den angesprochenen Fallback-Modus kann dieser Empfänger aber als Grundlage genutzt werden, im Notfall die Kontrolle über die Motoren wieder zu übernehmen. Auf diese Funktion soll später noch genauer eingegangen werden.

Die Fernsteuerung muss deshalb nur eine grundlegende Funktionalität bieten, über mindestens zwei, besser aber 4 Kanäle und eine hohe Reichweite verfügen. Am besten eignen sich hierfür Modelle, die die Signale frequenzmoduliert (FM) übertragen, da sie zuverlässiger sind und tendenziell höhere Reichweiten ermöglichen. Dabei wird bei Schiffs- und Automodellen eine Trägerfrequenz von 27 oder 40 MHz benutzt. Die Betriebsspannung des Receivers liegt typischerweise zwischen 4,8 und 7,2 Volt. Er sollte klein, leicht und im Idealfall wasserdicht sein.

Mit Ausnahme der Resistenz gegenüber Wasser sind mit dem Modell „MC-50“ alle Anforderungen erfüllt.

6. Spannungsüberwachung

Diese sei wegen seiner Charakteristik als Sensor bereits an dieser Stelle aufgeführt, benötigt als Grundlage aber die nachfolgenden Betrachtungen und Spezifikationen und soll deshalb erst in Kapitel 4.3.7 genauer betrachtet werden.

Abgesehen vom RC-Receiver sollen alle Sensoren am Hauptcontroller angebunden werden. Abbildung 4.5 stellt die grafisch dar.

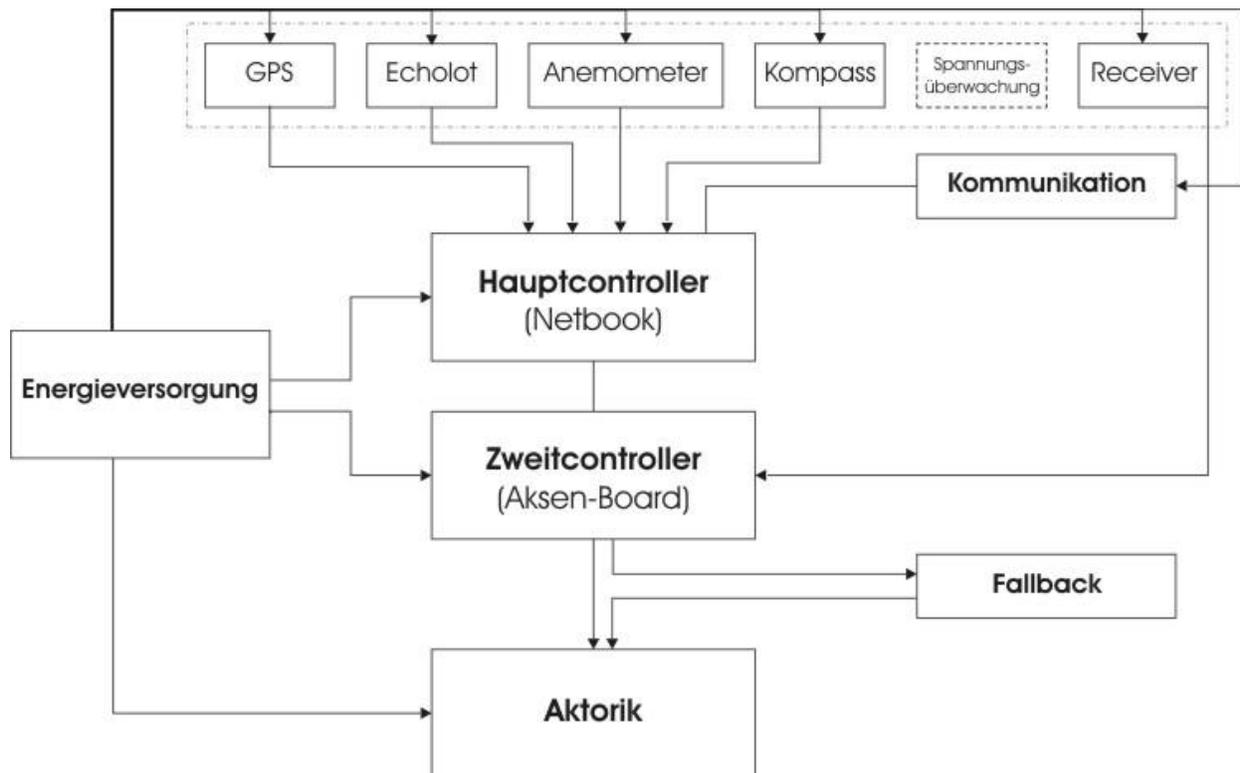


Abbildung 4.5: schematische Darstellung des Systems mit spezifizierter Sensorik

4.3.4 Aktorik

Im Vorfeld dieses Kapitels sei angemerkt, dass parallel zur Konzeptionsphase bereits nach einer Möglichkeit gesucht wurde, den kompletten Neuaufbau des Modellsegelboots und den damit verbundenen Arbeitsaufwand zu umgehen. Die Lösung lag in der Beschaffung eines gebrauchten, aber bereits fertig montierten Modells.

1. Servomotoren

Dieses verfügt bereits über zwei Servomotoren für Verstellung von Segel und Ruder, ist darüber hinaus aber auch noch mit einem Motor ausgestattet, der für den Fall absoluter Windstille Fortbewegung und Manövrierfähigkeit gewährleistet. Die vorhandenen Motoren, insbesondere die Segelwinde, sind leistungsstark, qualitativ hochwertig, voll funktionsfähig und den Anforderungen entsprechend. Ein Selektionsverfahren ist daher nicht mehr erforderlich. Einzig der Motor muss noch um einen Fahrtregler erweitert werden, der das PWM-Signal des Receivers in ein analoges Spannungssignal umwandelt.

2. Funkmodul

Jede bidirektionale Kommunikationsverbindung stellt, wie bereits zu Beginn des letzten Kapitels erwähnt, eine Besonderheit dar, da es als Transceiver sowohl ein Sensor als auch ein Aktor ist. Sie soll zum einen dazu genutzt werden, beispielsweise Statusinformationen oder Messwerte an das Festland zu übertragen, zum anderen aber auch, um neue Befehle oder Aufgaben zu empfangen. Bei der hardwarebasierten Konzeption kommt dies nicht weiter zum Tragen, sondern spielt eventuell nur bei der Entwicklung der Software eine Rolle.

Das Modul soll in erster Linie dazu dienen, die vorhandene Kommunikationsverbindung über WLAN zu erweitern, da diese in freier Umgebung über eine typische Reichweite von nur ca. 300 m verfügt. Da aber ein wesentlich größerer Aktionsradius angedacht ist, muss eine ebenso leistungsstärkere Funkverbindung realisiert werden, die einen ständigen Datenaustausch auch über mehrere Kilometer gewährleistet. Dazu bieten sich Module an, die auf einem Frequenzband von 433 oder 868 MHz arbeiten. Letzteres bietet eine Unterteilung in mehrere Subbänder um gegenseitige Störungen zu vermeiden. Dabei sind zum Teil sehr hohe Sendeleistungen erlaubt, was sich positiv auf die maximale Reichweite auswirkt.

Ähnlich wie den bereits ausgewählten Sensoren ist auch hier die Anbindung über eine Schnittstelle nach RS232-Standard sehr gebräuchlich. Mitunter wird auch RS422, RS485 oder USB unterstützt.

Aufgrund der Anschlussmöglichkeit an einen USB-Port oder nach RS232-Standard, eine hohe theoretische Reichweite von bis zu 40 km und eine optionale Verschlüsselung bei der Datenübertragung fällt die Wahl auf Modell „XBee Pro 868“.

3. LED

Die LED ist nur der Vollständigkeit halber an dieser Stelle als Aktor aufgeführt, da sie anzeigt, ob sich das Boot im autonomen Modus befindet oder nicht. An sie ist nur die Anforderung gestellt, dass sie einerseits eine hohe Leuchtkraft besitzt um über große Entfernungen sichtbar zu sein, zum anderen im Betrieb aber wenig Leistung aufnimmt.

Nachdem nun das Auswahlverfahren für diese Kategorie abgeschlossen ist, kann der Entwurf wieder entsprechend erweitert werden. Alle neu hinzugefügten Komponenten, mit Ausnahme des Funkmoduls, bleiben am Zweitcontroller beziehungsweise am Fallback-Baustein angebunden.

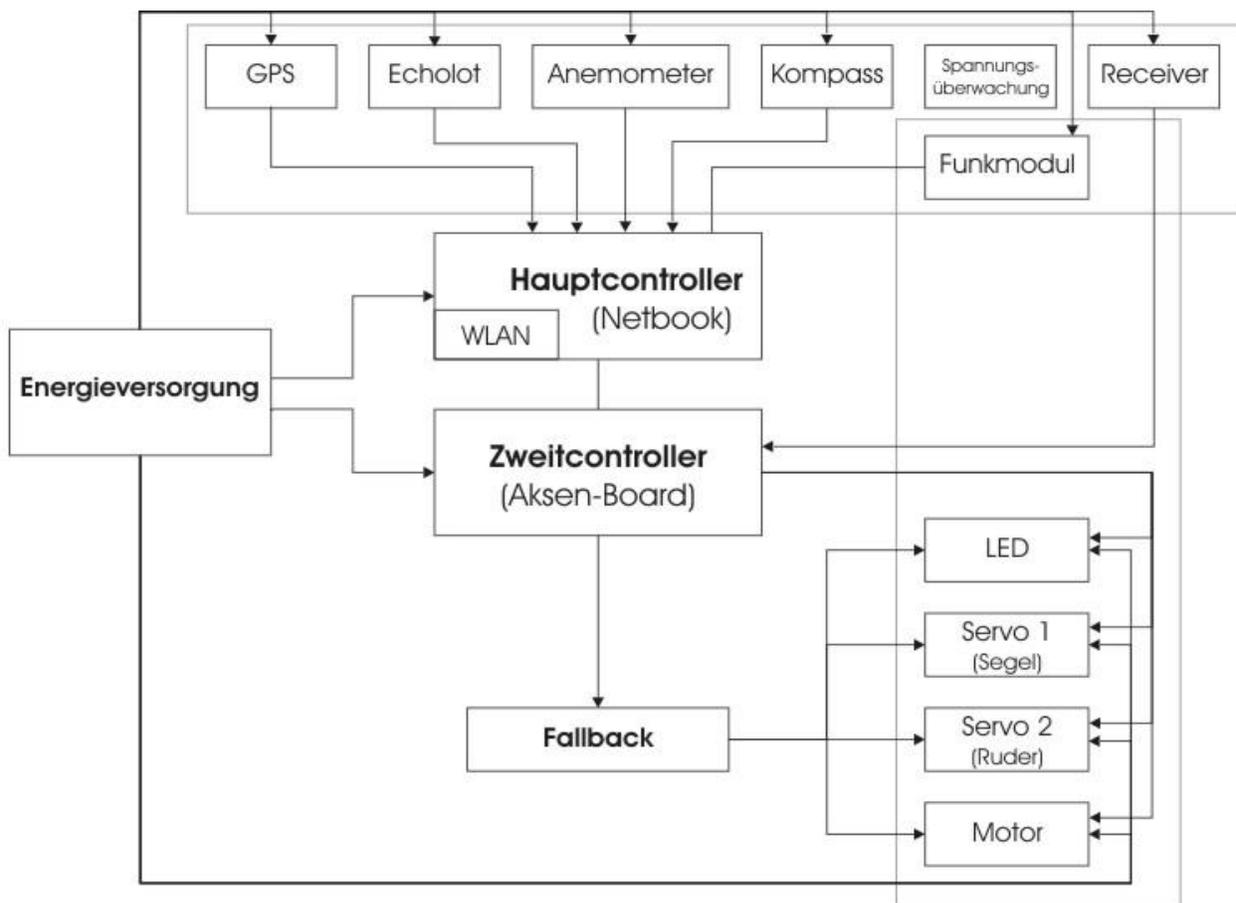


Abbildung 4.6: schematische Darstellung des System inklusive selektierter Aktorik

4.3.5 Fallback-Möglichkeit

Dieser Modus muss möglichst jederzeit aktivierbar sein, insbesondere dann, wenn sich das System zum Beispiel aufgrund eines Programmfehlers oder -absturzes außerhalb seiner Spezifikation bewegt. Wäre der Receiver, der die Steuerbefehle der Fernbedienung empfängt und an die Aktoren weitergibt, wie zunächst vorgesehen direkt an das Aksen-Board angeschlossen, würde ein dort auftretender Fehler unter Umständen die gewünschte Eingriffsmöglichkeit außer Kraft setzen. In der Konsequenz müssen Receiver und Controller also voneinander unabhängig angeordnet werden. Beide sollen Befehle an die Motoren senden können, wobei aber ein zwischengeschaltetes Relais nur einer der beiden Seiten den Vorzug gibt. Das Relais muss von außen geschaltet werden können. Hierzu kann der noch freie vierte Kanal der Fernsteuerung genutzt werden. Bewegt man also am Sender den Knüppel für den entsprechenden Kanal, schlägt das Relais um und aktiviert den jeweils anderen Modus. Eine LED gibt Auskunft darüber, welche der beiden Modi gerade aktiv ist.

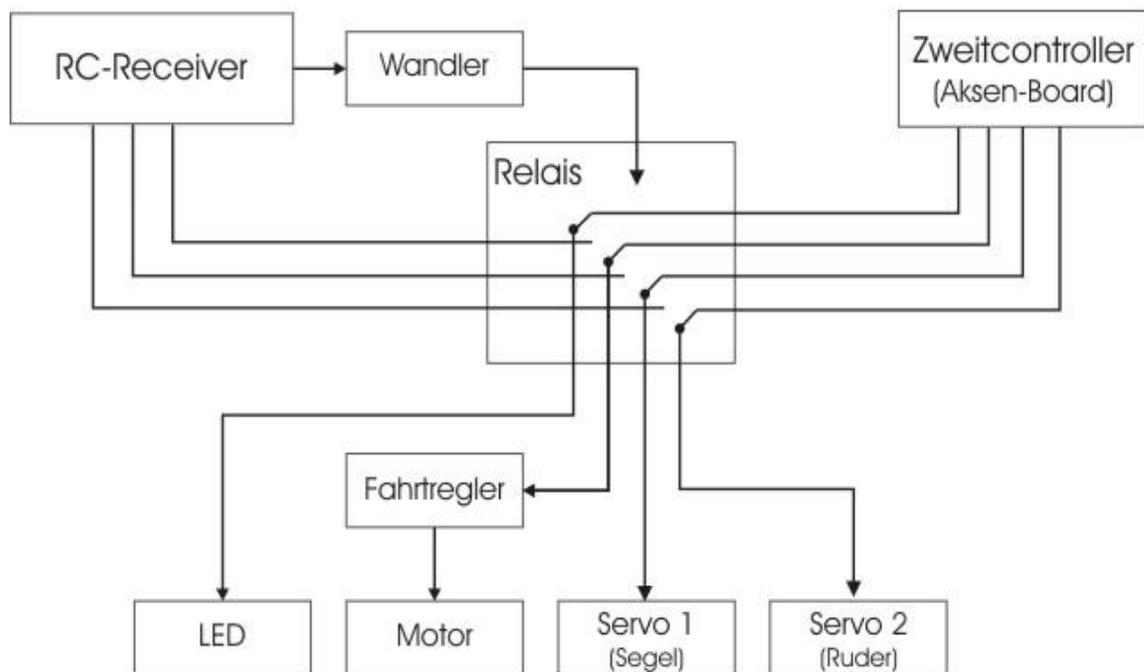


Abbildung 4.7: schematischer Aufbau des Fallback-Mechanismus

1. Relais

Für den beschriebenen Anwendungsfall ist ein Relais erforderlich, das zum Ersten in beiden Stellungen Signale weiterleitet, also wechselt, zum Zweiten über insgesamt vier dieser Wechsler verfügt und zum Dritten auf beiden Positionen auch im stromlosen Zustand verbleibt. Für letztere Anforderung sind bistabile Modellen vorgesehen. Dazu wird entweder lediglich eine Spule eingesetzt, bei der die Polarität geändert werden muss, oder zwei Spulen, die entgegengesetzt ausgerichtet sind.

Mit Auslenkung des Steuerknüppels in eine Richtung schlägt das Relais um und verbleibt in dieser Stellung solange, bis der Knüppel in die entgegengesetzte Richtung bewegt wird.

Für das Projekt ist der Einsatz eines bistabilen Modells mit 2 Spulen vorgesehen, das in sogenannter DIL-Bauform auf einer Leiterplatte montiert werden kann.

2. RC-Schalter

Da Relais durch das Anlegen einer spezifizierten Spannung geschaltet werden, muss das vom Receiver kommende PWM-Signal zwischenzeitlich zu einer solchen decodiert werden. Diese Aufgabe wird von einem RC- oder auch Kanal-Schalter genanntem Bauelement übernommen. Er vergleicht über einen Microcontroller die Impulslänge des ankommenden Signals mit einem eingestellten Referenzwert. Stimmen sie überein, wird der Laststromkreis geschlossen und das Relais schaltet um. Da analog dazu auch die zweite Spule zum Zurückspringen des Relais angesteuert werden soll, ist ein Modell mit zwei Schaltfunktionen notwendig.

3. Fahrtregler

Über einen Fahrtregler oder –steller lässt sich die Drehzahl von Gleichstrommotoren in Abhängigkeit des vom Receiver weitergegebenen PWM-Signals einstellen. Aus dem Signal wird eine gepulste Gleichspannung für den Motor generiert. Ist dem Steuerknüppel zum Beispiel um die Hälfte nach oben bewegt, entspricht das in etwa einer Pulslänge von 1,7 Millisekunden und nach Umwandlung einem Tastverhältnis von ca. 50 Prozent. Der Motor dreht mit der Hälfte der Kraft.

Dabei ist es wichtig, dass der Regler entsprechend der Leistungsaufnahme des Motors dimensioniert ist. Im Segelboot kommt es aber ein genügsames Modell verbaut, da nur im Notfall und bei Windstille darauf zurückgegriffen werden muss.

4.3.6 Energieversorgung

Da nun nahezu alle elektrisch betriebenen Bauteile selektiert sind, kann im folgenden Abschnitt die Energieversorgung des Systems betrachtet werden. Der Energiebedarf der Komponenten soll durch einen einzelnen Akkumulator gedeckt werden. Der Einsatz einer Brennstoffzelle ist aus Gewichts- und Platzgründen nicht möglich.

1. Akkumulator und Ladegerät

Zunächst stellt sich die Frage, auf welcher Technologie der Akkumulator basieren soll. Eine Übersicht darüber bietet Tabelle 3 in Kapitel 253.7. Blei-Gel-Akkumulatoren disqualifizieren sich durch ihr hohes Gewicht, Ni-Cd-Zellen werden aufgrund der giftigen Bestandteile nicht mehr hergestellt und scheiden damit ebenfalls aus.

Der Großteil der Komponenten ließe sich mit einer Spannung von 6 bzw. 12 Volt betreiben, ein Vorteil für die Ni-MH-Technik, da sich beide aus einfach aus den 1,2 Volt Zellspannung generieren lassen. Für die auf Lithium basierenden Akkumulatoren spricht, dass ihre Entwicklung in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht hat. Gerade Li-Ion-Zellen überzeugen mit einer hohen Kapazität, verbunden mit einer geringen Masse. Sie haben ein dreimal besseres Verhältnis von Leistung und Gewicht als Ni-MH-Zellen, sind dabei aber mittlerweile unwesentlich teurer. Dies trifft vor allem auf als Ersatzakkumulator für Camcorder gedachte Modelle zu, welche aus diesem Grund für das Projekt „zweckentfremdet“ werden sollen.

Die Ausgangsspannung beträgt 7,4 Volt, was erforderlich macht, dass die oben genannten Spannungen vorher von dafür geeigneten Wandlern generiert werden muss. Um die benötigte Leistungsfähigkeit abschätzen zu können, muss die typische, sowie die maximale Stromaufnahme eines jeden Bauteils bestimmt werden. Tabelle 7 zeigt eine Liste dieser Werte. Die Auswahl des Wandlers richtet sich nach der jeweiligen Summe der Maximalwerte.

Für das Wiederaufladen des Akkumulators existieren entsprechende Geräte mit passender Ladeschale. Zudem verfügt das Netbook über einen eigenen Akkumulator, mit dem es sich selbst und an einen USB-Port angeschlossene Komponenten mit Energie versorgen kann.

Komponente	Betriebsspannung	Maximale Stromaufnahme	Typische Stromaufnahme	Versorgt über
Anemometer	12 V	125 mA	125 mA	Akku -> Schaltregler
Echolot	12 V	40 mA	40 mA	Akku -> Schaltregler
Kompass	5 V	35 mA	20 mA	Aksen-Board
GPS	5 V	80 mA	80 mA	EeePC
Segelservo	6 V	1600 mA	310 mA	Akku -> Schaltregler
Motor	6 V	3300 mA	(500 mA)	Akku -> Schaltregler
Ruderservo	6 V	500 mA	200 mA	Akku -> Schaltregler
Aksen-Board	6 V	170 mA	170 mA	Akku -> Schaltregler
Empfänger	5 V	40 mA	40 mA	Fahrtregler
Fahrtregler	6 V	80 mA	80 mA	Akku -> Schaltregler
RC-Schalter	5 V	1,5 mA	1,5 mA	Empfänger
Relais	5 V	40 mA	5 mA	Aksen-Board
Funkmodul	6 V	500 mA	250 mA	Akku -> Schaltregler
Summe 6 V		6150 mA	1010 mA	
Summe 12 V		165 mA	165 mA	
Gesamtsumme		6511,5 mA	1321,5 mA	

Tabelle 7: Übersicht zu Spannungsversorgung und Stromaufnahme des Systems

2. Spannungswandler/Schaltregler

Die Recherchen zu den einzelnen Komponenten haben gezeigt, dass es nahezu unmöglich ist, eine bestimmte Betriebsspannung zu definieren und davon ausgehend eine Selektion vorzunehmen, da anderen Eigenschaften eine höhere Wichtung zuzuordnen ist.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, lässt sich ein Großteil von ihnen mit 6 oder 12 V betreiben. Zusätzlich werden einige Bauteile mit der für sie maximal zulässigen Spannung von 5 Volt entweder über den Haupt- oder den Zweitcontroller versorgt. Beide sind aber bei der maximalen Stromstärke begrenzt. Für alle anderen wird die Betriebsspannung über einen Abwärts- und einen Abwärtswandler bereitgestellt.

Diese müssen zum einen den in Tabelle 7 geforderten Ausgangsstrom liefern, zum anderen aber auch über einen möglichst hohen Wirkungsgrad verfügen. Anderenfalls würde sich die daraus resultierende höhere Leistungsaufnahme negativ auf die Laufzeit

des Systems auswirken. Um diesem Aspekt nachzukommen, sind Schaltregler mit Werten zwischen 80 und 95 Prozent am besten geeignet. Für 6 Volt Ausgangsspannung wurde das Modell „OKR-T/6 W12-C“ mit 6 Ampere, für 12 Volt das Modell „JCA0605S12“ mit 0,5 A Ausgangsstrom ausgewählt. Abbildung A 2 zeigt den nun kompletten Systemaufbau.

