

# Diplomarbeit

## Ausleihexemplar

Name: <b>Kaminski</b>	Vorname: <b>Jan</b>
Studiengang: Maschinenbau und Produktion	vorgelegt am: 21.02.2012
Erstprüfer: <b>Prof.Dr.-Ing. Victor Gheorghiu</b>	Zweitprüfer: <b>Dipl-Ing. Siegfried Prust</b>
Thema:  <p style="text-align: center;"><b>" Auslegung und Optimierung der Antriebsanlage einer ferngelenkten / autark operierenden Seezieldarstellungsdrohne"</b></p>	



## **Abstract**

Diese Diplomarbeit behandelt die

Auslegung und Optimierung der Antriebsanlage einer ferngelenkten / autark operierenden Seezieldarstellungsdrohne.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Auswahl eines geeigneten Antriebsmotors für den Prototypen der Drohne. Dafür werden drei verschiedene Verbrennungsmotoren ausgewählt und näher betrachtet. Nach einer Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Motorvarianten soll der für den Prototypen der Drohne am besten geeignete Motor bestimmt werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Erstellung eines Konzeptes für die Installation eines Wasserstrahlantriebes und die dafür notwendigen Umbaumaßnahmen am Rumpf der Drohne.

## **Danksagung**

Diese Diplomarbeit stellt den Abschluss meines Maschinenbaustudiums an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg dar.

Mein Dank gilt der Firma Röderpräzision.

Insbesondere möchte ich Dip.-Ing Ralf Kaiser und Dipl.-Ing. Mirko Erbse für ihre Unterstützung danken.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht und mich während dieser Zeit auf vielfältige Weise unterstützten.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	i
Tabellen Verzeichnis .....	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Die Firma Röder Präzision.....	1
1.2 Drohnen-Projekte der Firma Röder Präzision.....	3
1.3 Vorstellung der Drohne Sea Skitty I.....	3
1.3.1 Militärische Aufgabenbereiche .....	4
1.3.2 Zivile Aufgabenbereiche.....	4
1.4 Technische Daten des Prototypen von Sea Skitty I.....	5
2 Motorauswahl.....	6
2.1 Wankelmotor LCR-814 TGti:.....	6
2.1.1 Funktionsprinzip des Wankelmotors.....	8
2.1.2 Vor- und Nachteile des Wankelmotors .....	10
2.2 Zweizylinder Reihen-Ottomotor.....	11
2.2.1 Weber MPE 750.....	13
2.2.2 Vor- und Nachteile des Weber MPE 750 TC.....	15
2.3 Dreizylinder Dieselmotor .....	15
2.3.1 DMV-Marine-Dieselmotor Typ 3R 030 TE 61.....	16
2.3.2 Vor- und Nachteile des DMV-Marine-Dieselmotors.....	17
2.4 Ermittlung des bestgeeigneten Motors.....	17
3 Antriebsanlage.....	19
3.1 Funktionsweise des Wasserstrahlantriebs .....	20
3.1.1 Der Ansaugvorgang.....	21
3.1.2 Der Impeller.....	21
3.1.3 Der Stator .....	22
3.1.4 Die Schubdüse .....	23
3.1.5 Die Steurdüse.....	25
3.1.6 Die Schubumkehrklappe .....	25
3.1.7 Ansteuerung des Jet-Antriebs .....	27
3.2 Vorteile des Jetantriebs .....	28
3.3 Nachteile des Jetantriebs.....	29

4	Erforderliche Umbaumaßnahmen.....	30
4.1	Der Rumpf.....	30
4.2	Einbau des Einlasskanals.....	33
4.3	Montage des Motors.....	34
4.4	Luft einlass.....	36
4.5	Kühlsystem.....	37
4.6	Abgasanlage.....	38
4.7	Kraftstoffversorgung.....	38
4.8	Lenzsystem.....	39
4.8.1	Automatisches Lenzsystem.....	39
5	Stromversorgung und Elektronik.....	39
5.1	Sicherheitsschaltung.....	40
5.2	Beleuchtung.....	41
6	Sonstige Ausrüstung.....	41
6.1	Schleppeinrichtung.....	41
6.2	Feuerlöschsystem.....	42
7	Navigation.....	43
7.1	Ferngesteuerte Navigation.....	43
7.2	Autonome Navigation.....	44
8	Ausblick.....	44
9	Literatur.....	45

