



**Kantonsschule  
Uetikon am See**

# **Entwurf, Konstruktion und Bau eines autonomen Segelboots**

Maturaarbeit

Georg Alejandro Niggli

23.10.2023

Betreuung: Dr. Carola Ebenhoch

Fachschaft Physik, Kantonsschule Uetikon am See



---

## Zusammenfassung

Autonome Fahrzeuge gewinnen zunehmend an Bedeutung. Auch auf Gewässern bieten sie vielfältige Einsatzmöglichkeiten, darunter beispielsweise die Überwachung der Wasserqualität. Segelboote erweisen sich aufgrund ihrer Emissionsfreiheit und ihres geringen Energiebedarfs als besonders geeignet für solche Einsatzzwecke.

Bisher werden autonome Segelboote fast ausschliesslich für den maritimen Einsatz entwickelt. In dieser Arbeit wird die Entwicklung und der Bau eines vollständig autonomen Segelboots beschrieben, das für den Einsatz auf Binnengewässern vorgesehen ist. Das 2,2 Meter lange Boot hat einen Rumpf aus glasfaserverstärktem Kunststoff und ist mit einem Hartsegel mit Sailwing ausgestattet. Das selbstentwickelte einfache Navigations- und Steuerprogramm läuft auf einem leistungsschwachen Raspberry Pi Zero W 1.1. Die Energieversorgung wird durch ein kleines Solarpanel in Kombination mit einem selbst gebauten Akkumulator sichergestellt.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Heutige Verbreitung von autonomen Segelbooten . . . . .	1
1.2 Was sind autonome Segelboote . . . . .	1
1.2.1 Segelboot . . . . .	1
1.2.2 Autonomie . . . . .	2
<b>2 Auflistung verwandter Arbeiten</b>	<b>3</b>
<b>3 Konzeptentwicklung</b>	<b>5</b>
3.1 Zielsetzung . . . . .	5
3.2 Methodisches Vorgehen . . . . .	5
3.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen . . . . .	6
<b>4 Design und Konstruktion</b>	<b>9</b>
4.1 Verschiedene Segelbootstypen . . . . .	9
4.1.1 Rump fzahl . . . . .	9
4.1.2 Segelart . . . . .	9
4.1.3 Kielart . . . . .	10
4.2 Exkurs zur Stabilität von Segelbooten . . . . .	10
4.3 Wahl des Bootstypus . . . . .	15
4.3.1 Wahl der Segelart . . . . .	15
4.3.2 Wahl der Rump fzahl . . . . .	16
4.3.3 Kiel oder Schwertboot . . . . .	16
4.3.4 Ergebnis des Auswahlverfahrens zum Bootstyp . . . . .	16
4.4 Grundmaterialentscheid . . . . .	16
4.5 Prozess der Konstruktion . . . . .	17
4.6 Konstruktion des Rumpfs . . . . .	18
4.7 Konstruktion des Hauptsegels und des Sailflap . . . . .	23

4.7.1	Hauptsegel . . . . .	23
4.7.2	Sailflap . . . . .	24
4.8	Konstruktion des Kiels . . . . .	25
4.9	Konstruktion des Ruders . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Elektronik</b>	<b>29</b>
5.1	Mikrocontroller . . . . .	29
5.2	Sensoren und Aktuatoren . . . . .	30
5.2.1	Positionsbestimmung (GPS) . . . . .	30
5.2.2	Gyro und Magnetometer . . . . .	32
5.2.3	Eigenentwicklung des Windrichtungssensors . . . . .	33
5.2.4	Aktuatoren . . . . .	37
5.3	Schleifring (Slip Ring) . . . . .	39
5.4	Energieversorgung . . . . .	39
5.4.1	Wasserturbine . . . . .	39
5.4.2	Windturbine . . . . .	40
5.4.3	Fotovoltaik . . . . .	40
5.4.4	Energiespeicher (Akku) . . . . .	42
5.4.5	Ladeelektronik . . . . .	43
5.4.6	Spannungswandler . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Navigation</b>	<b>47</b>
6.1	Kurze Einführung ins Segeln . . . . .	47
6.1.1	Segelstellungen . . . . .	47
6.1.2	Wahrer und scheinbarer Wind . . . . .	47
6.2	Software Architektur . . . . .	48
6.3	Verbreitete Wegfindungsalgorithmen . . . . .	49
6.3.1	Deep Reinforcement Learning Algorithm . . . . .	49
6.3.2	Künstliche Potenzialfelder Algorithmus . . . . .	49
6.4	Eigenentwickelter vektorbasierter Ansatz . . . . .	50
6.5	Kollisionsvermeidung . . . . .	53
6.6	Motorsteuerung . . . . .	53
6.6.1	Ruder (PD Controller) . . . . .	53
6.6.2	Segel . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Herstellung und Zusammenbau</b>	<b>57</b>
7.1	Herstellungsprozess der Komponenten . . . . .	57
7.1.1	Skelett und grundlegende Bootsform . . . . .	57
7.1.2	Glasfaserbeschichtung . . . . .	59
7.1.3	Ruder . . . . .	60
7.1.4	Kiel . . . . .	61
7.1.5	Segel . . . . .	61
7.1.6	Sailflap . . . . .	63
7.2	Bemalung . . . . .	63

7.3	Einbau der Elektronik . . . . .	64
7.3.1	Raspberry Pi . . . . .	64
7.3.2	Sensoren . . . . .	64
7.3.3	Aktuatoren . . . . .	64
7.3.4	Energieversorgung . . . . .	64
<b>8</b>	<b>Verbesserungspotenzial und Ausblick</b>	<b>65</b>
8.1	Verbesserungspotenzial . . . . .	65
8.1.1	Rumpf . . . . .	65
8.1.2	Elektronik . . . . .	65
8.1.3	Segel . . . . .	66
8.1.4	Kiel . . . . .	66
8.1.5	Ruder . . . . .	66
8.2	Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der autonomen Segelboote . . . . .	66
<b>9</b>	<b>Danksagung</b>	<b>69</b>
	<b>Literatur</b>	<b>71</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Schaltplan</b>	<b>75</b>
<b>B</b>	<b>Algorithmus</b>	<b>77</b>



## Kapitel 1

---

# Einleitung

---

Segelboote waren vor der Erfindung motorisierter Boote und Schiffe der Schlüssel zur Globalisierung. Dank der Kraft des Windes konnten Menschen schon damals riesige Distanzen überwinden und Güter selbst über Ozeane transportieren. Seit der Erfindung der Dampfmaschine und der damit ausgelösten industriellen Revolution dienen sie jedoch fast nur noch als Vergnügungs- oder Sportgeräte. Als Folge der rasanten Entwicklung der Technologie des autonomen Fahrens können Segelboote in nicht zeitkritischen Anwendungen einen erneuten Aufschwung erleben.

### 1.1 Heutige Verbreitung von autonomen Segelbooten

Während Berichte über Entwicklungen und Fortschritte autonomer Strassenfahrzeuge fast täglich in der Presse erscheinen und sich die bedeutendsten und kapitalkräftigsten Unternehmen der Fahrzeugindustrie und Informatik in einem harten Wettbewerb um die Führerschaft bei deren Entwicklung befinden [1], fristet die Entwicklung von autonomen Segelbooten bisher ein Schattendasein.

### 1.2 Was sind autonome Segelboote

#### 1.2.1 Segelboot

Ein Schiff ist ein Wasserfahrzeug oder ein anderer zur Fortbewegung auf oder unter der Wasseroberfläche bestimmter Schwimmkörper oder ein schwimmendes Gerät (Artikel 2 Abs. 1 lit. a Ziffer 1 der Verordnung über die Schifffahrt auf schweizerischen Gewässern (Binnenschifffahrtsverordnung, BSV) vom 8. November 1978. Ein Boot ist damit ein Schiff, wobei der Begriff Schiff als Überbegriff für Wasserfahrzeuge gilt und der Begriff Boot

regelmässig zur Bezeichnung kleineren Wasserfahrzeuge wie Ruderboote, Sportboote, Paddelboote etc. dient, die in der Regel nicht eingedeckt sind [2].

Ein Segelschiff ist ein Schiff, das für die Fortbewegung mit Segeln versehen ist. Ein Segelschiff, das mit oder ohne gesetzte Segel unter Motor fährt, gilt rechtlich nicht als Segelschiff, sondern als Schiff mit Maschinenantrieb (Artikel 2 Abs. 1 lit. a Ziffer 9 Binnenschiffverkehrsverordnung).

Ein Schiff ist folglich nur dann ein Segelschiff, wenn es:

- (a) für die Fortbewegung mit Segeln versehen ist und
- (b) über keinen Motor für die Fortbewegung verfügt oder einen vorhandenen Motor nicht dafür einsetzt.

Der Einsatz von Motoren für andere Zwecke als der Fortbewegung, zum Beispiel für das Setzen von Segeln oder das Bewegen des Ruders, ändert aber nichts an der Klassierung eines Wasserfahrzeuges als Segelschiff.

### 1.2.2 Autonomie

Autonom ist ein Segelboot dann, wenn es selbstständig und ohne eigene Mannschaft oder Einflussnahme durch eine Mannschaft von aussen operieren kann. Es benötigt dazu einzig die Vorgabe eines Ziels; danach sucht es selbstständig den Weg zu diesem vorgegebenen Ziel oder auch zu mehreren vorgegebenen Zielen. Autonome Boote unterscheiden sich damit von Roboterschiffen oder Drohenschiffen, die von einer Mannschaft ferngesteuert operiert werden. Der Begriff «roboter sailing» wird in der englischen Sprache allerdings oft als Synonym für autonomes Segeln verwendet. In dieser Arbeit werden autonome Boote und Roboterboote aber unterschieden.

Damit ein Segelboot autonom ist, muss es in der Lage sein, nach der einmaligen Vorgabe eines Zielpunktes:

1. seine Ausgangsposition selbstständig zu ermitteln,
2. das vorgegebene Ziel selbstständig zu suchen und allein unter Nutzung der Windkraft selbstständig anzusteuern,
3. den einmal gewählten Kurs unter Berücksichtigung der herrschenden und sich ändernden Umweltbedingungen, insbesondere Wind oder Strömung selbstständig so anzupassen, dass es das Ziel planmässig und nicht nur zufällig erreicht.

## Kapitel 2

---

# Auflistung verwandter Arbeiten

---

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über relevante Arbeiten präsentiert, die sich mit dem Bau und der Konstruktion oder der Autonomie von Segelbooten befassen.

Mit dem Bau und der Konstruktion befasst sich Schröder et. al. im Conference Paper «Development of a low-budget robotic sailboat». Es wird ein EPS basierter Rumpf beschrieben, sowie ein frei rotierendes Segel. Das Boot ist 1.2m lang und kostet nur ca. 350 Franken. Das Boot, sowie die Bordelektronik wird selbst entwickelt. [3]

Ebenfalls ein autonomes Segelboot wird von Giger et. al. in «Design and Construction of the Autonomous Sailing Vessel AVALON» an der ETH Zürich konstruiert und gebaut. Das Ziel ist es, mit dem gebauten Katamaran autonom den Atlantik zu überqueren. [4]

Mit dem Bau des Rumpfes eines Segelboots beschäftigt sich Ingrassia et. al. in «Parametric Hull Design with Rational Bézier Curves and Estimation of Performances». Die digitale Konstruktion von Schiffskörpern mit Hilfe von Bezièrekurven wird beschrieben. [5]

Ausschliesslich mit dem Segeldesign beschäftigt sich Tretow C. in «Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat». Das Konzept eines Sailwings und dessen Funktionsweise wird beschrieben, sowie ein möglichst effizientes, aber auch robustes Segel entwickelt. [6]

Ein high-level Ansatz zur Navigation mithilfe von Q-Learning verfolgen Silva Junior et. al. in «High-Level Path Planning for an Autonomous Sailboat Robot Using Q-Learning». Der Maschine Learning Algorithmus basiert auf einem Rastermodell, in welchem sich das Segelboot bewegt. [7]

Ebenfalls mit der Navigation, jedoch einem deutlich einfacheren Modell, beschäftigen sich Jaulin und Le Bars in «A Simple Controller for Line Following of Sailboats». Ein einfacher, jedoch effizienter Ansatz zur Navigation

## 2. AUFLISTUNG VERWANDTER ARBEITEN

---

über weite Distanzen wird beschrieben. Das Ziel ist es, das Segelboot einen vordefinierten Pfad möglichst genau entlang fahren zu lassen. [8]

Einen ganz anderen Ansatz verfolgen Luc und Plumet et. al. in «Line following for an autonomous sailboat using potential fields method», indem sie den Potential Fields Path Finding Algorithmus aufs Segeln anwenden. [9]

Seit 2010 werden unter dem Namen MicroTransat Challenge regelmässig Wettbewerbe zur Überquerung des Atlantiks mit autonomen, vom Wind angetriebenen Booten organisiert, die nicht länger als 2,4 m sein dürfen. Damit sollen Entwickler auf der ganzen Welt motiviert werden, Boote zu entwickeln, welches in der Lage sind, den Atlantik zu überqueren. [10]

Die kommerzielle Anwendung von autonomen Segelbooten wird vom US-amerikanischen Startup-Unternehmen «Saildrone» vorangetrieben, welche eine Flotte an autonomen Segelbooten hauptsächlich für die Vermessung von Ozeanen einsetzt. [11]

# Konzeptentwicklung

---

### 3.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein autonomes Segelboot zu entwerfen, zu konstruieren und zu bauen. Dabei soll günstiges und einfach zu verarbeitendes Konstruktionsmaterial verwendet werden, das in Baumärkten erworben werden kann, mit Werkzeugen gearbeitet werden, die in einer gut bestückten Handwerkerwerkstatt vorhanden sind, die Navigation und Steuerung selbst entworfen werden und die dafür notwendigen Programme selbst entwickelt werden.

### 3.2 Methodisches Vorgehen

In einem ersten Schritt wird ein Überblick über die bekannten autonomen Segelboote und Segelbootprojekte gewonnen. Im obigen Kapitel 2 werden die relevanten Arbeiten aufgeführt. Anschliessend wird geklärt, ob ein autonomes Segelboot in der Schweiz überhaupt betrieben werden darf (Kapitel 3.3). Dann werden die Ergebnisse der detaillierten Analyse Anforderungen an ein autonomes Segelboot, das der Zielsetzung dieser Arbeit entspricht, aufgelistet (Kapitel 3.4). Im folgenden Schritt werden Überlegungen zum Design des Bootes angestellt. Dabei werden die möglichen Segelbootstypen anhand der Hauptelemente Rumpffzahl, Segelart und Kielart und deren Bedeutung für das Projekt diskutiert. Anschliessend wird der Designentscheid und der Hauptmaterialentscheid getroffen und begründet. Im nächsten Schritt wird der Konstruktionsprozess und die Konstruktion des Bootes beschrieben. Danach folgt die Beschäftigung mit der Elektronik, also dem Rechner, den Sensoren, den Motoren und der Energieversorgung. Alsdann werden nach einer Kurzeinführung in die Segeltheorie und der Beschreibung der Software Architektur die bekannten Wegfindungsalgorithmen diskutiert und für das Projekt entworfen. Anschliessend wird ein selbstentwickelter Navigationsan-

satz vorgestellt und eine ebenfalls selbstentwickelte einfache Methode zur Kollisionsverhinderung mit bekannten Hindernissen diskutiert. Schliesslich wird die Steuerung von Segel und Ruder beschrieben. Daran schliesst der Beschrieb des Baus des Bootes, des Einbaus der Elektronik und der Bemalung an. Am Schluss wird vor dem Hintergrund der gemachten Erfahrung das Verbesserungspotenzial diskutiert.

### 3.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Das projektierte autonome Segelboot ist ein Segelschiff im Sinne der Binnenschiffverkehrsverordnung (siehe Kapitel 1.2 oben) und fällt damit grundsätzlich unter die einschlägigen gesetzlichen Zulassungs-, Betriebs- und Verkehrsbestimmungen. Da es aber kürzer als 2.5 m ist, ist es von der Kennzeichnungspflicht mit einem behördlich zugeteilten Kennzeichen ausgenommen (Artikel 16 Abs. 2 Buchstabe b der Binnenschiffverkehrsverordnung). Es benötigt damit gemäss Art. 92 der Binnenschiffverkehrsverordnung auch keinen Schiffsausweis, womit auch eine behördliche Zulassungsprüfung entfällt. Das Boot muss aber einen Schiffsnamen tragen, der sich sowohl aus Buchstaben als auch aus Zahlen zusammensetzen kann. Ausserdem muss es mit dem Namen und der Adresse des Eigentümers versehen sein (Art. 16 Abs. 3 Binnenschiffverkehrsverordnung).

Art. 42 der Binnenschiffverkehrsverordnung schreibt vor, dass Schiffe, die kürzer als 2,5 m sind, nur in der inneren Uferzone (150 m) oder im Abstand von höchstens 150 m um sie begleitende Schiffe herum verkehren dürfen. Autonome Segelboote in der Grössenordnung dieses Projektes können in der Schweiz damit nicht einfach sich selbst überlassen werden, sondern müssen im Einsatz aus der Distanz von einem andern bemannten Schiff begleitet und beobachtet werden.

Gemäss Art. 16 Abs. 1 des Bundesgesetzes über die Binnenschiffahrt (BSG) vom 3. Oktober 1975 muss jedes Schiff einen verantwortlichen Führer haben. Da sich autonome Segelboote definitionsgemäss gerade dadurch auszeichnen, dass sie keinen Schiffsführer haben, scheint diese Bestimmung einem Einsatz von autonomen Segelbooten in der Schweiz entgegen stehen. Nach Abs. 2 dieser Bestimmung gilt als Schiffsführer, wer die tatsächliche Befehlsgewalt innehat. Entscheidend dabei ist, dass nicht verlangt wird, dass die Befehlsgewalt tatsächlich dauernd ausgeübt wird, sondern dass es genügt, wenn diese ausgeübt werden kann. Hierbei muss es genügen, wenn eine natürliche Person jederzeit mittels Funk Befehle an das autonome Schiff senden kann und sich das Boot jederzeit in Sichtweite der Person befindet. Letztes ist aufgrund der Vorgaben von Art. 42 der Binnenschiffverkehrsverordnung sowieso erforderlich und bedeutet deshalb keine zusätzliche Einschränkung.

Unter diesen Parametern ist der Betrieb eines autonomen Segelbootes aber

ohne einen Schiffsführerausweis möglich, solange dessen Segelfläche nicht mehr als 15 Quadratmeter beträgt (Art. 78 Abs. 1 Buchstabe b Binnenschiff-fahrtsverordnung). Es besteht auch keine Haftpflichtversicherungspflicht (Art. 153 Abs. 1 Binnenschifffahrtsverordnung).

Bei Nacht oder bei unsichtigem Wetter muss das Segelboot mit a. getrennten Seitenlichtern und einem Hecklicht; b. einem Kombinations-Seitenlicht und einem Hecklicht; c. einem Dreifarben-Topplicht; oder d. einem weisses Rund-umlicht ausgestattet werden (Art. 25 Abs. 2 Binnenschifffahrtsverordnung)

Ein autonomes Segelboot mit einer Länge von weniger als 2,5 m und einer Segelfläche von maximal 15 Quadratmetern kann auf Schweizer Gewässern also verkehren, sofern es von einem anderen Boot begleitet wird, welches maximal 150 m entfernt ist und sofern eine natürliche Person auf diesem Begleitboot Befehlsgewalt über das autonome Segelboot ausüben kann, zum Beispiel indem diesem per Funk Befehle übermittelt werden oder indem es physisch behändigt wird.