4.3.7 Sonstiges

1. Spannungsüberwachung

Ausgehend davon, dass Typ und Betriebsspannung des Akkumulators nun festgelegt sind, kann jetzt auch das Konzept zur Spannungsüberwachung näher betrachtet werden. Da die Spannung mit fortschreitender Entladung immer weiter abnimmt, lässt dies Rückschlüsse auf die verbleibende Kapazität zu. Dabei verläuft die Spannungskurve bei der Entladung von LiIon-Akkumulatoren relativ gleichmäßig und geradlinig.

Das Axsen-Board ist in der Lage, über einen, dem analogen Eingang nachgeschalteten AD-Wandler Spannungen von 0 – 5 Volt auf einen Wertebereich von 0 – 255 abzubilden. Da die Ausgangsspannung des Akkumulators im vollgeladenen Zustand knapp 8,4 Volt beträgt, muss sie vor dem Eingang entsprechend reduziert werden. Hierzu kann ein Spannungsteiler genutzt werden.

Dieser wird durch zwei in Reihe geschaltete ohmsche Widerstände realisiert, wie in Abbildung 4.8 dargestellt. Ausgehend vom ohmschen Gesetz

$$R = U \times I \text{ bzw. } I = \frac{U}{R}$$

lässt sich auf Grundlage von physikalischen Gegebenheiten, Einsetzen und Äquivalenzumformung die Aussage treffen, dass das Verhältnis aus Widerstand R_2 und der über R_2 abfallenden Spannung U_A identisch mit dem Verhältnis aus Gesamtwiderstand $(R_1 + R_2)$ und der darüber abfallenden Spannung U_E ist:

$$\frac{U_A}{R_2} = \frac{U_E}{R_1 + R_2}$$

Umgeformt zu

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

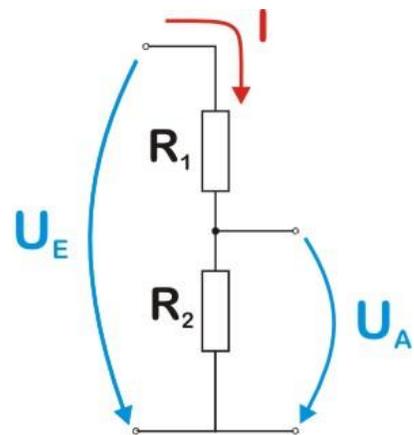


Abbildung 4.8:
allgemeiner Aufbau eines
Spannungsteilers

ist dieser Sachverhalt als Spannungsteilerregel bekannt. Die Ausgangsspannung ist also von den Werten beider Widerstände und ihrem Verhältnis untereinander abhängig. Es muss in der Realisierungsphase zum einen das richtige Verhältnis für maximal 5 Volt

Ausgangsspannung gefunden, zum anderen darauf geachtet werden, dass die Werte hinsichtlich der Leistungsaufnahme so hoch wie möglich gewählt werden. Zudem ist der dem Eingang am Aksen-Board nachgeschaltete 47 KOhm-Widerstand und deren Einfluss bei der Berechnung zu berücksichtigen.

2. USB-to-Serial-Adapter

Ein solcher Adapter bietet je nach Ausführung einen oder mehrere D-SUB9-Anschlüsse nach RS232-Standard. Er kann über eine USB-Schnittstelle mit dem Netbook verbunden werden. Der Adapter sorgt selbst für die Umwandlung von beiden Seiten eingehender Daten. Am Netbook wird für jeden DSUB-Anschluss eine virtuelle COM-Schnittstelle eingerichtet, über die mit dem angeschlossenen Gerät kommuniziert werden kann.

Nach aktuellem Entwicklungsstand werden 5 Komponenten über besagte Schnittstelle angesprochen. Die beiden verfügbaren 2fach-Adapter reichen hierfür nicht mehr aus. Da auch nur noch zwei USB-Ports zur Verfügung stehen, muss ein 4fach-Adapter hinzugezogen werden.

3. Decksdurchführung, Stecker

Einige Komponenten müssen außerhalb des Rumpfes angebracht werden. Dies betrifft vor allem Windsensor und LED. Anderenfalls sind sie ihren Funktion eingeschränkt oder unbrauchbar. Beide benötigen eine Kabelverbindung zu dem abgeschlossen im Bootsinneren liegenden System. Folglich muss eine Decksdurchführung realisiert werden, die vollkommen wasserdicht sein muss.

Desweiteren soll vermieden werden, dass die beiden Akkumulatoren zum Laden aus dem Rumpf entnommen werden müssen. Ermöglichen würde das eine Steckverbindung zwischen Ladegerät und Akkumulator, die Buchse ebenfalls im Deck des Bootes eingelassen. Befindet es sich an Land, kann der Stecker mit Verbindung zu den Ladegeräten montiert werden. Im Betrieb wird die Buchse wasserdicht verschlossen.

4. Hauptschalter

Ein derartiger Schalter ist für das System unverzichtbar. Es soll über ihn komplett außer Funktion gesetzt werden können. Der Schalter muss dafür leicht zugänglich positioniert werden. Ist dieser zweipolig ausgeführt, wäre es zudem möglich, die Ladefunktion darüber einzuschalten. Die Abbildung rechts zeigt einen entsprechenden Entwurf.

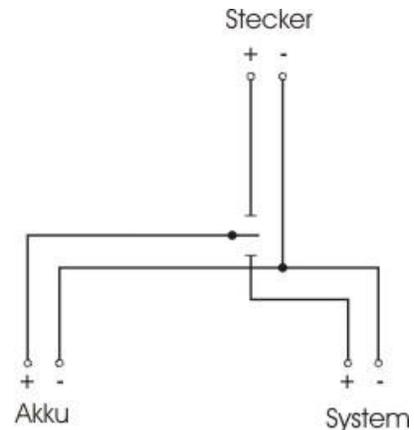


Abbildung 4.9: Schema zur Steuerung der Energieversorgung über einen Schalter

5. Aufnahme für Windsensor am Masttop

Der bisherige Beschlag⁸ ist zu klein und nicht für das Anbringen des Windsensors ausgelegt. Folglich muss neu konstruiert und angefertigt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass Bohrungen und Aussparungen für Mast und Segel übernommen werden, der Beschlag aber so klein und leicht wie möglich bleibt, um das Gewicht an der Mastspitze nicht übermäßig zu erhöhen. Einen entsprechenden Entwurf zeigt im Abbildung A 7 im Anhang.

6. Gewicht

Neben dem Gewicht des Windsensors und seiner Aufnahme, ist zudem auch das der anderen Komponenten zu betrachten, da zusätzliches Gewicht zum einen den Auftrieb und damit die Seetüchtigkeit des Bootes verringert, zum anderen abhängig von der Positionierung die Stabilität bei Windeinwirkung beeinflusst. Tabelle 8 listet das zu erwartende Gewicht der einzelnen Komponenten auf.

Modul	Gewicht
GPS	40 g
Kompass	30 g
Anemometer	300 g
Echolot	1000 g
Funkmodul	~100g
Servocontroller	~100 g
Hauptcontroller	1500 g
Servos	-
Akkumulator	~600 g
Sonstiges (Adapter, Kabel, usw.)	~300 g
Summe	3970 g

Tabelle 8: Aufstellung des erwarteten Zusatzgewichts

⁸ Sammelbegriff für Einrichtungen an Bord, die etwas verbinden, befestigen oder sichern [Deu08, 86]

4.4 Softwarearchitektur

4.4.1 Funktionen

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Programm entstehen, das alle Komponenten auch auf Softwareebene miteinander verbindet und jedes Gerät je nach Typ ansprechen bzw. abfragen kann. Diese Verbindungen müssen zu Programmbeginn mit, auf die jeweilige Komponente abgestimmten Parametern initialisiert werden. Ist eine Verbindung hergestellt, sollte eine Wächterfunktion, in diesem Zusammenhang oft auch als „Watchdog“ bezeichnet, ihr Bestehen kontrollieren. Wird sie unterbrochen oder reißt ab, ist dieser Zustand zu detektieren und ein Hinweis oder Fehlermeldung auszugeben. Da alle Komponenten entweder direkt über Bereitstellung ihrer Daten oder indirekt auf Nachfrage mit der Software kommunizieren werden, lässt sich dieser Umstand für die Realisierung nutzen. Ist über die normale Reaktionszeit hinaus und trotz mehrfacher Anfrage kein Dateneingang zu verzeichnen, deutet dies auf eine Unterbrechung hin. Die Erkennung eines solchen Zustands ist gerade im Bereich der Aktorik wichtig.

Einige Sensoren können nach Verbindungsaufnahme konfiguriert werden. So lassen sich zum Beispiel Abtastrate oder Ausgabeformat verändern. Dazu sind komponentenspezifische Befehle, die dem Gerät eine Änderung seiner Konfiguration anzeigen. Für die Anwendung am komfortabelsten wäre eine Datei, über die der Benutzer im Vorfeld Änderungen an den Parametern vornehmen kann. Diese Datei wird bei Programmstart geöffnet, die Parameterwerte eingelesen und mit Hilfe vom Sensor vorgegebenen Befehle übermittelt.

Anschließend sollen über eine Menüauswahl Interaktionen mit einem Benutzer ermöglicht werden. Dazu ist aufgrund des Entwicklungsstatus‘ nicht zwingend eine grafische Benutzeroberfläche erforderlich, eine Ausgabe in einem Kommandozeilenfenster vollkommen ausreichend. Dort können sich eine Reihe von Informationen anzeigen lassen, aber auch die Aktorik über einen entsprechenden Modus selbst durch Eingabe von Befehlen ansteuern. Aus dem Menü heraus kann das Programm jederzeit beendet werden.

4.4.2 Aufbau und Struktur

Geht man von der auf Hardwareebene konzeptionierten Trennung in Haupt- und Servocontroller aus, zieht dies auch eine Zweiteilung des Programms nach sich. Dabei sind die Funktionen, die jede der beiden Komponenten übernehmen kann, von ihrer Ausstattung und ihrer Rechenleistung abhängig. Da die für die Steuerung notwendigen Motoren direkt an das vorgesehene Achsen-Board angeschlossen werden können, bietet sich die Auslagerung des für die Ausführung von Steuerbefehlen verantwortlichen Teils an.

Der Großteil verbleibt aber auf dem Hauptcontroller, der dafür zuständig ist, die Kommunikation mit den Sensoren zu gewährleisten, die von ihnen bereitgestellten Daten einzulesen und weiter zu verarbeiten. Diese Vielzahl an Aufgaben macht eine Modularisierung des Programms erforderlich, zumal einige Teile aufgrund der kurzen Reaktionszeit bezüglich Änderungen in der Umgebung des Bootes parallel ausgeführt werden sollten. Dies betrifft insbesondere die Sensorik, wobei aber zu beachten ist, dass diese mit unterschiedlichen Abtastraten arbeiten. Für die gewünschte Parallelisierung wäre die Nutzung von Threads sinnvoll, wobei je einer für jede Daten sendende und/oder empfangene Komponente eingerichtet werden müsste. Die einzelnen Threads werden aus dem in einer Schleife laufenden Hauptprozess gestartet und gesteuert, die einzelnen Komponenten bei jedem Durchlauf auf neue Daten abgefragt. Dabei ist wahrscheinlich, dass die Daten in den Threads abhängig von den Abtastraten der Sensoren langsamer und nicht synchron mit dem Zeitpunkt der Abfrage empfangen werden. In diesem Fall, werden sie zunächst in einem Puffer zwischengespeichert. Gleiches gilt im Umkehrschluss für zu sendende Daten, wie zum Beispiel anhand der Sensorwerte errechnete Befehle für die Aktorik.

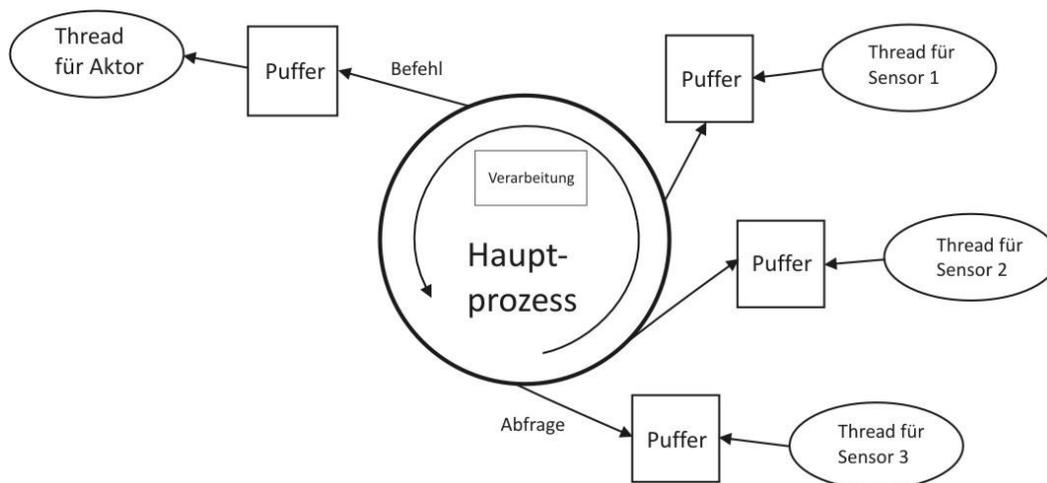


Abbildung 4.10: vereinfachte Programmstruktur

Da die Anzahl der Sensoren recht zahlreich ist, bietet es sich an, für jeden eine eigene Klasse zu definieren, deren Objekte eigenständig eine Kommunikationsverbindung zum entsprechenden Sensor aufbauen und unterhalten. Daraus ist ersichtlich, dass einige Funktionen in allen Klassen gleichermaßen ausgeführt werden. Hier bietet sich eine gemeinsame Oberklasse an, von der diese Funktionen geerbt und gegebenenfalls überschrieben werden.

Der Datenaustausch mit allen Komponenten wird über eine serielle (COM-) Schnittstelle realisiert. Funktionen wie das Initialisieren und Beenden einer Verbindung oder das Senden und Empfangen von Daten können ebenfalls in einer Klasse zu zusammengefasst werden. Daneben sollen empfangende Daten zur Überprüfung in eine Datei geschrieben und Parameter zur Konfiguration einer Komponente aus einer solchen ausgelesen werden. Diese Funktionen sind zum Teil aneinander gekoppelt und insgesamt als (Daten-) Ein- und Ausgabe zu betrachten.

Neben der einheitlichen Schnittstelle unterstützen fast alle das NMEA 0183-Protokoll, mit dessen Hilfe Daten in einem einheitlichen Format versendet werden. Auswertung und Überprüfung können ebenfalls in eine Klasse ausgelagert werden.

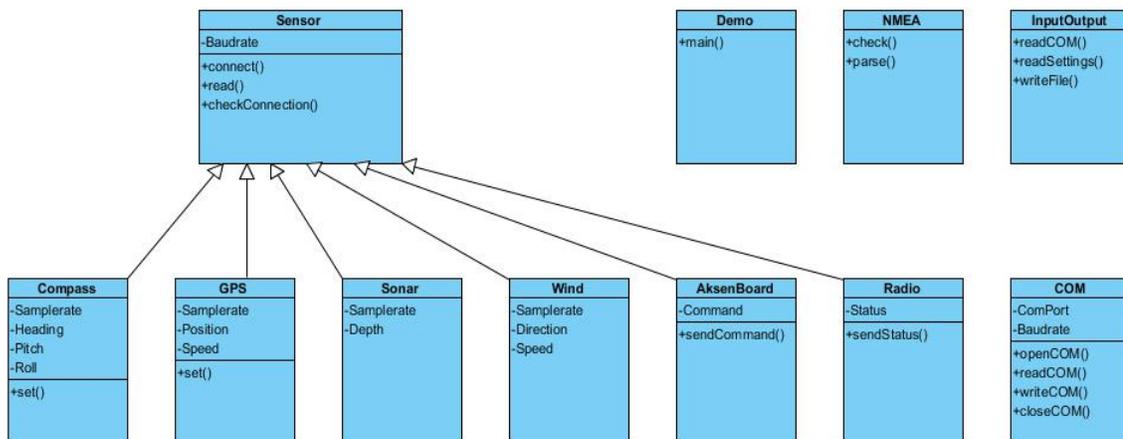


Abbildung 4.11: Klassendiagramm zum Aufbau des Hauptprogramms

Über das NMEA 0183-Protokoll werden ausschließlich Daten vom Sensor versendet. Einige lassen sich aber auch konfigurieren und bieten dafür ein spezifisches Protokoll an. Für das Aksen-Board muss eine eigene Form für die Datenübertragung entwickelt werden. Für das Senden und Empfangen wird auf Seiten des Hauptcontrollers auf die Funktionen der Klasse COM zurückgegriffen, auf Seiten des Servocontrollers können die dort dafür vorhandenen Bibliotheksfunktionen genutzt werden. Auf die jeweiligen Protokolle wird in Kapitel 4.4.3 eingegangen.

Das Aksen-Board stellt ebenfalls Funktionen für das Ansteuern von Servomotoren bereit. Die entsprechenden Steuerbefehle sind aber abhängig von den eingehenden Sensordaten und werden deshalb im Hauptcontroller berechnet. Anschließend werden sie an den Servocontroller gesendet, um dort auf Fehler bei der Übertragung und zulässige Werte überprüft und anschließend an die Servomotoren unter Nutzung der verfügbaren Funktion an die Servomotoren weitergeleitet zu werden.

Bei der Übertragung der Daten selbst, als auch bei der Kommunikation an sich, können zahlreiche Fehler, wie zum Beispiel das Ausbleiben einer Antwort auf eine gestellte Anfrage, auftreten. Solche Fehler müssen über ein entsprechendes Exception-Handling abgefangen und falls möglich behoben werden.

4.4.1 Schnittstellen, Protokolle und Datenformate

Nach außen hin nutzt das Programm die serielle Schnittstelle nach RS-232 – Standard, Daten an die Komponenten zu übertragen oder von ihnen zu empfangen. Dabei existiert für jeden Teilnehmer eine separate Verbindung mit einer eindeutigen Portnummer. Die Daten werden ASCII-codiert in Paketen mit je 8 Bit übertragen, umgeben von einem Start- und einen Stoppsbit [Kol11]. Zusätzlich kann ein Paritybit enthalten sein. In den meisten Fällen wird aber darauf verzichtet. Man spricht im Zusammenhang mit dieser am häufigsten verwendeten Konfiguration auch von einer „8-N-1“-Notation.

Innerhalb des Programms ist eine Schnittstelle zwischen den Threads der einzelnen Komponenten und dem Hauptprozess notwendig. Hier werden die Daten der Sensoren oder neue Befehle oder Ausgaben übergeben. Der bereits erwähnte Puffer hält sie mit einer definierten Struktur für ein Auslesen bereit. Die Sensoren übertragen ihre Werte aber zusammengefasst nach dem NMEA 0183-Protokoll, müssen also vorher in ihre Bestandteile entsprechend aufgesplittet werden.

Der NMEA-Standard wurde ursprünglich dazu definiert, den „Datenaustausch zwischen verschiedenen Geräten aus der Marineelektronik zu ermöglichen“ [Köh09]. Dabei sind mehrere Messwerte zu einem Satz zusammengefasst. Zu Beginn eines jeden Satzes steht ein \$-Zeichen, gefolgt von einer fünfstelligen Zeichenkette. Darauf folgen, jeweils mit einem Komma voneinander getrennt, die einzelnen Werte. Eine Checksumme wird ausgehend vom ersten Zeichen nach dem einleitenden \$-Zeichen mit einem „*“ getrennt an das Ende angehängt. Ein Zeilenumbruch („CR“+“LF“) schließen einen Satz ab. Nachfolgend als Beispiel ein Datensatz eines GPS-Empfängers:

```
$GPGGA,164423.750,5225.0615,N,01233.3300,E,1,04,17.7,37.0,M,43.2,M,,0000*5D
```

Für den Datenaustausch mit dem Aksen-Board kann auf die oben genannte Schnittstelle zurückgegriffen werden, das NMEA 0183-Protokoll wird aber nicht unterstützt. Aufgrund der Tatsache, dass sich bei diesen Daten vorwiegend um, für die Steuerung wichtige,

Aktorikbefehle handelt, soll gewährleistet sein, dass ein Fehler bei der Übertragung detektiert werden kann. Dazu kann ein Drei-Wege-Handshake-Verfahren angewendet werden, wie es Tanenbaum [And03] beschreibt. Hier wird zunächst eine Anfrage auf Empfangsbereitschaft gestellt und eine Bestätigung abgewartet, bevor die Nutzdaten gesendet werden.

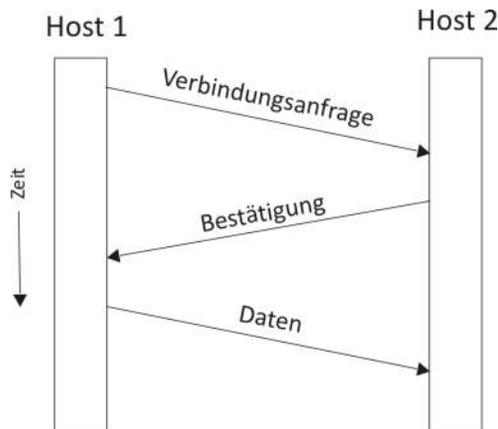


Abbildung 4.12: grundlegender Ablauf des Dreiwege-Handshake-Verfahrens
Quelle: [And03, 548]

Einige Komponenten lassen sich auf verschiedene Art konfigurieren und ihre Ausgaben den Anforderungen des Programms anpassen. Dazu gehören der Kompass (Modell OS5000), der GPS-Empfänger und das Funkmodul. An dieser Stelle sind Protokoll bzw. Datenformat kurz beschrieben, eine genauere Dokumentation ist den entsprechenden Handbüchern auf der beiliegenden CD zu entnehmen.

Kompass

Bei genanntem Modell ist die Konfiguration sehr komfortabel vorzunehmen. Das Empfangen des ASCII-Zeichens <ESC> stoppt die Ausgabe der Messdaten und startet den Konfigurationsmodus. Ein Befehlszeichen selektiert den zu ändernden Parameter. Anschließend werden der gewünschte Wert und ein abschließender Zeilenumbruch gesendet. Der Kompass sendet auf jedes Element eine entsprechende Rückmeldung. Die nachfolgende Tabelle gibt ein Überblick über die änderbaren Parameter.