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zweiseiben-Wankelmotor <sup>[1]</sup> .....	9
Abbildung 2 : Funktionsprinzip des Wankelmotors <sup>[4]</sup> .....	10
Abbildung 3 : Schematische Darstellung des Viertaktverfahrens <sup>[5]</sup> .....	11
Abbildung 4 :Zylinderanordnungen von Hubkolbenmotoren <sup>[3]</sup> .....	12
Abbildung 5 : Webermotor MPE 750 TC <sup>[8]</sup> .....	14
Abbildung 6: Weber Jet 148 <sup>[6]</sup> .....	20
Abbildung 7 : Blick auf den Impeller des Weber Jet 148 <sup>[8]</sup> .....	22
Abbildung 8 : Stator <sup>[9]</sup> .....	23
Abbildung 9: Kontinuitätsgleichung einer Stromröhre <sup>[10]</sup> .....	24
Abbildung 10: Rumpf mit und ohne Gleitstufe .....	30
Abbildung 11 : Kasten für Jet-Antrieb .....	31
Abbildung 12: ride plate und Schutzgitter <sup>[11]</sup> .....	32
Abbildung 13 : Rumpf mit eingebautem Kasten und Jet-Antrieb .....	32
Abbildung 14 : CAD-Modell Einlasskanal .....	33
Abbildung 15 : Einbauposition des Motors, Seitenansicht .....	35
Abbildung 16: Einbauposition des Motors, Bugansicht .....	35
Abbildung 17 : Aufbau mit Schlepphaken .....	42

## Tabellen Verzeichnis

Tabelle 1:Technische Daten von Sea Skitty .....	5
Tabelle 2:Technische Daten LCR – 814 TGti <sup>[1]</sup> .....	7
Tabelle 3 Technische Daten Weber MPE 750 TC <sup>[6]</sup> .....	14
Tabelle 4: Technische Daten DMV-Marine-Dieselmotor Typ 3R 030 TE 61 <sup>[7]</sup> .....	16
Tabelle 5: Tabellarische Bewertung der Motorvarianten .....	18

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Firma Röder Präzision



Die Firma Röder Präzision GmbH wurde 1922 als Zylinderschleiferei für Automobil Motoren gegründet. Das Unternehmen spezialisierte sich auf die Wartung und Instandsetzung von Luftfahrzeugmotoren und Luftfahrzeugbauteilen.

Das Unternehmen beschäftigt an den Standorten Egelsbach, Frankfurt, Frankfurt-Hahn und Alsfeld rund 300 Mitarbeiter.

Heute ist Röder Präzision als einziger Betrieb in Deutschland in der Lage, die vollständige Wartung an kolbengetriebenen Flugzeugen bis 5,7t Abfluggewicht durchzuführen. Es werden Flugmotoren und deren Nebenaggregate, Flugzeugstrukturen, die Avionik sowie Propelleranlagen grundüberholt und repariert. Desweiteren werden die turnusmäßig vorgeschriebenen Wartungsarbeiten an Luftfahrzeugen durchgeführt.

Das Unternehmen verfügt über eine eigene, große Galvanik-Abteilung in der unter anderem Teile für verschiedene Luftfahrthersteller oberflächenveredelt werden.

In den 1960er Jahren wurde Röder Präzision zu einem der ersten Instandhaltungsbetriebe der deutschen Luftwaffe.

Der militärische Bereich macht heute etwa 50% des Unternehmensumsatzes aus. Es werden unter anderem Enteisungsanlagen des Hubschraubers CH53, des Marinehubschraubers Sea Lynx und des Jagdbombers Tornado instandgesetzt. Desweiteren werden die Fahrwerke des Tornado, der Phantom sowie kleinere Hydraulikteile überholt. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Instandsetzung von Groß-Propeller-Anlagen.

Röder Präzision ist ein von der EASA (Europäische Luftfahrt Behörde) zugelassener Instandhaltungs-, Entwicklungs- und Herstellungsbetrieb.

Der Entwicklungsbetrieb unterstützt vor allem die Flugzeugwartung bei kleinen und großen Spezialumbauten und entwickelt Änderungen an militärischen Luftfahrzeugbauteilen.

Seit etwa 2 Jahren werden mit Unterstützung einer großen deutschen Fluglinie diverse LED Beleuchtungselemente für Luftfahrzeuge entwickelt.

Seit Mitte 2009 beschäftigt sich die Entwicklungsabteilung mit der Entwicklung und Konstruktion von fliegenden und schwimmenden Zieldarstellungsdrohnen.



## **1.2 Drohnen-Projekte der Firma Röder Präzision**

Da in den letzten Jahren der Bedarf an ferngelenkten und autonom operierenden Drohnen weltweit stark angestiegen ist, hat die Entwicklungsabteilung der Firma Röder Präzision GmbH im Jahr 2009 damit begonnen, fliegende Drohnen mit einer maximalen Abflugmasse von 30 kg zu entwickeln. Es wurde ein Rumpf entwickelt, der je nach Motorisierungs- und Tragflächenvariante als Zieldarstellungs- oder Überwachungsdrohne eingesetzt werden kann.

Hervorgehend aus den Ereignissen der jüngeren Vergangenheit, in der die Piraterie und der Terrorismus auf den Weltmeeren stark anstiegen ist, entstand der Gedanke, neben den fliegenden Drohnen auch eine schwimmende Version zu entwickeln.