Ein Einsatz ohne begleitende Überwachung ist in der Schweiz zurzeit ohne behördliche Ausnahmegewilligung nicht zulässig. Das Boot muss:

1. den Wind zum Antrieb mit Segeln nutzen (keine Windturbine);
2. selbstständig den Weg in ein vorgegebenes Ziel finden und ansteuern können;
3. selbstständig mehrere vorgegebene Ziele in der vorgegebenen Reihenfolge ansteuern können;
4. über eine selbst entworfene und gebaute Navigationsanlage und Steuerung verfügen;
5. die Navigation- und Steuerungsanlage mit selbstentwickelten Programmen betreiben;
6. vordefinierten Gefahrenpunkten ausweichen können;
7. sich auf einem Flachgewässer autonom und sicher bewegen können;
8. eine Kollision mit einem auf einem Flachgewässer schwimmenden Stück Holz ohne Funktionseinbussen überstehen können;
9. drahtlos via WLAN Befehle und Zieleingaben empfangen können;
10. mit überschaubaren Kosten gebaut werden können;
11. aus günstigen, einfach verfügbaren, in Baumärkten erhältlichen Konstruktionsmaterialien gebaut werden;
12. aus einfach zu verarbeitenden Konstruktionsmaterialien gebaut werden;
13. von einer Person allein entworfen, konstruiert und gebaut werden können;

### 3. KONZEPTENTWICKLUNG

---

14. mit Werkzeugen gebaut werden können, die in einer gut bestückten Handwerkerwerkstatt vorhanden sind oder selber gebaut werden;
15. stabil schwimmen;
16. kentersicher sein;
17. mit einem Fokus auf Stabilität konstruiert werden;
18. über eine autarke Energieversorgung verfügen;
19. über eine Energiereserve von mindestens 72 h verfügen;
20. auf Schweizer Gewässern zumindest unter Aufsicht verkehren dürfen;
21. über eine Segelfläche von maximal 15 m<sup>2</sup> verfügen;
22. über maximal ein Segel verfügen;
23. mit einer einfachen Beleuchtung ausgestattet sein;
24. mit einer auffälligen Farbe bemalt sein;
25. an Land mit einem Personenfahrzeug an ein Flachgewässer transportiert werden können; und
26. mit dem Namen und der Adresse des Eigentümers versehen sein.

Bewusst kein Gewicht wird auf die Optimierung der Geschwindigkeit des Boots, seine elegante Erscheinung, die Ermittlung des kürzesten Wegs ins Ziel, der Berechnung des optimalen Wegs zum Besuch mehrere vorgegebener Ziele (Problem des Handelsreisenden) und die Erkennung und Vermeidung von beweglichen Hindernissen wie andere Boote gelegt.

Segelboote im Grössenbereich von 2 m bis 2.5 m werden weder kommerziell angeboten noch industriell gefertigt. Für das vorliegende Projekt kann daher nicht auf einen bestehenden Bootstypus zurückgegriffen werden. Ein einfacher Erwerb eines solchen Bootes, um es in ein autonomes Boot umzubauen, würde der Zielsetzung widersprechen, selbst wenn ein entsprechendes Exemplar käuflich erworben werden könnte.

Es werden Bausätze für bemannte kleine Segelboote wie Optimisten etc. angeboten. Diese kosten mehrere tausend Franken und überschreiten die Maximallänge von 2,5 m. Ebenfalls werden fertige Baupläne für Modellsegelboote zum Kauf angeboten. Diese Modelle erreichen mit ganz wenigen Ausnahmen nicht die erforderlichen Dimensionen und sind zulasten der Stabilität auf optimale Segeleigenschaften ausgelegt.

# Design und Konstruktion

---

### 4.1 Verschiedene Segelbootstypen

Segelboote weisen eine jahrtausendalte Entwicklungsgeschichte auf. Sie kommen daher in einer unüberschaubaren Zahl von unterschiedlichen Ausgestaltungen vor, die vom einfachen, mit einem Segel versehenen Floss aus Schilf über mehrmastige Karavellen aus Holz, Freizeitjachten aus Aluminium oder Kunststoff bis zur Hightech Rennjacht aus Carbonfasern reicht. Trotz dieser Diversität lassen sich alle Segelboote anhand von drei Hauptmerkmalen (i) Rumpffzahl (ii) Segelart und (iii) Kielart kategorisieren.

#### 4.1.1 Rumpffzahl

Die erste und einfachste Unterscheidung der verschiedenen Segelboottypen erfolgt anhand der Zahl der Rümpfe. Wenn man sich ein Segelboot vorstellt, denkt man an ein Einrumpfboot (Mono Hull). Es gibt aber auch Mehrumpfbote (Multi Hull) mit zwei oder drei Rümpfen. Bekannte Vertreter sind Katamaran und Trimaran.

#### 4.1.2 Segelart

Segel lassen sich grob in flexible und feste Segel einteilen. Flexible Segel bestanden ursprünglich aus Segeltüchern, die aus Wolle hergestellt wurden. Heute werden für Segeltücher fast ausschliesslich verschiedenen Kunstfasern wie Nylon, Polyester, Kevlar, aber auch Carbon verwendet, die oft laminiert werden.

Festsegel sind steif und fristen ein Nischendasein. Sie finden sich bisher nur bei experimentellen Booten und Schiffen in zwei sehr unterschiedlichen Bereichen. Einerseits können damit grosse Kreuzfahrt- oder Containerschiffe ausgerüstet werden, um deren Energie- und Umwelteffizienz zu verbessern. Dabei kann durch die Verwendung von zusammengesetzten

Komposit-Paneelen die mit dem Einsatz textiler Standardsegel verbundene Grössenbeschränkung überwunden werden. [12] Andererseits werden Prototypen für autonome Segelboote und Segelbootdrohnen fast ausschliesslich mit Festsegeln ausgerüstet. Diese Boote weisen Längen von 2 m bis 20 m auf und die technischen Grössenbeschränkungen textiler Segel sind bei ihnen daher ohne Relevanz. Ihr Hauptvorteil gegenüber flexiblen Segeln ist die vergleichsweise einfache Segelführung im Betrieb. Festsegel bestehen bei kommerziellen Projekten aus Verbundwerkstoffen und bei nicht-kommerziellen Projekten meistens aus expandiertem Polystyrol (EPS), das unter dem geschützten Handelsnamen «Styropor» bekannt ist. Der in Form gebrachte Segelkörper wird dabei zum Schutz fast immer mit glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) (umgangssprachlich als Fiberglas bekannt) oder anderen Kunststoffen ummantelt.

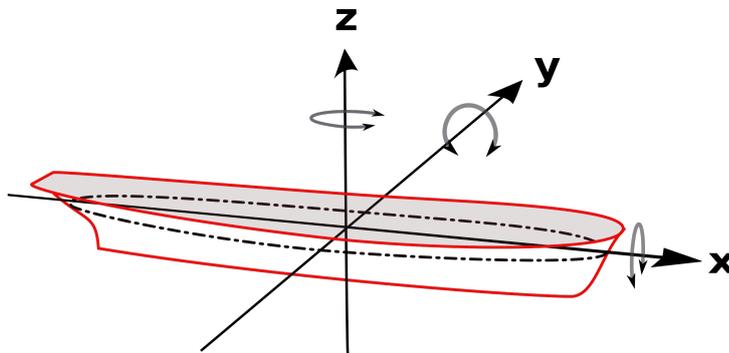
### 4.1.3 Kielart

Segelboote lassen sich in Kiel und Schwertboote unterteilen. Der Kiel ist der unterste Teil eines Bootsrumpfes. Ein grosser Teil der Segelboote, insbesondere die grösseren Boote, verfügen über einen Balastkiel. Das ist eine schwerere, aus Gusseisen oder Blei bestehende Kielflosse. Der Balastkiel macht etwa ein Drittel bis die Hälfte des gesamten Bootsgewichts aus. Der Kiel dient beim Segelboot zur Verminderung der seitlichen Abdrift und sorgt für Gewichtsstabilität (siehe 4.2).

Keinen Kiel haben Flachbodensegelschiffe wie Jollen oder bestimmte Kuttertypen, die in Flachgewässern operieren. Auch die Mehrumpfboote verfügen über keinen Kiel. Zur Vermeidung der Abdrift verfügen diese Segelboote anstelle eines Kiels über ein Schwert. Ein Schwert ist eine parallel zur Fahrtrichtung vorgesehene senkrechte Platte aus Stahl, Holz oder glasfaserverstärktem Kunststoff. Das Schwert ist fast immer beweglich ausgestaltet, kann also eingezogen oder eingeklappt werden. Für die Stabilität von Schwertsegelbooten sorgt allein ihre Form.

## 4.2 Exkurs zur Stabilität von Segelbooten

Der Begriff Stabilität steht im Schiffbau für die Eigenschaft eines Bootes, eine aufrechte Schwimmlage einzunehmen und beizubehalten oder sich selbstständig wieder aufzurichten, wenn ein krängendes Drehmoment auf das Boot einwirkt oder einwirkte. Krängung ist die Neigung eines Schiffs um seine Längsachse. [13] Umgangssprachlich wird Krängung auch als Schräglage bezeichnet.



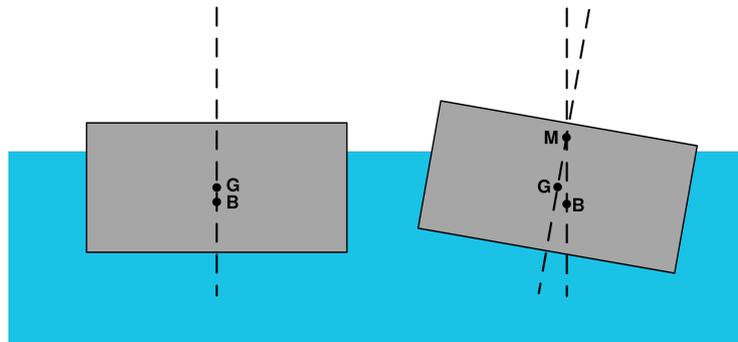
**Abbildung 4.1:** Krängung

Bei geringer Stabilität besteht die Gefahr des Kenterns. Kentern bezeichnet in der Nautik einen Unfall, bei dem ein Wasserfahrzeug seitlich umkippt, wenn dessen Krängung durch Wind, Wellengang oder Verlagerung von Fracht, Ausrüstung oder Mannschaft den Kenterwinkel erreicht. Dreht sich das Schiff danach weiter um seine Längsachse, so spricht man von Durchkentern. Ein gekentertes Schiff kann Wasser aufnehmen und in der Folge sinken.

Autonome Segelboote dürfen nicht kentern, da sie sonst ihr Ziel nicht mehr erreichen können. Sie müssen daher über eine sehr hohe Stabilität verfügen.

Die Stabilität eines Bootes wird durch drei Parameter bestimmt: seinen Gewichtsschwerpunkt, seinen Auftriebsschwerpunkt sowie die sich aus diesen ergebende sogenannte metazentrische Höhe.[14]

- Der Gewichtsschwerpunkt steht für die gesamte, in einem Punkt konzentrierte, nach unten wirkende Gewichtskraft eines Bootes. Seine Lage innerhalb des Bootes verändert sich bei einer Krängung nicht, solange alle Massen im Boot unverändert an ihrem Ort verharren.
- Der Auftriebsschwerpunkt (auch Form- oder Verdrängungsschwerpunkt genannt) steht für die gesamte, in einem Punkt konzentrierte, nach oben wirkende Gewichtskraft des verdrängten Wassers. Seine Lage ändert sich bei einer Krängung, weil sich durch die Rumpfform auch die „Form“ des verdrängten Wassers ändert.
- Als metazentrische Höhe wird der entlang der Körpervertikalen gemessene Abstand des Metazentrums vom Gewichtsschwerpunkt bezeichnet. Das Metazentrum eines Schiffs entspricht dem Aufhängungspunkt eines Stabpendels. Während aber dessen Aufhängungspunkt gleichzeitig auch der Drehpunkt ist, liegt beim Schiff die Drehachse immer auf der Wasseroberfläche.[15]



**Abbildung 4.2:** Lage des Gewichtsschwerpunkt (G), Auftriebsschwerpunkt (B) und Metazentrum (M) bei aufrechtem sowie gekrängtem Boot

Bei aufrechter Schwimmelage eines Schiffes liegt der Gewichtsschwerpunkt exakt vertikal über dem Auftriebsschwerpunkt. Führt ein äußerer Einfluss aber zu einer Krängung des Schiffes, verändert sich die Lage des Gewichtsschwerpunkts auf der horizontalen Achse. Gewichtsschwerpunkt und Auftriebsschwerpunkt stehen damit nicht mehr senkrecht übereinander. Dadurch entsteht ein aufrichtendes Drehmoment, welches das Boot bei Wegfall des krängenden Einflusses in seine Ausgangslage zurückführt.

Zur Bewertung der Stabilität eines Schiffes müssen die folgenden drei Parameter bekannt sein:

- Die Anfangsstabilität (die sogenannte metazentrische Anfangshöhe),
- der Stabilitätsumfang und
- die Fläche unter der Hebelarmkurve.

Die metazentrische Anfangshöhe ist der Parameter für den aufrichtenden Hebelarm. Mit dem Stabilitätsumfang wird die rechnerische Krängung des Schiffes in Winkelgraden bis zum Kenterpunkt bezeichnet und mit der Hebelarmkurve wird der jeweilige aufrichtende Hebelarm über den vollen Krängungsbereich bis zum Kenterpunkt des Bootes grafisch dargestellt. Der Hebelarm wächst bei zunehmender Krängung zunächst steil und dann immer flacher an. Bei noch stärkerer Krängung wird er wieder geringer, bis er schliesslich den Kenterpunkt (C) erreicht. Dieser liegt da, wo der Gewichtsschwerpunkt über den Auftriebsschwerpunkt hinauswandert. [13]

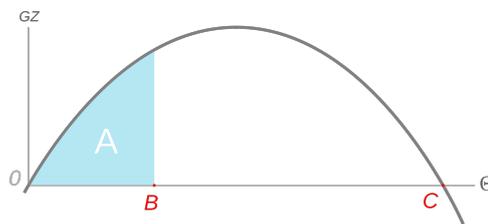


Abbildung 4.3: Hebelarmkurve

Bei Segelbooten sind die Überlegungen zur Stabilität besonders wichtig, da sie dem Wind mit ihrem Segel eine sehr grosse Angriffsfläche bieten. Ohne geeignete Gegenmassnahmen kippen sie schon bei geringen Windstärken um. Entscheidend für die Stabilität eines Segelbootes sind dabei die Rumpfform und Gewichtsverteilung des Bootes. Die Stabilität eines Boots kann erhöht werden, wenn die Krängung durch eine der zwei folgenden Massnahmen ausgeglichen wird:

- Gewichtsstabilität – ein tief liegender Ballastkiel zwingt das Boot wieder in die aufrechte Lage (sogenanntes Stehaufmännchen-Prinzip).
- Formstabilität – die Form des Rumpfes begünstigt eine Rückkehr in die Ausgangslage.

**Gewichtsstabilität** Ein Ballastkiel wirkt der Krängung eines Bootes als Gegengewicht entgegen. Er enthält bis zur Hälfte der Masse des Segelschiffs und bewirkt damit ein aufrichtendes Moment. Eine Krängung von 20 bis 45 Grad ist bei Segelbooten aber durchaus normal und stellt keine Gefahr für das Schiff dar. Dies ergibt sich ohne weiteres aus der unten stehenden Abbildung. Dabei steht G für den Gewichtsschwerpunkt (Schwerpunkt des Bootes) und A für den Auftriebsschwerpunkt (Schwerpunkt der verdrängten Wassermasse). Mit zunehmender Krängung wandert der Gewichtsschwerpunkt immer weiter nach aussen. Damit erhöht sich aber auch das aufrichtende Drehmoment.

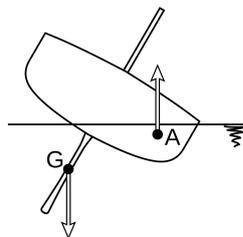


Abbildung 4.4: Gewichtsstabilität durch Ballastkiel

Es gibt Segelschiffe die sich selbst bei einer Krängung von mehr als 120 Grad selbstständig wieder aufrichten. Sie gelten daher als kentersicher, denn sie können nur durch sehr hohen Wellengang mit dem Kiel nach oben gedreht werden. Nimmt der Bootskörper dabei viel Wasser auf, sinken sie wegen des hohen Ballastgewichts.

**Formstabilität** Im Unterschied zu Kielbooten sind Schwertboote kaum gewichtsstabil, sondern überwiegend formstabil. Ihr leichtes Schwert hat nämlich keinen nennenswerten aufrichtenden Effekt. Wie die unten stehende Abbildung zeigt, ist für die Formstabilität die Lage des Auftriebsschwerpunkts A ausschlaggebend. Wenn sich ein Boot in einer aufrechten Lage befindet, wird auf beiden Seiten des Rumpfes gleich viel Wasser verdrängt. A befindet sich dann mittig im Rumpfquerschnitt und es entsteht kein Drehmoment. Mit zunehmender Krängung wird Wasser zunehmend nur noch auf einer Seite des Rumpfes verdrängt. Dadurch wandert A immer mehr nach aussen und es entsteht ein Drehmoment. Je breiter das Boot ist, desto weiter kann A nach aussen wandern und desto stärker ist das aufrichtende Drehmoment.

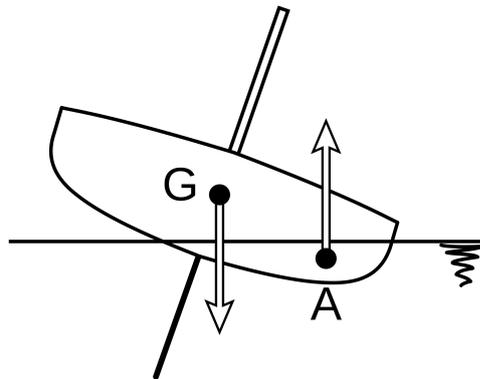


Abbildung 4.5: Formstabilität

Wenn die Krängung aber zu gross wird, nimmt das Drehmoment wieder ab, weil dann der Rumpf kippt und A wieder näher bei der Mitte liegt. Eine leichte Krängung wird daher durch das kräftige aufrichtende Drehmoment kompensiert, während eine zu starke Krängung zum Kentern des Bootes führt. Katamarane kentern erst, wenn die Krängung 90 Grad erreicht.

Bei Schwertbooten wird die Stabilität durch die entsprechende Formgebung des Rumpfquerschnittes erreicht, während sie bei Kielbooten von der Masse und der Länge des Kiels bestimmt wird. Schwertboote besitzen bei leichter Krängung aufgrund ihrer Formstabilität ein sehr hohes aufrichtendes Mo-

ment. Dieses aufrichtende Moment nimmt aber mit zunehmender Krängung stark ab, sodass es zur Kenterung kommen kann. Bei Kielbooten ist es genau umgekehrt, bei leichter Krängung ist das aufrichtende Moment gering und nimmt bei zunehmender Krängung zu, sodass sie kaum kentern können bzw. sich nach einer Kenterung von alleine wieder aufrichten. [16]

### 4.3 Wahl des Bootstypus

#### 4.3.1 Wahl der Segelart

Ausgangspunkt für die Wahl des Bootstypus für das vorliegende Projekt bildet der Entscheid über das zu verwendende Segel. Da sich das Segelboot autonom bewegen können muss, fällt dieser Entscheid leicht, denn nur mit einem Festsegel lässt sich die Neigung, flexibler Segel zu flattern, vermeiden.

Die Verwendung eines flexiblen Segels würde den Einbau einer sehr aufwendigen und auch fehleranfälligen Mechanik zur automatischen Trimmung des Segels mit Leinen und Rollen erfordern. Selbst wenn die Entwicklung einer Trimmmechanik gelingen würde, müsste das Segelboot zusätzlich in die Lage versetzt werden, ein loses (also ein flatterndes) oder zu strammes Segel selbstständig zu erkennen und entsprechende Steuerbefehle an die Segeltrimmmechanik zu senden. Idealerweise müsste das Segelboot aber nicht nur jedes Abweichen von der idealen Segelform selbstständig erkennen, sondern es müsste auch die negativen Auswirkung von Ruderbewegungen, Windböen oder starkem Wellenschlag auf die ideale Segelform selbstständig antizipieren können.