Befehl	Parameter	Wertebereich
<ESC>B	Baudrate	0 (4800) – 6 (115200)
<ESC>R	Abtastrate	-50 bis 40
<ESC>X	Auswahl der gesendeten Elemente	0 - 8191
<ESC>Q	Deklination	Winkel *10
<ESC>C	Hard-Iron-Kalibrierung (X,Y)	
<ESC>Z	Hard-Iron-Kalibrierung (Z)	
<ESC>A	Filter für Pitch, Roll und Heading	
<ESC>+	Temperatur-Offset	
<ESC>U	Skalierung des magn. Feldes	
<ESC>D	Filterwert für AD-Wandler	
<ESC>*	Ausgabeformat	1,2,4,8
<ESC>E	Kompass-Ausrichtung	
<ESC>&	Ausgabe der aktuellen Einstellung	
<ESC>\$	Soft-Iron Kompensation	0,1,2
<ESC>S	Degauss- & Offset-Rate	

Tabelle 9: Konfigurationsmöglichkeiten des Kompass‘

GPS-Empfänger

Hier erfolgt die Konfiguration unter Nutzung des UBX-Protokolls. Dieses stellt sogenannte Config-Messages bereit. Diese orientieren sich in ihrer Struktur an die eines NMEA-Datensatzes. So trägt eine Nachricht zum Ändern der Abtastrate folgendes Format:

```
$PUBX,40,msgId,rddc,rus1,rus2,rusb,rspi,reserved*cs<CR><LF>
```

Der Empfänger sendet abhängig davon, ob die Änderung ausgeführt werden konnte, eine positive (ACK) oder negative (NAK) Bestätigung.

Funkmodul

Das Funkmodul wird über sogenannte AT-Kommandos konfiguriert. Abgesehen von der einleitenden Zeichenkette „AT“ besteht hier eine Ähnlichkeit zu dem oben beschriebenen Befehl zur Konfiguration des Kompasses.

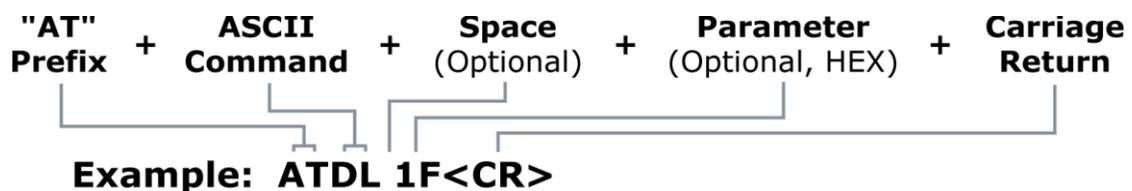


Abbildung 4.13: Struktur eines AT-Befehls zur Konfiguration des Funkmoduls

Quelle: [Dig08, 19]

5 Realisierung und Implementierung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Auswahl aller notwendigen Komponenten getroffen wurde und diese nach Durchlaufen des Beschaffungsprozesses nach und nach zur Verfügung stehen, ist es nun möglich, alle Bestandteile in das schon vorgestellte Gesamtsystem einzugliedern. Wichtig dabei ist zunächst, sie mit der von ihnen benötigten Betriebsspannung zu versorgen und ein Datenaustausch über ihre Schnittstelle zu ermöglichen. Unter Schnittstelle ist dabei sowohl die in Hardware stattfindende Verbindung als auch die in Software zu realisierende Möglichkeit zur Kommunikation zu verstehen. Zunächst soll die physische Umsetzung des Systems und anschließend die Implementierung des Programms erläutert werden. Die folgenden Ausführungen bieten Anhaltspunkte für die Weiterentwicklung des Projekts.

5.1 Hardware

Die Konzeptionsphase hat ergeben, dass ein Modellsegelboot in entsprechender Größe eine geeignete Basis für das Projekt bildet. Da die am Markt verfügbaren Modellen gerade wegen ihrer Maße nur als Bausatz erhältlich sind und ein Aufbau einen zu großen zeitlichen Aufwand bedeutet, ist die Wahl auf ein gebrauchtes, segelklares und in einem sehr guten Zustand befindliches Exemplar des Typs „Smaragd“ gefallen. Die Anschaffungskosten entsprachen inklusive Zubehör und drei Motoren denen des Bausatzes exklusive dem für einen betriebsfähigen Zustand notwendigen Zubehör. Zeit- und Kostenersparnis sind also enorm, der erste Meilenstein des Projekts erreicht.

Da bei der Auswahl der fehlenden Bestandteile des Systems bestimmten Kriterien, wie zum Beispiel der Genauigkeit, dem Gewicht oder der unterstützten Schnittstelle, eine höhere Priorität zuzuordnen ist, konnte keine einheitliche Betriebsspannung gefunden werden. Sie liegt in Abhängigkeit der Komponente bei entweder 5, 6 oder 12 Volt. Dieser Umstand lässt sich aber durch die Umwandlung der Ausgangsspannung des Akkumulators von nominal 7,4 Volt, auf die genannten Spannungen beheben. Diese Verfahrensweise ist bei größeren Systemen mit vielen unterschiedlichen Komponenten nahezu unumgänglich.

Für die Transformation auf 12 bzw. 6 Volt sind zwei Schaltregler mit einem hohen Wirkungsgrad von bis zu 84 Prozent bei der Aufwärtswandlung und bis zu 95 Prozent bei der Abwärtswandlung, sowie 0,5 bzw. 6 Ampere Ausgangsstrom zuständig. Tabelle 7 in Kapitel 4.3.7 gibt für 6 Volt Versorgungsspannung einen Maximalstrom von knapp 6200 Milliampere an, was über dem Wert des Schaltreglers liegt. Dieser ist zum einen im Falle einer Überlastung durch interne Einrichtungen geschützt, zum anderen stellt der angegebene Wert das theoretische Maximum dar, das nur erreicht wird, wenn alle Komponenten gleichzeitig unter Volllast betrieben werden. In der Praxis ist aber beispielsweise nicht vorgesehen, dass die beiden Motoren für Segel und Notantrieb

zeitgleich und mit voller Leistung betrieben werden. Zusammengenommen machen sie aber fast 80 Prozent des Maximalwertes aus. Der Durchschnittswert in der praktischen Anwendung sollte abhängig von den äußeren Bedingungen bei zirka zwei Ampere liegen.

Bei einigen Komponenten, dazu gehören Kompass, GPS-Empfänger, LED, Relais, RC-Receiver und RC-Schalter liegt die maximale Betriebsspannung entweder bei 5 Volt, oder der vom Hersteller angegebene Bereich macht einen Betrieb mit dieser Spannung möglich. Letztere Möglichkeit wird genutzt, um den Systemaufbau einfacher und das Design übersichtlicher zu machen.

Sowohl das Aksen-Board, als auch der Fahrtregler durch ein BEC-System, stellen über einen internen Wandler Ausgänge bereit, an denen eine Spannung von 5 Volt anliegt. Das Aksen-Board verfügt darüber hinaus über die Möglichkeit, unter anderen LEDs mit Hilfe board-eigener Bibliotheksfunktionen ansprechen oder auch steuern zu können. Die Status-LED sowie die Kompassbeziehung beziehen ihre Energie über das Aksen-Board. Der Fahrtregler selbst ist über den Schaltregler mit dem Akkumulator verbunden und mit Energie versorgt. Normalerweise hauptsächlich bei ferngesteuerten Modellautos eingesetzt, verfügt er zudem über ein Servokabel, das mit dem RC-Receiver verbunden wird. Dort von der Fernsteuerung empfangene Signale werden so weitergeleitet. Im Gegenzug erhält der Receiver über dieses dreiadrigige Kabel die für seinen Betrieb benötigte Energie.

Die dritte Ader für das PWM-Signal wurde aber in diesem Fall abgetrennt, da dies für den Fallback-Modus nötig ist. Für die bessere Veranschaulichung sei an dieser Stelle auf Abbildung 4.7 und Tabelle 9 zur Stecker- und Kabelbelegung verwiesen. Dort soll auch noch einmal genauer auf diesen Aspekt eingegangen werden.

Der RC-Receiver kann neben seiner eigentlichen Funktion auch als Energieverteiler gesehen werden, da er, sofern er selbst mit Energie versorgt wird, diese auch an alle anderen angeschlossenen Geräte weitergibt. Diese Eigenschaft wurde sich für den Betrieb des RC-Schalters zu Nutze gemacht.

Die grundlegende Funktionsweise ist bereits in Kapitel 4.3.5 beschrieben. Das verwendete Modell lässt zudem mehrere per DIP-Schalter wählbare Einstellungen für die beiden steuerbaren Kanäle zu. Dabei kann zwischen einer Tast- und einer Rastfunktion umgeschaltet werden. Tastfunktion bedeutet, dass nur ein kurzer Stromimpuls ausgegeben wird, Rastfunktion entsprechend, dass dauerhaft Strom fließt. Für den hier vorliegenden Fall ist die Tastfunktion die bessere Wahl, da das Relais nur einen Impuls zum Umschlagen benötigt und danach auch unbestromt in seiner Stellung verbleibt.

Prinzipiell benötigt der RC-Schalter für den Laststromkreis eine eigene Spannungsquelle. Die Spannung muss dabei mindestens 6 Volt betragen und wird über den Schaltregler vom Akkumulator bereitgestellt. Da die einzige Aufgabe dieses Bauelements im Schalten

des Relais besteht, dieses aber nur mit 5 Volt Spannung betrieben werden darf, muss ein Widerstand zwischengeschaltet werden, der die Spannung entsprechend reduziert.

Die letzte Komponente, die mit besagten 5 Volt versorgt werden muss, ist der GPS-Empfänger. Dieser hat aber die Besonderheit, dass er direkt am USB-Port des Hauptcontrollers angeschlossen wird. Damit verfügt er, ohne Änderungen an Stecker oder Kabel vornehmen zu müssen, über eine Energieversorgung und eine Schnittstelle für die Kommunikation.

Windsensor und Echolot benötigen 12 Volt Betriebsspannung, für die restlichen Komponenten wurde ein Wert von 6 Volt gewählt, da dieser sich bei allen innerhalb des vom jeweiligen Hersteller angegebenen Spannungsintervalls befindet. Mit den Ausnahmen Hauptcontroller, GPS-Empfänger und USB-to-Serial-Adapter beziehen alle Komponenten des Systems direkt oder indirekt über den 7,4 Volt-Akkumulator.

Um die dafür notwendigen physischen Verbindungen zu realisieren, bietet es sich an, einen gemeinsamen Knotenpunkt zu schaffen. Ein weiteres Argument dafür ist, dass die beiden Schaltregler und das Relais in einer sogenannten „Print“-Form vorliegen, was bedeutet, dass sie auf eine entsprechende Platine gelötet werden müssen. Ein entsprechendes Konstrukt, nachfolgend als „Powerboard“ bezeichnet, enthält neben den Bauteilen für das Umwandeln der Spannung, das Relais für den Fallback-Modus und Steckverbindungen für die Aufnahme von Strom- und Signalkabeln. Ein Schaltplan und das Board-Design sind im Anhang unter Abbildung A 6 zu finden. Bei den Anschlüssen finden reversible und verpolungssichere Steckverbindungen Verwendung, um spätere Wartungs- und Erweiterungsarbeiten schnell zu ermöglichen und die Funktionsfähigkeit des Systems auch nach einer Demontage einfach wieder herstellen zu können. Die einzelnen Kontakte sind dabei, soweit möglich entsprechend den angeschlossenen Bauteilen gruppiert und zu einem Stecker zusammengefasst. Die Steckerbelegung ist den folgenden Tabellen zu entnehmen, die Bezeichnungen stimmen mit denen des Board-Designs überein und auch im System entsprechend beschriftet.

Bezeichnung	Pin	Farbe des Kabels	Angeschlossene Komponente / Buchse
JP1	1	-	-
	2	grün	Unterer DSUB9-Buchse (Pin 7)
	3	gelb	Unterer DSUB9-Buchse (Pin 3)
	4	orange	Unterer DSUB9-Buchse (Pin 8)
JP2	1	gelb	RC-Schalter
	2	gelb	RC-Schalter
	3	schwarz	RC-Schalter
	4	rot	RC-Schalter
JP3	1	violett	Aksen-Board (Signalpin Servoport 0)
	2	grün	Aksen-Board (Signalpin Servoport 1)
	3	gelb	Aksen-Board (Signalpin Servoport 2)
	4	braun	Aksen-Board ((+) - Pin Analogport 7)
	5	orange	Aksen-Board (Signalpin Analogport 0)
	6	schwarz	Aksen-Board (Stromanschlusstecker)
	7	rot	Aksen-Board (Stromanschlusstecker)
	8	-	-
JP4	1	schwarz	Obere DSUB9-Buchse (Pin 1)
	2	rot	Obere DSUB9-Buchse (Pin 6)
	3	gelb	Obere DSUB9-Buchse (Pin 2)
	4	schwarz	Obere DSUB9-Buchse (Pin 7)
	5	rot	Obere DSUB9-Buchse (Pin 3)
	6	gelb	Obere DSUB9-Buchse (Pin 8)
	7	schwarz	3-polige Buchse => LED (-)
	8	rot	3-polige Buchse => LED (+)
JP5	1	schwarz	Echolot (-)
	2	schwarz	3-polige Buchse => Windsensor (-)
	3	rot	3-polige Buchse => Windsensor (+)
	4	rot	Echolot (+)
JP6	1	schwarz	Obere DSUB9-Buchse (Pin 4)
	2	rot	Obere DSUB9-Buchse (Pin 5)
JP8	1	schwarz	Akkumulator (-)
	2	rot	Akkumulator (+)
JP10	1	schwarz	Fahrtregler (-)
	2	rot	Fahrtregler (+)
	3	orange	Fahrtregler (Signal)
	4	-	-

Tabelle 10: Steckerbelegung an Powerboard

Neben den Kabeln für die Energieversorgung laufen auch die Signalkabel von RC-Receiver, RC-Schalter, Aksen-Board, Fahrtregler und den Servomotoren selbst am Powerboard zusammen. Abhängig davon ob, der autonome oder manuelle Modus gewählt wurde, werden die PWM-Signale entweder vom Aksen-Board oder vom RC-Receiver über das Relais an die Servomotoren weiter geleitet.

Weitere Bauelemente auf dem Powerboard sind ein 220 Ohm Präzisionswiderstand, der die Ausgangsspannung des Abwärtsreglers auf 6 Volt festlegt, sowie eine Steckbrücke, mit der jener Regler separat ein- und ausgeschaltet werden kann. Standardmäßig ist diese Verbindung geöffnet und das Bauteil damit eingeschaltet. Ein Ausschalten ist nicht zu empfehlen, da sonst allen dort angeschlossenen Komponenten die Ausgangsspannung des Akkumulators direkt anliegt, wodurch diese beschädigt oder zerstört werden könnten.

Außerdem ist auf der Platine der bereits in Abschnitt 4.3.7 erwähnte Spannungsteiler untergebracht, dessen Funktionsweise und Zweck an dieser Stelle nochmal genauer erläutert werden soll. Des Weiteren ist der Einfluss des Widerstands des Aksen-Boards zu betrachten.

Ziel ist es, eine direkte Proportionalität zwischen Eingangsspannung U_E und Ausgangsspannung U_A nachzuweisen. Dies wäre der Fall, wenn sich eine Gleichung aufstellen lässt, die der Form $U_A = m \times U_E + n$ entspricht.

U_E beträgt im Maximalfall 8,4 Volt, U_A darf 5 Volt nicht überschreiten. Durch den dritten Widerstand erweitert sich der Aufbau wie ihn Abbildung 5.1 zeigt. Der Wert des Widerstands R_3 beträgt 47000 Ohm. V_{CC} ist die interne Versorgungsspannung des Aksen-Board. Zunächst wird das Verhältnis zwischen R_1 und R_2 ermittelt.

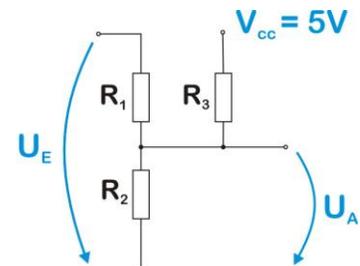


Abbildung 5.1: angepasster Aufbau des Spannungsteilers

Aufgrund der Parallelschaltung von R_1 und R_3 ergibt sich

$$I_A = I_1 + I_3 \quad (1).$$

Die Anwendung der Ohmschen Gesetze führt zu

$$I_A = \frac{U_A}{R_2} = \frac{U_E - U_A}{R_1} + \frac{V_{CC} - U_A}{R_3} \quad (2).$$

Legt man den Wert einer der beiden Widerstände fest,

(z.B. $R_2 = 4700$ Ohm) ergibt sich

$$R_1 = \frac{U_E - U_A}{\frac{U_A}{R_2} - \frac{V_{CC} - U_A}{R_3}} = \frac{8,4 V - 5 V}{\frac{5 V}{4700 \Omega} - \frac{5 V - 5 V}{47000 \Omega}} = 3196 \Omega.$$

Der nächstgelegene Wert eines Widerstands beträgt 3300 Ohm.

Zum Nachweis der Proportionalität liegt ebenfalls (2) zu Grunde.

Äquivalenzumformung führt zu

$$\frac{U_A}{R_2} = \frac{R_3 \times (U_E - U_A) + R_1 \times (V_{CC} - U_A)}{R_1 \times R_3} \quad (3).$$

Weitere Umformungen und Umstellen nach U_A ergeben

$$U_A = \frac{R_2 \times R_3 \times U_E + R_1 \times R_2 \times V_{CC}}{R_1 \times R_3 + R_2 \times R_3 + R_1 \times R_2} \quad (4).$$

Dies entspricht der oben genannten Form. Einsetzen der Werte für $R_1 = 4700 \Omega$, $R_2 = 3300 \Omega$, $R_3 = 47000 \Omega$, und $V_{CC} = 5 \text{ V}$ führen zu der Gleichung

$$U_A = 0,565 \times U_E + 0,198 \text{ V} \quad (5).$$

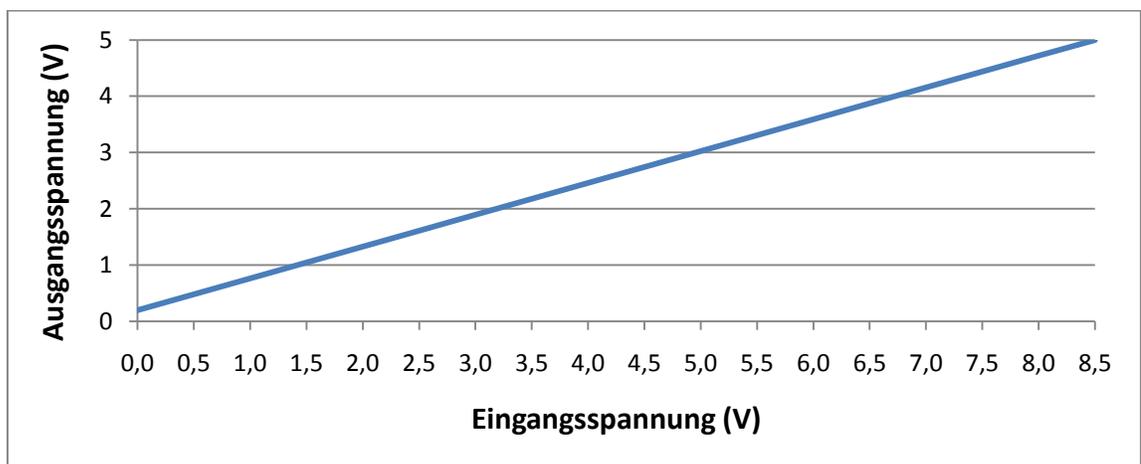


Abbildung 5.2: Diagramm zu Proportionalität von Eingangs- und Ausgangsspannung

Die Ausgangsspannung wird nun am Analogport des Aksen-Boards auf einen Wert zwischen 0 (0 Volt) und 255 (5 Volt) abgebildet. Im geladenen Zustand beträgt die Spannung des Akkumulators 8,4 Volt, was nach Durchlaufen des Spannungsteilers einer Spannung von 4,944 Volt bzw. einem Wert von 252 entspricht. Für das Projekt beschränkt sich das Intervall für die Eingangsspannung auf 5 bis 8,4 Volt, da dies Minimal- und Maximalwert des Akkumulators darstellen. In der Praxis ist bereits aber zirka 6,5 Volt eine Warnung auszugeben, weil die Spannung dort nicht mehr linear mit der Zeit abfällt.

Außerdem ist zu beachten, dass alle Widerstände einer gewissen Toleranz unterliegen. Diese ist in der obigen Berechnung noch nicht berücksichtigt.

Die Anordnung der Komponenten innerhalb des Rumpfes erfolgte unter den Gesichtspunkten Funktion, Gewicht und Vermeidung von Wechselwirkungen. Dabei sollen alle empfindlichen Bauteile zum Schutz vor eindringendem Wasser zusätzlich in wasserdichten Boxen untergebracht werden. Gruppirt wurden zum einen Akkumulator, Powerboard, Aksen-Board, Fahrtregler und RC-Schalter, zum anderen Netbook und die beiden USB-to-Serial Adapter. Alle verbliebenden Komponenten sind zur Vermeidung von Wechselwirkungen und Beeinträchtigung ihrer Funktion separat angeordnet. Einen Überblick bietet Abbildung A 4 im Anhang.

Die Box für erstgenannte Komponentengruppe verfügt über zahlreiche ein- oder ausgehende Kabel. Diese sind unter anderem in zwei DSUB9-Steckverbindungen zusammengefasst. Die Belegung und angeschlossene Bauteile zeigen die Tabellen 10 und 11.

Verbindung von RC-Receiver zu unterem DSUB9-Stecker (Kanal / Kabel / Pin)	Verbindung von unterer DSUB9-Buchse zu Komponente (Kabel / Komponente / Stecker / Pin)
1 (-) / grau / 1	schwarz / RC-Schalter / - / -
1 (+) / violett / 6	rot / RC-Schalter / - / -
1 (Signal) / blau / 2	gelb / RC-Schalter / - / -
2 (Signal) / grün / 7	gelb / PowerBoard / JP1 / 2
3 (Signal) / gelb / 3	orange / PowerBoard / JP1 / 3
4 (Signal) / orange / 8	violett / PowerBoard / JP1 / 4
4 (+) / rot / 4	rot / Fahrtregler / - / -
4 (-) / braun / 9	braun / Fahrtregler / - / -

Tabelle 11: Belegung der unteren DSUB-Steckverbindung

Verbindung von Komponente zu oberem DSUB9-Stecker (Komponente / Kabel / Pin)	Verbindung von oberer DSUB9-Buchse zu Komponente (Kabel / Komponente / Stecker / Pin)
Segelservo (-) / braun / 1	schwarz / Powerboard / JP4 / 1
Segelservo (+) / rot / 6	rot / Powerboard / JP4 / 2
Segelservo (Signal) / orange / 2	gelb / Powerboard / JP4 / 3
Ruderservo (-) / braun / 7	schwarz / Powerboard / JP4 / 4
Ruderservo (+) / rot / 3	rot / Powerboard / JP4 / 5
Ruderservo (Signal) / orange / 8	gelb / Powerboard / JP4 / 6
Funkmodul (-) / schwarz / 4	schwarz / Powerboard / JP6 / 1
Funkmodul / schwarz-weiß / 5	rot / Powerboard / JP6 / 2

Tabelle 12: Belegung der oberen DSUB-Steckverbindung

Einige Kabel konnten aufgrund ihres Querschnitts oder in Hinblick auf bessere Wartbarkeit nicht zu einem Stecker zusammengefasst werden und sind deshalb durch eine ebenfalls wasserdicht abgeschlossene Öffnung nach außen geführt.