Als Grundlage für dieses Projekt wird ein ursprünglich von der Firma Veers Elektronik + Meerestechnik GmbH & Co. KG entwickelter Rumpf verwendet.

## **1.3 Vorstellung der Drohne Sea Skitty I**

Bei dem USV (unmanned surface vehicle) Sea Skitty I handelt es sich um ein unbemannt operierendes Überwasserfahrzeug, das sowohl ferngelenkt als auch mit Hilfe eines Autopiloten autonom operieren kann.

Der Rumpf des Prototyps von Sea Skitty I wird vom Vorgängerprojekt Seewiesel I übernommen und an das neue Antriebskonzept angepasst. Sea Skitty I ist für verschiedene zivile und militärische Zwecke vorgesehen.

### **1.3.1 Militärische Aufgabenbereiche**

Zu den denkbaren Anwendungsmöglichkeiten im militärischen Bereich gehören z.B.:

- Das Schleppen von Zieldarstellungskörpern
- Objektüberwachung
- Aufklärung
- Feinderkennung/Abwehr
- Terroristen/Piraten Abwehr
- Materialtransport z.B. für Kampftaucher und Spezialeinheiten
- mobile Marker-/Sonarboje

### **1.3.2 Zivile Aufgabenbereiche**

Zusätzlich ist auch eine Vielzahl von zivilen Anwendungen denkbar. Möglich wären Aufgaben wie:

- Die Überwachung der Sicherheit von Hafenanlagen, Küstengebieten, Bohr- und Förderplattformen sowie Staumauern.
- Überwachung der Gewässerqualität z.B. Entnahme und Analyse von Wasserproben.
- Vermessung von Gewässern z.B. mit Hilfe von Sonar und GPS.
- Schleppen von Sonar Geräten, z.B. für die Suche nach Wracks.
- Seenotrettung (SAR)

## 1.4 Technische Daten des Prototypen von Sea Skitty I

Die Technischen Daten von Sea Skitty werden in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Technische Daten von Sea Skitty**

Länge	3300 mm
Breite	650 mm
Gesamthöhe (ohne Antenne)	1000 mm
Tiefgang	ca. 400 mm
Gesamtgewicht	ca. 300 kg
vorgesehene Geschwindigkeit	Je nach Motorisierung ca. 35 - 60 Kn
Steuerung	Manuell / Autopilot

## 2 Motorauswahl

Das USV Sea Skitty I soll von einem Viertakt-Verbrennungsmotor angetrieben werden. Aufgrund der sehr eingeschränkten Platzverhältnisse im Rumpf ist bei der Auswahl eines geeigneten Motors, vor allem auf die Breite, die Höhe und das Gewicht zu achten. Dabei sollte der Motor jedoch eine möglichst hohe Leistung bereitstellen, um die geforderten Fahreigenschaften zu ermöglichen. Es werden im Folgenden drei verschiedene Motorisierungsvarianten vorgestellt und näher betrachtet.

Die Motoren werden mit dem Ziel verglichen, eine Empfehlung für das am besten geeignete Motorisierungskonzept auszusprechen.

### 2.1 Wankelmotor LCR-814 TGti:

Bei dem für Sea Skitty I in Frage kommende Wankelmotor handelt es sich um einen nicht aufgeladenen Zweischeiben-Läufer der Firma Wankel AG (Abbildung 1).

Der Motor LCR-814 TGti wird überwiegend als Antrieb von Ultraleicht- und Kleinflugzeugen eingesetzt. Der Motor ist flüssigkeitsgekühlt und eignet sich somit auch für den Einsatz in anderen Fahrzeugen.

Die technischen Daten des Motors können Tabelle 2, entnommen werden.

Der Motor ist mit einer kennfeldgesteuerten Saugrohr- Benzin- Einspritzanlage und einer elektronischen Doppelzündanlage ausgestattet. Letztere soll für eine bessere Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches sorgen. Gleichzeitig sorgt die doppelte Auslegung des Zündsystems für eine Redundanz der Zündanlage und erhöht somit die Betriebssicherheit des Motors.

Tabelle 2: Technische Daten LCR - 814 TGti [1]

Modell	LCR - 814 TGti
Bauart	Zweiläufer Einspritzmotor
Maße [mm] L x B x H l x b x h	600 x 462 x 430 523 x 280 x 285
Gewicht [kg] Motor Getriebe Elektrik	35,0 6,5 4,5
Leistung [kW(PS)] bei Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	55 (75) 6000
Drehmoment [Nm] bei Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	90 4000
Hubraum [ $\text{cm}^3$ ]	814
Spez. Verbrauch [g/kWh]	300
Kraftstoff	Normalbenzin, bleifrei / Mogas(ROZ 92) oder 1:80-Gemisch
Schmierung	Standart-2-Takt-Öl (API-TC)
Motorsteuerung	WANKEL tric-injection mit integrierter Zündanlage
Elektroanlasser	12 V / 900 W
Generator	14 V / 200 W
Bilder	Bilder
Lieferumfang	Motor mit Elektroanlasser, kennfeldgesteuerte Einspritzanlage mit Doppelzündung, Generator, Luftfilter,
Zubehör	Edelstahl Auspuffanlage, Wasserkühler, 3:1-HDT-Zahnriemen- Untersetzungsgetriebe