Das würde erfordern, dass entweder direkt im Segel Sensoren verbaut würden oder dass das Segel optisch mittels einer oder mehrere Kameras erfasst würde. Aus diesen Daten würde dann in Echtzeit in einem ersten Schritt der Ist-Zustand des Segels berechnet, dieser in einem zweiten Schritt mit dem Idealzustand verglichen, in einem dritten Schritt der Anpassungsbedarf berechnet, in einem vierten Schritt die notwendige Massnahme ermittelt (eine Verlängerung oder eine Verkürzung der Leinen (Schotten) und/oder ein Steuereingriff am Ruder) und in einem letzten Schritt der entsprechende Befehl an die Trimm- und/oder Steuermechanik übermittelt.

Die Entwicklung einer solchen Trimmautomatik für eine flexibles Segel sprengt den Rahmen einer Maturaarbeit bei weitem, selbst wenn sie als selbstständige Arbeit vorgesehen würde. Bei einem autonomen Segelboot dieser Klasse muss daher der Entscheid zwingend zugunsten eines Festsegels lauten.

### 4.3.2 Wahl der Rumpfzahl

Ein Festsegel kann sowohl mit Einrumpfbooten als auch mit Mehrrumpfbooten eingesetzt werden, womit der Entscheid über die Rumpfzahl nicht durch den Entscheid über die Segelart antizipiert wird.

Für das vorliegende Projekt wird eine Einrumpfkonstruktion vorgezogen, da diese einfacher zu realisieren ist. Doppelrumpfboote verfügen über keinen Kiel und bieten damit keine Gewichtsstabilität. Sie sind nicht kentersicher und scheiden aus. Trimarane können theoretisch mit einem Kiel versehen werden, womit sie Gewichts- und Formstabilität bieten. Sie erfordern aber einen sehr hohen konstruktiven Aufwand, ohne für die Zwecke dieses Projektes gegenüber einem Einrumpfboot (mit einem Kiel) einen entscheidenden Vorteil zu bieten.

### 4.3.3 Kiel oder Schwertboot

Unter 4.2 oben werden Kiel- und Schwertboote unter dem Aspekt der Stabilität betrachtet. Dabei zeigt sich, dass Schwertboote im Gegensatz zu Kielbooten nicht kentersicher konstruiert werden können. Damit scheidet eine Schwertbootskonstruktion für die vorliegenden Zwecke aus.

Bei der Konstruktion des Bootes muss eine hohe Gewichtsstabilität erreicht werden. Da dieser für autonome Fahrten in Binnengewässern nicht sehr lang vorgesehen werden kann, wird er mit einem sehr hohen Ballastgewicht versehen.

### 4.3.4 Ergebnis des Auswahlverfahrens zum Bootstyp

Nach Abschluss des Auswahlverfahrens zum Bootstyp steht fest, dass ein einrumpfiges Kielboot mit einem Festsegel konstruiert wird.

## 4.4 Grundmaterialentscheid

Boote können aus diversen Materialien gebaut werden. Der Bau eines Boots aus Stahl oder Aluminium scheidet aber von vornherein aus, weil kein Zugang zu den dafür erforderlichen Werkzeugen und Metallbearbeitungsmaschinen besteht. Der Bau eines Boots aus Carbonfasern scheidet aus denselben Gründen ebenso aus Kostengründen aus. Auch für den Bau eines Kunststoffboots im Spritzgussverfahren fehlt nicht nur das dafür notwendige Wissen, sondern auch der Zugang zu einer Spritzgussmaschine. Da der Entscheid zugunsten einer Kielbootkonstruktion getroffen wird, scheiden auch exotische Materialien wie Schilf etc. aus. Der Bau des Boots aus Kunststoffteilen, die im 3D Druckverfahren erstellt werden, scheidet einerseits aus Kostengründen aus, und andererseits weil der vorhandene private 3D Drucker dafür nicht

ausreichend leistungsfähig ist (bei Projektbeginn waren die 3D Drucker der Kantonsschule Uetikon noch nicht zugänglich). Der Bau des Bootskörpers aus Glasfaserverstärkter Kunststoff GfK) scheidet ebenfalls aus, da sich die Erstellung der dafür notwendigen Negativform mit den vorhandenen Maschinen nicht machbar ist. Damit bleibt Holz als Konstruktionsmaterial übrig. Es ist im Bootsbau seit Jahrtausenden bewährt, einfach verfügbar, kostengünstig und einfach zu bearbeiten. Zudem hat es den Vorteil, dass es schwimmt, da es weniger dicht ist als das verdrängte Wasser.

Für Sport- und Freizeitboote werden oft Tropenhölzer oder kostspielige spezielle Bootsperrhölzer verwendet. Aus Kostengründen werden für das Skelett Leimholzplatten aus Tannenholz mit einer Stärke von 18 mm angewandt. Es ist das günstigste Material, das in Baumärkten angeboten wird. Das Weichholz ist zudem einfach zu bearbeiten.

Für die Beplankung bietet sich das besonders einfach zu bearbeitendes Balsaholz an. Es ist sehr weich und biegsam, ist im Modellbau weit verbreitet und in diversen Stärken verfügbar. In der verwendeten geringen Stärke von 1 mm lässt es sich gut an die Form des Bootes anpassen. Es hat aber den Nachteil, dass es sehr porös ist und daher leicht Wasser aufnimmt. Es muss daher mit einer Schutzschicht vor Feuchtigkeit geschützt werden. Dafür werden im Modellbau gerne Lacke oder Öle verwendet.

Die Beplankung erfolgt mit mehreren Balsaholzbahnen und nicht mit zwei grossen Platten, die über den ganzen Bootskörper reichen. Die Schnittstellen zwischen den Balsaholzbahnen sind wegen der Krümmung des Bootskörpers nicht hundertprozentig bündig. Damit wird die Bootshaut auch mit ausgiebigem Einsatz von Lack nicht wasserdicht sein. Ausserdem ist das weiche Balsaholz mit einer Stärke von nur 1 mm zu wenig robust, um als Aussenhaut des Boots zu dienen. Diese muss daher so weit verstärkt werden, dass sie eine mögliche Kollision mit einem auf einem Gewässer schwimmenden Stück Holz unbeschadet überlebt.

Diese äussere wasserfeste Schutzschicht kann am einfachsten und kostengünstigsten aus einer Schicht glasfaserverstärktem Epoxidharz erstellt werden. Sie macht das Boot sehr robust, wenn sie in mehreren Lagen aufgetragen wird.

Für das Deck des Schiffskörpers wird günstiges Pappelsperholz mit einer Stärke von 0.4 cm verwendet. Es wird mit einem Farbanstrich gegen Witterungseinflüsse geschützt.

## 4.5 Prozess der Konstruktion

Bei der Konstruktion geht es um die Erstellung von Plänen. Das erfolgt bei komplexeren Konstruktionen sinnvollerweise computergestützt mittels

sogenannten CAD Programmen. '

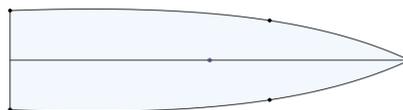
Der Einstieg in den Konstruktionsteil dieses Projekts beginnt mit dem Erlernen der Bedienung der beiden Programme Autodesk Inventor und Autodesk Fusion 360. Beide Programme verfolgen einen ähnlichen Ansatz und sind ähnlich aufgebaut. Fusion 360 ist deutlich nutzerfreundlicher als Inventor und erlaubt es, Projekte in einer Cloud zu speichern. Die Programme von Autodesk wurden ausgewählt, da diese für den Privatgebrauch und zu Ausbildungszwecken kostenlos genutzt werden können. Auf die Nutzung von Open Source Programme wie FreeCAD etc. wurde verzichtet, da diese gerade für Anfänger weniger intuitiv zu erlernen und meist über weniger Funktionen verfügen. Deutlich leistungsfähigere Programme wie NX Siemens oder SolidWorks kommen wegen der hohen Lizenzierungskosten für dieses Projekt nicht infrage.

### 4.6 Konstruktion des Rumpfs

Da eine ebene Fläche für die Positionierung der Solarpanels benötigt wird, wird das Deck flach ausgelegt. Das Deck bildet den Ausgangspunkt des Entwurfs. In einer ersten Skizze wird die spätere Bootsform gezeichnet und im CAD Programm zunächst in 2D konstruiert (Abbildung 4.6).

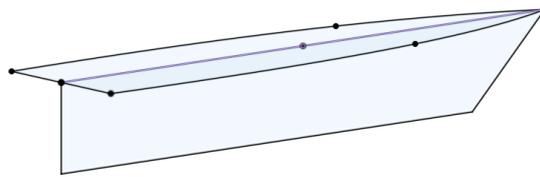
Da das Boot sich sicher auf Binnenseen bewegen können muss, darf es von Wellen mit einer Höhe von bis zu 0.8 m nicht zum Kentern gebracht werden. Das bedingt, dass das Boot eine minimale Grösse erreicht (und mit einen schweren Ballastkiel versehen ist). Der Bootskörper muss einen vergleichsweise grossen Auftrieb erzeugen. Daher wird eine Länge von 2.2 m gewählt. Für die maximale Breite werden 0.55 m vorgesehen. Dies entspricht ungefähr einem Viertel seiner Länge.

Das Verhältnis zwischen der Länge und der Breite ist ein einflussreicher Faktor für Stabilität und Manövrierfähigkeit. Ein vergleichsweise breites Boot ist deutlich stabiler als ein schmaleres, aber es zeichnet sich dafür durch eine geringere Manövrierfähigkeit aus. [17]



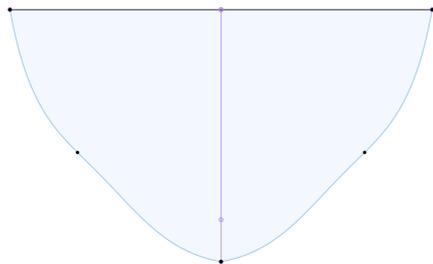
**Abbildung 4.6:** Topansicht des Boots

In einem nächsten Schritt wird die Seitenansicht des Bootes konstruiert. Es werden ein angewinkelter Vorsteven (das ist der vordere Abschluss des Bootes) und ein senkrechtes Heck vorgesehen. Das Heck wird deshalb senkrecht vorgesehen, weil damit die Befestigung des Ruders am einfachsten zu realisieren ist.



**Abbildung 4.7:** Seitenansicht mit Steven

Für den Bootskörper wird eine leicht eingebulte Form verwendet, welche dem Boot verhilft, senkrecht im Wasser zu stehen.



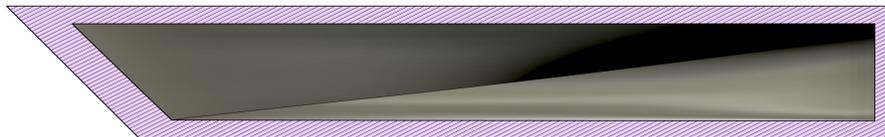
**Abbildung 4.8:** Heckansicht

Mit dem Erhebungswerkzeug (Loft Tool) der CAD Software wird im Anschluss aus den zweidimensionalen Skizzen ein dreidimensionaler Körper berechnet.



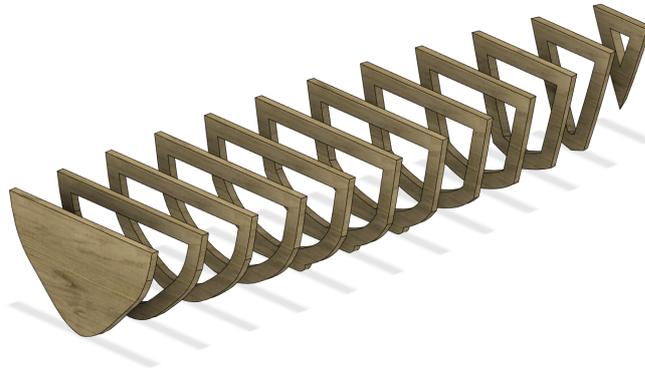
**Abbildung 4.9:** Fläche zur Montage des Kiels

Im Anschluss wird die Bootskörperform von der CAD Software mit einer Wandstärke von 4 cm innen ausgehöhlt.



**Abbildung 4.10:** Schnittbild Hohlkörper

Danach wird der bereits ausgehöhlte Körper auf zwölf Spanten mit einem einheitlichem Abstand je 14 cm reduziert. Die Spanten haben eine Stärke von 18 mm. Die Masse der Spanten verjüngen sich von der Mitte zum Bug und Heck hin.



**Abbildung 4.11:** Spantenansicht

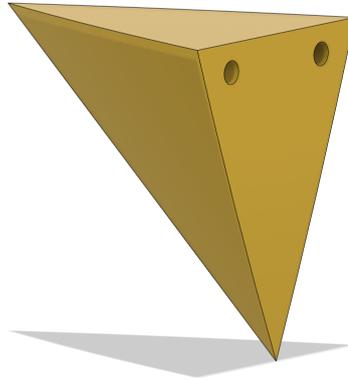
Die hinterste Spannte, die Achtersteven genannt wird, ist nicht hohl, weil sie sich am Ende des Bootskörpers befindet und diesen abschliesst.

Mit Ausnahme der Spanten 5, 6 und 7 laufen die Spanten unten spitz zu. Die Spanten 5, 6 und 7 sehen einen flachen Boden von 15 cm vor, der dazu dient, später den Kiel des Bootes sicher und senkrecht zu befestigen.



**Abbildung 4.12:** Spanten 5, 6 und 7

Der Bug des Bootes läuft spitz zu. Diese Form der Spitze ist in Holz schwierig zu bauen. Es wird daher auf die klassische Konstruktion mit einer Bugspante verzichtet. An ihrer Stelle wird die gesamte Spitze im 3D Druckverfahren aus Kunststoff als ein einziges Werkstück gedruckt. Es wird mit der vordersten Spante verklebt. Der Bugspitz ist nicht in Massivbauweise, sondern als Hohlkörper vorgesehen.



**Abbildung 4.13:** Bugspitz

Die meisten Boote und Schiffe verfügen über einen mittschiffs im Boden angebrachten Längsverband, der das Rückgrat des Bootes bildet. An ihm sind die querstabilisierenden Spanten befestigt. Dieser Längsverband bildet zusammen mit einer vertikalen Unterwasserverlängerung den Kiel und mündet am Anfang und Ende in den Steven.

Da für die vorliegende Konstruktion ein Flachdeck vorgesehen ist, der Boden des Schiffskörpers aber gewölbt ist, wird von dieser klassischen Kielkonstruktionsweise abgewichen. Die Längsverbinding der Spanten wird nicht am Boden des Schiffs, sondern direkt unter dem Deck vorgesehen. Sie besteht auch nicht aus einem einzelnen mittschiffs angebrachten Längsverband, sondern aus zwei Längsverbänden, die in einem Abstand von 10 cm von der Mittelachse parallel über die ganze Bootslänge horizontal angebracht werden. Sie bestehen aus zwei Aluminiumröhren mit einem Durchmesser von je 16 mm. Die beiden Röhren werden durch die Spanten geführt, in welchen im oberen Holm je zwei runde Löcher im Abstand von 10 cm gebohrt werden. Am vorderen Ende des Bootes werden die beiden Röhren in zwei dafür vorgesehene Hohlöffnungen des gedruckten Bugspitzes geführt und verklebt.

Diese Konstruktion ist viel einfacher zu bauen als ein klassischer Kielaufbau. Sie ist jedoch bei bemannten Booten nicht verbreitet, weil die beiden Längsverbindungen direkt unter dem Deck dem Einbau eines Cockpits im Weg stehen würden. Möglich wäre allein, das Cockpit auf dem Deck aufzubauen, was sowohl die Stabilität als auch den Komfort stark beeinträchtigen würde. Auch ein Zugang zu einer Kajüte würde verunmöglicht.

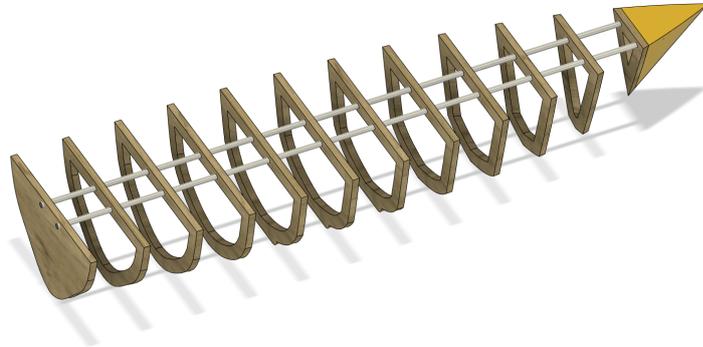


Abbildung 4.14: Abbild der Spanten und des Spitzes in Verbindung

### 4.7 Konstruktion des Hauptsegels und des Sailflap

Hauptsegel und Sailflap werden ebenfalls mit dem CAD Programm entworfen.

#### 4.7.1 Hauptsegel

Die grundlegende Form des Festsegels wurde aus der bereits erwähnten Arbeit von Tretow übernommen «Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat» [6] Dabei wurde lediglich die aerodynamische Grundform, nicht aber der gesamte Segelaufbau übernommen.

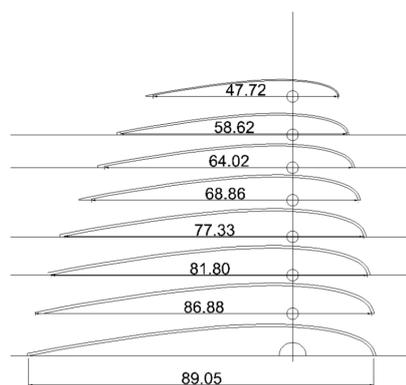


Abbildung 4.15: Segelform von Tretwo aus Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat

Das Segel, welches in dieser Arbeit verwendet wird, hat über die gesamten Höhe identische Masse und verjüngt sich nicht. Damit wird der spätere Herstellungsprozess stark vereinfacht. Nachteilig wirkt sich aus, dass wegen des deutlich grösseren oberen Teils des Segels wegen der Hebelkraft deutlich mehr Drehmoment auf das Boot einwirkt. Das könnte zu einer stärkeren Krängung führen. Da die Segelfläche jedoch insgesamt eher gering ist, ist davon auszugehen, dass sich dies nicht als grosses Problem erweisen wird.

Das Segel wird aus vier identischen Teilen zusammengesetzt, die aus Standard EPS Platten herausgeschnitten werden. Je zwei Teile müssen dann mit ihrer planen Seite verklebt werden, auf dass ein stromlinienförmiger Körper entsteht. Im vorderen Teil der beiden Segelteile wird in einer ausgeschnittenen Kerbe der Mast geführt. Dieser besteht aus einem Aluminiumrohr.

#### 4.7.2 Sailflap

Das Sailflap hat dieselbe Form wie das Grossegel, ist aber lediglich 30 cm lang. Das Sailflap wird mit zwei Carbonstangen am Grossegel befestigt, welche einen Durchmesser von ca. 7 mm haben. Mithilfe von 3-D-gedruckten Teilen, welche in der Abbildung 4.16 dargestellt werden, kann das Flap am Grossegel befestigt werden. Durch das Loch im 3D-gedruckten Block passt genau die Karbonstange.

Die drei Teile unterscheiden sich in Ihrer Bauweise. Das ganz rechte Bauteil dient der Befestigung des Aktuators. Das mittlere und das linke Teil verfügen über je einen rechtwinklig abstehenden Noppen. Diese passen in Kugellager, die direkt im Sailflap versenkt werden. Das linke Bauteil hat einen langen Arm, an dem das Ende der Welle des Aktuators befestigt wird.