Außer für den GPS-Empfänger mussten die Anschlüsse aller Sensoren in Daten und Stromkabel unterteilt werden. Die Stromversorgung wurde wie beschrieben realisiert. Durch die Unterstützung des RS-232-Standards sind alle Sensoren für den Datenaustausch mit einem DSUB9-Stecker ausgestattet, wo abhängig vom Sensor, Pin 2 (Empfangen), Pin 3 (Senden) und Pin 5 (Masse) belegt sind. Darüber können sie problemlos mit den USB-to-Serial Adaptern verbunden werden. Die Ports der Adapter sind beschriftet und die Belegung wie in Tabelle vorgesehen.

Port	Komponente
2	Aksen-Board
3	Funkmodul
4	Windsensor
5	Kompass (OS)
6	Echolot
7	Kompass (TCM)

Tabelle 13: Belegung der Adapter

Das System verfügt über einen nach außen geführten Schalter, über dem allen Komponenten, mit Ausnahme des Hauptcontrollers und den damit verbundenen Adaptern und GPS-Empfänger, die Energiezufuhr gewährt werden kann. Die dritte Position verbindet Akkumulator und Ladegerät, angeschlossene Komponenten bleiben abgetrennt.

Um das Wiederaufladen beider Akkumulatoren zu ermöglichen, ohne diese aus dem Rumpf zu entfernen, ist eine Steckverbindung realisiert, wie sie Kapitel 4.3.7 beschreibt. Die Ladegeräte wurden dementsprechend modifiziert. Beim System-Akkumulator ist die Ladeschale vom Ladegerät getrennt und als Aufnahmepunkt für den jenen mit in die Box eingebracht worden. Die Belegung des Steckers zeigt die Abbildung 5.3.

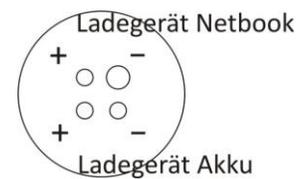


Abbildung 5.3: Belegung des Steckers zum Anschluss der Ladegeräte

Zudem wurde eine weitere wasserdichte Decksdurchführung geschaffen, durch die die Anschlusskabel für LED und Windsensor nach außen geführt werden. Der Beschlag an der Mastspitze wurde nach den entsprechenden Überlegungen (Abbildung A 7) realisiert und kann den Windsensor an dieser Stelle aufnehmen.

Für die Realisierung des Fallback-Modus und dem Umschalten zwischen autonomen und manuellen Modus ist die Fernsteuerung ein unabdingbarer Teil des System. Sie verfügt über zwei Steuerknüppel mit jeweils zwei Achsen. Ihre Funktion ist abhängig von der Belegung am Receiver (vgl. Tabelle 10). Außerdem entscheidet ein Kippschalter über ein Zusammenschalten einzelner Kanäle. Die Stellung „Airplane“ ist davon nicht betroffen und die geeignete Wahl für die Anforderungen des Projekts. Tabelle 14 stellt dar, welcher Steuerknüppel welche Funktion hat.

Steuerknüppel	Achse	Funktion
Links	Horizontal	Ruderservo
Links	Vertikal	Segelservo
Rechts	Horizontal	Links: manueller Modus Rechts: autonomer Modus
Rechts	Vertikal	(Hilfs-) Motor

Tabelle 14: Belegung der Steuerknüppel der Fernbedienung

5.2 Software

5.2.1 Voraussetzungen

Im Vorfeld der Implementierung sind zunächst einige Änderungen an der Softwarekonfiguration des Hauptcontrollers vorgenommen worden.

Zum einen sind den seriellen Schnittstellen im Betriebssystem aufeinanderfolgende COM-Ports zugeordnet worden, um sie aus dem Programm heraus leichter ansprechen zu können. Die Belegung ist Tabelle 12 zu entnehmen, zusätzlich ist dem GPS-Empfänger der Port 8 zugewiesen. Um diese Belegung beizubehalten ist es erforderlich, die entsprechend markierten USB-Ports zu benutzen.

Zum anderen wurde die Möglichkeit geschaffen, das Aksen-Board direkt über den Hauptcontroller zu programmieren. Die Programme „Cygwin“ für das Kompilieren der Quellcodedatei und „Flasher“ für das Übertragen des Maschinen-Codes sind auf dem Netbook installiert und den Gegebenheiten des Systems angepasst. Änderungen an den Kabelverbindungen sind nicht mehr erforderlich.

Damit deutet sich bereits an, dass von der Möglichkeit, Teile der Gesamtsoftware auf das Aksen-Board auszulagern, Gebrauch gemacht wird.

5.2.2 Programm des Aksen-Boards

Hierüber sollen zwei wesentliche Funktionen realisiert werden. Zum einen sollen berechnete oder eingegebene Steuerbefehle an die Aktorik übergeben werden, zum anderen soll die Spannung des Akkumulators abgefragt werden.

Für die Ansteuerung angeschlossener Servomotoren stehen die Funktionen `servo()` und `servo_arc()` zur Verfügung. Tests ergaben, dass Zweitgenannte über die Angabe einen Winkels bessere Ergebnisse liefert. Die Stellwege der Motoren decken sich mit über die Fernsteuerung gesendete „Eingaben“. Das Programm reagiert auf die Eingabe eines Befehls mit dem Format (Servonummer,Winkel). Die Zuordnung, sowie den Wertebereich für den Stellwinkel zeigt Tabelle 15.

Motor für	Nummer	Wertebereich
Verstellung des Segels	0	25 – 85
Verstellung des Ruders	1	34 - 108
Hilfsantrieb	2	32 - 112

Tabelle 15: Belegung und Wertebereich der Motoren

Zu Programmbeginn werden alle Motoren in ihre Null- bzw. Mittelstellung gebracht.

Die Übertragung neuer Steuerbefehle erfolgt nach dem bereits beschriebenen Handshakeverfahren. Dieses wurde allerdings noch erweitert. Nachdem die Übertragungsanfrage bestätigt und der Befehl an sich übertragen wurde, muss das Ende der Übertragung angezeigt werden. Daraufhin wird der Befehl auf Korrektheit (Format und Wertebereich) überprüft in diesem Fall zunächst die Anzahl der empfangenden Befehle als Bestätigung übertragen. Erst nach Erhalt der Freigabe wird der Befehl dann schlussendlich ausgeführt.

Im Fall der Spannungsabfrage ist dieser Sicherheitsmechanismus nicht vorgesehen, da hier eine zyklische Abfrage dazu genutzt werden soll, den Verbindungsstatus zu überwachen und die verbleibende Laufzeit des Systems abschätzen zu können. Hierfür müssen mehrere Werte gemittelt werden, demnach der Einfluss eines verlorenen oder verfälschten Wertes nicht so schwerwiegend wie die ansteigende Anzahl an Datentransfers und der dafür benötigten Zeit.

Um die zu übertragende Datenmenge gering zu halten, bestehen die meisten Kommandos nur aus einem einzigen Zeichen. Welcher empfangener Befehl welche Zustand auslöst, zeigt das folgende Diagramm.

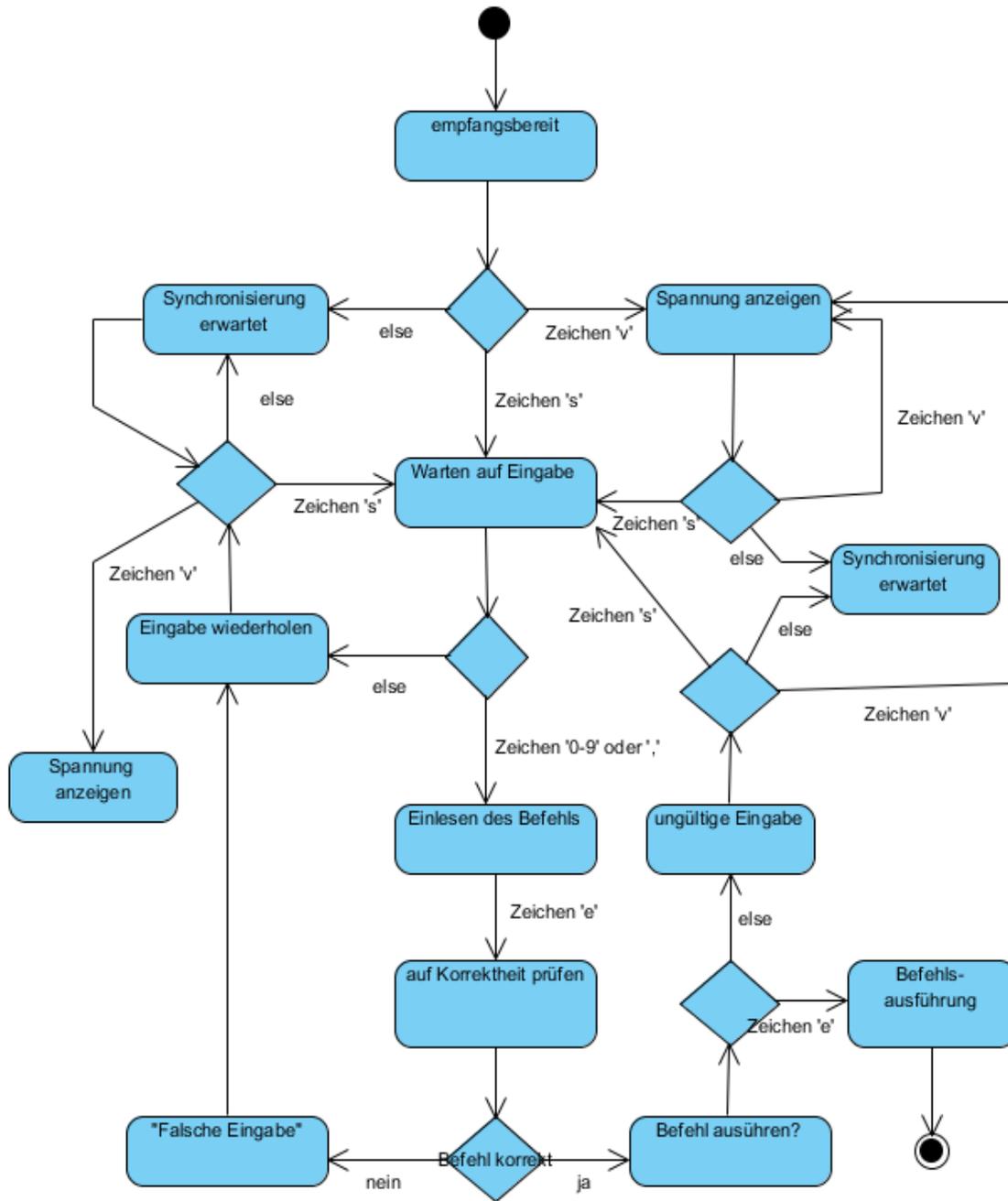


Abbildung 5.4: Zustandsdiagramm des Programms auf dem Aksen-Board

5.2.3 Programm des Hauptcontrollers

Grundlegende Funktion des Programms ist es, eine Kommunikationsverbindung mit allen Komponenten aufzubauen und zu unterhalten. Dafür wurde auf das Programm von Anton Zechner [Zec11] aufgebaut. Es bietet Funktionen, um entweder einzelne Zeichen oder eine Zeichenkette mit fest definierter Länge zu senden oder zu empfangen. Erstes ist für die Kommunikation mit dem Aksen-Board vollkommen ausreichend, hat sich aber auch bei den anderen Komponenten als die bessere Lösung herausgestellt, da die Zeichenketten im NMEA-Format unterschiedlich lang sein können.

Über das für die Demonstration vorgesehene Auswahlmenü können die zur Verfügung stehenden Funktionen selektiert werden. Dazu gehören die Anzeige der Daten von GPS-Empfänger, Kompass und Windsensor, die Anzeige der Spannung des Akkumulators, sowie die Eingabe oder Generierung von Steuerbefehlen für die Motoren.

Abbildung 5.4 zeigt bereits, welche Kommandos der Servocontroller vom Hauptcontroller empfängt und wie er darauf reagiert. Umgekehrt entscheiden die Rückmeldungen über den weiteren Ablauf des Hauptprogramms. Dazu muss außerdem bekannt sein, welcher Schritt des Handshake-Verfahrens gerade durchlaufen wurde und welcher Schritt als nächste folgt. Dies wird von den Variablen „ActualCommand“ und „LastCommand“ übernommen.

In der folgenden Abbildung ist der Ablauf am Beispiel eines über die Konsole eingegebenen Befehls grafisch dargestellt.

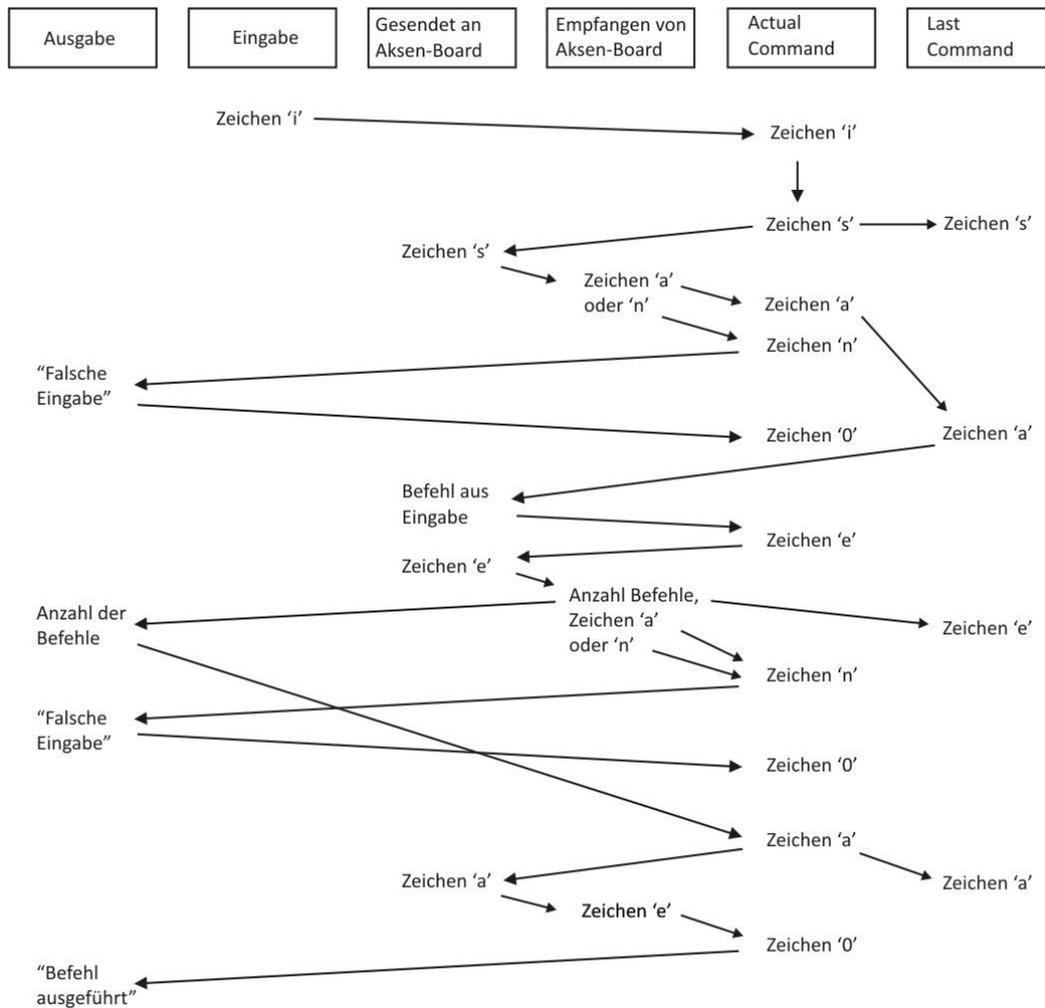


Abbildung 5.5: Sequenzdiagramm zum Programmablauf nach Eingabe eines Steuerbefehls

Die nächste wichtige Funktion ist das Einlesen der Sensorwerte. Sie werden, wie bereits erwähnt, als Zeichenkette nach dem NMEA 0183-Standard übertragen. Eine Zeichenkette muss für den Zugriff auf einzelnen Sensorwerte geparkt, also in seine Bestandteile zerlegt werden. Nach dem einleitenden \$-Zeichen folgt ein eindeutiges Literal, mit dessen Hilfe das Gerät und die nachfolgenden Werte identifiziert werden können. Bei den Komponenten Kompass, Windsensor und Echolot ist dieser „Kopf“ immer gleich, beim GPS-Empfänger werden aufgrund der Menge an zur Verfügung gestellten Daten mehrere Literale verwendet. Dabei sind die enthaltenen Daten teilweise redundant und nicht alle für das Projekt relevant.

Grundsätzlich werden alle Zeichenketten eingelesen und für die Erkennung von Fehlern in einer Datei gespeichert, ausgewertet werden aber nur jene, die in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet sind.

NMEA-Kopf	Zugehöriger Sensor
GPRMC	GPS-Empfänger
GPGGA	GPS-Empfänger
GPVTG	GPS-Empfänger
HCHDT	Kompass
OPHR	Kompass
WIMWV	Windsensor

Tabelle 16: Zuordnung von NMEA-Kopf und Komponente

Der Kompass bietet mehrere Ausgabeformate, zwischen denen man mit Hilfe der Konfiguration auswählen kann.

Sind die wichtigen Zeichenketten anhand ihres Kopfes erkannt, müssen sie aufgesplittet werden. Dabei hilft, dass jeder Wert durch ein Komma vom Nächsten abgetrennt ist. Diese Aufgabe wird durch die Funktion „splitString“ übernommen.

```
int splitString(char *Substr, char *Parts[], char Delimiter)
{
    int Part_index = 0;
    Parts[Part_index++] = Substr;
    while (*Substr) {
        if (*Substr == Delimiter) {
            *Substr = '\\0';
            Parts[Part_index++] = Substr + 1;
        }
        Substr++;
    }
    return Part_index;
}
```

Abbildung 5.6: Die Funktion „splitString“

Dabei ist unter Umständen nicht jeder Wert vorhanden, und es folgen mehrere Trennzeichen aufeinander. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der GPS-Empfänger in der Verbindungsphase mit den Satelliten noch über kein gültiges Signal verfügt:

```
$GPRMC,112819.00,V,,,,,,,,030211,,N*7E
```

Das Fehlen einzelner Elemente muss aber erkannt werden, damit eine Zuordnung der anderen Werte möglich ist. Die voneinander getrennten Daten werden anschließend in der zugehörigen Variablen der Sensorklasse gespeichert und stehen somit der weiteren Verarbeitung zu Verfügung. Sie werden zur Demonstration über das Kommandozeilenfenster ausgegeben und außerdem auch in dieser Form in einer Datei gespeichert.

6 Funktionsnachweis

Dieses Kapitel zeigt die Funktion des Programms und des Systems mit einzelnen Komponenten. Einige Nachweise lassen sich in dieser Form schlecht erbringen, da Abbildungen nur eine Momentaufnahme und einen kleinen Ausschnitt zeigen. Dazu gehört unter anderem der realisierte und einwandfrei funktionierende Fallback-Modus.

Das Auswahlmenü zeigt bei Programmstart die angeschlossenen Komponenten und die zu Auswahl stehenden Optionen.

```
-----
Belegte COM-Ports:
COM-Port 4 : Windsensor
COM-Port 5 : Kompass<OS>
COM-Port 6 : Echo lot
COM-Port 7 : Kompass<TCM>
Bitte waehlen:
Winddaten anzeigen      - Taste 'w'
Kompassdaten anzeigen  - Taste 'c'
GPS-Daten anzeigen      - Taste 'p'
Spannung des Akkus anzeigen - Taste 'u'
Servobefehl eingeben   - Taste 'i'
Servobefehl generieren - Taste 'g'
Programm beenden       - Taste 'h'
Auswahl: _
```

Abbildung 6.1: Ansicht des Auswahlmenüs

Da die seriellen Schnittstellen über die Adapter zur Verfügung gestellt werden, ist nicht garantiert, ob die angeschlossene Komponente wirklich verfügbar ist.

Die Daten der einzelnen Komponenten lassen sich entweder im Programm oder über die erzeugte Datei anzeigen. Von den GPS-Daten werden geografische Position, Höhe, Geschwindigkeit, Richtung und Zeitpunkt ausgegeben.

```
16:44:04.500
Position: 52 Grad 25 min 0562 sek N 012 Grad 33 min 3308 sek E
Hoehe: 24.20 m Geschwindigkeit: 0.43 m/s Kurs: 0.00 Grad

16:44:04.750
Position: 52 Grad 25 min 0563 sek N 012 Grad 33 min 3309 sek E
Hoehe: 24.20 m Geschwindigkeit: 0.40 m/s Kurs: 0.00 Grad
```

Abbildung 6.2: vom GPS-Empfänger empfangende, bereits umgewandelte Daten

Die korrekt der empfangenden Daten zeigt die folgende Abbildung. Die Daten wurden hierfür in das Programm „Google Earth“ importiert. Dabei ist festzustellen, dass die aufgezeichnete Route (Strecke wurde im Uhrzeigersinn zurückgelegt) mit zunehmender Verbindungsdauer eine hohe Genauigkeit aufweist.