### 2.1.1 Funktionsprinzip des Wankelmotors

Bei einem Wankelmotor handelt es sich um einen Kreiskolbenmotor. Der Motor besitzt einen gleichseitig-dreieckförmigen Kolben mit konvexen Kanten, der in einer trochoidenförmigen Kammer auf einem Exzenter der Antriebswelle um den Exzentermittelpunkt rotiert. Ein am Motorgehäuse befestigtes Ritzel kämmt mit dem Innenrad im Kolben<sup>[2]</sup>. Der Kolben teilt den Brennraum in drei Kammern auf, in denen der Arbeitsprozess abläuft. Während der Drehung des Kolbens ändert sich das Volumen der Kammern ständig. Der Motor arbeitet nach dem Viertakt-Ottomotor-Prinzip. Die Funktionsweise des Wankelmotors wird in Abbildung 2 veranschaulicht. Das frische Luft/Kraftstoffgemisch gelangt durch seitliche oder am Umfang liegende Schlitze in den Brennraum und wird dort durch die vom Kolben verursachte Volumenänderung verdichtet und dann verbrannt. Der Motor benötigt eine Umdrehung des Kolbens, um alle vier Arbeitsschritte auszuführen. Dieses Arbeitsspiel vollzieht sich in allen drei Kammern gleichzeitig. Bei jeder vollen Umdrehung des Kolbens erfolgen somit drei Zündungen<sup>[3]</sup>. Dadurch kommt es zu einem sehr ruhigen Lauf und einer gleichmäßigen Entfaltung des Drehmomentes. Der Vorteil dieses Antriebes liegt in seiner sehr kompakten und leichten Bauweise.

Bei der Entwicklung des Wankelmotors stellte sich jedoch die Abdichtung zwischen Brennraum und Kolben als größtes Problem heraus.

Da im Bereich der Dichtlippen kontinuierlich etwas Schmieröl in die Brennkammern gelangt, stellt der Ölverbrauch einen weiteren Nachteil des Wankelmotors dar.

Das Problem der Abdichtung wurde inzwischen durch die geschickte Kombination von verschiedenen Materialien bzw. Legierungen weitestgehend gelöst.

Dadurch konnte auch der Ölverbrauch auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

Der Wankelmotor hat außerdem den Nachteil, dass die Abgaswerte deutlich schlechter sind und der spezifische Verbrauch höher ist als bei einem modernen Hubkolbenmotor. Dies liegt unter anderem daran, dass aufgrund der für die Verbrennung nicht optimalen Brennkammerform keine vollständige Verbrennung des Kraftstoff/ Luft Gemisches möglich ist. Die Flammfront kann sich nicht schnell genug in der Brennkammer ausbreiten, um die spitz zulaufenden Enden des Brennraums zu erreichen.

In diesen Bereichen bleiben daher nicht oder nur unvollständig verbrannte Kohlenwasserstoffe übrig, die mit dem Abgas entweichen. Zudem wird kontinuierlich etwas Motoröl, das über die Dichtung in den Brennraum gelangt mit verbrannt.

Das Problem der unvollständigen Verbrennung lässt sich bis zu einem gewissen Grad durch ein doppelt ausgelegtes Zündsystem und eine Direkteinspritzung kompensieren.

Üblicherweise werden Wankelmotoren nach dem Otto-Prinzip betrieben. Es ist jedoch auch möglich sie als Dieselmotor zu bauen. Dabei tritt allerdings das Problem auf, dass eine extrem hohe Aufladung des Motors nötig ist, um die für die Selbstzündung erforderlichen hohen Kompressionsdrücke zu erzielen. Bei hohen Kompressionsdrücken kommt dann wieder die Problematik der Brennraumabdichtung zum tragen.

Um die Leistung des Wankelmotors zu erhöhen ist es möglich zwei oder mehr Drehkolben hintereinander zu bauen.