**Abbildung 4.16:** Sailflap Befestigungsteile

## 4.8 Konstruktion des Kiels

Oben wird bei der Beschreibung der Konstruktion des Bootskörpers ausgeführt, dass von der klassischen Bauweise mit einem über die gesamte Länge des Bootes reichenden Kiel abgewichen wird. Es gibt keine über die gesamte Länge des Schiffsbodens reichende Längsverbindungen. Dafür haben die Formen der Spanten 5, 6 und 7, wie ebenfalls bereits oben ausgeführt, einen flachen Boden. Das ist so vorgesehen, damit der Balastkiel stabil an den Spanten befestigt werden kann.

Der Kiel wird ebenfalls mit dem CAD Programm entworfen. Er setzt sich aus 9 Hauptbestandteilen zusammen.

Die Grundstruktur des Kiels besteht aus 5 Brettern aus Tannenholz mit einer Stärke von 1.8 cm. Am unteren Ende des mittleren Kielhauptbretts ist auf jeder Seite je ein Gewicht von 2 kg aus Gusseisen verschraubt. Diese Gewichte stammen von einer alten Waage. Sie werden auf beiden Seiten von Gehäusen eingefasst, die mit dem 3D Druckverfahren aus Kunststoff erstellt und mit dem Kielhauptbrett verklebt werden. Die Gehäuseform ist darauf ausgelegt, den Wasserwiderstand zu minimieren und Verwirbelungen zu reduzieren. Das mittlere Kielhauptbrette hat eine trapezförmige, sich nach unten verjüngende Form. Es reicht über die gesamte Länge des Kiels. Seine Höhe misst 40 cm. Am oberen Ende dieses Kielhauptbretts werden auf beiden Seiten je zwei weitere Bretter mit dem Hauptbrett verschraubt. Die äusseren Bretter sind dabei sehr viel kürzer als die beiden mittleren Bretter. Diese gestaffelte Bauweise verleiht dem Kiel die notwendige Stabilität, um den auftretenden Seitenkräften zu widerstehen.

Das obere Ende des Kiels weist durch die Kombination von 5 Brettern eine Breite von 9 cm auf. Damit lässt es sich ideal und bündig mit dem in der Mitte des Bootes flachen Boden des Bootskörpers festmachen. Zur Verbindung werden Gewindestangen benutzt.

## 4.9 Konstruktion des Ruders

Das Ruder wird ebenfalls mit dem CAD Programm entworfen. Es wird wie die übrigen tragenden Holzteile des Boots ebenfalls aus Tannen-Leimholzplatten gesägt.

Die dem Boot zugewandte Seite des Ruders wird in eine elliptische Form geschliffen, da damit verbesserte hydrodynamische Eigenschaften erhofft werden. Dazu wurden aber keine weiteren Analysen oder Simulationen durchgeführt, da in diese Arbeit kein Fokus auf ein optimales Strömungsverhalten gelegt wird.



**Abbildung 4.17:** Fertiger Kiel

Zur Befestigung des Ruders am Bootskörper wird ein Befestigungsstück mittels 3D Druck Verfahren hergestellt. Dieses wird mit PETG gedruckt, da das Material deutlich stärker ist als das sonst verwendete PLA. Durch die sichtbaren Löcher werden Schrauben durchgeführt und verschraubt.



**Abbildung 4.18:** Aktuator Befestigung



# Elektronik

---

### 5.1 Mikrocontroller

Für die Steuerung des Bootes wird ein Raspberry Pi Zero W 1.1 verwendet. Dieser verfügt über ausreichend Rechenleistung, um alle notwendigen Berechnungen in Echtzeit durchzuführen. Er verfügt über einen einkernigen ARM Prozessor, der mit 400 MHz getaktet ist. Sein Arbeitsspeicher beträgt 512 Megabyte. Er ist 6,5 mal 3,2 cm gross und wiegt nur 9 Gramm.

Auf dem Raspberry Pi läuft ein Debian basiertes GNU/ Linux Betriebssystem. Im Kapitel Navigation wird auf die Software detailliert eingegangen.

Der Raspberry Pi Zero W 1.1 kann über WLAN nach den Spezifikationen 802.11 b/g/n sowie über Bluetooth 4.1 und Bluetooth Low Energy (BLE) kommunizieren. Die WLAN Verbindung wird benutzt, um mit dem autonomen Segelboot zu kommunizieren. Über die Verbindung kann der Rechner drahtlos aufgesetzt und eingerichtet werden. Auch die Übermittlung von Zielkoordinaten erfolgt über diese Verbindung. Die Bluetoothverbindung wird nicht benutzt.

Die in den unmittelbar nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Sensoren und Aktuatoren sowie die Energieversorgung werden über die 40 GPIO (general-purpose input/output) Pins angeschlossen.

Der Raspberry Pi Zero W 1.1 wird mit 5 V Gleichspannung betrieben. Sein Stromverbrauch ist sehr bescheiden. Seine maximale Stromaufnahme liegt bei 1,2 A. Diese wird beim vorgesehenen Einsatz allerdings bei weitem nicht erreicht werden. [18] im Leerlauf braucht er aber nur 120 mA. [19]

Die Stromversorgung des Raspberry Pi Zero W 1.1 ist über einen seiner 5 V Pins vorgesehen und nicht über seine Micro-USB Buchse. Dieser Vorgehensweise hat den Nachteil, dass der Raspberry Pi Zero W 1.1 damit nicht von der Schutzschaltung hinter der Micro-USB Buchse geschützt wird. Der wesentliche Vorteil der Vorgehensweise ist jedoch, dass verlötete Verbindungen viel

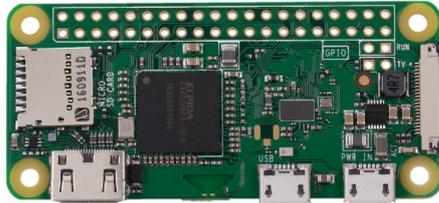


Abbildung 5.1: Raspberry Pi Zero

stabiler sind als gesteckte und ohne erhebliche direkte Gewalteinwirkung nicht brechen. Da der Raspberry Pi Zero W 1.1 auf dem Boot dauernd bewegt wird, ist die Stabilität der Verbindungen von entscheidender Wichtigkeit, denn ein Ausfall der Bordelektronik hätte für das Boot katastrophale Folgen.

## 5.2 Sensoren und Aktuatoren

### 5.2.1 Positionsbestimmung (GPS)

Zur Positionsbestimmung, also der Bestimmung des aktuellen Standorts des Segelboots, werden Funksignale des bekannten US-amerikanischen satellitenbasierten Global Positioning Systems (GPS) (deutsch Globales Positionsbestimmungssystem) offiziell NAVSTAR GPS verwendet. Dafür wird das Empfängermodul Whadda Neo 7M der belgischen Velleman Group nv verwendet, welches alternativ Signale des entsprechenden russischen Systems GLONASS empfangen kann.



Abbildung 5.2: GPS Modul

Das Modul wird über die vorhandenen Pins mit dem Raspberry Pi Zero W 1.1 verdrahtet und kommuniziert über eine serielle Verbindung. Die Pins TX und RX werden dabei mit den Pins RX und TX des Raspberry Pi Zero W 1.1 verbunden. Das Modul wird mit 5 V betrieben. Dazu wird sein Pin VCC mit der 5 V Gleichspannungsleitung und sein Pin GND mit der Ground Leitung der Stromversorgung verbunden.



Abbildung 5.3: GPS Modul - Oberseite

Das Modul wird unter Deck im Rumpf des Bootes platziert. Weil für die Deckplatte eine dünne Sperrholzplatte verwendet wird, kann auf eine externe Empfangsantenne verzichtet werden. Die vorhandene SMA Antennen Steckbuchse bleibt damit unbenutzt. Es wird die eingebaute keramische Patchantenne verwendet. In der unten stehenden Abbildung 5.4 ist diese als rosa Fläche mit einem metallenen Knopf auf einem beigen Körper sichtbar.

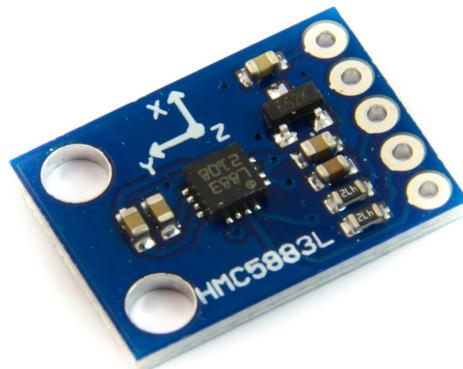


Abbildung 5.4: GPS Modul - Unterseite

### 5.2.2 Gyro und Magnetometer

Zur Bestimmung der Richtung des Segelbootes dient ein Magnetometer. Ein Magnetometer ist eine sensorische Einrichtung zur Messung magnetischer Flussdichten [20]. Im vorliegenden Projekt wird das Magnetometer dafür eingesetzt, um damit einen Magnetkompass zu realisieren, indem das erdmagnetische Feld dreidimensional erfasst wird, um daraus die Bootsrichtung abzuleiten. Dieses Verfahren wird auch in Smartphones zur Richtungsbestimmung angewendet.

Im vorliegenden Projekt wird dafür das Sensormodul Purecrea GY-273 QMC5883L der deutschen Purecrea GmbH vorgesehen. Das Modul ist zusätzlich mit einem Gyroskop (Deutsch: Kreiselinstrument) ausgestattet. Auch damit kann die Bewegung des Segelbootes erfasst werden. Ausserdem erlaubt es die Bestimmung der Schräglage des Segelbootes. Im vorliegenden Projekt wird dieser Wert aber nicht erfasst und ausgewertet.



**Abbildung 5.5:** Gyro und Magnetometer

Das Sensormodul wird mit einer Eingangsspannung von 3-5 V Gleichspannung betrieben. Sein Pin GND wird dafür mit der Ground Leitung und sein Pin VCC wird mit der der 5 V Gleichspannungsleitung der Stromversorgung verbunden.

Die Kommunikation mit dem Raspberry Pi Zero W 1.1 erfolgt über eine serielle Verbindung. Der Pin SCL und der Pin SDA des Moduls werden dafür mit den Pins SCL und SDA des Raspberry Pi Zero W 1.1 verdrahtet.

### 5.2.3 Eigenentwicklung des Windrichtungssensors

Der Windrichtungssensor muss selbst entwickelt und gebaut werden, da die am Markt angebotenen Windrichtungsmesser entweder zu gross und zu schwer oder unerschwinglich teuer sind.

Windrichtungssensoren lassen sich in zwei unterschiedliche Typen einteilen. Der erste Typ verwendet ein Potenziometer zur Richtungsbestimmung. Solche Messgeräte sind mechanisch sehr leicht umzusetzen, da dazu lediglich ein kleiner Flügel an der Achse eines Potenziometers befestigt werden muss. Die Position des Flügels kann damit über einen analogen Input Pin mit einem Mikrocontroller eingelesen und daraus die Richtung des Windes abgeleitet werden. Der Nachteil dieses Typs ist, dass die freie Drehung der Achse durch die Reibung des Potenziometers stark abgebremst wird. Dieser Typ wird daher nicht weiter verfolgt.

Der andere Typ verwendet Hallensoren, welche den Hall-Effekt zur Messung von Magnetfeldern nutzen [21]. Sie sind passive Sensoren, die den Spannungsunterschied messen, der an einem elektrischen Leiter erzeugt wird, wenn ein Magnetfeld senkrecht zur Fliessrichtung eines elektrischen Stroms steht [22]. Um die Rotation eines Objektes mittels Hallensoren zu messen, gibt es die folgenden zwei Möglichkeiten:

Bei der ersten Variante wird um ein abwechselnd magnetisch positiv und magnetisch negativ geladenes rundes Objekt mehrere Hallsensoren platziert. Damit kann dann die Drehung des Objektes gemessen werden. Diese Variante ist praktisch schwierig umzusetzen, weil viele Hall Sensoren präzise kreisförmig um eine Achse angeordnet werden müssen. Dafür müssten die Hallsensoren in enger Folge auf einer individuell entworfenen Platine verlötet werden. Der Entwurf einer solchen Platine ist anspruchsvoll, mit deren Herstellung müssten Auftragsfertiger beauftragt werden, was hohe Kosten verursachen würde. Weil die Hallsensoren sehr eng aneinander platziert werden müssten, müssten sogenannte SMD Varianten (Surface Mountable Device; deutsch: oberflächenmontierbare Bauteile) verwendet werden, die ohne Bohrungen direkt auf die Oberfläche der Platine gelötet werden. Es braucht dafür eine spezielle Löttechnik und die Gefahr, dass Bauteile beim Lötvorgang den Hitzetod sterben, ist erheblich, wenn der Lötende über wenig Übung mit SMD Löttechnik verfügt. Diese Variante wird daher nicht weiter verfolgt.

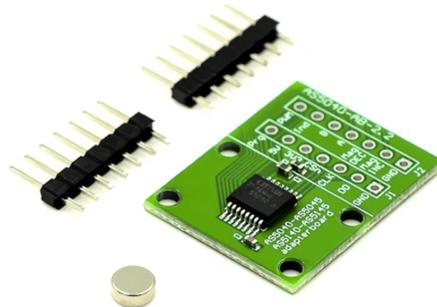
Die zweite Variante ist praktisch einfacher umzusetzen. Statt normale Hall Sensoren werden dabei spezielle, sogenannten Rotary Hall (deutsch rotierende magnetische Hall) Encoder verwendet. Ein Encoder (oder Messwertgeber) dient in der Antriebstechnik zur Signalbildung aus mechanischen Bewegungen. Er erkennt die Position einer Antriebseinheit (Welle) und gibt diese als elektrisches Signal aus. [23] Rotary Hall Encoder sind komplexe Bauteile, die fast immer als System-on-Chip gefertigt, in dem integrierte Hall-Elemente, analoges Frontend und digitale Signalverarbeitung in einem einzigen Gerät integriert sind. Zur Messung des Winkels wird nur ein einfacher zweipoliger Magnet benötigt, der sich über oder unter der Mitte des Chips dreht.

Zur Funktionsweise von Rotary Hall Encodern: Josef Janisch, Understanding Integrated Hall Effect Rotary Encoders, Nov 1, 2006 1:00am, auf Fierce Electronics [24].

Für das vorliegende Projekt wird ein Windsensor auf der Basis eines Rotary-Hall-Encoders vorgezogen. Dabei wird der auf einem Adapterboard gelötete AS5040-ASST der österreichischen ams-OSRAM AG verwendet. Das ist ein berührungsloser Rotary Hall Encoder für genaue Winkelmessung über eine volle Umdrehung von  $360^\circ$ . Die absolute Winkelmessung liefert eine sofortige Anzeige der Winkelposition des Magneten mit einer Auflösung von  $0,35^\circ = 1024$  Positionen pro Umdrehung. Diese digitalen Daten stehen als serieller Bitstrom und als PWM (Pulsweitenmodulation) Signal zur Verfügung. Für das vorliegende Projekt wird nur die PWM Verbindung verwendet, um die absoluten Werte auszulesen.

Der Encoder kann mit 3,3 V oder 5 V betrieben werden. Quellen für beide Spannungen sind auf dem Segelboot vorhanden. Es wird ein 3.3 V Pin des Raspberry Pi Zero W 1.1 genutzt.

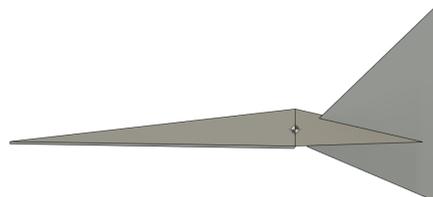
Die restlichen Teile des Windrichtungssensors werden von Grund auf selbst



**Abbildung 5.6:** AS5040-ASST mit Adapter Board

entworfen und gebaut. Es handelt sich dabei um die Bodenplatte, das Gehäuse, die Welle und den Windflügel. Die vier Teile wurden mit dem CAD Programm entworfen und mit dem 3D Drucker gedruckt.

Der drehbare Windflügel verfügt am Ende über ein Segel, damit er sich selbständig in den Wind dreht. Er ist 15 cm lang.

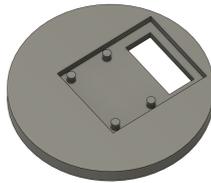


**Abbildung 5.7:** Windflügel

Der Windflügel wird fest mit der Welle verbunden. Diese wird dann von oben ins leere Gehäuse geführt. Das Gehäuse weist dafür eine Öffnung auf, in welcher ein Kugellager verleimt wird, damit sich die Welle frei drehen kann. Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass der Massemittelpunkt unabhängig von der Lage des Segelboots genau auf dem Drehpunkt des Windflügels liegt. Damit ist sichergestellt, dass auch bei den häufigen Schräglagen korrekte Werte ermittelt werden.

Das Gehäuse steht auf einer am Deck des Segelbootes gefestigten Grundplatte. Es hebt den Windflügel in den Wind und schützt die Adapterplatte mit dem Rotary-Hall-Encoder vor der Witterung und Wellen.

Die Grundplatte weist auf der Gehäusesseite eine rechteckige Vertiefung auf, welche die Adapterplatte mit dem Rotary-Hall-Encoder aufnimmt. Damit wird dieser in eine Position gezwungen, bei der die Welle des Windflügels präzise über dem Rotary Hall Encoder steht. Am unteren Ende der Welle wird dabei ein vom Encoder zum ordentlichen Funktionieren benötigter runder zweipoliger Magnet verklebt.



**Abbildung 5.8:** Bodenplatte um das Adapterplättchen richtig zu positionieren

In der Vertiefung für die Adapterplatte ist am äusseren Ende eine rechteckige Lücke ausgespart. Durch diese können die Anschlusskabel von der Adapterplatte zum Raspberry Pi Zero W 1.1 und zum Ground Leiter der Stromversorgung geführt werden.

Der gesamte Windrichtungssensor ist 15 cm hoch und wird an der Spitze des Bootes mit der Deckplatte verklebt.



**Abbildung 5.9:** Kompletter Windrichtungssensor

### 5.2.4 Aktuatoren

Für die Bewegung des Ruders und des Sailflaps werden Aktuatoren verwendet. Aktuatoren (auch als Aktoren bezeichnet) sind das signalwandlerbezogene Gegenstück zu Sensoren. Sie setzen bei einem Bewegungsregelungsvorgang Signale durch mechanische Arbeit in Wirkungen um [25]. Zur Bewegung von Ruder und Sailflaps werden elektrische lineare Aktuatoren benötigt. Ein elektrischer Linearantrieb ist ein Gerät, das die Drehbewegung eines Wechsel- oder Gleichstrommotors in eine lineare Bewegung umwandelt. Er kann sowohl Schub- als auch Zugbewegungen ausführen.

Für das vorliegende Projekt werden zwei L16-100-63-6 Serie R Aktuator der kanadischen Actuonix Motion Devices Inc. verwendet. Diese sind für den Einsatz in der Robotik und im Modellbau entwickelt worden und wasserdicht. Damit sind sie für den Einsatz auf Segelbooten prädestiniert.

Die Aktuatorwelle aus Aluminium verfügt über einem Maximalhub von 100 mm. Die Maximalgeschwindigkeit liegt ohne Last bei 20 mm/s. Damit sind sie nicht besonders schnell, verfügen mit 100N Stoss- und 46N Zugkraft aber über ausreichende Kraft zur Bewegung von Ruder und Sailflaps. Ihr Peak Power Point (der spezifische Geschwindigkeits- und Kraftpunkt, an dem die grösste Leistungsabgabe erfolgt) liegt bei 75N bei 10 mm/s. Das Getriebe der Aktuatoren weist eine Übersetzung von 63:1 auf.