Abbildung 6.3: mit Hilfe des GPS-Empfängers aufgezeichnete Route

Der Kompass gibt die erforderlichen Werte für Richtung und Krängung (Rollen) aus. Zudem werden Pitch (Drehung um die horizontale Querachse) und Angaben über Beschleunigung und magnetisches Feld angezeigt.

```

Belegte COM-Ports:
-----
COM-Port 4 : Windsensor
COM-Port 5 : Kompass<OS>
COM-Port 6 : Echolot
COM-Port 7 : Kompass<TCM>

Welcher COM-Port <2-8>: 5
Verbunden mit COM 5
Abbruch mit ESC.

Richtung: 24.9 Pitch: 10.7 Roll: -2 Temperatur: 22.6
MagX: -23.53 MagY: 29.74 MagZ: 178.69
AccX: 0.194 AccY: -0.037 AccZ: 1.023

Richtung: 24.7 Pitch: 10.7 Roll: -2 Temperatur: 22.6
MagX: -23.58 MagY: 29.7 MagZ: 178.66
AccX: 0.194 AccY: -0.037 AccZ: 1.022

```

Abbildung 6.4: Ausgabe der Kompass-Werte im Kommandozeilenfenster

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Änderung der empfangenen Daten bei einer schnellen Bewegung um alle drei Achsen. Da die Abtastrate in diesem Fall mit nur einem Hertz sehr niedrig ist, ist die Differenz zwischen den einzelnen Messungen sehr hoch. Für die Praxis ist ein bedeutend höherer Wert angedacht.

```

$OHPR,58.0,-7.7,-25.3,25.0,-51.79,100.57,99.07,-0.143,-0.452,0.945*25
$OHPR,25.2,17.7,-16.0,25.0,-10.73,55.64,118.03,0.246,-0.224,0.737*17
$OHPR,350.7,17.5,-1.9,25.0,-12.96,-6.37,133.28,0.256,-0.029,0.808*07
$OHPR,335.7,16.7,15.4,25.0,-2.50,-74.88,167.64,0.300,0.276,0.
$OHPR,328.8,17.5,17.3,25.1,2.55,-87.74,163.49,0.311,0.307,0.932*11
$OHPR,331.3,16.3,14.0,25.1,-0.61,-74.89,169.43,0.293,0.253,0.967*38
$OHPR,339.8,16.9,9.8,25.0,-1.64,-53.82,176.07,0.302,0.178,0.978*0D
$OHPR,355.9,16.9,5.8,25.1,-4.74,-25.27,181.78,0.299,0.104,0.982*0C
$OHPR,13.8,14.3,-0.5,25.1,-14.24,13.68,182.48,0.256,-0.010,1.003*2D
$OHPR,29.4,11.9,-5.1,25.1,-20.77,45.85,179.92,0.212,-0.091,1.003*2D
$OHPR,40.2,8.8,-7.9,25.1,-25.08,66.37,176.86,0.161,-0.145,1.028*1E

```

Abbildung 6.5: Reaktion auf eine schnelle Änderung in allen drei Achsen

Der Windsensor liefert Werte für Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Sie liegen innerhalb des erwarteten Wertebereichs. Der Sensor ist so ausgerichtet, dass Wind direkt von vorn einer Richtung von 0 Grad entspricht. Die Werte nehmen dabei im Uhrzeigersinn zu.

```

windrichtung: 328 Grad windgeschwindigkeit: 0.30
windrichtung: 328 Grad windgeschwindigkeit: 0.20
windrichtung: 328 Grad windgeschwindigkeit: 0.40
windrichtung: 328 Grad windgeschwindigkeit: 0.40

```

Abbildung 6.6: ausgegebene Winddaten

Alle Motoren lassen sich über Eingaben aus dem Programm heraus steuern. Dabei entspricht der Wertebereich den maximal zulässigen bzw. möglichen Stellwegen. Sie stimmen in beiden verfügbaren Modi überein. Bei Start des Programms des Aksen-Boards werden alle Motoren in ihre Nullstellung versetzt. Abbildung 6.7 und 6.8 zeigen die Eingabe von zwei Befehlen, die das Ruder in beide Richtungen auslenkt.

```

Bitte waehlen:
Spannung des Akkus anzeigen      - Taste 'v'
Servobefehl eingeben            - Taste 'i'
Servobefehl generieren          - Taste 'g'
zurueck                          - Taste 'z'

Auswahl: i

Erwartetes Format - Servonummer<0-2>,Winkel<25-112>

Eingabe: 1,108
's' gesendet

Gesamtanzahl empfangener Befehle: 3

```

Abbildung 6.7: Steuerbefehl für nach links ausgelenktes Ruder

```
Bitte waehlen:  
Spannung des Akkus anzeigen      - Taste 'v'  
Servobefehl eingeben            - Taste 'i'  
Servobefehl generieren          - Taste 'g'  
zurueck                          - Taste 'z'  
  
Auswahl: i  
  
Erwartetes Format - Servonummer<0-2>, Winkel<25-112>  
Eingabe: 1,35  
's' gesendet  
  
Gesamtanzahl empfangener Befehle: 14
```

Abbildung 6.8: Steuerbefehl für nach rechts ausgelenktes Ruder

Neben der Ansteuerung der Motoren lässt sich über das Aksen-Board auch die Spannung des Akkumulators auslesen und anzeigen. Ist dieser vollgeladen, zeigt er wie unten abgebildet einen Wert von etwa 8,4 Volt an. Wird das System über einen längeren Zeitraum belastet, sinkt die Spannung kontinuierlich ab.

```
Bitte waehlen:  
Spannung des Akkus anzeigen      - Taste 'v'  
Servobefehl eingeben            - Taste 'i'  
Servobefehl generieren          - Taste 'g'  
zurueck                          - Taste 'z'  
  
Auswahl: v  
  
Akkuspannung: 8.395 U
```

Abbildung 6.9: Anzeige der Systemspannung

Zur optischen Anzeige welcher der beiden Steuerungsmodi aktiv ist, wurde auf halber Höhe des Mastes eine LED angebracht. Befindet sich das System im autonomen Modus, ist sie eingeschaltet und blinkt, im manuellen Modus hingegen ist sie ausgeschaltet.

Ein Nachweis über die Funktion des Funkmoduls für den Datenaustausch bei größeren Entfernungen lässt sich über das vor Hersteller zur Verfügung gestellte Programm X-CTU erbringen. Die Stromversorgung ist dabei über das System realisiert. Die Abbildung zeigt das erfolgreiche Senden und Empfangen von 50 Datenpaketen zu je 128 Byte Größe. Dabei wurde der Test im Labor bei einer Entfernung von zirka 8 Metern und außerhalb des Gebäudes über eine Entfernung von mehr als 200 Metern durchgeführt.

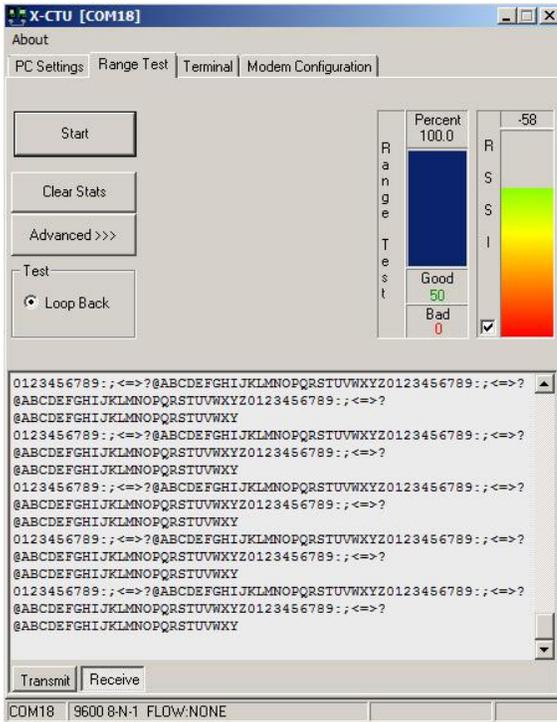


Abbildung 6.10: Datentransfer über das Funkmodul

7 Zusammenfassung

7.1 Einschätzung des Ergebnisses und Kritik

Das Ergebnis der Arbeit lässt sich wie folgt einschätzen

- gute Grundlage, aber noch Prototyp
- System lief bei Test unter Laborbedingungen stabil
- Grundlegende Sicherheitsmechanismen sind integriert
- Gewicht nahezu eingehalten
- System verfügt über lange Akkulaufzeit
- Bei Realisierung eines solchen Projekts treten viele Probleme auf

Neben den positiven Gesichtspunkten sind folgende Aspekte kritisch zu betrachten:

- System immer noch nicht komplett (trotz langer Entwicklungszeit)
- Software verfügt nur über einen Teil der Funktionalität
 - ⇒ Modularer Aufbau noch nicht komplett
 - ⇒ Keine Parallelität (Verbindung wird bei anderer Menüauswahl geschlossen)
- In diesem Zustand ist praktischer Funktionstest nur eingeschränkt möglich
- Sensoren lassen sich noch nicht aus dem Programm heraus konfigurieren
- Genauigkeit der Sensoren konnte noch nicht getestet/nachgewiesen werden
- bisher wurde nur ein Kompass in die Software integriert
- Funkmodul ist nur über externe Software ansprechbar
- nur rudimentäre Fehlerbehandlung implementiert

7.2 Offene Probleme und Ausblick

Es existieren noch eine Vielzahl zu lösender Probleme:

- Windsensor kurz vor Abgabe ohne Funktion (keine Spannung)
- Probleme bei Entwicklung, insbesondere bei bidirektionaler Kommunikation => Timing
 - ⇒ Fehler die nur zur Laufzeit auftraten
- Hauptcontroller lässt sich in eingebautem Zustand nicht einschalten
- Einbau des Echolots nicht durchgeführt
 - ⇒ Position, Konflikt mit Deckel
- Keine geeignete Box für die Aufnahme des EeePC gefunden, die zudem durch die Öffnung des Rumpfes passt
- Länge der Umlaufschot muss noch angepasst werden, da sonst zu viel Platz im vorderen Teil verloren geht

Der aktuelle Stand bietet einen guten Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen. Dabei muss sich in einem Praxistest zunächst zeigen, ob die Komponenten hinsichtlich Gewicht und Wechselwirkungen richtig positioniert sind. Außerdem ließe sich zur besseren Möglichkeit der Weiterentwicklung die hintere Decksöffnung vergrößern, sowie zusätzlich eine Öffnung im vorderen Bereich schaffen. Alternativ sollte über einen Austausch des Hauptcontrollers nachgedacht werden, da viele Probleme mit diesem zusammenhängen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Übersicht der Kurse zum Wind	4
Abbildung 2.2 a - c: Kräfteparallelogramm zu unterschiedlichen Windrichtungen	5
Abbildung 2.3: Antriebsarten beim Segelboot	6
Abbildung 2.4: Aufteilung der Gesamtkraft auf verschiedenen Kursen	6
Abbildung 2.5: Verdeutlichung von Gewichtswiderstand (A) und Formwiderstand (B).....	8
Abbildung 2.6: Übersicht über die Stabilitätsverteilung der Bootstypen Katamaran, Kielyacht und Hightech-Racer bei zunehmender Krängung	8
Abbildung 2.7: Ablauf einer Wende	10
Abbildung 2.8: Ablauf einer Halse	11
Abbildung 4.1: Verdeutlichung des Magnuseffekts	33
Abbildung 4.2: Nutzung des Magnuseffekts zum Vortrieb	33
Abbildung 4.3: schematische Darstellung des groben Systementwurfs	34
Abbildung 4.4: schematische Darstellung des Entwurfs mit geteiltem Computersystem	38
Abbildung 4.5: schematische Darstellung des Systems mit spezifizierter Sensorik.....	42
Abbildung 4.6: schematische Darstellung des System inklusive selektierter Aktorik.....	44
Abbildung 4.7: schematischer Aufbau des Fallback-Mechanismus	45
Abbildung 4.8: allgemeiner Aufbau eines Spannungsteilers.....	49
Abbildung 4.9: Schema zur Steuerung der Energieversorgung über einen Schalter	51
Abbildung 4.10: vereinfachte Programmstruktur	53
Abbildung 4.11: Klassendiagramm zum Aufbau des Hauptprogramms	54
Abbildung 4.12: grundlegender Ablauf des Dreiwege-Handshake-Verfahrens	56
Abbildung 4.13: Struktur eines AT-Befehls zur Konfiguration des Funkmoduls	57
Abbildung 5.1: angepasster Aufbau des Spannungsteilers	62
Abbildung 5.2: Diagramm zu Proportionalität von Eingangs- und Ausgangsspannung.....	63
Abbildung 5.3: Belegung des Steckers zum Anschluss der Ladegeräte.....	65

Abbildung 5.4: Zustandsdiagramm des Programms auf dem Aksen-Board.....	68
Abbildung 5.5: Sequenzdiagramm zum Programmablauf nach Eingabe eines Steuerbefehls	70
Abbildung 5.6: Die Funktion „splitString“	71
Abbildung 6.1: Ansicht des Auswahlmenüs	72
Abbildung 6.2: vom GPS-Empfänger empfangende, bereits umgewandelte Daten.....	72
Abbildung 6.3: mit Hilfe des GPS-Empfängers aufgezeichnete Route	73
Abbildung 6.4: Ausgabe der Kompass-Werte im Kommandozeilenfenster	73
Abbildung 6.5: Reaktion auf eine schnelle Änderung in allen drei Achsen.....	74
Abbildung 6.6: ausgegebene Winddaten	74
Abbildung 6.7: Steuerbefehl für nach links ausgelenktes Ruder	74
Abbildung 6.8: Steuerbefehl für nach rechts ausgelenktes Ruder.....	75
Abbildung 6.9: Anzeige der Systemspannung	75
Abbildung 6.10: Datentransfer über das Funkmodul.....	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der zu messenden Größen, ihren Wertebereich und geeigneter Sensoren	21
Tabelle 2: Schätzung der maximalen Leistungsaufnahme	25
Tabelle 3: Vergleich der unterschiedlichen Akkumulator-Technologien	26
Tabelle 4: Auflistung von Vor- und Nachteilen der einzelnen Bootsklassen.....	31
Tabelle 5: Liste möglicher Segelboote.....	36
Tabelle 6: Vergleich von Segeljolle und Modellsegelboot mit den dazugehörigen Komponenten	36
Tabelle 7: Übersicht zu Spannungsversorgung und Stromaufnahme des Systems	48
Tabelle 8: Aufstellung des erwarteten Zusatzgewichts.....	51
Tabelle 9: Konfigurationsmöglichkeiten des Kompass'	57
Tabelle 10: Steckerbelegung an Powerboard.....	61
Tabelle 11: Belegung der unteren DSUB-Steckverbindung.....	64
Tabelle 12: Belegung der oberen DSUB-Steckverbindung	64
Tabelle 13: Belegung der Adapter	65
Tabelle 14: Belegung der Steuerknüppel der Fernbedienung	66
Tabelle 15: Belegung und Wertebereich der Motoren	67
Tabelle 16: Zuordnung von NMEA-Kopf und Komponente.....	71

Literaturverzeichnis

- [Fle26] **Flettner, Anton.** *Mein Weg zum Rotor.* Leipzig : Koehler & Amelang, 1926.
- [Cla01] **Claus, Volker und Schwill, Andreas.** *Duden Informatik.* Mannheim : Dudenverlag, 2001.
- Bey96] **Beyerlein, Peter, et al.** *Harenberg Kompaktlexikon.* Dortmund : Harenberg Lexikon Verlag, 1996.
- [Gli07] **Gliewe, Ramon und Overschmidt, Heinz.** *Sportbootführerschein Binnen - Segel/Motor.* s.l. : Delius Klasing Verlag, 2007.
- [Ste10] **Stelzer, Roland und Jafarmadar, Karim.** Department of Control System and Instrumentation Engineering. [Online] 2010. Mai 2010. [Zitat vom: 12. Februar 2011.]
<ftp://www.inc.eng.kmutt.ac.th/pornpoj/SailBoat/1266686769.pdf>.
- [Hau05] **Haluschack, Bernhard.** Aktuelle und zukünftige Akkutechnologien. [Online] 11. Mai 2005. [Zitat vom: 12. Februar 2011.]
http://www.channelpartner.de/_misc/img/detail.cfm?fk=225509&pk=105813.
- [Deu08] **Baumeier, Dr. Wolfgang, et al.** *Seemannschaft.* [Hrsg.] Deutscher Hochseesportverband "Hansa" e.V. Bielefeld : Delius Lasing Verlag, 2008. 978-3-7688-0523-0.
- [Zec11] **Zechner, Anton.** Die serielle Schnittstelle. [Online] [Zitat vom: 12. Februar 2011.]
<http://members.inode.at/anton.zechner/az/Seriell.htm>.
- [War11] **Karschulin, Othmar.** Warum ein Multi und kein Einrümpfer. [Online] 2007. [Zitat vom: 12. Februar 2011.] <http://www.multihull.de/basis/multi-mono.htm>.
- [Dig08] **Digi International Inc.** XBee-PRO® 868 OEM RF Modules. [Online] 2008. [Zitat vom: 13. Februar 2011.] http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001020_a.pdf.
- [And03] **Tanenbaum, Andrew S.** *Computernetzwerke.* München : Pearson Studium, 2003. 3-8273-7046-9.
- [Köh09] **Köhne, Anja und Wößner, Michael.** Das NMEA 0183-Datenformat. [Online] 2009. [Zitat vom: 13. Februar 2011.] <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/NMEA.htm>.
- [Kol11] **Kolter, Heinrich.** Schnittstellen. [Online] [Zitat vom: 12. Februar 2011.] <http://www.pci-card.com/schnittstellen.html>.
- [Kor08] **Kosiorek, Bartosz.** Wikipedia. [Online] 6. Januar 2008. [Zitat vom: 12. Februar 2011.]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Magnus_effect.svg&filetimestamp=20080106174226.
- [Wes06] **Wessmann, Dr.** Wikipedia. [Online] 10. September 2006. [Zitat vom: 12. Februar 2011.]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flettnerrotor.png&filetimestamp=20060910173813>.

Glossar

Lee	- die dem Wind abgewandte Seite
Luv	- die dem Wind zugewandte Seite
Hoch-/Bermudasegel	- heute gängigster Segeltyp mit Form eines Dreiecks
dichtholen	- anziehen einer Leine/Schot; Anstellwinkel des Segels wird dadurch verringert
fieren	- lockern oder herauslassen einer Leine/Schot; Anstellwinkel des Segels wird dadurch vergrößert
Schot	- Leine zum Regulieren der Segelstellung
Vorliek	- vordere Kante des Segels