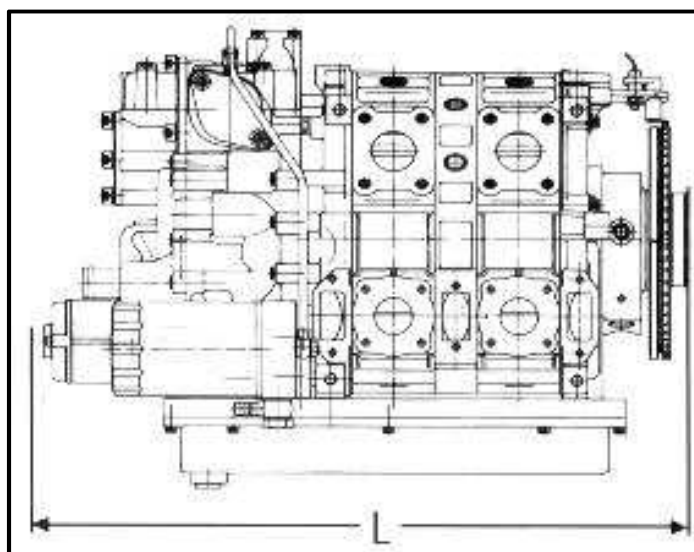


Abbildung 1: Zweiseiben-Wankelmotor<sup>[1]</sup>

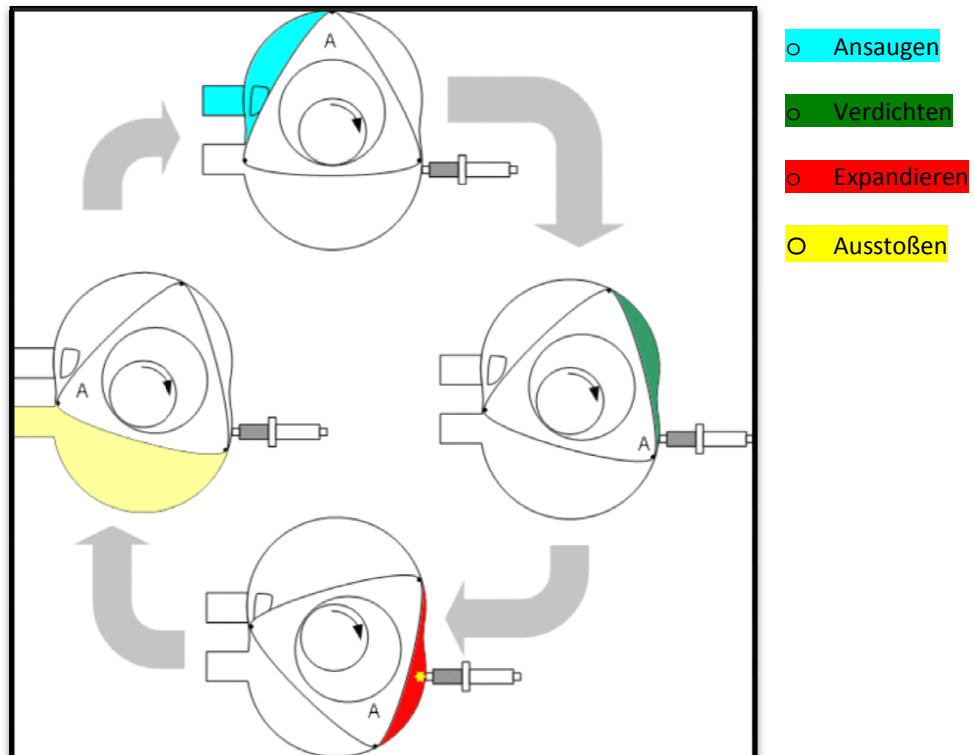


Abbildung 2 : Funktionsprinzip des Wankelmotors<sup>[4]</sup>

## 2.1.2 Vor- und Nachteile des Wankelmotors

Vorteile des Wankelmotors LCR - 814 TGti

- Sehr kompakte Baugröße
- Geringes Gewicht
- Ruhiger Motorlauf
- Gleichmäßige Entfaltung des Drehmomentes
- Doppelte Zündanlage

Dagegen stehen jedoch folgende Nachteile:

- Verhältnismäßig hoher spezifischer Kraftstoffverbrauch
- Niedriges Drehmoment
- Schlechte Abgaswerte
- Ölverbrauch



## 2.2 Zweizylinder Reihen-Ottomotor

Als zweite mögliche Motorisierungsvariante für das Projekt Sea Skitty wurde ein Zweizylinder-Reihen-Motor, der nach dem Viertaktverfahren arbeitet, ausgesucht.

Beim Viertaktverfahren erstreckt sich ein Arbeitspiel bestehend aus Ansaugen, Verdichten, Verbrennen/Expandieren und Ausschleiben des Gasgemisches über vier Kolbenhübe (Abbildung 3).

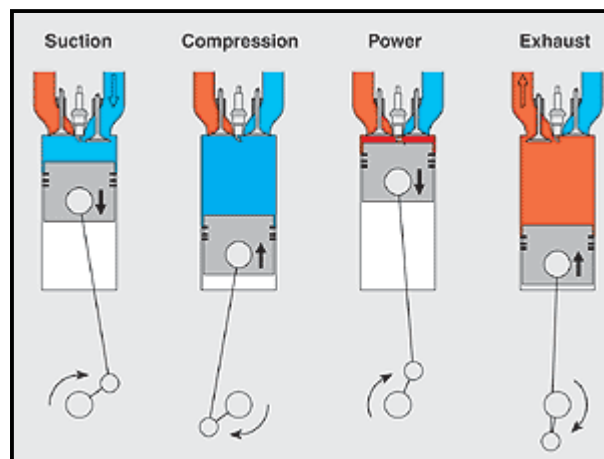


Abbildung 3 : Schematische Darstellung des Viertaktverfahrens<sup>[5]</sup>

Bei dem ausgewählten Motor handelt es sich um einen Ottomotor. Der Ottomotor ist ein Verbrennungsmotor, bei dem die Verbrennung des verdichteten Kraftstoff-Luft-Gemisches durch zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird.<sup>[3]</sup>

Im Gegensatz zum Wankelmotor handelt es sich bei diesem Motor um einen Hubkolbenmotor.