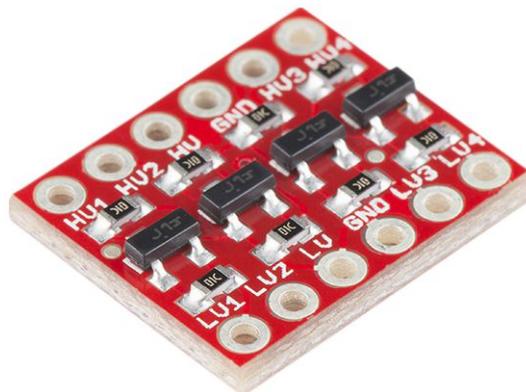
Die Aktuatoren verfügen über kein digitales Positionsfeedback, das heisst, dass nicht abgefragt werden kann, an welcher Position sich das Ende der ausfahrbaren Welle befindet. Es können jedoch konkrete Distanzen angesteuert werden.

Über eine einzige Datenleitung können kurze Impulse zwischen 1ms-2ms gesendet werden, wobei 1ms den Aktuator in die Startposition führt und der Aktuator bei 2ms voll ausgefahren wird. Um Einstellungen dazwischen zu erhalten, wird ein Wert zwischen 1ms und 2ms gesendet.

Die Steuerleitung des Aktuators kann nicht direkt mit dem Raspberry Pi Zero W 1.1 verbunden werden, da dieser an seinen Pins nur 3,3 V Steuersignale ausgibt, der Aktuator aber ein 5 V Steuersignal erwartet. Aus diesem Grund muss zwischen den beiden Aktuatoren und dem Raspberry Pi Zero W 1.1 ein einfacher Pegelumsetzer (lever shifter) geschaltet werden. Es wird das Modell BOB-12009 des US-amerikanischen Herstellers SparkFun Electronics verwendet.



**Abbildung 5.10:** Actuonix Aktuator



**Abbildung 5.11:** Pegelumsetzer

Zur Ansteuerung wird die am ersten Pin des Ruderaktuators befestigte weis-

se Kabellize mit einem Verlängerungskabel mit dem Pin HV1 der linken Pinleiste des Pegelumsetzers verbunden und der Pin LV1 der rechten Pinleiste mit einem Pin BCM des Raspberry Pi Zero W 1.1 verbunden. Die am ersten Pin des Sailflap-Aktuators befestigte weiße Kabellize wird mit einem Verlängerungskabel zunächst in den Mast und dann durch den Schleifring geführt und mit dem Pin LV2 der linken Pinleiste des Pegelumsetzers verbunden. Der Pin HV2 der rechten Pinleiste wird dann mit dem Pin BCM des Raspberry Pi Zero W 1.1 verbunden.

### 5.3 Schleifring (Slip Ring)

Der Aktuator zur Bewegung der Sailflaps muss einerseits über den Pegelumsetzer mit dem Raspberry Pi Zero W 1.1 und andererseits mit der Stromversorgung verkabelt werden. Da das Segel frei rotiert und sich um die eigene Achse drehen kann, besteht die Gefahr, dass die Verbindungskabel um den Mast gewickelt werden und reißen.

Dieser Gefahr kann mit dem Einsatz eines sogenannten Schleifrings begegnet werden. Ein Schleifring ist ein elektromechanisches Bauteil, das eine elektrische Leistungs- oder Signalübertragung zwischen gegeneinander rotierenden Bauteilen ermöglicht. Er besteht aus einem stromleitenden Ring und Bürsten, die in Kontakt mit diesem Ring stehen. Die Bürsten bestehen aus einem leitfähigen Material und sind mit der stationären Struktur des Systems verbunden.

Der Schleifring wird am Fuss des Segelmastes montiert und mit dem Schiffskörper verschraubt. Durch den hohlen Mast werden dann die drei Leistungen hinauf zum Segel gezogen und durch ein in den Mast gebohrtes Loch zum Aktuator geführt und mit diesem verbunden.

### 5.4 Energieversorgung

Rechner, Sensoren und Aktuatoren werden mit elektrischer Energie betrieben. Weil das Segelboot autonom funktionieren soll, muss diese auf dem Schiff selbst gewonnen werden. Infrage kommen dabei grundsätzlich drei Energiequellen, nämlich Wasserenergie, Windenergie und Sonnenenergie.

#### 5.4.1 Wasserturbine

Da sich das Boot im Wasser bewegt, könnte eine kleine Wasserturbine am Bootskörper befestigt und die Strömung zu deren Antrieb genutzt werden. Da sich das Boot relativ zum Wasser bewegt, gelten die gleichen Prinzipien wie bei Generierung elektrischer Energie durch Wasserkraft in Fließgewässern.

Diese Methode hat jedoch gewichtige Nachteile. Segelboote erreichen, abgesehen von speziellen Konstruktionen wie sog. Foilingboote, bei denen der Bootskörper bei Fahrt vollständig aus dem Wasser gehoben wird, nur bescheidene Geschwindigkeiten. Da die Leistung einer Turbine in einer Flüssigkeit bei gleicher Fläche kubisch zur Strömungsgeschwindigkeit ansteigt, erlaubt diese Methode selbst bei idealen Segelbedingungen nur eine geringe Energieausbeute. Zudem würde das Segelboot durch die Turbine empfindlich abgebremst.

### 5.4.2 Windturbine

Auch die Generierung von elektrischer Energie mithilfe einer Windturbine unter Nutzung der Windkraft ist nicht praktikabel. Um die Windenergie in Bewegungsenergie umzusetzen, aus der dann elektrische Energie generiert werden kann, muss ein Windrad in den Wind gedreht werden. Ein Segelboot kann keinen Kurs gegen den Wind segeln. Der Kurs vor dem Wind (also ein Kurs, bei dem der Wind von hinten auf das Boot trifft) ist zwar möglich, aber wenig effizient. Ein Windrad könnte folglich nicht fix mit dem Boot verbunden werden, sondern müsste drehbar ausgelegt werden, damit es unabhängig vom Kurs des Bootes in den Wind gedreht werden kann. Es müsste so platziert werden, dass nicht nur eine Berührung des Segels, sondern auch eine Berührung der Wasseroberfläche bei einer Kränkung (Schieflage) des Bootes ausgeschlossen ist. Damit müsste es am äussersten Bug, am äussersten Heck oder auf dem Mast platziert werden. Alle Positionen verbieten sich, da damit die Balance des Bootes akut gefährdet wäre.

Schliesslich würde eine Positionierung am Bug oder Heck je nach vorherrschendem Wind, zu einer vollen oder teilweisen Abschattung des Windrades durch das Segel oder des Segels durch das Windrad führen. Eine Positionierung auf dem Mast würde selbst im Fall eines Vertikalwindrades zu Verwirbelungen führen, welche die Segeleigenschaften des Bootes negativ beeinträchtigen würden.

### 5.4.3 Fotovoltaik

Für die Nutzung der Sonnenenergie auf dem autonomen Segelboot kommt nur die Methode der Fotovoltaik infrage. Die für den Betrieb von Wärme-Kraft-Maschinen erforderlichen Temperaturen lassen sich auf einem beweglichen Boot mit Sonnenenergie nicht erreichen.

Die Energieerzeugung mit Fotovoltaikanlagen ist auf Segelbooten beliebt und verbreitet. Solche Anlagen haben keinen Einfluss auf die Segeleigenschaften des Bootes. Die Energieausbeute hängt aber stark vom Sonnenstand und dem vorherrschenden Wetter ab. Im Gegensatz zu stationären Anlagen lassen sich Fotovoltaikanlagen auf Booten nicht ideal auf die Sonne ausrichten und

können je nach Kurs sogar vom Segel beschattet werden. Da während der Nachtstunden überhaupt keine Energie gewonnen werden kann, muss das Boot zur Überbrückung zwingend mit einem Energiespeicher ausgerüstet werden.

Das Solarpanel kann auf dem Deck oder am Festsegel befestigt werden. Die Befestigung auf dem Deck hat den Vorteil, dass die Verbindungsleitung zum Energiespeicher nicht durch den Schleifring geführt werden muss. Sodann ist die sichere Befestigung am flachen Deck einfacher als am gewölbten Festsegel. Schliesslich müssten bei einer Montage am Segel zwei Panels verwendet werden, damit beide Seiten des Festsegels damit ausgerüstet werden können. Andernfalls bestünde die Gefahr, dass sich das Panel bei einem ungünstigen Kurs längere Zeit auf der Schattenseite des Festsegels befindet.

Der Selbstbau eines Panels wird nach einer längeren Erkundungsphase verworfen, da komplette, für den mobilen Einsatz entwickelte Panels kostengünstiger sind.

Es wird das portable und faltbare Pi Juice Solar Panel - 22 Watt der britischen Pi Supply (Nebra Ltd) verwendet. Es ist gegen Spritzwasser geschützt (IP4X-Kennzeichnung), misst im entfalteten Zustand 83x23 cm und wiegt 520 g. Die vier einzelnen Panels sind von einer Textilhülle umfasst, die vier Befestigungsösen aufweist. Mit diesen wird das Panel vor dem Mast auf der flachen Deckplatte des Segelboots befestigt.

Die maximale regulierte Ausgangsleistung beträgt 20 W bei 5 V. Es verfügt über zwei 5 V / 2.4 A USB Ausgänge, wobei die maximale Ausgangsleistung pro USB Buchse auf 12 W beschränkt ist. Die zwei USB Buchsen können simultan benutzt werden.



**Abbildung 5.12:** Pi Juice Solarpanel

### 5.4.4 Energiespeicher (Akku)

Während der Nachtstunden kann mit dem Solarpanel keine Energie gewonnen werden und bei Nebel ist die Energieausbeute sehr gering. Daher muss das Boot zur Überbrückung dieser Phasen mit einem Energiespeicher ausgerüstet werden, damit seine Autonomie sichergestellt ist.

Es wurde vorgesehen, dass die Energiereserve einen Betrieb während drei Tage (72 h) erlauben soll. Der genaue Energieverbrauch des Rechners, der Sensoren und vor allem der Aktuatoren hängt stark davon ab, wie oft Steuereingriffe vorgenommen werden müssen und Messdatenerfassungen Neuberechnungen erfolgen. Es lässt sich daher nicht präzise berechnen, sondern nur abschätzen.

Der Schätzwert für den Gesamtenergieverbrauch pro Stunde beträgt 1.5 Watt (bei 5 Volt Gleichspannung). Das ergibt einen Energieverbrauch von 36 Wattstunden pro Tag (24 h). Zur Überbrückung der vorgesehenen drei Tagen ohne Energiezufuhr muss der Speicher daher über eine Kapazität von mindestens 108 Wattstunden verfügen.

Eine völlige Erschöpfung des Energiespeichers kann diesen schädigen. Sie muss daher verhindert werden. Aber bereits ein Absinken der Ladung auf unter 20 Prozent verkürzt dessen Lebensdauer. Die Kapazität muss daher erhöht werden. Um über ausreichende Reserven zu verfügen, wird daher eine Kapazität von 185 Wattstunden vorgesehen.

Im Handel erhältliche sogenannte Powerbanks verfügen über eine Kapazität von bis zu 20'000 mAh, was eine Leistung von 100 Wh ergibt. Eine solche Powerbank genügt den gestellten Anforderungen damit nicht. Auch eine Kombination mehrerer Powerbanks scheidet aus, weil heute angebotene Geräte nicht auf die sogenannten Durchgangsladung (pass-through charging) ausgelegt sind. Sie können also nicht geladen werden, während ein Verbraucher Energie bezieht.

Deutlich grössere Powerstations, die insbesondere für den Campingeinsatz vorgesehen sind, verfügen über deutlich grössere Kapazitäten und sind durchgangsladungsfähig. Sie sind aber meist auf Verbraucher ausgelegt, die mit 220 V Wechselspannung betrieben werden, sind meist weit über 10 Kg schwer und kosten über 1000 Franken. Sie scheiden damit ebenfalls aus.

Der Energiespeicher muss daher selbst entworfen und gebaut werden. Bei Selbstbauprojekten werden dafür häufig Li-Ion Zellen der Bauform 18650 verwendet.

Für den Energiespeicher sollen 20 günstige wiederaufladbare EVE ICR18650/26V Litium-Ionen Zellen der chinesischen EVE Energy CO., LTD verwendet werden. Die Zellen haben eine Kapazität von 2'550 mAh bei 3.7 V.



**Abbildung 5.13:** EVE ICR18650/26V Litium-Ionen Zelle

Der Energiespeicher (Akku) wird aus zwei identischen Teilen mit je 10 Zellen aufgebaut. Die Zellen werden innerhalb ihres Zellverbundes parallel geschaltet. Damit bleibt die Spannung der Zellen unverändert, aber die Kapazität des Zellverbunds erhöht sich. Die beiden Zellverbände werden seriell geschaltet, womit sich eine Spannung des Akkus von 7.4 V und eine Kapazität von 25000 mAh ergibt.

Die einzelnen Zellen jedes Zellverbundes werden untereinander mit einem Nickelband verbunden, das mit einem Punktschweissgerät direkt auf den Zellen geschweisst wird. Das Punktschweissgerät muss speziell für dieses Projekt angeschafft werden, da ein solches Spezialwerkzeug nicht zur Standardausrüstung einer Heimwerkerwerkstatt gehört. Es wäre an sich möglich, die Nickelbänder mit den Zellen zu verlöten. Dabei besteht aber die ernste Gefahr, dass die Zellen mit dem LötKolben zu lange und zu stark erhitzt werden. Sie können dabei nicht nur unrettbar beschädigt werden, sondern sich auch entzünden. Aus Sicherheitsgründen wird daher von den definierten Anforderungen abgewichen.

### 5.4.5 Ladeelektronik

Da Lithiumzellen bei einer Überladung oder bei einer Tiefentladung beschädigt oder im schlimmsten Fall in Flammen aufgehen können, wird ein BMS (Battery Management System) Modul vorgesehen. Es wird das TECNOIOT 5 un. 2S 8A Li-Ion Bateria Lipo 7.4v 8.4V 18650 protección junta BMS PCM 15A Picon Board der italienischen TECHNOIT SPA verwendet. Dieses wird gemäss dem nachstehenden Schaltplan mit dem Akku verbunden.

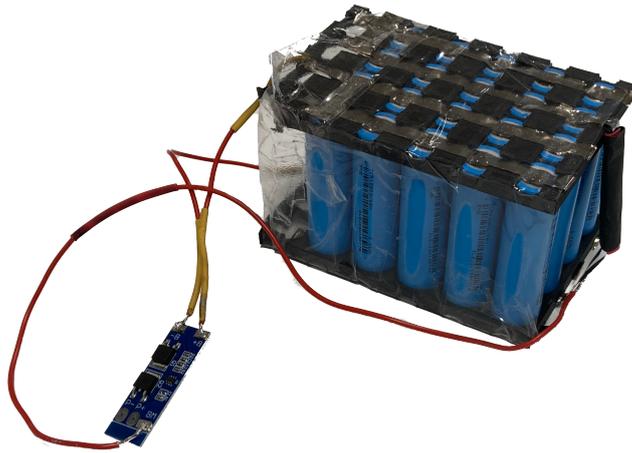


Abbildung 5.14: Selbstgebafter Akku

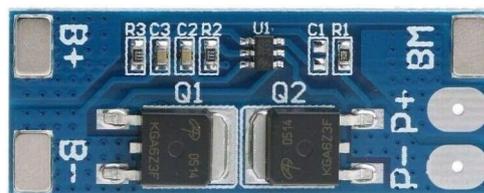


Abbildung 5.15: TechnoIt BMS

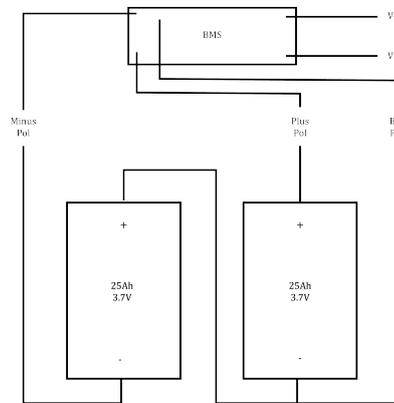
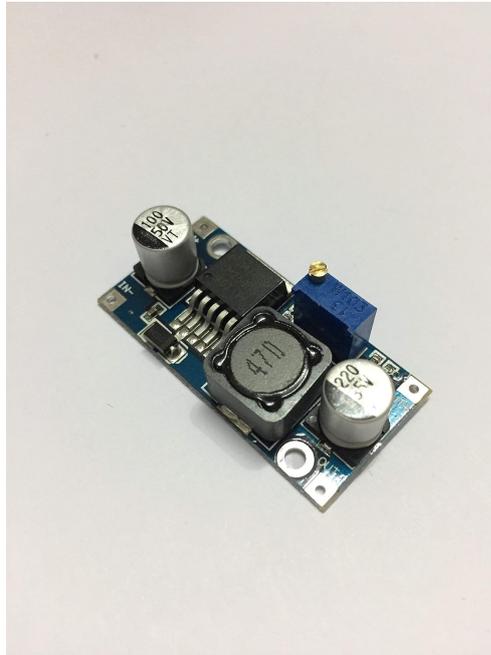


Abbildung 5.16: Ladeelektronik-Schaltkreis

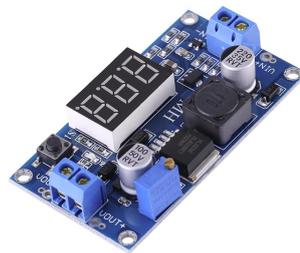
#### 5.4.6 Spannungswandler

Die Ausgangsspannung des Akkus beträgt 7.4 V. Der Raspberry Pi Zero W 1.1, die Sensoren und die Aktuatoren werden aber mit 5 V betrieben. Mit einem sogenannten Abwärtsregler (Step-Down Converter) kann die 7.3 V Spannung auf 5 V reduziert werden. Es wird dafür der LM2596S-ADJ DC-DC (Abbildung 5.17) Spannungswandler eines unbekanntenen Herstellers verwendet, der bei Aliexpress erworben wurde. Der Abwärtsregler wird zwischen Akkumulator und den Verbrauchern geschaltet.

Um jedoch den Akkumulator zu laden, muss ein Step-Up Converter verwendet werden. Da das Solarpanel lediglich 5 V liefert, wäre es sonst nicht möglich, den Akku zu laden. Somit können die 5 V in 7.4 V hoch geregelt werden. Es wird ein Walfont-fcbw9hvekm Modul von Walfont verwendet (Abbildung 5.18)



**Abbildung 5.17:** LM2596 Spannungswandler



**Abbildung 5.18:** Walmart-fcbw9hvekm Boost Converter

# Navigation

---

## 6.1 Kurze Einführung ins Segeln

Bevor man sich mit der autonomen Operation von Segelbooten beschäftigt, muss man zumindest in groben Zügen verstehen, wie und warum diese sich fortbewegen.

### 6.1.1 Segelstellungen

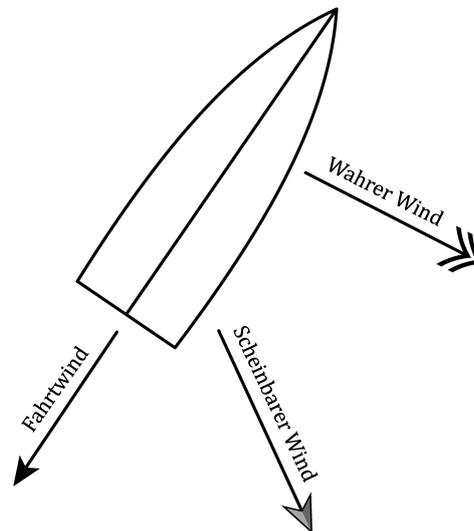
Grundsätzlich werden 5 Kurse bzw. Segelstellungen unterschieden.

- Vorwind: Der Wind weht von hinten. (U)
- Im Wind: Der Wind weht von Vorne.
- Halbwind: Der Wind trifft mit  $\pm 90^\circ$  auf das Boot. (U)
- Raumschot: Der Wind weht schräg von hinten. (S)
- Amwind: Der Wind weht schräg von vorne. (S)

Alle Kurse ausser der *Im Wind* Kurs sind besegelbar. Dies liegt daran, dass dann, wenn der Wind von vorne auf das Boot trifft, dieser nicht vom Segel aufgefangen wird. Dieser Bereich wird als *No Go Zone* bezeichnet und ist je nach Boot  $\approx 90^\circ$ . Auf den übrigen Kursen wird das Boot entweder durch das Stossprinzip (S), oder durch Umströmung (U) angetrieben. Bei der Umströmung wird derselbe Effekt genutzt wie bei den Flügeln von Flugzeugen.