Anlagenverzeichnis

Abbildung A 2: schematische Darstellung des vollständigen Systems..... 5

Abbildung A 3: detaillierter Überblick des Systemaufbaus 5

Anhang

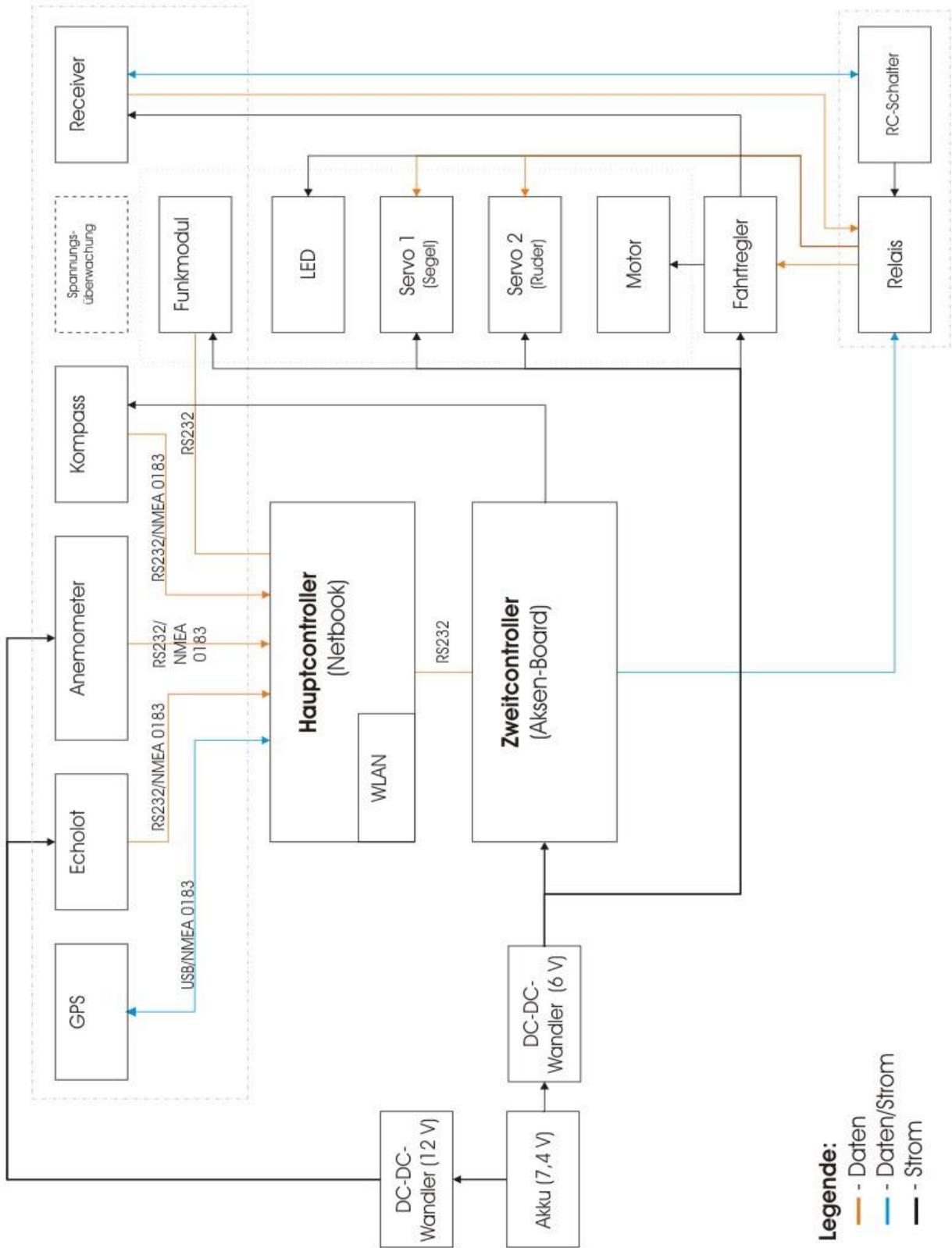


Abbildung A 1: schematische Darstellung des vollständigen Systems

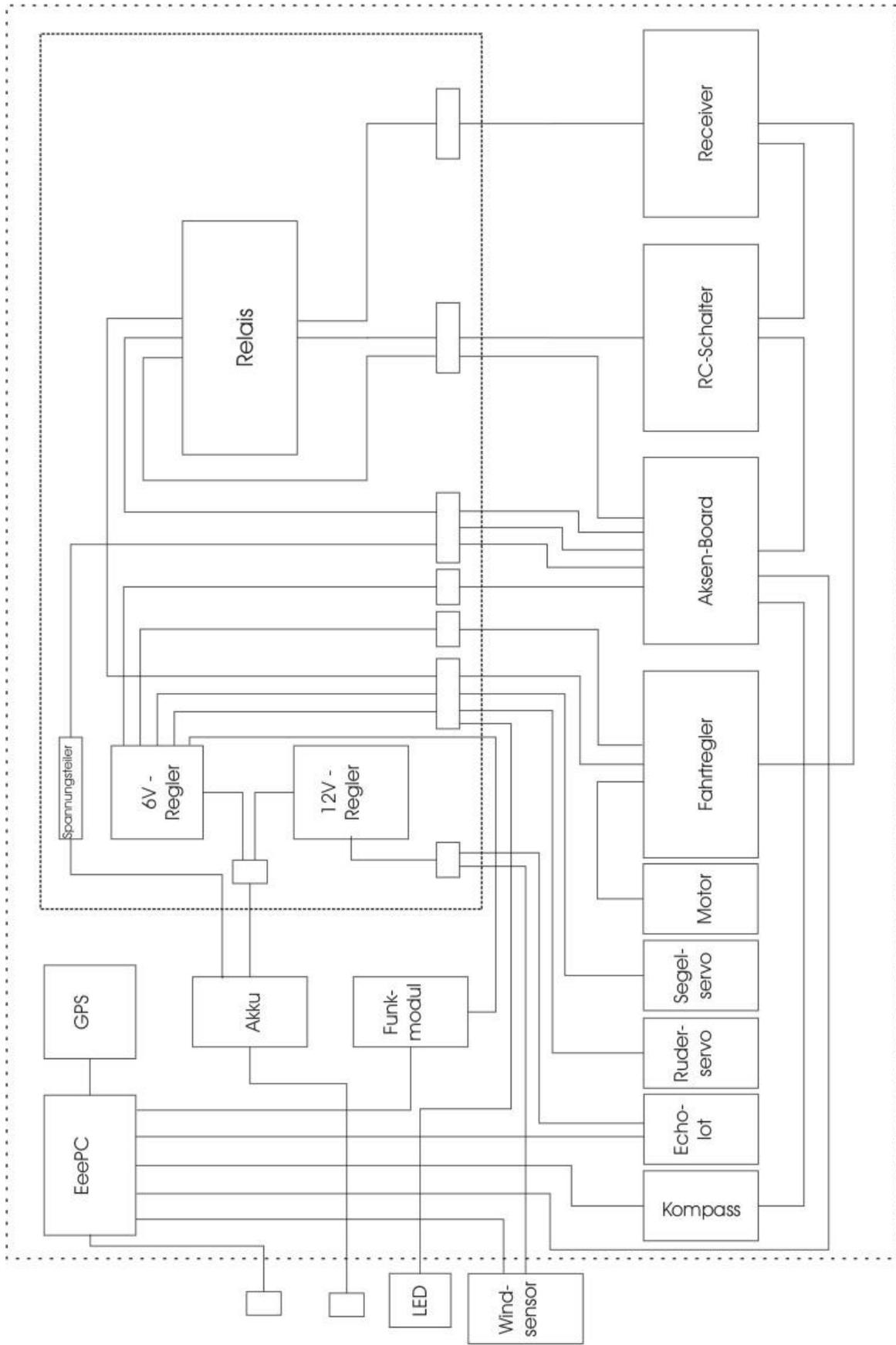


Abbildung A 2: detaillierter Überblick des Systemaufbaus

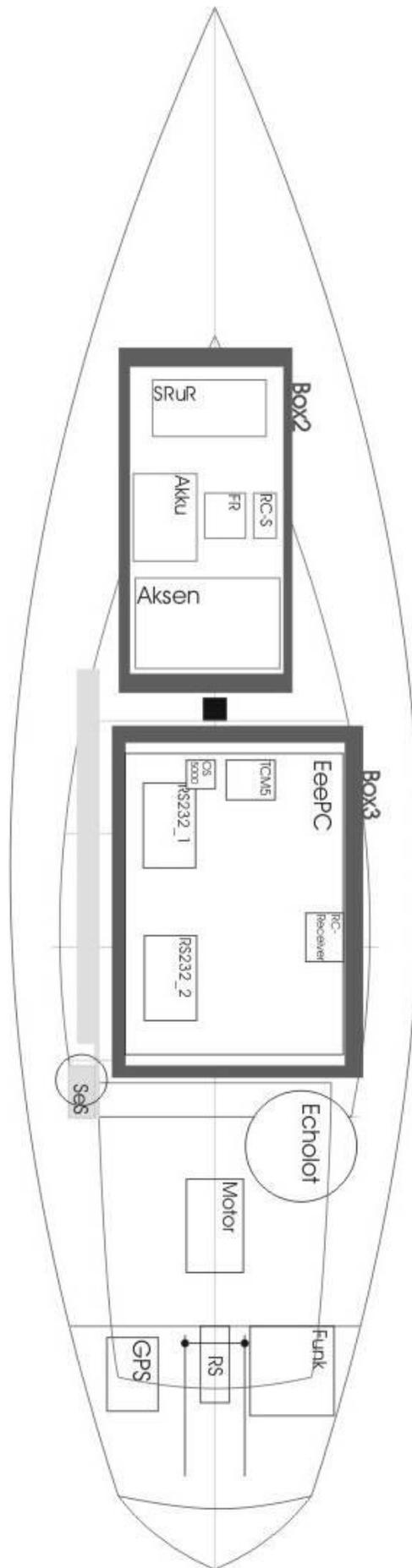


Abbildung A 3: mögliche Anordnung der Komponenten im Segelboot

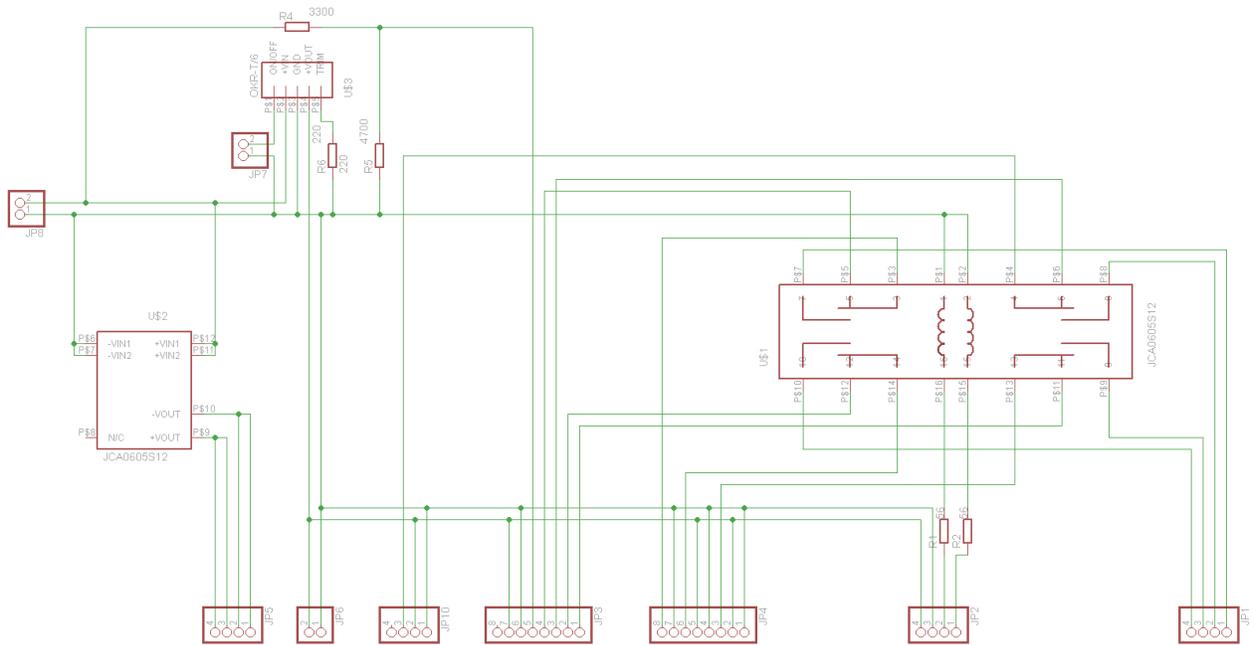


Abbildung A 5: Schaltplan des Powerboards

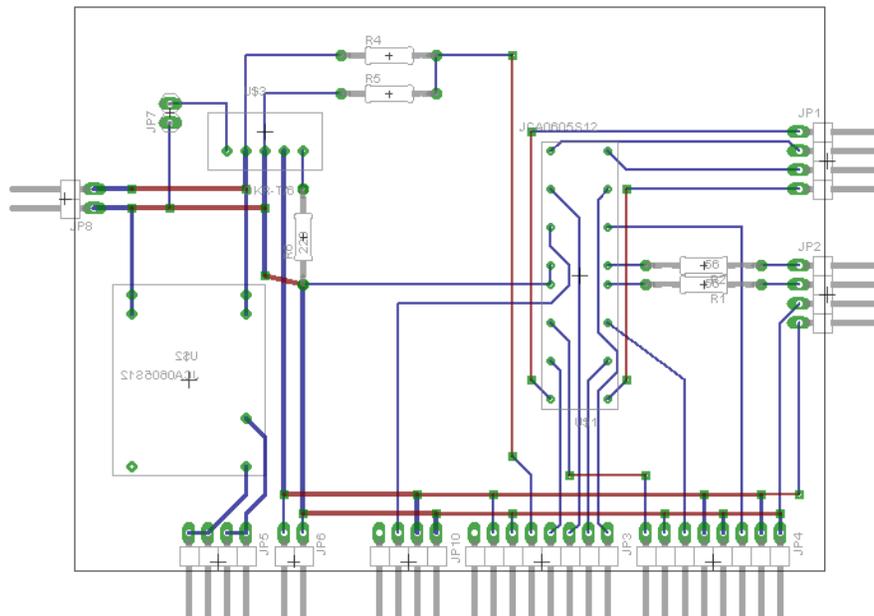


Abbildung A 4: Board-Design des Powerboards

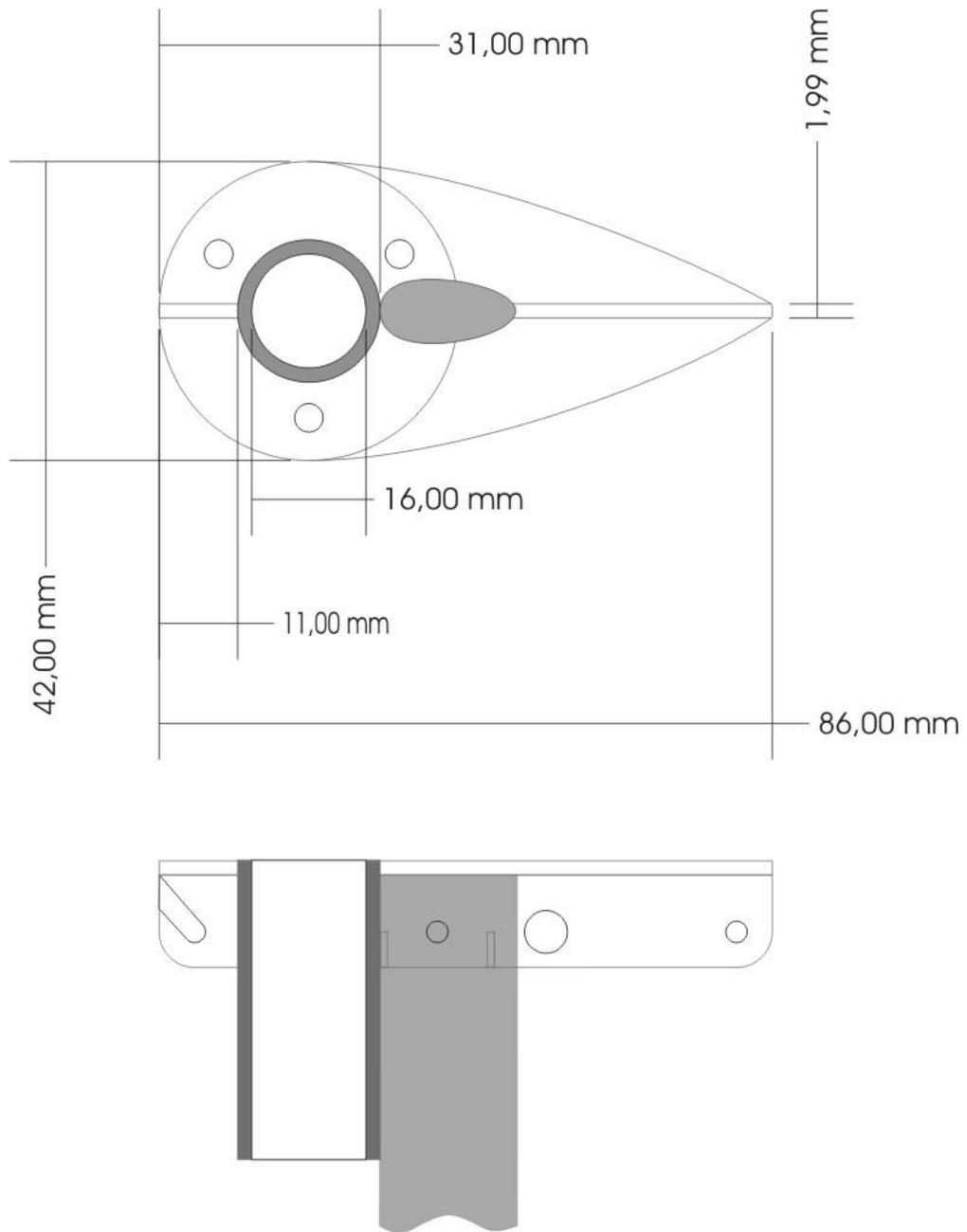


Abbildung A 6: Entwurf des Beschlages zur Aufnahme des Windsensors

Windrichtung (relativ)	Über Potentiometer	Ultraschall-Windsensor	?	(rotierender) Windsensor	?	x	Über Potentiometer	Ultraschall-Windsensor	Siehe „Beagle B“	?	ASS040 (Messung der Orientierung eines Permanentmagnets)
Windstärke	Schalenkreuz mit Hallsensor		?		?	?	-	?	?	?	Schalenkreuz mit Hallsensor
Bootsausrichtung	Lagekompensierter Kompass	Lagekompensierter Kompass (PNI TCM 5)	?	Lagekompensierter Kompass	?	X	Gimbalede? Kompass	Lagekompensierter Kompass	Siehe „Beagle B“	?	Lagekompensierter Kompass (Honeywell HMR3300)
Bootsposition	Serielle GPS-Maus	GPS	?	GPS	?	X	GPS	GPS	Siehe „Beagle B“	?	GPS(ublox RCB-4H)
Bootsgeschwindigkeit	GPS, Propeller mit Hallsensor	GPS, Propeller mit Hallsensor	?		?	X		?	?	?	
Krängung	2-Achsen-Beschleunigungssensor	Siehe Boots-ausrichtung	?	Neigungssensor	?	X	?	?	?	?	2-Achsen-Beschleunigungssensor (ADXL202)
Segelstellung	Über Potentiometer	X	?		?	?	Über Potentiometer	?	?	?	Siehe Windrichtung
Sonstiges	?	Luftdruck, Luft- und Wassertemperatur, Tiefe	?		?	?	?	YSI 6600 Sonde	?	?	Temperatur (2 6-Kanal-AD-Wandler AD7905), Steigung Rotation?, Luftfeuchtigkeit
Anbindung	?	NMEA2000/CAN-BUS	?	CAN 2.0b Bus	?	?	?	?	?	?	
Aktoren	2 Servomotoren	Kettenantrieb für Schoten, Pinnenlinearantrieb (Transmotek) Lenzpumpe Nebelhorn	?	2 Schrittmotoren	?	Servomotoren Segelwisch	3 Schrittmotoren (einer für beide Ruder, einer pro Segel)	2x LA12 Linearaktoren	Elektromotor (DC) mit Winsch-Mechanismus, Tiller-Pilot für Ruder	?	2 Servomotoren (Hitec HS-805BB, 27Kg/cm) für die 2 Ruder, DC-Motor fürs Segel
Kommunikation	?	WLAN, Iridium-Satellitenmodem,	?	868 Mhz Radio Modem (Reichweite 5km)	?	Futuba RC	?	WLAN, RC, GSM (GM-862), Satelliten-	?	?	WLAN(LinkSys WRT54GC), GSM Modem (Siemens

		UMTS/GPRS						telefon			MC35), Iridium-Satellitenmodem (model 9601), RC	
Sicherheit	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Legende (gilt auch für alle folgenden Tabellen):

- ? keine Informationen verfügbar/gefunden
- Nicht vorhanden
- x vorhanden, aber keine genaueren Informationen bekannt

Sensoren

Messung der Bootsausrichtung (lagekompensierende Kompass)

Modell	EZ-Compass-3A	SP3002D (ohne Development Kit)	HMR3300	TCM-5	OS5000-US	HMC6343 (ohne Demo-Kit)	MDC-1	SKM	Weather-Station PB200
Hersteller	AOSI	Sparton	Honeywell	PNI	OceanServer	Honeywell	InnaLabs	SanSys	Airmar
Verwendete Technik	3-Achsen Magnetometer (solid state)	Magnetinduktive Sensoren und 3-Achsen-Beschleunigungssensor	3 magnetresistive Sensoren und 3-Achsen-Beschleunigungssensor	Magnetinduktive Sensoren und 3-Achsen-Beschleunigungssensoren	3-Achsen-Magnetsensoren, 3-Achsen-Beschleunigungssensor	3-Achsen magnetresistive Sensoren und 3-Achsen-Beschleunigungssensoren (MEMS)	3 Beschleunigungssensoren und 3-Achsen-Fluxgate-Magnetometer	Magnetfeldsensor, Beschleunigungssensor	3-Achsen-Beschleunigungssensor
Maße (in cm)	3,81 x 5,08 x 1,27	3,9 x 3,9 x 1,9	2,54 x 3,81	3,5 x 4,3 x 1,3	2,54 x 2,54 x 0,76	0,9 x 0,9 x 0,19	12,7 x 3,1 x 2,9	2,6 x 2,5 x 0,35	7,2 x 7,2 x 13
Gewicht	11 g	30 g	7,5 g	12 g	2 g	0,32 g	190 g	TBD?	285 g
Spezifikation									
Richtung									
Genauigkeit	< 0,5°	0,8° - 1,5°	1° bei 0° Neigung 3° bei <30° Neigung 4° bei 30-60° Neig.	0,3° bei <70° Neig. 0,5° bei >70° Neig.	<0,5° bei 0° Neig. 1° bei < 30° Neig. 1,5° bei < 60° Neig.	2° bei 0° Neigung 3° bei ±15° Neig. 4° bei ±60° Neig.	0,25° bei <70° Neig.	0,03°	1° bei 0° Neig. 2° bei ±30° Neigung 3° bei ±45° Neig.
Auflösung	0,08 Grad	0,1 Grad	0,1 Grad	0,1 Grad	0,1 Grad	0,1 Grad	0,03 Grad	0,03 Grad	?
Wiederholbarkeit	< 0,25°	0,2 Grad	0,2 Grad	0,05 Grad	?	0,3 Grad	0,25°	0,1 Grad	?
Neigung									
Genauigkeit Pitch	?	< 0,2 Grad	0,4° bei 0 bis ±30°	0,2 Grad	1° bei ± 30 Grad	1° bei 0 bis ±15°	0,2 Grad	?	<1 Grad
Genauigkeit Roll	?	< 0,2 Grad	1° bei ± 30 bis ±60°	0,2° bei < 65° Pitch 0,5° bei < 80° Pitch 1,0° bei < 86° Pitch	2° bei ±15 bis ±60°	2° bei ±15 bis ±60°	0,2 Grad	?	<1 Grad
Bereich	± 90 Grad	± 90 Grad Pitch ± 180 Grad Roll	± 60 Grad	± 90 Grad Pitch ± 180 Grad Roll	± 90 Grad Pitch ± 180 Grad Roll	± 80 Grad	± 89 Grad Pitch ± 180 Grad Roll	± 90 Grad Pitch ± 180 Grad Roll	± 50 Grad
Auflösung	0,04°	0,02° Pitch, 0,04° Roll	0,1 Grad	<0,01 Grad	?	0,1 Grad	0,02 Grad	?	?
Wiederholbarkeit	< 2 Bit	0,2 Grad	0,2 Grad	0,05 Grad	?	0,2 Grad	0,2 Grad	?	?
Magnetisches Feld									
Dynam. Bereich	± 2 Gauss	± 0,9 Gauss	± 2 Gauss	± 0,08 Gauss	?	± 1 Gauss	0,8 Gauss	?	?
Auflösung	< 1 mGauss	± 0,6 mGauss	0,1 mGauss	± 0,5 mGauss	?	?	0,05 mGauss	?	?

Energie									
Spannung	6-15 V	5-20V unregelt 3,3V geregelt	6-15 V unregelt 4,75-5,25V geregelt	3,6-5 V unregelt	3,3 – 5 V	2,7-3,6 V	5,5-6,5 V	3,3-12 V	9-16 V
Stromaufnahme	45 mA	11 mA	22 – 24 mA	0, 6 mA Sleep 14-18 mA Idle 22 mA Work	35 mA	0,01 mA Sleep 1 mA Idle Max. 5,5 mA Work	110 mA	TBD?	<220 mA
Schnittstellen									
Hardware	RS232, RS422, RS485	RS232	RS232	RS232	RS232, USB	USB	RS232	?	RS485, USB möglich
Software	NMEA0183	UART, SPI, NMEA0183	UART, SPI	?	NMEA0183	I ² C	?	UART, SPI	NMEA0183, NMEA2000
Abtastrate	10 Hz	Max. 10 Hz	8 Hz	Max 20 Hz	0,01 – 40 Hz	1, 5, 10 Hz	1 – 100 Hz	0,5 – 5 Hz	?
Ausgabewerte	?	?	?	?	?	?	?	True and magnetic Course, Pitch and roll angle, Magnetic field (x, y, z, magnitude), Acceleration (x, y, z, magnitude), Estimated tolerance	?
Arbeitstemperatur	-40 bis +85°C	-40 bis +85°C	-20 bis +70°C	-40 bis +80°C	-40 bis +85°C	-40 bis +80°C	-40 bis +70°C	-30 bis +85°C	-25 bis +55°C
Preis	~ 1000 €	~ 350 US\$	~ 450 US\$	~ 1500 €	~ 300 US\$	~ 150 US\$	~ 600 US\$	~ 200 CHF	~ 1000 US\$
Quelle(n)	¹	²	³	⁴	⁵	⁶	⁷	⁸	⁹

¹ http://www.sensor-test.de/include_CST/pv_CST_extended_search/get_file.php?file=EZCompass3A.pdf&type=3&lang=en&PHPSESSID=957,

<http://www.aositilt.com/APPCOMP3A%20user%20manual.pdf>

² <http://www.thedigitalcompass.com/SP3002D.pdf>

³ <http://www.honeywell.com/sites/servlet/com.merx.npoint.servlets.DocumentServlet?docid=DBAB0A75B-BEB2-3E4E-D5C6-1C4EF1229A94>

⁴ http://www.pnicorp.com/files/TCM5%20Datasheet_05-14-2009.pdf

⁵ http://www.ocean-server.com/download/OS5000_Compass_Manual.pdf

⁶ <http://www.magneticsensors.com/datasheets/HMC6343.pdf>

⁷ http://www.innalabs.com/images/downloads/innalabs_digital_compass_datasheet_mdc-1.pdf

⁸ http://sansys-electronic.com/download.php?file=ds_skm

⁹ <http://airmarttechnology.com/uploads/brochures/PB200.pdf>

Messung von Windstärke und –richtung (Anemometer)

Modell	MW22 / MMW 005	WindSonic	FT702LM	7911	1453 S2 (komb. kleiner Windsensor)	WSI603	WSO100	Basic 14564 und 14574	WeatherStation PB200
Hersteller	Mierij Meteo	Gill Intruments	FT Technologies	Davis	Lamprecht	AAG Elektronica	Maretron	Lambrecht	Airmar
Verwendete Technik	Temperatursensitives Element	Ultraschall	Akustische Resonanz	Windtassen mit Magnetschalter, Windfahne mit Potentiometer	Schalenstern mit Gleichstromgenerator, Windfahne mit Ringpotentiometer	Windtassen mit Magnetschalter, Windfahne mit Potentiometer	Ultraschall	Schalenstern und Blattwindfahne jeweils mit magnetischem Messprinzip	Ultraschall
Maße (in cm)	12 x 10,5	14,2 x 16	5 x 7,8	47 x 19,1 x 12,1 (mit Montagearm)	9,6 x 9,6 x 29	?	10,8 x 10,8 x 8,8	Windfahne: 23,2 x 0 x 26 Schalenstern: 9,5 x 9,5 x 18	7,2 x 7,2 x 13
Gewicht	200 g	500 g	250 g	1,33 kg	ca. 300 g	?	283 g	Insg. 1,85 kg	285 g
Spezifikation									
Einsatzbereich									
Windgeschwindigk.	0 - 25 m/s	0 – 60 m/s	0 – 50 m/s	1 – 67 m/s	0 – 35 m/s	?	0,5 – 99 kt (0,25 – 51 m/s)	0,7 – 50 m/s	0 – 80 kt (0 – 41 m/s)
Auflösung	0,1 m/s	0,01 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s	?	0,1 kt (0,05 m/s)	0,26 m/s	0,1 kt (0,05 m/s)
Min. Schwellwert	0,2 m/s	0,01 m/s	?	?	1 m/s	?	?	0,7 m/s	?
Windrichtung	0 - 360° (ab Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s)	0 - 360°	0 - 360°	0 - 360°	0 - 360°	0 - 360° ?	0 - 360° ?	0 - 360°	0 - 360°
Auflösung	0,1°	1°	1°	1°	0,1°	22,5°	?	3°	0,1°
Ungenauigkeit									
Windgeschwindigk.	± 0,5 m/s ± 3 %	± 2 %	± 4 %	± 5 %	± 2 %	> 10 % (0 - 10 mph Wind) ± 2 % (> 10 mph Wind)	± 5 % oder 1 kt bei 0° Neigung (funktioniert bis ±30 Grad Neigung)	± 2 %	± 1 kt (0-10kt Wind) +10% ± 2 kt oder ± 5 % (10-80 kt Wind) 5 kt bei nassen Bedingungen
Windrichtung	± 3 Grad	± 3 Grad	± 2 Grad	± 7 Grad	± 1 %		± 5 Grad (funktioniert bis ±30 Grad Neigung)	± 2 %	± 6° (4-10 kt Wind) ± 3° (> 10 kt Wind) ± 8° (bei nassen Bedingungen)
Reaktionszeit / Abtastrate	< 2 sek	0,25 sek	5 Hz	2,25 sek (Geschw.) 1 sek (Richtung)	?	0,2 Hz	10 Hz	?	?