Bei dieser Bauart, die heutzutage am häufigsten verwendet wird, führen die Kolben in den Zylindern eine oszillierende Bewegung aus.

Die Hin- und Herbewegung des Kolbens wird durch einen Kurbeltrieb, bestehend aus Pleuelstange und Kurbelwelle, in eine Rotationsbewegung umgewandelt (Abbildung 3).

Bei der Anordnung der Zylinder gibt es eine Reihe verschiedener Bauformen (Abbildung 4), von denen sich einige Standardbauformen wie zum Beispiel die Reihen-, V-, Boxer-, und die Sternanordnung durchgesetzt haben.

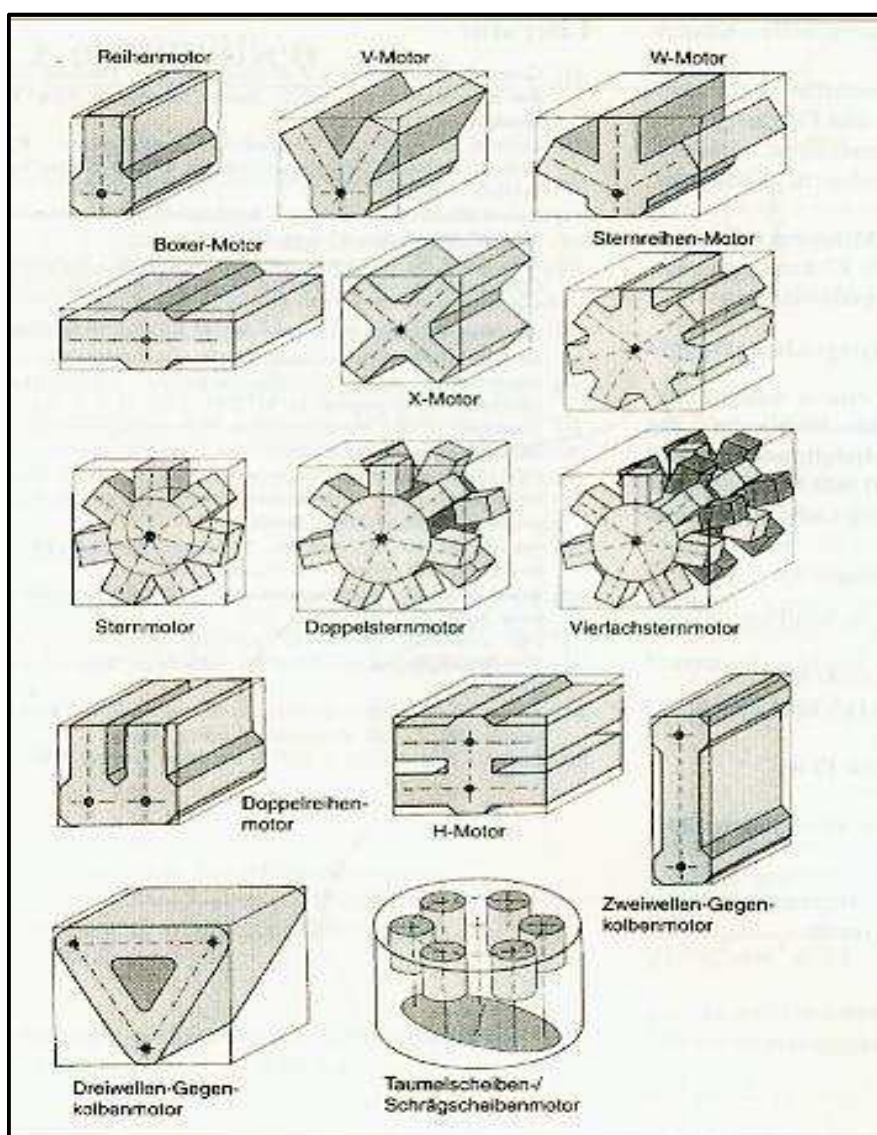


Abbildung 4 :Zylinderanordnungen von Hubkolbenmotoren<sup>[3]</sup>

### 2.2.1 Weber MPE 750

Der Motor MPE 750 der Firma Weber (Abbildung 5) ist ein nach dem Downsizing Prinzip entwickelter 2-Zylinder Reihen-Ottomotor. Er ist sehr variabel einsetzbar und kommt in einer Vielzahl von unterschiedlichen Fahrzeugen wie z.B. Jetski, Schneemobilen, Quads, Motorbooten, Leichtflugzeugen usw. zur Anwendung.