### 6.1.2 Wahrer und scheinbarer Wind

Es ist wichtig, zwischen dem wahren Wind und dem scheinbaren Wind zu unterscheiden. Der wahre Wind kommt aus der echten Richtung. Wer auf die Messdaten eines stationären Windsensors schaut, liest den wahren



**Abbildung 6.1:** Vektordarstellung des Windes

Wind ab. Der scheinbare Wind hingegen ist eine Zusammensetzung aus dem wahren Wind und dem Fahrtwind. Wenn im Segeln von der Windrichtung gesprochen wird, meint man in der Regel den scheinbaren Wind, da meist nur dieser von Bedeutung ist.

## 6.2 Software Architektur

### Betriebssystem

Der Raspberry Pi Zero W 1.1 Mikroprozessor, welcher für die Kursberechnung, Navigation und Steuerung zuständig ist, wird mit der Raspberry Pi OS Linux Distribution betrieben. Linux hat im Gegensatz zu den Arduinos, ESPs etc. Systemen den entscheidenden Vorteil, dass es einfach zu bedienen, zu warten und zu erweitern ist. Es lässt sich sehr einfach über WLAN aus der Ferne warten.

### Docker

Alle für das Boot geschriebenen Programme laufen in sogenannten Docker-containern. Docker ist eine Containerisierungstechnologie, welche es erlaubt,

Anwendungen in isolierten Containern virtualisiert auszuführen. Diese Container sind leichtgewichtig und portabel.

### Programmiersprache

Aufgrund der geringen Anforderungen wurden die Programme mit der Programmiersprache Python entwickelt. Im Gegensatz zu Programmiersprachen wie C++ oder Rust, welche um ein Vielfaches leistungsfähiger sind, ist Python sehr langsam. Da die eingesetzten und weiter unten beschriebenen Algorithmen aber nicht besonders komplex sind und keine langwierigen Rechenoperationen bedingen, ist Pythons Behändigkeit praktisch nicht relevant.

## 6.3 Verbreitete Wegfindungsalgorithmen

Für dieses Projekt wurden verschiedene Algorithmen auf ihre Eignung für dieses Projekt untersucht.

### 6.3.1 Deep Reinforcement Learning Algorithm

Deep Reinforcement learning ist ein Algorithmus aus der Familie des maschinellen Lernens. Seine Besonderheit ist, dass er im Gegensatz zum gewöhnlichen maschinellen Lernen keine Trainingsdaten benötigt. Hingegen wird ein «Agent» (vorliegend wäre das Segelboot der Agent) in eine virtuelle Umgebung gesetzt, in welcher er ein Ziel erreichen muss und dabei definierte Freiheitsgrade zur Bewegung hat. Wenn der Agent einen Fortschritt macht, wird dies belohnt. Macht er einen Fehler, wird er bestraft.

Der Nachteil dieses Algorithmus ist, dass er sich ausserhalb seiner trainierten Umgebung nicht zurechtfindet und dass die Bewegungen eines Segelboots sehr schwer in einer virtuellen Umgebung simuliert werden können. Eine auch nur ansatzweise akkurate Simulation würde den Rahmen dieser Arbeit eindeutig sprengen.

### 6.3.2 Künstliche Potenzialfelder Algorithmus

Der Algorithmus der künstlichen Potenzialfelder ist eine Methode zur Pfadfindung, welche in der Robotik verbreitet ist. Der Algorithmus ermöglicht es, einen Weg zu finden, indem er auf anziehende und abstossende Felder reagiert, ähnlich wie dies in der Physik mit elektrischen Feldern geschieht.

Das Ziel des Algorithmus ist es, eine Richtung zu finden, in welche das Boot fahren soll, um vom Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt zu gelangen. Dabei übt der Zielpunkt eine anziehende Kraft auf das Objekt aus, während Hindernisse eine abstossend wirken entfalten. Mathematisch kann dies als Gradient dargestellt werden, bei dem die anziehende Kraft einen negativen

Gradienten aufzeigt, der das Objekt zum Ziel zieht und die abstossende Kraft einen positiven Gradienten erzeugt, der das Objekt von Hindernissen abstösst.

Der gravierende Nachteil dieses Ansatzes ist, dass er in lokalen Minima stecken bleiben kann und tatsächlich auch stecken bleibt. Überprüft wurde die Eignung des Ansatzes im Papier «Line following for an autonomous sailboat using potential fields method» [9]. Dabei hat er sich auf offene Gewässer zwar als effizient erweisen, für engere Gewässer jedoch als ungünstig herausstellt.

## 6.4 Eigenentwickelter vektorbasierter Ansatz

Die meisten der bekannten Algorithmen wurde mit Blick auf eine Überquerung von Ozeanen oder die Navigation auf grossen Gewässern entwickelt. Dabei spielen die Berücksichtigung von Wetterdaten etc. bei der Routenplanung eine grosse Rolle. Für das vorliegende Projekt sind solche Thema aber nicht relevant.

Es ist deshalb angezeigt, für das vorliegende Projekt einen eigenen Algorithmus zu entwickeln. Dieser basiert auf den Grundlagen der linearen Algebra und lässt sich somit mit Gymnasialmathematik beschreiben. Ähnlich wie beim Algorithmus der künstlichen Potenzialfelder wird bei jeder Berechnungsiteration der Kurs neu berechnet. Der Algorithmus hat eine gewisse Ähnlichkeit zu demjenigen, welcher in «Simple Controller for Line Following of Sailboats» beschrieben wird. [9] Der Ansatz ist jedoch ganz anders gewählt, daher ist die Ähnlichkeit vor allem in der Einfachheit. Bevor etwas berechnet werden kann, müssen die folgenden Werte bekannt sein:

- Position des Bootes (Längengrad und Breitengrad)
- Position des Ziels (Längengrad und Breitengrad)
- Windrichtung (als normalisierter Vektor)
- Richtung des Bootes (als normalisierter Vektor)

Jegliche Vektoren werden nur normalisiert verwendet. Als erstes wird der Ziel-Vektor  $v_{Ziel}^{\vec{}}$  welcher als

$$v_{Ziel}^{\vec{}} = \text{Position Ziel} - \text{Position Boot}$$

definiert ist. Im Anschluss wird der neue Kurs provisorisch auf diesen Vektor gesetzt. Danach wird das Skalarprodukt zwischen  $v_{Wind}^{\vec{}}$  und  $v_{Boot}^{\vec{}}$  als

$$\text{Skalarprodukt} = v_{Wind}^{\vec{}} \cdot v_{Boot}^{\vec{}}$$

berechnet. Dieses gibt Auskunft, wie die beiden Vektoren zueinander stehen. Ist der Wert 1, zeigen die beiden Vektoren in die gleiche Richtung und der

Wind kommt von hinten. Ist der Wert jedoch -1, stehen die beiden Vektoren entgegengesetzt zueinander. Daraus lässt sich schliessen, dass dieser Kurs nicht gesegelt werden kann, da das Boot im Wind stehen würde. Ist dies der Fall, werden zwei weitere Vektoren berechnet, welche normal zu  $\vec{v}_{Ziel}$  stehen.

$$\text{Möglicher Kurs A} = \vec{v}_{Ziel} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Möglicher Kurs B} = \vec{v}_{Ziel} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Diese beiden Kurse werden nun stückweise wieder Richtung Zielvektor «zugeklappt»

$$\text{Möglicher Kurs A} \leftarrow \vec{v}_{Ziel} + n \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_{Ziel}$$

$$\text{Möglicher Kurs B} \leftarrow \vec{v}_{Ziel} + n \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_{Ziel}$$

wobei n eine iterierende Variable ist, welche bei 0 anfängt und in 0.1 Schritten grösser wird, und zwar so lange, bis der Vektor praktisch in den Wind zeigt, bzw. der Kurs Amwind erreicht ist.

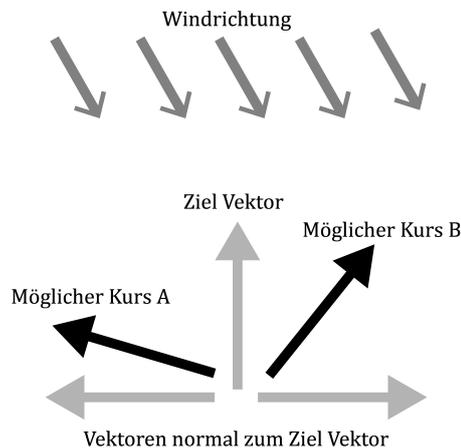
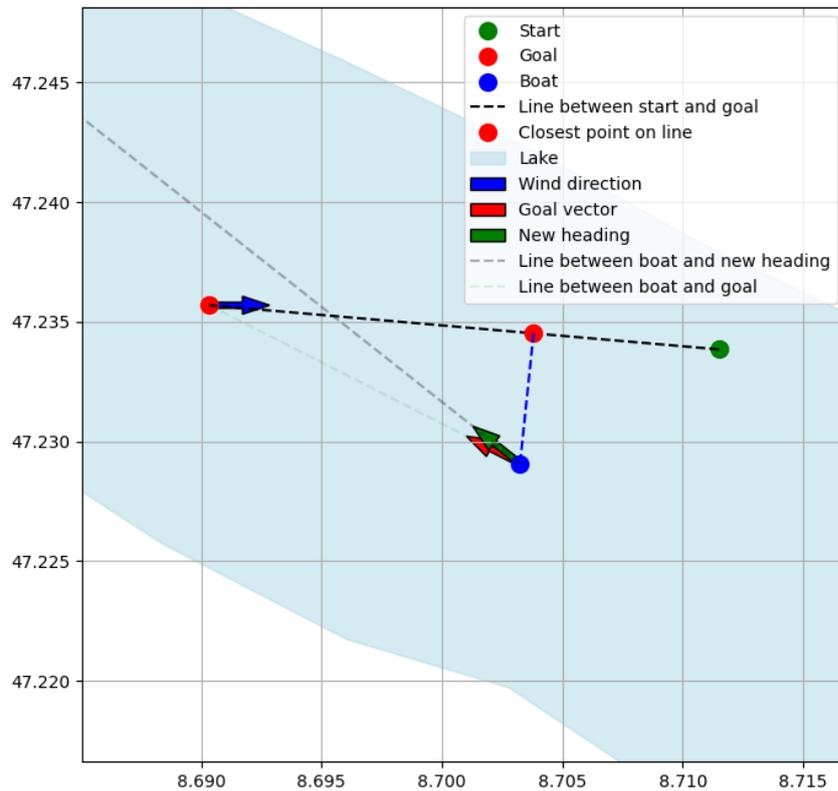


Abbildung 6.2: Visualisierung der beiden möglichen Pfade

Nun wird wieder mithilfe des Skalarprodukts überprüft, welcher der beiden Kurs-Vektoren näher am Ziel-Vektor ist. Der nähere Vektor bestimmt

dann den nächsten Kurs. Der Algorithmus ist im Appendix B als Ganzes wiedergegeben.



**Abbildung 6.3:** Matplotlib Visualisierung des Algorithmus

Die Wegpunkte werden mittels GeoJson bereitgestellt. GeoJson ist grundsätzlich reines Json. Das steht für JavaScript Object Notation und ermöglicht es, Objekte von verschiedenen Programmiersprachen in einem einheitlichen Format zu speichern. GeoJson ist ein weit verbreitetes Format für Geodaten, da so die Daten standardisiert gespeichert und gelesen werden können.

Das Ziel und die Wegpunkte werden mit Geojson festgelegt. So können diese in diversen Kartenprogrammen einfach bearbeitet werden.

Da das Boot nur darauf ausgelegt ist, auf kleinen Gewässern zu verkehren,

wird die Krümmung der Erde nicht berücksichtigt und einberechnet.

## 6.5 Kollisionsvermeidung

Damit das Segelboot nicht auf Grund läuft, muss es über eine Funktion zur Kollisionsvermeidung verfügen. Diese funktioniert jedoch nur mit vorher einprogrammierten Hindernissen wie dem Ufer, Inseln, Sandbänken oder Naturschutzgebieten.

Dabei wird dasselbe Prinzip angewendet wie dem Aufkreuzen (gegen den Wind fahren). Dabei wird bei jeder Iteration die Distanz zu den Hindernissen berechnet. Falls diese geringer als 40 m ist, erkennt das Boot diese als Gefahr und weicht ihnen aus.

Hindernisse werden immer als Punkt behandelt. Grosse Hindernisse wie Inseln oder das Ufer müssen als eine Vielzahl von Punkten vorgegeben werden. Sobald Hindernisse in der unmittelbaren Nähe (40 m) des Bootes sind, erfährt die übliche Navigation die folgende Modifikation.

Als erstes werden die Vektoren zwischen den Hindernissen und dem Boot in einer Liste gespeichert. Beim Berechnen der neuen Richtung wird nun nicht mehr nur das Skalarprodukt zwischen dem Wind und dem Boot in Betracht gezogen, sondern ebenfalls das Skalarprodukt zwischen den einzelnen Hindernissen und dem Boot. So wird dann versucht, eine neue Richtung zu finden.

Die Nachteile dieses reaktiven Ansatzes sind offensichtlich. Das Boot könnte allenfalls in engen Buchten gefangen bleiben, weil es kein Weg aus diesen findet. Dies lässt sich aber dadurch vermeiden, dass dem Boot die Einfahrt in die Bucht durch ein entsprechendes Ziehen der Uferlinie grundsätzlich untersagt wird.

## 6.6 Motorsteuerung

Wie im Kapitel Elektronik bereits ausgeführt, werden zwei Aktuatoren verwendet. Beide können mit einem einzigen 5 V Steuerimpuls in die eine gewünschte Position bewegt werden, wobei die genaue Position durch die Dauer des Impulses (zwischen 1 ms und 2 ms) bestimmt wird.

### 6.6.1 Ruder (PD Controller)

Für das Ruder des Segelboots ist ein Regelungssystem notwendig, damit das Boot in die richtige Richtung gelenkt wird. Hierfür wird ein PD Controller verwendet. Der Name «PD» steht für Proportional (P) und Derivative (D). Diese Begriffe beschreiben die Hauptkomponenten des Regelungsalgorithmus. Der proportionale Teil des Reglers misst den Fehler zwischen der

aktuellen Ausrichtung (des Bootes) und der gewünschten Ausrichtung. Dieser Fehler wird als Vektor dargestellt. Der P-Anteil multipliziert diesen Fehler mit dem Verstärkungsfaktor ( $K_p$ ), um einen ersten Korrekturwert zu generieren. Demnach gilt, je grösser der Fehler ist, desto grösser muss die Korrektur sein. Mit diesem Teil des Reglers wird das Ruder erstmals in die richtige Richtung gelenkt. Der Derivatanteil (D) des Reglers achtet darauf, wie sich die Änderung des Fehlers verhält. Wenn das Boot sich dem gewünschten Kurs nähert, kann der Fehler schnell abnehmen, was zu einem Überschwingen führen kann. Der D-Teil versucht, dieses Überschwingen möglichst zu reduzieren, indem er den Fehlergeschwindigkeitsvektor (sprich die Ableitung des Fehlers) berechnet. Dieser wird ebenfalls mit einem Verstärkungsfaktor multipliziert. Aus der Kombination von P- und D-Komponenten kann eine Ruderposition, die zwischen 0 und 1 liegt, berechnet werden. Ein Wert von 0.5 entspricht dem Ruder, welches sich, wenn alles stimmt, in der Mitte befinden sollte. Somit kann sich das Boot sanft an den gewünschten Kurs annähern, ohne dauernd zu übersteuern.

### 6.6.2 Segel

Da das Segel über keine Trimmmöglichkeiten verfügt und da die Geschwindigkeit der Zielerreichung bei dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung ist, wird das Sailflap immer in die Richtung des Windes gedreht. Dies sorgt dafür, dass das Segel in eine segelbare Position geführt wird.

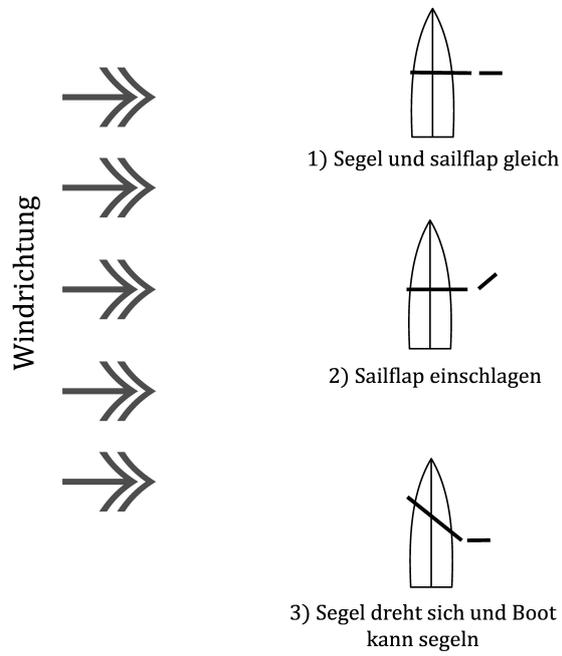


Abbildung 6.4: Sailflap Visualisierung



# Herstellung und Zusammenbau

---

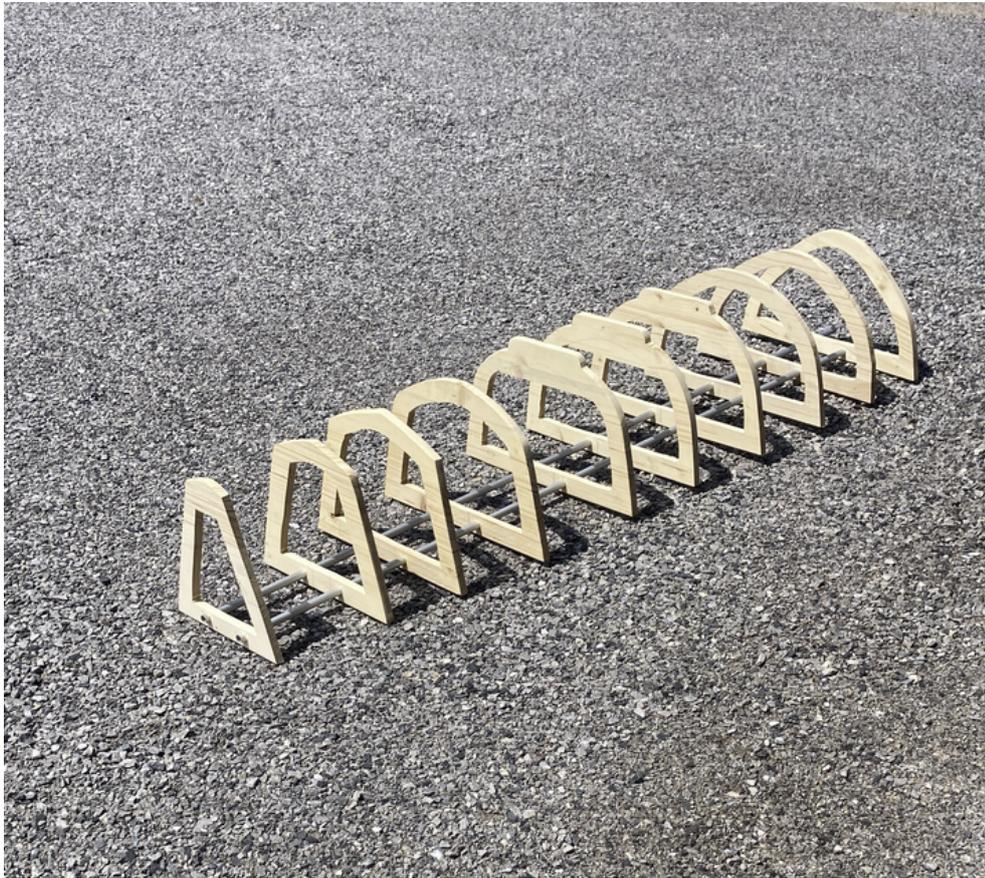
## 7.1 Herstellungsprozess der Komponenten

### 7.1.1 Skelett und grundlegende Bootsform

Da für dieses Projekt keine computergesteuerte CNC Fräse zur Verfügung steht, werden die Spanten des Bootes mittels einer elektrischen Handstichsäge aus drei verleimten Tannenbrettern mit den Massen 240 x 40 cm und einer Stärke von 18 mm ausgesägt. Dafür werden die Baupläne der zehn Elemente mithilfe eines Plotters im Massstab 1:1 ausgedruckt und mithilfe von transparentem Backpapier mittels der Abpausmethode auf Tannenholzbretter übertragen und anschliessend mit der Handstichsäge ausgesägt.