Stabilisierungsdauer	< 10 min nach Start	< 5 sek nach Start	?	?	?	?	?	?	?
Energie									
Versorgungsspannung	12 V	5-30 V	3,5-30V	?	12 V	?	9 – 16 V	6-28 V	9-16 V
Stromaufnahme	125 mA	9 mA	12 mA	?	50 mA	?	<350mA	Insg. ~ 25 mA	<220 mA
Schnittstellen									
Hardware	RS 422	RS232, RS422, RS485	RS422	RJ 11	?	RS485, RJ45, RJ45-to-USB-Adapter	NMEA2000	?	RS485, USB möglich
Software	NMEA 0183	?	NMEA 0183	?	?	?	NMEA2000	?	NMEA0183/2000
Arbeitstemperatur	-25 bis +70°C	-35 bis +70°C	-40 bis +85°C	?	-30 bis +70°C		-25 bis +55°C	-30 bis +70°C	-25 bis +55°C
Weitere Funktionen	-	-	-	-	-	Messung von Temperatur, Tageslicht	Messung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck	-	Messung von Temperatur, Luftdruck und Neigung (Längs- und Querachse)
Preis	~ 500 €	~ 1800 €	~ 1650 €	~ 150 US\$	~ 2100 €	~ 100 US\$	~ 550 US\$	Insg. ~ 400 €	~ 1000 US\$
Quelle(n)	¹⁰	¹¹	¹²	¹³	¹⁴	¹⁵	¹⁶	¹⁷	¹⁸

¹⁰ <http://www.mierijmeteo.nl/index.php?paginaid=31>

¹¹ <http://www.gill.co.uk/data/datasheets/WindSonicWebDatasheet.pdf>

¹² <http://www.fttech.co.uk/ft702lm.html>

¹³ http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/7911_spec_Rev_E.pdf

¹⁴ http://www.lambrecht.net/de/html/KombinierterkleinerWindSensor1453_10_13_30.php

http://www.mercateo.com/q?query=lambrecht&catcat=live~s.100*root-MC001&page=2

¹⁵ <http://www.aag.com.mx/aagusa/index1.html>

¹⁶ http://www.maretron.com/products/pdf/WSO100-Data_Sheet.pdf

¹⁷ http://www.lambrecht.net/de/html/WindSensorenBASIC145x4_10_13_369.php

http://www.mercateo.com/q?query=lambrecht&catcat=live~s.100*root-MC001&page=2

¹⁸ <http://airmarttechnology.com/uploads/brochures/PB200.pdf>

Hardware	USB, Bluetooth	USB, USB-to-Serial Bridge	USB	RS232, USB 2.0	Bluetooth	USB 2.0	USB 1.1	?	RS485, USB möglich
Software	NMEA0183	NMEA0183	NMEA0183	NMEA0183	NMEA0183	NMEA0183	NMEA0183	NMEA2000	NMEA0183/2000
Arbeitstemperatur	- 10°C to + 60°C	-40°C bis +85°C	?	-40°C bis +70°C	?	40°C bis +85°C	-40°C bis +85°C	-25 bis +55°C	-25 bis +55°C
Sonstige Eigenschaften	Bluetooth Li-Ion-Akkus	Wasserdicht, magnetisch, bereits GALILEO - kompatibel	Wasserdicht 3V Li-Ion Akku als Backup	Wasserdicht, bereits GALILEO- kompatibel	-	-	Bereits GALILEO- kompatibel	Wasserdicht Backup-Akku	wasserdicht
Preis	~ 80 €	~ 50 €	~ 80 €	~ 1750 €	~ 80 €	~ 50 €	~ 35 €	~ 250 U\$	~ U\$ 1000
Quelle(n)	¹⁹	²⁰	²¹	²²	²³	²⁴	²⁵	²⁶	²⁷

¹⁹ <http://www.qstarz.com/Products/GPS%20Products/BT-Q818X-S.htm>

²⁰ http://www.navilock.de/produkte/gruppen/3/Kabel_Empfaenger/60095_NL-402U.html?show=spec

²¹ http://www.haicom.com.tw/gps204III_USB.aspx

²² http://www.septentrio.com/products_asterx1.htm

²³ http://www.royaltek.com/index.php?option=com_content&view=article&id=143&Itemid=100#

²⁴ [http://www.conrad.de/...](http://www.conrad.de/) (angezeigter Link verkürzt)

http://www.pocketnavigation.de/article/view_502__conrad-gps-receiver-cr4/2.4.16.html

²⁵ http://www.navilock.de/produkte/gruppen/13/Boards_und_Module/60419_NL-551EUSB_ublox5.html?show=spec

²⁶ http://www.maretron.com/products/pdf/GPS100-Data_Sheet.pdf

²⁷ <http://airmarttechnology.com/uploads/brochures/PB200.pdf>

Aktoren

	Servos										
Modell	HS-785HB	SW-2	Regatta	C-12021	HS-805BB	S 3306 MG	MS-X6		Speed 400		
Hersteller	Hitec	Robbe	Graupner	Graupner	Hitec	Futaba	Multiplex		Graupner		
Maße (in mm)	59 x 29 x 50	54 x 26,5 x 65	46 x 23 x 42	63 x 32 x 61	66 x 30 x 57,6	66 x 30 x 57	40 x 20 x 38		5,1 x 2,77 x 2,77		
Gewicht	110g	147 g	90 g	130 g	152 g	126g	48 g		73 g		
Spezifikation											
Stell- / Haltemoment	132 Ncm / ? (6V)	100 Ncm / ? (6V)	79 Ncm / ? (6V)	156 Ncm / ? (6V)	247 Ncm / ? (6V)	240 Ncm / ? (6V)	26 Ncm / ? (4,8V)				
Geschwindigkeit	1,38 sek/60° (6V)	1 U/sek (6V)	0,8 U/sek	0,15 sek/40° (6V)	0,14 sek/60° (6V)	0,16 sek/60° (6V)	0,21 sek/60° (4,8V)		16400 U/min		
Schrittwinkel	-	-		-	-	-					
Material Getriebe	Karbonite	?	Metall	Kunststoff	Nylon	Nylon	Nylon				
Arbeitsweg	1,75 (3,5?) Umdrehungen	5,5 Umdrehungen	1,5 – 5,5 Umdrehungen	45° in beide Richtungen	45° in beide Richtungen	?	?				
Lager	2 Kugellager	?	2 Kugellager	2 Kugellager	2 Kugellager	2 Kugellager	-				
Energie											
Versorgungsspannung	4,8 – 6 V	4,8 – 6 V	4,8 – 7,2 V	4,8 – 6 V	4,8 – 6 V	4,8 – 6 V	4,8 - 6 V		3,6-8,4 V; 7,2 V Nennspannung		
Stromaufnahme											
Idle	8 mA	6,9 mA	20 mA	12 mA	8,7 mA	?	?				
Betrieb	250 mA (6V)	250 mA (6V)	310 mA(6V)	?	?	?	?		0,5 A		
Last/Halten	1800 mA (6V)	?	1600 mA (6V)	1600 mA (6V)	?	?	?		3,3 A		
Arbeitstemperatur	-20°C bis +60°C	?	?	?	-20°C bis +60°C	?	?				
Sonstige Eigenschaften	Staub- und spritzwassergeschützt	Staub- und spritzwassergeschützt	Staub- und spritzwassergeschützt, bereits vorhanden	Spritzwassergeschützt	-	?	Bereits vorhanden		Blockierstromaufnahme 21A; Wellendurchmesser 2,3 mm		
Preis	~ 35 €	~ 90 €	~ 120 €	~ 50 €	~ 40 €	~ 45 €	~ 15 €				

Quelle(n)	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

²⁸ <http://www.hitecrc.de/store/product.php?productid=21206&cat=309&page=1>

²⁹ <http://www.mikes-modellwelt.de/index.php?section=products&kind=brands&mainid=15&show=product&productid=1-8371>

³⁰ <http://www.graupner.de/fileadmin/downloads/servoliste.pdf>; <http://www.hobbydirekt.de/Servos/Graupner/Servo-C-12021-Jumbo-Graupner-4098::31333.html>

³¹ <http://www.hitecrc.de/store/product.php?productid=21151&cat=309&page=1>

³² <http://www.gpdealera.com/cgi-bin/wgainf100p.pgm?l=FUTM0020>

³³ http://de.nanotec.com/schrittmotor_st6018.html

³⁴ http://www.rcuniverse.com/pgarchive/Multiplex_MS-X6.htm

³⁵ http://www.orientalmotor.de/de/uploads/documents/c_08_pk2-serie_c187-241.pdf (Seite C-228)

³⁶ http://db.sanyodenki.co.jp/stepping_e/two/pdf/2step_e_087-090.pdf

³⁷ http://www.trinamic.com/tmc/media/Downloads/QMot_motors/QSH5718/QSH5718_new_ShortSpec.pdf

³⁸ http://www.motionstep.de/start.php?d_MS_237615_4_Schrittmotoren_Baugrose_56mm___190Ncm348.php

	Pinnenpiloten		Linearaktoren							
Modell	TP10	ST1000+	LA12XX03-313012XX	SERIES 43000 SIZE 17 (Non-Captive (J))	L4118L1804-T5x5	LA 71.3460	DRB60UA4-10A	Mini 0	Junior 0E Variante A	DCLA 42 770.130
Hersteller	Simrad	Raymarine	LINAK	HaydonKerk	Nanotec	Microstep	Oriental Motor	Framo Morat	Elero	Gerdt Seefrid
Maße (cm)	61 x 10,5 x 6	61 x 9,5 x ?	245 x 50 x 85	152 x 52 x 52	?	74 x 39 x 39	129 x 60 x 60	219 x 60 x 91	335 x 38 x 75	362 x 42 x 82
Gewicht	?	?	?	241 g	340 g	?	1,49 kg	?	?	?
Spezifikation										
Max. Schubkraft	65 kg	57 kg	20 kg	23 kg	22 kg	20 kg	20 kg	45 kg	15 kg	25 kg
Antriebssystem	Spindelgetriebe	Gewindespindel	Permanentmagnetmotor + Kolbenstange	Hybridschrittmotor + ?	Schrittmotor + Trapezspindel	Hybridschrittmotor + Hohlwelle	Schrittmotor mit Kugelumlaufspindel	Gleichstrommotor + Trapezspindel	?	?
Ausfahrlänge	250 mm	250 mm?	130 mm	ca. 120 mm	200 mm	max. 600 mm	100 mm	100 mm (max. 300)	max. 200 mm	250 mm
Max. Geschwindigkeit	ca. 30mm/s	ca. 30mm/s	28 (Last) – 40 mm/s	20 mm/s	200 mm/s	40 mm/s	32 mm/s	40 mm/s	30 mm/s	25 mm/s
Auflösung			?	0,0121 mm / Schritt	0,025 mm / Schritt	0,005 mm / Schritt	0,02 mm	?	4 einstellbare Positionen?	?
Energie										
Versorgungsspannung	12 V DC (10,8 - 16 V DC)	10 – 15 V DC	12 V DC	12 V DC	?	10 – 42 V DC	?	24 V DC	24 V DC	12 V DC
Stromaufnahme	0,5A im Betrieb 0,06 A Standby	0,5-1,5A im Betrieb 0,04 A Standby	2,2A Vollast	290 mA /Phase	1,8 A / Wicklung	1,4 A /Phase	?	4,6 A	1,6 A	0,8 A
Schnittstellen										
Hardware	- (NMEA-Eingang bei den Modellen TP22 & TP32) ³⁹	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Software	-	NMEA 0183	?	?	?	?	?	?	?	?
Arbeitstemperatur	-10°C bis + 55°C	0°C bis + 70°C	-20°C bis + 40°C	?	?	+ 5°C bis + 55°C	?	?	-20°C bis + 50°C	
Sonstige Eigenschaften / Ausstattung	Wasserdicht Kompass	Fernbedienung möglich	IP X1 (IP 66 optional)	-	-	IP 30	-	Spritzwassergeschützt (IP 65), Bremsen, Potentiometer, Dreh-	Spritzwassergeschützt (IP 54)	Spritzwassergeschützt (IP 54), Potentiometer (optional)

³⁹ Informationen, die verarbeitet werden können: Kursversatz, Peilung zum Wegpunkt, Ankunft am Wegpunkt, magnetische Variation, Schiffsgeschwindigkeit, scheinbarer Wind und Geschwindigkeit

								impulsgeber und Abschalt- tung (optional)		
Preis	~ 300 €	~ 300 €	?	?	~ 90 €	?	?	?	?	?
Quelle(n)	⁴⁰	⁴¹	⁴²	⁴³	⁴⁴	⁴⁵	⁴⁶	⁴⁷	⁴⁸	⁴⁹

⁴⁰ <http://www.simrad-yachting.de/Produkte/Autopiloten/Pinnenpiloten/TP10-Pinnenpilot/Technische-Daten/ + Handbuch>

⁴¹ <http://www.raymarine.com/GetFile.aspx?fileId=732&categoryId=3>

⁴² <http://www.techline.linak.de/corporate/openpdf.aspx?pdffile=/corporate/pdf/german/LA12.pdf>

⁴³ <http://www.haydonkerk.com/Products/StepperMotorLinearActuators/HybridLinearActuators/43000Series/tabid/79/Default.aspx>

⁴⁴ http://de.nanotec.com/linearaktuator_trapezgewinde.html

⁴⁵ <http://www.microstep.soemmerda.de/de/downloads/aktuatoren/pdf/LA-71-3000.pdf>

⁴⁶ <http://www.kwapil.com/downloads/drbseried.pdf>

⁴⁷ http://www.framo-morat.com/d/index_LiMax.html

⁴⁸ http://www.elero-linear.com/images/66fcf77d0/elero_JuniorOE_181108.pdf

⁴⁹ <http://www.seefrid.de/html/linearantriebe.html>

Servo-Controllerboards

Modell	RN-MiniControl	WSCB-16	Simple Servo	Micro Maestro	SC-8000	Arduino Duemilanove	Aksen-Board
Hersteller	Roboternetz	Whirlybird	?	Pololu	Tom's RC	?	
Maße (in cm)	5 x 8	?	?	2,16 x 3	8 x 3,8 x 1,9	6,86 x 5,33 x 1,2	?
Gewicht	?	?	?	4,8 g	?	?	?
Spezifikation							
Mikroprozessor	Atmel ATmega168	ARM7	?	?	Atmel ...	Atmel ATmega168	?
Taktfrequenz	16 MHz	?	?	?	?	16 MHz	?
Speicher	16 KByte	?	?	?	?	16 KByte	?
Anschlüsse	RS232 (TTL), RS232 (V24 => PC), I2C, 6 I/O-Ports (digital?; 4x 3polig, 2x 5polig)	RS232, 16x PWM	?	6 I/O-Ports, USB, RS232(TTL)	USB, 4 dig. I/O-Ports, 8 Servo-Ports	USB, 14 dig. I/O-Ports (davon 6 PWM), 4 analoge Eingänge	CAN-Schnittstelle, 16 dig. I/O-Ports (davon 11 PWM), 15 analoge Eingänge
Unterstützte Programmiersprachen	Assembler, Basic, C, Pascal	?	?	?	?	?	C
Übertragungsgeschwindigkeit (serielle Schnitts.)	?	?	?	300 - 250000 baud/s	9600 baud/s	?	?
Energie							
Versorgungsspannung	7,2 – 13 V DC	5 V	?	5 – 16 V DC	?	7 - 12 V DC	5 – 8 V DC
Betriebsspannung	?	?	?	?	?	5 V DC	?
Stromaufnahme	max. 30 mA	?	?	20 mA	?	50 mA	170 mA
Arbeitstemperatur	?	?	?	?	?	?	?
Sonstige Eigenschaften / Ausstattung	ISP-Schnittstelle, 5V für externe Verbraucher, 10poliger Universal-Anschluss, über 2 Stiftleisten erweiterbar, Interrupt für jeden Port	RC-Receiver anschließbar, Futaba-, Hitec- und Vigor-Servos anschließbar	?	Pulsweitenbereich 64 – 3280 µs; Pulsrate 33 – 100 Hz	USB-to-Serial Converter; Pulsweitenbereich 600 – 2200 µs; Auflösung 10000 Schritte; PPM-Ausgang (RC-Receiver)	I2C, SPI,	3 Encoder-Eingänge, 4 Motor-Treiber, CAN, LCD,
Preis	~ 40 €	?	?	~ 25 US\$	~ 60 US\$	~ 30 € (40 mit Starter Kit)	verfügbar
Quelle(n)	50	51	52	53	54	55	56

⁵⁰ <http://rn-wissen.de/index.php/RN-MiniControl>

⁵¹ <http://www.whirlybird.in/servo.html>

⁵² ?

⁵³ <http://www.pololu.com/catalog/product/1350>

Fernsteuerungen/Empfänger

Modell	MC50	Acoms Techniplus-4	CX 2,4 GHz	C-4 Sonic	X-408	Zebra 4 FM-Pro	2-Kanal Fernsteueranlage FM
Hersteller	Modelcraft	Carson	Jamara	Graupner	Graupner	Multiplex	Modelcraft
Kanäle	4	4	4	2	4	4	2
Frequenz/Modulation	40 MHz / FM-PCM	40 MHz / FM	2,4 GHz	40 MHz / AM	40 MHz / FM-PPM	40 MHz / FM-PPM	40 MHz / FM-PPM
Reichweite	?	?	~ 500 m	?	?	?	?
Empfänger enthalten	Ja	Ja	Ja	Ja (B 4 SSM)	Ja (Superhet R 700)	Ja (ZR-106SF)	Ja
Kanäle	8	?	6	2	4	6	2
Maße (in cm)	4,5 x 5,5 x 1,8	?	2,8 x 6 x 4,5	4,9 x 3,4 x 2,1	4,4 x 2,9 x 1,8	3,6 x 2,5 x 1,8	4,2 x 2,8 x 2,3
Gewicht	20 g	?	12 g	32 g	19 g	16 g	18 g
Energie							
Stromaufnahme	?	?	40 mA	38 mA	10 mA	?	?
Spannung	4, 8 – 6 V	?	4,8 - 5,2 V	4,8 – 7,2 V	4, 8 – 6 V	4,8 – 6 V	?
Sonstige Funktionen / Zubehör	Trimm- und Reversefkt., Delta-&V-Leitwerksmischer/ Quarzpaar	Trimm- und Reversefkt., Delta-&V-Leitwerksmischer/ Quarzpaar, Schalterkabel, Batteriebox, 3 Servos	Trimm- und Reversefkt., Deltamischer	Trimm- und Reversefkt.,	Trimm- und Reversefkt., Delta-&V-Leitwerksmischer/ Quarzpaar, Schalterkabel, Batteriebox, Servo C 677	Trimm- und Reversefkt., Delta-&V-Leitwerksmischer/ Quarzpaar, Schalterkabel, Batteriebox	Trimm- und Reversefkt. / Quarzpaar, Schalterkabel, Batteriebox
Preis	~ 50 €	~ 70 €	~ 60 €	~ 40 €	~ 90 €	~ 60 €	~ 40 €
Quelle	⁵⁷	⁵⁸	⁵⁹	⁶⁰	⁶¹	⁶²	⁶³

⁵⁴ <http://www.tti-us.com/rc/sc8000.htm>

⁵⁵ <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>

⁵⁶ http://ots.fh-brandenburg.de/index.php?module=pagemaster&PAGE_user_op=view_page&PAGE_id=20&MMN_position=29:14:17

⁵⁷ <http://www.conrad.de/ce/de/product/207255/HANDESENDER-4-KANAL-FERNSTEUERANLAGE-MC50/1207014>

⁵⁸ <http://www.carson-modelsport.com/de/produkte/fernsteueranlagen/anlagen4kanal/produktdetails.htm?sArtNr=500500506>

⁵⁹ <http://www.rc-info.de/fernsteuerung/sender-24-ghz/jamara-061110-cx-24ghz.html> (Reichweite siehe Amazon)

⁶⁰ <http://shop.graupner.de/webuerp/servlet/AI?ARTN=3131> , <http://www.graupner.de/fileadmin/downloadcenter/anleitungen/3131.pdf>

⁶¹ <http://shop.graupner.de/webuerp/servlet/AI?ARTN=4729> , http://www.graupner.de/fileadmin/downloadcenter/anleitungen/20060921103329_4728.pdf

⁶² http://modellbau-guru.eshop.t-online.de/epages/Store_Shop30842.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/Shop30842/Products/Fs-033

⁶³ <http://www.conrad.de/ce/de/product/227713/2-Kanal-Fernsteuerung-Stick-40-MHz-FM>

Funkmodule (434/868 MHz)