Der Motor wird mit und ohne Turbolader in verschiedenen Leistungsklassen von 60 bis 135 Ps angeboten und zeichnet sich durch einen niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauch aus.

Aufgrund der mittig zwischen den Zylindern liegenden Steuerkette für den Ventiltrieb ist es möglich, mit wenig Aufwand den Zylinderkopf um 180° zu drehen. Dadurch lassen sich Ein- und Auslassbereich problemlos an die vorhandenen Platzverhältnisse anpassen.

Der Motor ist mit einer Trockensumpfschmierung ausgestattet, wodurch sich eine sehr geringe Bauhöhe ergibt.

Für den Prototypen von Sea Skitty I kommt die Variante MPE 750 TC mit 76KW /104 Ps und einem maximalen Drehmoment von 112 Nm in Betracht ( Tabelle 3).

Der Motor ist mit einem Abgasturbolader und einem seewassergekühlten Ladeluftkühler ausgestattet.

Die Firma Weber bietet diesen Motor in einer Marinevariante als fertige „plug and play“<sup>[6]</sup> Einbaueinheit an.

Da der vorhandene Bauraum im Rumpf der Drohne vor allem in der Breite und der Höhe sehr begrenzt ist, kann diese fertige Motoreinheit jedoch nicht zum Einsatz kommen.

Um den Motor dennoch ohne große zusätzliche Umbaumaßnahmen in den Rumpf zu integrieren, ist es notwendig die Positionen der Einzelkomponenten wie zum Beispiel den Öltank, den Ladeluft- sowie den Ölkühler individuell an den vorhandenen Bauraum anzupassen.

Der Motor ist mit einem Ein- oder Zweikreiskühlsystem erhältlich.



Abbildung 5 : Webermotor MPE 750 TC [8]

Tabelle 3 Technische Daten Weber MPE 750 TC [6]

	Marine	
Variante	MPE 750 TC	
Länge	726 mm	
Breite	588 mm	
Höhe Naßsumpf	560 mm	
Höhe Trockensumpf	585 mm	
Gewicht	86 kg mit Starter/Gen.	89 kg mit Starter/Gen.
Leistung	76 kW 104 PS @ 7000 1/min	99 kW 135 PS @ 7250 1/min
Drehmoment	112 Nm @ 5000 1/min	134 Nm @ 5000 1/min
Verdichtung	9,0:1	9,0:1
Vorteile	Signifikant erhöhte Reichweite gegenüber traditionellen Marinemotoren Erheblich erhöhte Nutzlast bei kleinen Booten Erhöhung der nutzbaren Fläche im Boot Einzige "Plug-and-play-Lösung" am Markt Quantensprung im Emissionsverhalten	

### 2.2.2 Vor- und Nachteile des Weber MPE 750 TC

Zu den Vorteilen des Motors Weber MPE 750 TC gehören:

- Sehr hohe Leistung bei geringem Gewicht und wenig Hubraum)
  - Downsizing Konzept
- niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauch
- niedrige Emissionswerte
- Hohe maximale Drehzahl (von Vorteil bei Verwendung eines Wasserstrahlantriebs)
- Ruhiges Laufverhalten
- Sehr anpassungsfähig an verschiedene Einsatzbereiche
- Für Marineanwendungen vorbereitet und erprobt
- Trockensumpfschmierung
- Erhältlich mit Ein- oder Zweikreiskühlsystem

Zu den Nachteilen des Motors gehören:

- Im Vergleich zum Wankelmotor ist ein größerer Bauraum notwendig.
- Höheres Gewicht als der Wankelmotor

### 2.3 Dreizylinder Dieselmotor

Als dritte mögliche Motorisierungsvariante wurde ein Dreizylinder-Reihen-Dieselmotor, der ebenfalls nach dem Viertakt-Verfahren arbeitet, ausgewählt. Im Gegensatz zum Ottomotor entzündet sich beim Dieselmotor der in den Verbrennungsraum eingespritzte flüssige Kraftstoff an der Luftladung, nachdem diese vorher durch Verdichtung auf eine für die Einleitung der Zündung hinreichend hohe Temperatur gebracht worden ist [8].<sup>[3]</sup>

### 2.3.1 DMV-Marine-Dieselmotor Typ 3R 030 TE 61

Bei dem DMV-Marine-Dieselmotor Typ 3R 030 TE 61 handelt es sich um einen von der Firma DMV für Marineanwendungen umgerüsteten Mercedes-Benz OM 606 Dieselmotor, der normalerweise im Pkw „Smart“ verwendet wird. Der Motor ist mit einem Common-Rail-Einspritzsystem sowie einem Turbolader mit Ladeluftkühlung ausgestattet.