Die Erstellung der Spanten erfolgt in zwei Arbeitsschritten. Im ersten Schritt wird die äussere Form ausgesägt. In einem zweiten Schritt wird danach Material innerhalb der Elemente entfernt. Dies wird aus Gewichtsgründen gemacht und schafft den für die spätere Montage der Elektronik und der Energieversorgung notwendigen Freiraum im Inneren des Bootes.

An den entsprechenden Stellen an der Oberseite der Spanten werden je zwei Löcher gebohrt und die Elemente werden dann mithilfe von zwei Aluminiumrohren verbunden. Um eine Verschiebung der Elemente während des Herstellungsprozesses zu vermeiden, werden diese mit Heisskleber mit den Aluminiumrohren verklebt.



**Abbildung 7.1:** Rippenförmige Anordnung der Tragelemente

Da die Spanten mit einer Handstichsäge ausgesägt werden, lassen sich Ungenauigkeiten nicht völlig vermeiden. Daher weichen die tatsächlichen Maße der Spanten bis zu 5 mm von den Planwerten ab. Obwohl dies eine relative Abweichung ist, kann der Fehler in den folgenden Arbeitsschritten ausgebessert werden.

Da für die Elemente aus Kostengründen kein Massivholz genommen werden kann, muss auf Leimholz zurückgegriffen werden. Dies hat zum Nachteil, dass einzelne Elemente einen Bruch erleiden, wenn zu viel Druck auf die geleimten Stellen wirkt. Beschädigte Elemente werden nicht verwendet, sondern durch neu erstellte Kopien ersetzt.



**Abbildung 7.2:** Bruch eines Elements

Im Anschluss wird eine Schicht Balsaholz über die Rippen gelegt. Die verwendeten Balsaholzbrettchen haben eine Stärke von 1 mm und sind 100 cm lang. Zur Befestigung an den Spanten wird eine Tackerpistole verwendet. Durch Verspannungen im Holz ergeben sich unglücklicherweise kleinere Verformungen, welche sich negativ auf die endgültige Bootsform auswirken können.

### 7.1.2 Glasfaserbeschichtung

Um eine robuste Aussenhülle für das Boot zu schaffen, wird eine glasfaserverstärkte Epoxidharzschicht aufgetragen. Die Verbindung von Glasfaser-matten mit Epoxidharz ergibt eine äusserst harte und stabile Schicht. Dafür werden die Glasfaser-matten auf die Balsaholzplanken gelegt und mit Epoxidharz bestrichen. Dies führt dazu, dass die Epoxidschicht die Form des Bootes annimmt. Das unterliegende Balsaholz bildet also die formgebende und die Glasfaser-Epoxidschicht die strukturgebende Komponente.

Dieses Vorgehen führt jedoch auch zu Problemen, da der Auftrag der Glasfaser-Epoxidschicht zu Verspannungen in der Balsaholzschiicht führt. Auch die Schwankungen der Feuchtigkeit in der Werkstatt bewirken Verspannungen, welche sich dann ebenfalls auf die Balsaholzschiicht auswirken. Um diese Dellen in der Aussenhülle auszugleichen, muss sehr viel Epoxidspachtelmasse aufgetragen werden. Dafür wird eine Mischung von Epoxid und entsprechendem Härtungsmittel verwendet. Um das folgende Plan schleifen der Oberfläche zu vereinfachen, werden diesem Gemisch Microballons beigemischt und ein Tixotropiermittel wird zugegeben, um das Gemisch einzudicken. Der Prozess des Auftragens und Abschleifens muss viele Male wiederholt werden. Das ist sehr zeitaufwändig, da immer gewartet werden muss, bis die neu aufgeragene Schicht vollständig getrocknet ist. Dabei wird versucht einen möglichst glatten, stromlinienförmigen Körper zu formen.

Um eine Asymmetrie beim Bug zu vermeiden, wird sehr viel

Expoxid-Spachtelmasse aufgetragen. Kleine Glasfaserschnipsel, welche zur Spachtelmasse dazugerührt werden, geben dieser weitere Stabilität, damit der Bug gut geschützt ist.

Zum Schluss wird der Bootskörper mit Sperrholzplatten abgedeckt. Diese werden in einem ersten Schritt auf den offenen Bootskörper gelegt. Dann werden mit einem Bleistift die Konturen des Bootskörpers nachgezogen. Die Deckplatten werden entlang der Bleistiftmarkierungen ausgesägt. In der Mitte des Boots wird eine Öffnung in die Deckplatten gesägt und die Deckplatten mit dem Schiffskörper verleimt. Die vorhandene Lücke im Deck wird erst nach dem Einbau des Masts und der Elektronik und der Bemalung der Deckplatte mit einer weiteren abnehmbaren Sperrholzplatte verschlossen. Am Schluss werden noch die Positionslampen angebracht.

### 7.1.3 Ruder

Das Ruder wird aus einer Tannen-Leimholz-Platte ausgesägt. Dabei wird daselbe Verfahren wie bei den Spanten angewendet. Anschliessend wird das Werkstück mit der Schleifmaschine bearbeitet und in Form gebracht.



**Abbildung 7.3:** Fertiger Einbau des Ruders

Nach der Lackierung mit roter Farbe wird das Ruder am Heck des Schiffskörpers befestigt und mit der Welle des Aktuators verbunden.

### 7.1.4 Kiel

In einem ersten Schritt werden die 5 Bretter ausgesägt, miteinander verleimt und verschraubt. Anschliessend werden in die Löcher für die Gewindestangen in die beiden äusseren Kielbretter gebohrt.

Im nächsten Schritt wird ein Loch in jedes der beiden 2 kg Gewichte gebohrt. So können die Gewichte mit dem Kielhauptbrett verschraubt werden. Nach dem Druck der beiden Schutzgehäuse werden diese über die Gewichte gestülpt und mit dem Kielhauptbrett verleimt.



Abbildung 7.4: Fertiger Kiel

### 7.1.5 Segel

Das Segel besteht aus EPS und setzt sich aus vier identischen Teilen zusammen, die aus EPS-Platten ausgeschnitten werden. Je zwei Platten bilden die rechte und die linke Seite des Segels, das eine aerodynamisch günstige Form aufweist. Dazu werden die beiden Segelhälften verklebt.

#### EPS Schneidegerät

Mit speziellen Schneidegeräten können Formen aus EPS Platten geschnitten werden. Konventionelle EPS Schneidegeräte sind allerdings nicht genügend gross, um die vier Teile auszuschneiden, weshalb ein eigenes Schneidegerät gebaut werden muss. Alle EPS-Schneidegeräte funktionieren nach demselben Prinzip. Dabei wird ein Metalldraht auf 60° C - 100° C erhitzt und ins EPS gefahren, wo dieses lokal zum Schmelzen gebracht wird. Indem der Draht durch den EPS Körper gezogen wird, entsteht ein sauberer Schnitt. Der Draht wird dadurch erhitzt, dass an ihm eine elektrische Spannung gelegt wird. Der Draht bildet einen Widerstand und wird heiss. Der Draht ist so ausgelegt, dass er einen möglichst hohen Widerstand aufweist. Damit die vier grossen Segelteile als Ganzes aus EPS Blöcken geschnitten werden können, wird ein

## 7. HERSTELLUNG UND ZUSAMMENBAU

---

eigenes einfaches Schneidegerät mit entsprechenden Dimensionen gebaut. Dazu wird ein sogenannter «Widerstandsdraht» mit einem Durchmesser von  $\varnothing 0.2$  mm gekauft. Dieser wird dreifach verdrillt und daraus ein Schneidedraht mit einer Länge von 1.5 m erstellt. Die beiden Enden werden in einen u-förmigen Rahmen aus Tannenholzplatten gespannt. Als Stromquelle dient zunächst ein Labornetzteil, das 3 A bei 12 V liefert.

Die ersten Versuche, zunächst noch mit einem einfachen und anschliessend mit einem zweifachen Draht, verlaufen erfolglos. Erst als ein dreifach verdrillter Draht und ein stärkeres Labornetzteil, das 5 A bei 12 V liefert, verwendet wird, wird der Draht soweit aufgeheizt, dass damit EPS geschnitten werden kann.

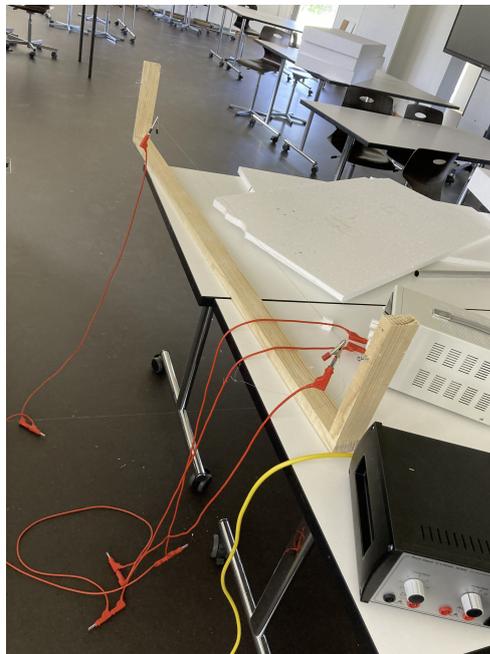
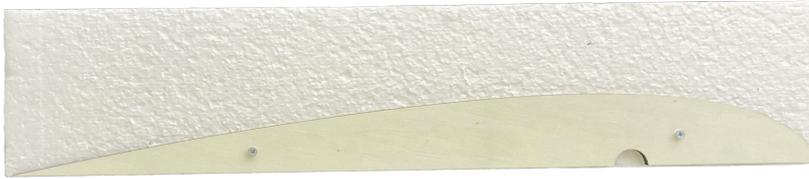


Abbildung 7.5: Foamcutter

### Grossegel

Um die geplante Form aus den EPS Platten schneiden zu können, wird zuerst mithilfe eines Lasercutters eine Halbprofilform aus Sperrholz erstellt. Je eine solche Halbprofilform wird mit zwei Schrauben an den beiden kürzeren Seiten einer EPS Platte befestigt. Der heisse Schneidedraht kann damit entlang der Kante der Halbprofilschablone durch den EPS Block gezogen werden. So entsteht ein halbes Segel mit der Form der Halbprofilschablonen.



**Abbildung 7.6:** Seitenansicht eines Elements mit der Schablone

Anschliessend muss auf der planen Seite des Halbsegelteils noch eine halbrunde Kerbe ausgeschnitten werden. In ihr findet bei der Verleimung der Platten der Aluminiummast Platz. Nicht jeder Schneideversuch verläuft erfolgreich. Wenn die beiden Enden des Schneiddrahtes nicht synchron über die Halbprofilform geführt werden oder wenn dieser nicht präzise gefolgt wird, weist der ausgeschnittene Körper erhebliche Formfehler auf. Auch bei einem an sich erfolgreichen Schnitt ergeben sich aber kleine Ungenauigkeiten, die aber mit einem Schliff des Bauteils korrigiert werden können.

Nachdem erfolgreich vier Profile ausgeschnitten worden sind, wird der Mast in die ausgesparte Kerbe gelegt und fixiert. Danach werden die vier Profile in Paaren verklebt. Im Bootskörper sind zwei Halterungen für den Mast vorgesehen, die ein Kugellager enthalten. Der Mast wird durch deren Öffnungen gesteckt und am Schluss in den Schleifring gesteckt.

### 7.1.6 Sailflap

Das Sailflap wird mit derselben Technik wie das Grosssegel hergestellt. Zu seiner Befestigung werden zwei Carbonstäbe verwendet, die am Grosssegel fixiert werden. Am unteren Stab wird der Aktuator befestigt, bevor das Sailflap mit den Carbonstäben fixiert wird. Zum Abschluss wird das Sailflap an der Welle des Aktuators befestigt.

## 7.2 Bemalung

Da das autonome Segelboot gut sichtbar sein soll, wird es in roter Signalfarbe bemalt. Dazu wird seidenmatter Acryllack verwendet, der mithilfe einer Farbwalze auf den Bootskörper aufgetragen wird. Es wurde bewusst eine matte Farbe gewählt, da diese kleine Ungenauigkeiten und Dellen in der Bootsform besser kaschiert als glänzende Farben.

Da das Ruder der Kiel und das Deck keine Schutzhülle aus glasfaserverstärktem Epoxidharz verfügen, hat die Farblackierung bei diesen Bauteilen auch eine Schutzfunktion.

Erst wenn die Farbe trocken ist, wird am Bug der Schiffsname *Panta Exo* aufgemalt. Dazu wird eine Schablone erstellt und verwendet.

### 7.3 Einbau der Elektronik

Als erstes wird ein digitaler Schaltplan mit allen Sensoren und Aktuatoren und Sensoren erstellt. Dieser dient als Bauanleitung für den Bau. Die für die Erstellung des Schaltplans notwendigen Informationen werden den Datenblättern der Geräte und Sensoren entnommen, in welchen ihre Funktionsweise beschrieben und die Betriebsweise erläutert wird.

#### 7.3.1 Raspberry Pi

Der Raspberry Pi Zero W 1.1 wird in einer kleinen Plastikbox festgemacht und dieses im Schiffskörper zwischen den Spanten 5 und 6 befestigt.

#### 7.3.2 Sensoren

Das GPS-Modul, sowie der Gyro und Magnetometer wird wie der Raspberry Pi Zero W 1.1 zwischen den Spanten 5 und 6 platziert. Der Windrichtungssensor wird zuvorderst auf dem Deck beim Bug platziert. Dazu wird seine Grundplatte mit der Deckplatte verleimt. Durch ein kleines Loch im Deck, das unter der Deckplatte des Windrichtungsmessers gebohrt wird, werden dessen Kabel in den Rumpf hinein und dann nach hinten zum Raspberry Pi Zero W 1.1 geführt.

#### 7.3.3 Aktuatoren

Der Aktuator für das Ruder wird am Heck des Bootes am Achtersteven befestigt. seine Welle wird mit dem Ruder verbunden. Das Ruder kann bis zu einem Winkel von etwa 60 Grad eingeschlagen werden. Der Einbau des zweiten Aktuators wird oben beim Bau des Sailflap beschrieben. Seine Steuerkabel werden durch das Gosssegel in den Mast und von dort durch den Schleifring in den Bootskörper geführt.

#### 7.3.4 Energieversorgung

Da der Akku relativ schwer ist, wird er zwischen den Spanten 6 und 7, also ziemlich genau am Längsschwerpunkt des Bootes platziert und am Boden des Bootsrumpfs befestigt. Da er unter der Wasserlinie zu liegen kommt, wird damit die Stabilität des Bootes gefördert. Das Solarpanel wird auf dem Deck vor dem Segel befestigt. Dazu werden die Ösen des Panels von Hacken festgehalten, die in der Deckplatte verschraubt werden.

# Verbesserungspotenzial und Ausblick

---

## 8.1 Verbesserungspotenzial

### 8.1.1 Rumpf

Bei einer Wiederholung des Bootsbaus würde die Konstruktion und der Bau des Rumpfes anders erfolgen. Das Verwenden von 3D- gedruckten Elementen hat sich beim Spitz als sehr erfolgreich herausgestellt. Daher würde bei einem zweiten Bau auf die Balsaholzbeplankung verzichtet und stattdessen möglichst lange und breite 3D-gedruckte Elemente verwendet werden. Diese würden mit der CAD Software entworfen und könnten dann in der idealen Form gedruckt werden. Damit würden Verspannungen im Holz und die daraus resultierenden Ungenauigkeiten vermieden, die im daran anschliessenden Arbeitsschritt der Beschichtung mit glasfaserverstärktem Epoxidharz sehr viel Arbeit verursacht hat und sehr zeitaufwendig war.

Sodann würden Spanten von geringerer Stärke aber in grösserer Zahl vorgesehen. Diese dünneren Spanten könnten dann sehr einfach mit dem Lasercutter erstellt werden.

### 8.1.2 Elektronik

Bei einer Wiederholung des Bootsbaus sollte für die Verkabelung der elektronischen Bauteile eine Platine individuell entworfen und bei einem Auftragsfertiger in Auftrag gegeben werden. Der Aufbau und die Fehlersuche würden damit enorm erleichtert. Auch könnte der Aufbau damit sehr viel ordentlicher vorgenommen werden.

Sodann sollte ein wasserdichtes Gehäuse entworfen und gebaut werden, in dem der Raspberry Pi Zero W 1.1, die Platine und der Pegelumsetzer Platz finden. Auch für den Energiespeicher und die Ladeelektronik sollte ein wasserdichtes Gehäuse entworfen und gebaut werden. Damit könnte

die Gefahr eines Kurzschlusses bei einem Wassereinbruch z. B. bei hohem Wellengang stark reduziert werden.

### 8.1.3 Segel

Bei einer Wiederholung des Bootsbaus sollten im Mast zwei Löcher zur Verankerung der Carbonrohre vorgesehen werden, an welchen das Sailflap montiert wird.

Die Oberfläche des Grossegels und des Sailflaps würde mit einer dünnen Schicht glasfaserverstärktem Epoxidharz geschützt.

### 8.1.4 Kiel

Bei einer Wiederholung des Bootsbaus sollte der Kiel aus Massivholzbrettern statt verleimten Platten aufgebaut werden, um die Gefahr eines Bruchs bei übermässigem Seitendruck oder einer Grundberührung weiter zu vermindern. Ausserdem sollte der Kiel mit einer dicken Schutzschicht aus glasfaserverstärktem Epoxidharz eingefasst und geschützt werden.

### 8.1.5 Ruder

Bei einer Wiederholung des Bootsbaus würde das Ruder nicht am Ende des Bootskörpers vorgesehen, sondern vollständig unter Wasser am Heck des Bootskörpers befestigt und über eine Welle bewegt werden, die den Bootsboden vertikal schneidet. Damit könnten für die Rudersteuerung ein einfacher und günstiger Servomotor im Schiffskörper montiert und betrieben werden. Der zuverlässigen Abdichtung der Wellendurchführung müsste dabei grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ausserdem würde das Ruder im 3D-Druckverfahren hergestellt.

## 8.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der autonomen Segelboote

Autonome Segelboote werden nie dieselbe Aufmerksamkeit wie autonome Landfahrzeuge auf sich ziehen.

Ihre Einsatzmöglichkeiten sind begrenzt. Diese finden sich vornehmlich in Nischen. Da Windstärke und Richtung auf absehbare Zeit nicht zuverlässig prognostiziert werden können, sind weder Reiserouten noch Reisezeiten autonomer Segelboote zuverlässig planbar oder auch nur annäherungsweise prognostizierbar. Das setzt einem kommerziellen Einsatz enge Grenzen. Eine weite Verbreitung autonomer Segelboote darf daher nicht erwartet werden.