Modell	Wi.232EUR	AC4868	AMB8376 (Box)	XBee Pro 868	ARF53 (Box)	RT868F5	70TRX-T	TRX433-10
Hersteller	Radiotronix	Aerocomm	Amber Wireless	Digi	Adeunis RF	?	HM Funktechnik	Schmiediger
Maße (in cm)	2,36 x 2,03 x 0,3 (nur Transceiver)	4,9 x 4,2 x 0,5 (nur Transceiver)	16,5 x 8,6 x 3,55	3,3 x 2,2 x 0,8 (nur Transceiver)	14,5 x 10 x 4 (+ 8,5 Antenne)	3,3 x 2,3 x 0,8	6,18 x 3,16 x 1,5	4 x 2,5 x 0,45 (nur Transceiver)
Gewicht	?	21 g (nur Transceiver)	310 g	?	?	?	30 g	7 g (nur Transceiver)
Spezifikation								
Frequenzbereich (MHz)	868,225 – 869,85	869,4 – 869,65	869,4 – 869,65	869,525	869,4 – 869,65	868 - 870	433,0625 - 434,7875	433,0625 - 434,7875
Reichweite	Ca 1,6 km	Bis 15 km	Bis 18 km	Bis 40 km (mit Dipol- Antenne)	Bis 6 km	Bis 350 m	Bis 1500 m	Bis 4 km
Datenrate	2,4 – 115,2 kBaud	Bis 57,6 kbps	2,4 – 19,2 kBaud	24 kbps	10 - 57,6 kbps	9,6 - 38,4 kBaud	Bis 9,6 kBaud	0 – 19,2 kbps
Empfindlichkeit (Eingang)	-106 dBm	-103 dBm	-112 dBm	-112 dBm	-112 dBm	-105 dBm	-118 dBm	-120 dBm
Sendeleistung	13 dBm (32 mW?)	Bis 250 mW	500 mW	85 - 500 mW	500 mW	Max. 10 dBm (10 mW)	10 mW	10 mW
Anzahl Kanäle	Max 6.	?	Max. 8	?	Max. 3	?	139	139
Antennenausführung	?	MMCX	SMA-Buchse	SMA-Buchse	?	BNC-Buchse (an Adapterboard)	SMA-Buchse optional	BNC-Buchse (an Evaluation-Board)
Schnittstellen								
Hardware	RS232, RS422, RS485	RS232, USB	RS232	RS232, USB	RS232, RS485, USB	RS232	?	RS232
Software	UART	?	?	UART	?	?	?	?
Konfiguration	?	?	Über AT-Kommandos	Über AT-Kommandos	Über AT-Kommandos	Über AT-Kommandos	?	Über RS232
Energie								
Stromaufnahme								
Senden	57 mA	240mA	530 mA bei 7V	500mA	?(3W)	31 mA	75 mA	35 mA
Empfangen	20 mA	36mA	75 mA bei 7V	65 mA	?(0,27W)	26 mA	56 mA	25 mA
Idle/Sleep	0,85 mA	?	?	?	?	10 µA	?	3 µA
Spannung	2,7 – 3, 6 V 4 – 15 V bei Kit	3,3 – 5,5 V	7 – 30 V	3 – 3,6 V, 5 - 14 V über Development- Board	4,5 – 36 V	2,7 – 3,6 V 5-18 V mit RN-Funk	5 – 11 V	3,5 – 6 V
Arbeitstemperatur	-40°C bis +85°C	-40°C bis +80°C	-30°C bis +70°C	?	-30°C bis +70°C	-20°C bis +70°C	-25°C bis + 75°C	?
Sicherheit (bei Datenübertragung)	?	?	Wiederholen, Bestätigen	128 Bit AES- Ver- schlüsselung, Wiederholen, Bestätigen	?	?	?	CRC-Checksumme
Sonstige Funktionen / Zubehör	Evaluations-Kit erhältlich	Bei Evaluations-Kit: => 2 Transceiver => 2 Adapterboards => 2 Antennen	Enthält AMB8355- Modul	Bei Evaluations-Kit: 2 Transceiver 2 Development- Boards, USB-Kabel,	?	Adapterboard RN- FUNK und Antenne erforderlich	Adapterboard FSM 24 erforderlich	Evaluations-Kit erhältlich (Eval3-Kit) => 2 Transceiver => 2 Adapterboards

		=> 2 DSUB9-Kabel => 2 USB-Kabel		RS232-Kabel, Antennen				=> 2 Antennen => 2 DSUB9-Kabel
Preis	~ 35 €	~ 200 US\$ (Kit) (nicht nach Deutschland lieferbar)	~ 550 € / Stück	120 € (Kit)	~ 530 €	Insg. ~ 95 € / Stück	?	~ 400 € (Eval-Kit)
Quelle	⁶⁴	⁶⁵	⁶⁶	⁶⁷	⁶⁸	⁶⁹	⁷⁰	⁷¹

⁶⁴ http://www.radiotronix.com/datasheets/new/eur_um.pdf

⁶⁵ http://www.aerocomm.com/docs/Datasheet_AC4868.pdf

⁶⁶ http://amber-wireless.de/files/amb8376_db.pdf

⁶⁷ <http://www.digi.com/products/wireless/point-multipoint/xbee-pro-868.jsp#specs> BZ: <http://www.digistoreurope.com/?pn=XBP08-DK>

⁶⁸ <http://www.reimesch.de/arf53.html>

⁶⁹ http://www.shop.robotikhardware.de/shop/catalog/product_info.php?cPath=76&products_id=64

⁷⁰ <http://www.hmradio.de/>

⁷¹ http://www.willi-schmidiger.ch/pdf-2/trx_module/Produkteblatt_TRXnnn-10.pdf

Akkus

Modell						ASN38120SHK	BA95HC-FL	VAP VCL0013	CANBP970	BP-970G
Hersteller	Tamiya	Conrad	Conrad	Kokam	GP	A123	Oceanserver?	?	?	?
Typ	NiMH	NiMH	NiMH	LiPo	LiPo	LiFePo	Lilon	Lilon	Lilon	Lilon
Maße (in mm / LxBxH)							167 x 107 x 21 od. 292 x 57 x 22	71 x 38 x 58	70 x 38 x 59	70 x 38 x 58,5
Gewicht (g)	787	580	435	348	271	340	646	ca. 290	290	290
Bauform										
Spezifikation										
Nennspannung	12 V	12 V	6 V	11,1 V	7,4 V	3,3 V	14,4 V	7,4 V	7,4 V	7,4 V
Kapazität (mAh/Wh)	4200 / 50,4	2400 / 28,8	4200 / 25,2	3800 / 42,2	5300 / 39,2	10000 / 33	6600 / 95	5500 / 40,7	6600 - 7500/ 48,8 - 55,5	6800 / 50,3
Anzahl Zellen	12						12	?	?	?
Maximalstrom (Laden / Entladen)							4 A / 8 A	?	?	?
Anzahl Ladezyklen						10000		?	?	?
Verhältnis										
Leistung/Preis	0,91	0,96	0,84	0,35	0,49	1,13	0,64	1,44	1,08 - 1,23	1,62
Leistung/Gewicht	64,04	49,65	57,93	121,26	144,64	97,06	147,05	140,34	168,28- 191,37	173,45
Sicherheit										
Arbeitstemperatur							-10 bis +50°C			
Quelle	⁷²	⁷³	⁷⁴	⁷⁵	⁷⁶	⁷⁷	⁷⁸	⁷⁹	⁸⁰	⁸¹
Bestell-Nr. (Conrad)										
Preis	54,95 €	29,95 €	29,95 €	119,00 €	79,96 €	29,00 €	\$ 187,45	28,25 €	44,95 €	30,99 €

⁷²

⁷³

⁷⁴

⁷⁵

⁷⁶

⁷⁷

⁷⁸ http://www.ocean-server.com/battery_packs.html

⁷⁹ <http://www.reichelt.de/?ACTION=3;ARTICLE=54124;GROUPID=4196;PROVID=4>

⁸⁰ <http://www.akkushop.de/accupower-akku-passend-fuer-canon-bp970-7500mah-p-7551.html>

⁸¹ <http://www.akkudo.de/akku-canon-bp970g-p-498.html>

Schaltregler/Spannungswandler

Kategorie	Step-Down-Wandler							
Modell	W78-5V0 5V	L4977A	LM3150	TPS54620	OKR-T/6 W12-C	3005S12	NSR006A0X4Z	6-stufiger 12V Schaltregler
Hersteller	Conrad	ST Electronics	Nat. Semiconductor	Texas Instruments	Murata PS	Martek	Lineage Power	?
Typ	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler
Maße (in mm / LxBxH)	24 x 24 x 8,5	22 x 20 x 9		3,6 x 3,6 x 2	10,4 x 16,5 x 7,6	65 x 76 10,2	10,4 x 16,5 x 7,6	95 x 60 x 28
Gewicht	?	?	?	?	?	142 g	?	?
Bauform / Package	?	15 Pin Power Package	?	14 Pin QFN	Miniatur SIP / C90	?	?	Fertiggerät mit Stecker für KFZ-Anschluss
Spezifikation								
Eingangsspannung	7 – 34 V	15- 50 V	6 - 42 V	4,5 – 17 V	4 – 14 V	9 – 18 V	4,5 – 14 V	11 – 14 V
Ausgangsspannung	5 V	5,1 -40 V	0,6 – 40 V	0,8 – 15 V	0,6 – 6 V	5 V	0,6 – 6 V	1,5 – 12 V
Ausgangsstrom	1 A	7 A	12 A	6 A	6 A	5 A	6 A	3 A
Wirkungsgrad	Bis 93,5 % bei 500 mA	Bis 87 %	bis 95 %	Bis 96 %	Bis 95,5 %	Bis 78 %	Bis 95 %	?
Schaltfrequenz		Bis 500 kHz	Bis 1 MHz	0,2 – 1,6 MHz	600 kHz	?	600 kHz	?
Arbeitstemperatur	-40 bis +85 °C	-40 bis ?? °C	-40 bis +125 °C	-40 bis +150 °C	-40 bis +85 °C	-40 bis +75 °C	-40 bis +85 °C	?
Sicherheit	Kurzschlussicherung	Überhitzungsschutz	?	?	Überhitzungs- & Überstromschutz	?	?	Überhitzungs-, Kurzschluss und Überlastschutz
Sonstiges	Keine Mindestlast, Kein Ausgangskondensator erforderlich, Soft-Start	Benötigt externe Komponenten (Evaluation Board), Soft-Start	Weitete Komponenten benötigt (Evaluation Board => beschränkt Uout auf 3,3V)	Weitere Komponenten notwendig,	?	?	?	Ausgangsspannung 6-stufig verstellbar, verschiedene Steckadapter
Quelle	⁸²	⁸³	⁸⁴	⁸⁵	⁸⁶	⁸⁷	⁸⁸	⁸⁹
Art.-Nr.	167805 – 62	-	-	-	-	-	-	43-846-00660
Preis	9,95 €	~ 11 €		~ 80 € (inkl. Eval-Kit)	~ 12 €	?	~ 17 €	18,95 €

⁸² http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/167805-da-01-en-SCHALTREGLER_W78_5V0_5V.pdf

⁸³ <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/1365.pdf>

⁸⁴ <http://www.national.com/ds/LM/LM3150.pdf>

⁸⁵ <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps54620.pdf>

⁸⁶ http://www.murata-ps.com/data/power/okr-t6-w12_long.pdf?ref=noshort

⁸⁷ http://p31638.typo3server.info/dcdc/datasheets/3000_lp.pdf

⁸⁸ <http://www.lineagepower.com/oem/pdf/NSR006A0X.pdf>

⁸⁹ http://www.netzteile.ch/index.html?spannungswandler_dc-dc_schaltregler.htm

Schaltregler/Spannungswandler

Kategorie	Step-Down-Wandler			Step-Up-Wandler			
Modell	LiPo-Spannungsregler	Volt Limiter	Servo-V-Limiter	JCA0605S12	3W Tel 3-0512	Step-Down-/ Step-Up-Wandler USW 525	Spannungswandler M029
Hersteller	Modelcraft	Robbe	Emcotec	XP-Power	Traco Power	ELV?	?
Typ	Spannungswandler	?	Spannungsregler/-wandler?	Schaltregler	Schaltregler	Schaltregler	Spannungswandler
Maße (in mm / LxBxH)	46 x 16 x 12	55x21x17	45 x 9,2 x 8,6	25,4 x 20,3 x 10	32 x 20 x 10	76 x 65,5	82 x 72 x 25
Gewicht	?	18 g	5,2 g	12 g	?	?	?
Bauform / Package	?	?	?	?	DIL-24	SMD?	?
Spezifikation							
Eingangsspannung	7 -25 V	6 - 7,4 V	5,9 – 8,4 V	4,5 – 9 V	4,5 – 9 V	7 – 25 V	6 – 13 V
Ausgangsspannung	6 V	5,7 V	5,9 V	12 V	12 V	4 – 25 V	11 – 24 V
Ausgangsstrom (Dauer- / Maximal-)	5 A / ?	3 A bei 7,4 V / ?	1,6 A / 10 A	0,5 A / ?	0,25 A / ?	Bis 5 A / ?	2 A
Wirkungsgrad	?	?	?	84 %	78 %	Bis 97 %	?
Schaltfrequenz	?	?	?	300 kHz	?	200 kHz	-
Arbeitstemperatur	?	?	?	-40 bis +100 °C	-25 bis +75 °C	?	?
Sicherheit	?	?					
Sonstiges	BEC-Stecksystem	Wahrscheinlich Spannungswandler	1 Servoein- und ausgang; bis 4 W Verlustleistung	?	Dauerkurzschlussfest	?	Kühlkörper notwendig Ausgangsspannung über Potentiometer einstellbar
Quelle	⁹⁰	⁹¹	⁹²	⁹³	⁹⁴	⁹⁵	⁹⁶
Art.-Nr.	207895 - 62	386711 - 62	-	-	154368 - U1	68-755-48	92-477-00190
Preis	9,95 €	~ 25 €	~ 20 €	~ 23 €	16,90 €	49,95 €	22,50 €

⁹⁰ <http://www.conrad.de/ce/de/product/207895/LIPO-SPANNUNGSREGLER-6-V-5-A/1209104>

⁹¹ <http://www.conrad.de/ce/de/product/386711/6-VOLT-LIMITER-LIPO>

⁹² http://shop.rc-electronic.com/downloads/pdf/bedienungsanleitungen/Anleitung_V_Limiter_2009_DE.pdf

⁹³ http://www.xppower.com/pdfs/SF_JCA04-06.pdf

⁹⁴ http://www.conrad.de/ce/ProductDetail.html?hk=WW2&insert=U1&WT.mc_id=epro&productcode=154368&zanpid=1394977039693389824

⁹⁵ <http://www.elv.de/output/controller.aspx?cid=74&detail=10&detail2=28606&flv=1&bereich=&marke=>

⁹⁶ http://www.netzteile.ch/index.html?spannungswandler_dc-dc_schaltregler.htm

Ladegeräte

Modell	BP-970G	CAM BASICLADER
Hersteller	?	?
Typ	Camcorder-Akkus (Lilon)	Camcorder-Akkus (Lilon)
Maße (in mm / LxBxH)	?	?
Gewicht (g)	?	~ 250
Spezifikation		
Ladestrom	400mA ?	600 mA?
Sonstiges	Ladestatus-Anzeige, 12V Adapter, Ladeschale einzeln erhältlich?	Ladestatus-Anzeige, 12V Adapter, Ladeschale muss einzeln gekauft werden
Sicherheit	Überladeschutz Autom. Abschaltung	?
Arbeitstemperatur	?	?
Quelle	⁹⁷	⁹⁸
Bestell-Nr. (Conrad)	-	
Preis	13,95 €	11,85 €

⁹⁷ <http://www.akkudo.de/ladeger%E4t-canon-bp970g-p-1486.html>

⁹⁸ <http://www.reichelt.de/?ACTION=3;GROUP=P54F;GROUPID=4206;ARTICLE=54382;SID=26R7RPiawQARoAACpcPnkb3950cc434671ed66730ef98370c21a3>

Komponenten für Servoswitch

Kategorie	RC-Schalter	RC-Schalter
Modell	SMD-Baustein 2-Kanalschalter	2-KANAL-MEMORY-SCHALTER
Hersteller	Conrad	Conrad
Maße (in cm)	3,5 x 3,5	4 x 2 x 4,1
Gewicht	?	?
Spezifikation		
Betriebsspannung	4,8 – 6 V	4 - 6 V
Schaltspannung	5 – 24 V	6 - 45 V
Schaltleistung	1 A	2 A
Kanäle	2	2
Schalter	Taster	Schalter und Taster
Sonstiges	-	Fertiggerät im Gehäuse
Quelle	⁹⁹	¹⁰⁰
Bestell-Nr. (Conrad)	225126 - 62	234656 - 62
Preis	14 €	25 €

⁹⁹ <http://www.conrad.de/ce/de/product/225126/SMD-Baustein-2-Kanalschalter/1207093>

¹⁰⁰ <http://www.conrad.de/ce/de/product/234656/FERTIGGERAeT-2-KANAL-MEMORY-SCHALTER/1207093>

Kategorie	Fahrtregler	Fahrtregler	Fahrtregler	Fahrtregler	Fahrtregler
Modell	VR 18 T	CARBON-Series Micro	A.I. Runner Reverse	Rookie 20	Thor 15 HC
Hersteller	Modelcraft	Modelcraft	LRP Electronic	Robbe	CTI
Maße (in cm)	4 x 3,6 x 1,4	2,9 x 2,7 x 2	2,6x 2,6 x 1,57	4,6 x 3,7 x 2,5	2,4 x 2 x 0,7
Gewicht	56 g	19 g	19 g	60 g	14g
Spezifikation					
Betriebsspannung	6 – 12 V	7.2 V / 8.4 V	4,8 – 7,2 V	6 - 12 V	7,2 – 12 V
Dauerstrom	17,5 A	25 A	?	20 A	18 A
Belastbarkeit (1 s/30s /5 min)	35 A / 27 A / 17,5 A	54 A / 35 A / 25 A	60 A / ? / ?	25 A / ? / 20 A	50 A / ? / 18 A
Vorw./Rückw./Bremse	ja / ja / ja	ja / ja / ja	ja / ja / ja	Ja / ja / ja	Ja / ja / nein
BEC-Daten	5 V / max. 1,2 A	5 V / max. 1 A	5 V / ?	5 V / 1,2 A	? / 1 A
Sonstiges	Wasserdicht, Fail-Safe-Modus	Temperatur-, Überlast- & Kurzschlussabschaltung	Wasserdicht, Fail-Safe-System, Plug & Play	Spritzwassergeschützt, Unterspannungsabschaltung	?
Quelle	¹⁰¹	¹⁰²	¹⁰³	¹⁰⁴	¹⁰⁵
Bestell-Nr. (Conrad)	228300 - 62	207369 - V0	234656 - 62	386712 - 62	-
Preis	30 €	15 €	40 €	35 €	21 €

¹⁰¹ <http://www.conrad.de/ce/de/product/228300/MODELCRAFT-12-V-FAHRTREGLER-VR-18-T>

¹⁰² http://www.conrad.de/ce/ProductDetail.html?hk=WW4&insert=V0&WT.mc_id=Froog&productcode=207369

¹⁰³ http://www.conrad.de/ce/de/product/231303/FAHRTREGLER-AI-RUNNER-REVERSE/SHOP_AREA_32305&promotionareaSearchDetail=005

¹⁰⁴ <http://www.conrad.de/ce/de/product/386712/ROOKIE-20>

¹⁰⁵ http://www.hobby-lobby-modellbau.com/onlineshop/product_info.php/info/p2891_CTI-Fahrregler-Thor-15-HC.html

Kategorie	Kleinrelais	Miniatur-Printrelais	DIL-Print-Relais	Printrelais	Signalrelais	Miniaturrelais	Signalrelais	Kleinrelais	Kleinrelais	Reed-Relais
Modell	M4-12H	30.22.7.012.0000	RA4-12W-K	30.22.9.012	G6A-474P-ST-US 12 VDC	SY-12W-K	DS2YS12	V23040-C0052-B201	G6AK-274P-ST-US 12 VDC	DIP12-1C90-51L
Hersteller	?	Finder	Takamisawa	Finder	Omron	Takamisawa	Panasonic	Siemens	Omron	Meder
Maße (in mm / LxBxH)	20 x 10 x 11	20,3 x 10,1 x 11,1	35,4 x 10 x 10	20 x 10 x 10	35,4 x 10 x 10	12,5 x 7,4 x 10	20 x 10 x 11	20 x 10 x 8	20 x 10 x 8	19,3 x 7 x 5,1
Gewicht	?	?	?	4,6 g	?	1,7 g	?	?	?	2,2 g
Spezifikation										
Ausführung	monostabil	monostabil	monostabil	monostabil	monostabil	monostabil	monostabil	bistabil	bistabil	?
Nennspannung	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V
Kontaktart	2 Wechsler	2 Wechsler	4 Wechsler	2 Wechsler	4 Wechsler	1 Wechsler	2 Wechsler	1 Wechsler	2 Wechsler	1 Wechsler
Schaltspannung	24 V	30 V	220 V	125 V	220 V	60 V	220 V	150 V	220 V	200 V
Schaltstrom I _s	1,25 A	2 A	2 A	2 A	2 A bei 30 V	1 A	2 A	2 A	2 A bei 30 V	0,25 A
Spulenwiderstand	960 Ohm	720 Ohm	720 Ohm	360 Ohm	400 Ohm	960 Ohm	720 Ohm	1850 Ohm	800 Ohm	500 Ohm
Ansprech-/Abfallzeit	≤10ms / ≤10ms	15ms / 10ms	≤ 6ms / ≤ 4ms	15ms / 10ms	≤ 5ms / ≤ 3ms	≤ 5ms / ≤ 2ms	4ms / 3ms	≤ 3ms / ≤ 3ms	≤ 5ms / ≤ 5ms	0,7ms / 1,5ms
Mech. Lebensdauer	100000000 Zykl.	100000000 Zyklen	200000000 Zyklen	100000000 Zyklen	100000000 Zykl.	5000000 Zyklen	100000000 Zykl.	1000000000 Zyk.	100000000 Zykl.	?
Quelle	¹⁰⁶	¹⁰⁷	¹⁰⁸	¹⁰⁹	¹¹⁰	¹¹¹	¹¹²	¹¹³	¹¹⁴	¹¹⁵
Bestell-Nr. (Conrad)	505170 - 62	502814 - 62	502910 - 62	-	503680 - 62	502826 - 62	504958 - 62	-	503689 - 62	-
Preis	2,66 €	2,22 €	8,03 €	1,50 €	7,85 €	1,84 €	2,59 €	1,99 €	5,30 €	3,50 €

¹⁰⁶ <http://www.conrad.de/ce/de/product/505170/KLEIN-RELAIS-WASCHDICHT-12-V/0214210>

¹⁰⁷ <http://www.conrad.de/ce/de/product/502814/REL-DIL-12V-DC-SERIE-30>

¹⁰⁸ <http://www.conrad.de/ce/de/product/502910/RELAIS-4-X-UM-12-V/0214210>

¹⁰⁹ <http://www.reichelt.de/?ACTION=3;GROUP=C33;GROUPID=3293;ARTICLE=7615;SID=315GOQnqwQAR8AACbXeSE7a620904f19cd54429fefe18ee3cced8>

¹¹⁰ <http://www.conrad.de/ce/de/product/503680/RELAIS-MONOS-4XUM-G6A-474P-ST-US-12-VDC/0214210>

¹¹¹ <http://www.conrad.de/ce/de/product/502826/RELAIS-SY-12W-K/0214110>

¹¹² <http://www.conrad.de/ce/de/product/504958/SIGNALRELAIS-2U-12V-2A-DS2Y/5714110>

¹¹³ http://www.luedeke-elektronik.de/product_info.php?products_id=3244

¹¹⁴ <http://www.conrad.de/ce/de/product/503689/RELAIS-BIST-2XUM-G6AK-274P-ST-US-12-VDC/0214210>

¹¹⁵ <http://www.reichelt.de/?ACTION=3;GROUP=C31;GROUPID=3291;ARTICLE=15188;SID=315GOQnqwQAR8AACbXeSE7a620904f19cd54429fefe18ee3cced8>