Autonome Segelboote könnten aber beispielsweise im Monitoring von Gewässern ein wichtiges Instrument werden, um grosse Räume über längere Zeiträume

## 8.2. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der autonomen Segelboote

kostengünstig zu überwachen. Dabei ist zwischen dem maritimen Einsatz und dem Einsatz auf Binnengewässern zu unterscheiden.

Für den maritimen Einsatz werden sich deutlich grössere Boote als das im Rahmen dieses Projektes gebaute, durchsetzen. Solche eignen sich ideal für Monitoringaufgaben in abgelegenen Meeresgegenden wie dem Südpolarmeer oder Teilen des indischen und Pazifischen Ozeans., da sie ohne weiteres mehrere Monate oder gar wenige Jahre im autonomen Einsatz stehen können. Damit könnten beispielsweise Erkenntnisse über die Entwicklung von Fischpopulationen, die Wasserqualität oder Wassertemperatur, die Vermüllung, aber auch Wetterdaten gewonnen werden.

Der Einsatz von autonomen Booten der Grössenordnung wie in der vorliegenden Arbeit auf Schweizer Seen ist wenig wahrscheinlich, da diese von einer Vielzahl von Freizeitbooten befahren werden, die eine Gefahr für das autonome Segelboot darstellen. Viel eher ist an einen Einsatz solcher Boote auf den zahllosen Seen in den nordischen Ländern zu denken, die in sehr dünn besiedelten Gegenden liegen und bei denen kaum eine Infrastruktur vorhanden ist, die ein Monitoring auf andere Weise erlaubt.



## Kapitel 9

---

# Danksagung

---

Das Projekt hätte ohne die wertvolle Hilfe vieler Personen nicht realisiert werden können. Ausdrücklich hervorheben möchte ich:

- Thomas Zwick, mein Segellehrer, der mir als Fünfjährigen meine ersten Segelstunden erteilte. Er hat mich nicht nur zum Segeln gebracht, sondern mir für den Bau des Segelbootes in grosszügiger Weise seine Werkstatt zur Verfügung gestellt und mich zunächst in die Technik der Arbeit mit glasfaserverstärkten Kunststoffen eingeführt und danach bei diesen Arbeiten tatkräftig unterstützt hat.
- Dr. Carola Ebenhoch, meine Betreuerin und ehemalige Physiklehrerin, die mir bei dieser Arbeit sehr viel Freiraum eingeräumt und meine etwas waghalsige Idee, ein Segelboot von Grund auf zu entwerfen, konstruieren und zu bauen, mitgetragen hat.
- Raphael Barengo, ebenfalls Physiklehrer an der Kantonsschule Uetikon am See, der mir Zugang zu den 3D Druckern, dem Lasercutter und diversen anderen Werkzeugen in der Makerhall der Kantonsschule Uetikon am See ermöglicht hat.
- Samuel Achermann, mein Mathematiklehrer an der Kantonsschule Uetikon am See, der sich sogar in seinen Ferien Zeit genommen, mit mir Navigationsalgorithmen durchzudenken, und mir vor allem dabei geholfen hat, den Potential Fields Algorithmus zu verstehen.
- Gian-Andri Morf, MSc ETH Masch. -Ing., mein Cousin, von dem ich am Anfang des Projekts sehr viel zur Materialauswahl lernen konnte.
- Samuel Hasenfratz, Mitarbeiter und Ingenieur bei Tribecraft AG, Zürich, der mir nicht nur das spannende Unternehmen vorgestellt, sondern sich auch viel Zeit genommen hat, einige Herausforderungen, vor allem bezüglich der Navigation, die noch zu lösen waren, zu durchdenken oder gar eine Lösung zu finden.

## 9. DANKSAGUNG

---

- Meine Mutter, welche mich während des ganzen Projektes geduldigst unzählige Male in die Werkstatt gefahren und von dort wieder abgeholt hat.
- Mein Vater, den ich als Lektor missbrauchen durfte und der mich bei den rechtlichen Aspekten beraten hat.
- Distrelec Schweiz AG, Nänikon, die mein Projekt mit einer grosszügigen Sachspende in Form von elektronischen Bauteilen unterstützt haben.

---

## Literatur

---

- [1] *Autonomes Fahren*, de, Page Version ID: 237729438, Sep. 2023. Adresse: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Autonomes\\_Fahren&oldid=237729438](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Autonomes_Fahren&oldid=237729438) (besucht am 22. 10. 2023).
- [2] *Boot*, de, Page Version ID: 234401451, Juni 2023. Adresse: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Boot&oldid=234401451> (besucht am 22. 10. 2023).
- [3] C. Schröder und L. Hertel, «Development of a low-budget robotic sailboat», in *Robotic sailing 2013*, F. L. Bars und L. Jaulin, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 13–24, ISBN: 978-3-319-02276-5.
- [4] L. Giger, S. Wismer, S. Boehl, G.-A. Büsser, H. Erckens, J. Weber, P. Moser, P. Schwizer, C. Pradalier und R. Siegwart, «Design and construction of the autonomous sailing vessel AVALON», 6 p. 2009, Artwork Size: 6 p. Medium: application/pdf Publisher: ETH Zurich. DOI: [10.3929/ETHZ-A-010035784](https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010035784). Adresse: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/82243> (besucht am 27. 01. 2023).
- [5] T. Ingrassia, A. Mancuso, V. Nigrelli, A. Saporito und D. Tumino, «Parametric hull design with rational bézier curves and estimation of performances», *Journal of Marine Science and Engineering*, Jg. 9, Nr. 4, S. 360, 27. März 2021, ISSN: 2077-1312. DOI: [10.3390/jmse9040360](https://doi.org/10.3390/jmse9040360). Adresse: <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/4/360> (besucht am 23. 01. 2023).
- [6] C. Tretow, «Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat», 2017. Adresse: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115994840>.
- [7] A. G. d. Silva Junior, D. H. d. Santos, A. P. F. d. Negreiros, J. M. V. B. d. S. Silva und L. M. G. Gonçalves, «High-level path planning for an autonomous sailboat robot using q-learning», *Sensors*, Jg. 20, Nr. 6, S. 1550,

- Jan. 2020, Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s20061550](https://doi.org/10.3390/s20061550). Adresse: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/6/1550> (besucht am 17. 01. 2023).
- [8] L. Jaulin und F. Le Bars, «A simple controller for line following of sailboats», in *Robotic Sailing 2012*, C. Sauzé und J. Finnis, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 117–129, ISBN: 978-3-642-33083-4 978-3-642-33084-1. DOI: [10.1007/978-3-642-33084-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33084-1_11). Adresse: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33084-1\\_11](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33084-1_11) (besucht am 27. 01. 2023).
- [9] F. Plumet, H. Saoud und M.-D. Hua, «Line following for an autonomous sailboat using potential fields method», Juni 2013, S. 1–6. DOI: [10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607961](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607961).
- [10] (). The Microtransat Challenge, Adresse: <https://www.microtransat.org/mailling-list.php> (besucht am 26. 01. 2023).
- [11] *Saildrone: Real-time Ocean Data Solutions*. Adresse: <https://www.saildrone.com/> (besucht am 20. 10. 2023).
- [12] a. B. Redaktion, *BV-Grundsatz-Zulassung für innovatives Festsegel-Zusatzantriebssystem für große Kreuzfahrtschiffe*, de-DE, Apr. 2022. Adresse: <https://anbord.de/bv-grundsatz-zulassung-fuer-innovatives-festsegel-zusatzantriebssystem-fuer-grosse-kreuzfahrtschiffe/> (besucht am 22. 10. 2023).
- [13] *Stabilität (Schiffskörper)*, de, Page Version ID: 234861185, Juni 2023. Adresse: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stabilit%C3%A4t\\_\(Schiffsk%C3%B6rper\)&oldid=234861185](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stabilit%C3%A4t_(Schiffsk%C3%B6rper)&oldid=234861185) (besucht am 20. 10. 2023).
- [14] *Stabilität (Schiffskörper)*, de, Page Version ID: 234861185, Juni 2023. Adresse: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stabilit%C3%A4t\\_\(Schiffsk%C3%B6rper\)&oldid=234861185#Gewichtsstabilit%C3%A4t](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stabilit%C3%A4t_(Schiffsk%C3%B6rper)&oldid=234861185#Gewichtsstabilit%C3%A4t) (besucht am 20. 10. 2023).
- [15] *Metazentrische Höhe*, de. Adresse: <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/947654> (besucht am 22. 10. 2023).
- [16] *Schwertboot*, de, Page Version ID: 231823820, März 2023. Adresse: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schwertboot&oldid=231823820> (besucht am 22. 10. 2023).
- [17] *Seemannschaft*. Delius Klasing Verlag, 2019.
- [18] *Raspberry Pi*, de, Page Version ID: 238254773, Okt. 2023. Adresse: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Raspberry\\_Pi&oldid=238254773#Eigenschaften](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Raspberry_Pi&oldid=238254773#Eigenschaften) (besucht am 22. 10. 2023).

- [19] *Stromverbrauch des Raspberry Pi Zero W (mit WLAN und Bluetooth) gemessen*, de. Adresse: <https://www.bitblokes.de/stromverbrauch-des-raspberry-pi-zero-w-mit-wlan-und-bluetooth-gemessen/> (besucht am 22.10.2023).
- [20] *Magnetometer*, de, Page Version ID: 237734499, Sep. 2023. Adresse: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetometer&oldid=237734499> (besucht am 22.10.2023).
- [21] *Hall-Sensor*, de, Page Version ID: 236923357, Aug. 2023. Adresse: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Hall-Sensor&oldid=236923357> (besucht am 22.10.2023).
- [22] *Alles über Hall-Effekt-Sensoren — RS Components*. Adresse: <https://at.rs-online.com/web/content/discovery-portal/produktatgeber/hall-sensoren-leitfaden> (besucht am 22.10.2023).
- [23] *Was ist ein Encoder - einfach erklärt*, de. Adresse: <https://www.kc-co.com/de/glossar/encoder/> (besucht am 22.10.2023).
- [24] J. Janisch, *Understanding Integrated Hall Effect Rotary Encoders*, en, Nov. 2006. Adresse: <https://www.fierceelectronics.com/components/understanding-integrated-hall-effect-rotary-encoders> (besucht am 22.10.2023).
- [25] *Aktor*, de, Page Version ID: 230162438, Jan. 2023. Adresse: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Aktor&oldid=230162438> (besucht am 22.10.2023).

---

## Abbildungsverzeichnis

---

4.1 Krängung . . . . .	11
4.2 Lage des Gewichtsschwerpunkt (G), Auftriebsschwerpunkt (B) und Metazentrum (M) bei aufrechtem sowie gekrängtem Boot . . . . .	12
4.3 Hebelarmkurve . . . . .	13
4.4 Gewichtsstabilität durch Ballastkiel . . . . .	13
4.5 Formstabilität . . . . .	14
4.6 Topansicht des Boots . . . . .	18
4.7 Seitenansicht mit Steven . . . . .	19

4.8	Heckansicht . . . . .	19
4.9	Fläche zur Montage des Kiels . . . . .	20
4.10	Schnittbild Hohlkörper . . . . .	20
4.11	Spantenansicht . . . . .	21
4.12	Spanten 5, 6 und 7 . . . . .	21
4.13	Bugspitz . . . . .	22
4.14	Abbild der Spanten und des Spitzes in Verbindung . . . . .	23
4.15	Segelform von Tretwo aus Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat . . . . .	23
4.16	Sailflap Befestigungsteile . . . . .	24
4.17	Fertiger Kiel . . . . .	26
4.18	Aktuator Befestigung . . . . .	27
5.1	Raspberry Pi Zero . . . . .	30
5.2	GPS Modul . . . . .	31
5.3	GPS Modul - Oberseite . . . . .	31
5.4	GPS Modul - Unterseite . . . . .	32
5.5	Gyro und Magnetometer . . . . .	33
5.6	AS5040-ASST mit Adapter Board . . . . .	35
5.7	Windflügel . . . . .	35
5.8	Bodenplatte um das Adapterplättchen richtig zu positionieren . . . . .	36
5.9	Kompletter Windrichtungssensor . . . . .	36
5.10	Actuonix Aktuator . . . . .	38
5.11	Pegelumsetzer . . . . .	38
5.12	Pi Juice Solarpanel . . . . .	41
5.13	EVE ICR18650/26V Litium-Ionen Zelle . . . . .	43
5.14	Selbstgebauter Akku . . . . .	44
5.15	TechnoIT BMS . . . . .	44
5.16	Ladeelektronik-Schaltkreis . . . . .	45
5.17	LM2596 Spannungswandler . . . . .	46
5.18	Walfont-fcbw9hvekm Boost Converter . . . . .	46
6.1	Vektordarstellung des Windes . . . . .	48
6.2	Visualisierung der beiden möglichen Pfade . . . . .	51
6.3	Matplotlib Visualisierung des Algorithmus . . . . .	52
6.4	Sailflap Visualisierung . . . . .	55
7.1	Rippenförmige Anordnung der Tragelemente . . . . .	58
7.2	Bruch eines Elements . . . . .	59
7.3	Fertiger Einbau des Ruders . . . . .	60
7.4	Fertiger Kiel . . . . .	61
7.5	Foamcutter . . . . .	62
7.6	Seitenansicht eines Elements mit der Schablone . . . . .	63
A.1	Schaltplan Bordelektronik . . . . .	76

Anhang A

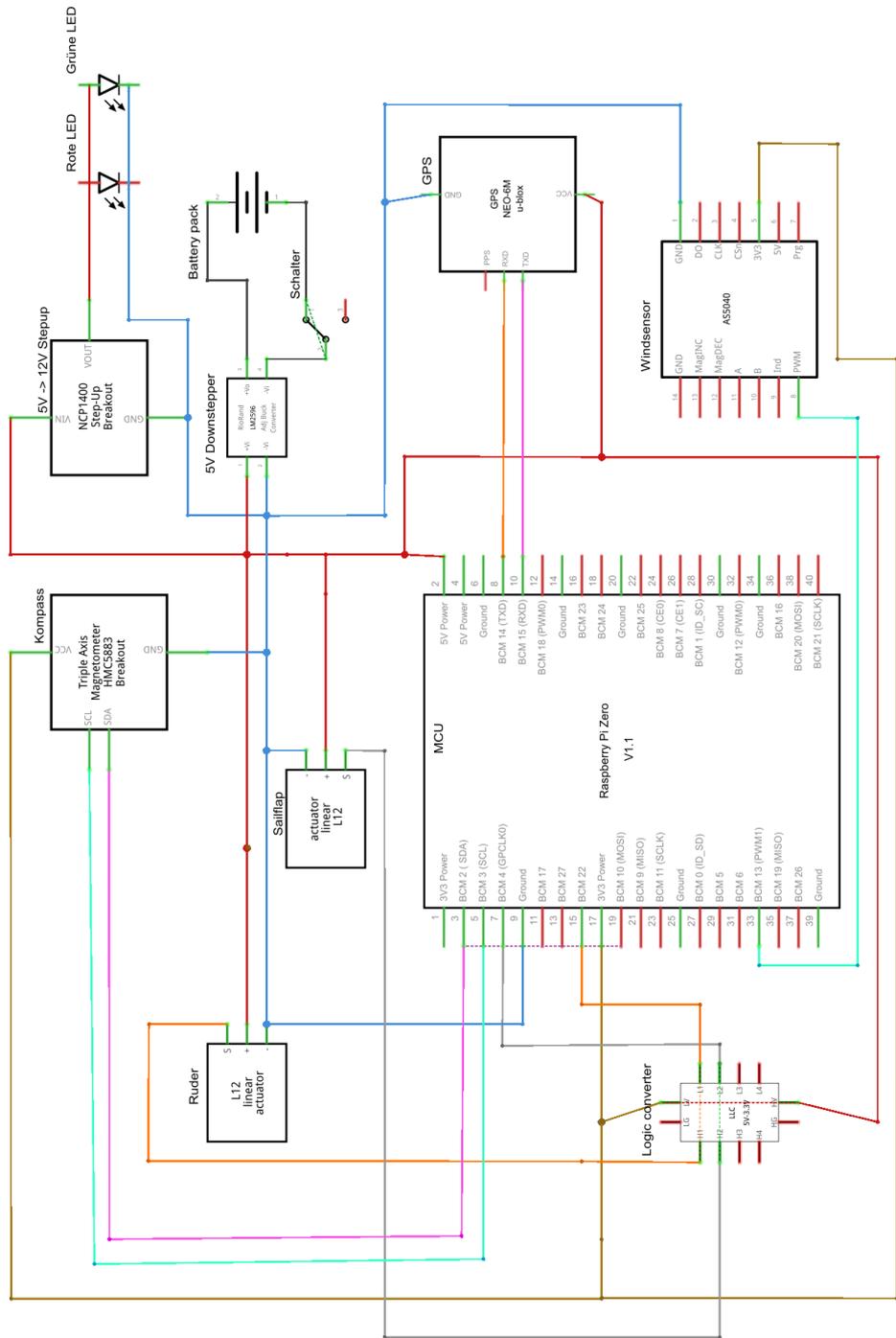
---

## Schaltplan

---

Auf der Folgeseite ist der Schaltplan aufgeführt. Er wird in «fritzing» erstellt und beinhaltet alle elektrische Komponenten, welche im Boot verbaut sind.

# A. SCHALTPLAN



fritzing

Abbildung A.1: Schaltplan Bordelektronik

## Anhang B

---

# Algorithmus

---

---

### Algorithm 1 Berechne neuen Kurs

---

```
1: function BERECHNENEUENKURS( $\vec{v}_{\text{Boot}}, \vec{v}_{\text{Wind}}, \vec{v}_{\text{Ziel}}$ )
2:   Skalarprodukt  $\leftarrow \vec{v}_{\text{Wind}} \cdot \vec{v}_{\text{Boot}}$ 
3:    $\text{neuerKurs} \leftarrow \vec{v}_{\text{Ziel}}$ 
4:   if Skalarprodukt  $< -0.8$  then
5:     if  $\vec{v}_{\text{Wind}} \cdot \vec{v}_{\text{Ziel}} > -0.8$  then
6:        $\text{neuerKurs} \leftarrow \vec{v}_{\text{Ziel}}$ 
7:       return NORMALISIERE( $\text{neuerKurs}$ )
8:     end if
9:      $n \leftarrow 0$ 
10:    while  $\vec{v}_{\text{Wind}} \cdot \text{neuerKurs} < -0.8$  und  $n < 1$  do
11:       $n \leftarrow n + 0.1$ 
12:       $\text{neuerKurs1} \leftarrow \vec{v}_{\text{Ziel}} + n \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_{\text{Ziel}}$ 
13:       $\text{neuerKurs2} \leftarrow \vec{v}_{\text{Ziel}} + n \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_{\text{Ziel}}$ 
14:      if  $\text{neuerKurs1} \cdot \vec{v}_{\text{Ziel}} > \text{neuerKurs2} \cdot \vec{v}_{\text{Ziel}}$  then
15:         $\text{neuerKurs} \leftarrow \text{neuerKurs1}$ 
16:      else
17:         $\text{neuerKurs} \leftarrow \text{neuerKurs2}$ 
18:      end if
19:    end while
20:    return NORMALISIERE( $\text{neuerKurs}$ )
21:  end if
22: end function
```

---



# ■ Kantonsschule Uetikon am See

## Redlichkeitserklärung

Name Niggli Vorname Georg Klasse 6c

Titel der Arbeit Entwurf, Konstruktion und Bau eines autonomen Segelboots

---

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit gemäss dem KUE-Reglement verfasst habe, das heisst im Besonderen:

- Ich habe diese Arbeit selbständig verfasst.
- Alle Hilfsmittel, die ich verwendet habe, sind angegeben.
- Alle wörtlichen und sinngemässen Übernahmen aus anderen Werken sind als solche gekennzeichnet.
- Personen, die einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben (Betreuer/-in ausgenommen), habe ich ebenfalls erwähnt.

Datum 21.10.2023

Unterschrift

*Georg Niggli*