Da der Motor größtenteils aus Aluminium hergestellt wird hat er im Vergleich zu anderen Dieselmotoren ein sehr niedriges Gewicht.

Er ist mit einem Zwei-Kreis-Kühlsystem, das mit einem Titanplatten-Wärmetauscher arbeitet, ausgerüstet.

Der Motor erreicht eine Leistung von maximal 30 kW / 40 PS und ein Drehmoment von maximal 100 Nm (Tabelle 4).

Tabelle 4: Technische Daten DMV-Marine-Dieselmotor Typ 3R 030 TE 61 <sup>[7]</sup>

Modell	DMV-Marine-Dieselmotor Typ 3R 030 TE 61
Zylinderzahl	3
Zylinderanordnung	Reihenmotor
Länge	1020 mm
Breite	500 mm
Höhe	600 mm
Hubvolumen	800 ccm
Max. Leistung	30 kW (ca. 40 PS) bei 3500 1/min
Max. Drehmoment	100 Nm bei n = 1700 - 2800 U/min
Verbrennungsluftzufuhr	Abgasturbolader mit Ladeluftkühler
Gewicht:	solo 85 kg
Marinisierung	22 kg

### 2.3.2 Vor- und Nachteile des DMV-Marine-Dieselmotors

Vorteile des DMV-Marine-Dieselmotors Typ 3R 030 TE 61 :

- Geringer Kraftstoffverbrauch
- Hohes Drehmoment
- Geringes Gewicht durch Aluminiumbauweise
- Für Marineanwendung optimiert
- Zweikreiskühlsystem
- niedrige Abgaswerte

Nachteile des Motors:

- Geringe Leistung
- Niedrige maximale Drehzahl (bei Verwendung eines Wasserstrahlantriebs ist ein Getriebe erforderlich)
- Keine Trockensumpfschmierung
- Ungünstig geformte Ölwanne, dadurch große Höhe (im PKW ist der Motor schräg eingebaut)

## 2.4 Ermittlung des bestgeeigneten Motors

Um den für Sea Skitty I am besten geeigneten Antriebsmotor auszuwählen, werden die oben genannten Vor- und Nachteile der Motoren gegeneinander aufgewogen. Um dies zu veranschaulichen werden in Tabelle 5 die wichtigsten Beurteilungskriterien aufgeführt und bewertet.

Dabei steht:           + für gut  
                              0 für neutral  
                              – für negativ

Tabelle 5: Tabellarische Bewertung der Motorvarianten

	Wankel LCR - 814 TGti	Weber MPE 750 TC	DMV-Marine- Dieselmotor
Breite	++	+	+
Höhe	++	0	-
Gewicht	++	+	+
Leistung	0	++	-
Drehmoment	-	++	++
Drehzahl	+	++	-
Verbrauch	-	++	++
Kraftstoff	0	0	+
Abgaswerte	-	+	++
Kühlsystem	0	+	+
Schmiersystem	-	+	-

Der Wankelmotor bietet gegenüber den zwei anderen Motorvarianten den enormen Vorteil, dass er das geringste Gewicht und die kleinsten Abmessungen besitzt.

Jedoch ist er den anderen Motoren in den übrigen Bewertungskriterien weitestgehend unterlegen.

Der DMV Dieselmotor ist zwar eigentlich gut geeignet für den Antrieb von Sea Skitty I, er ist jedoch von den drei ausgewählten Motoren der Leistungsschwächste. Diesen Faktor könnte er allerdings über sein hohes Drehmoment zum Teil kompensieren.

Aufgrund seiner niedrigen maximalen Drehzahl müsste zusätzlich ein Getriebe eingebaut werden, um die, für den vorgesehenen Jet-Antrieb (Abbildung 6) nötigen, hohen Drehzahlen zu erreichen.

Ein weiterer Nachteil des Motors liegt in seiner Bauhöhe. Um diese zu reduzieren, müsste entweder eine spezielle Ölwanne angefertigt werden, oder der Motor müsste auf eine Trockensumpfschmierung umgerüstet werden. Beides wäre mit zusätzlichem Entwicklungs- und Bauaufwand und so mit höheren Kosten verbunden.



Der Webermotor bietet von den drei ausgewählten Motoren das größte Leistungsspektrum. Er hat bei einer höheren Leistung und einem geringeren Gewicht ein vergleichbares Drehmoment wie der Dieselmotor und ist von seinem Drehzahlbereich optimal auf den vorgesehenen Jet-Antrieb ( Abbildung 6) abgestimmt.

Der Motor ist serienmäßig mit einer Trockensumpfschmierung und einem Zweikreis-Kühlsystem lieferbar.

Aufgrund der oben genannten Vorteile und seiner hohen Flexibilität, fällt die Beurteilung der drei betrachteten Motorenvarianten zu Gunsten des Weber MPE 750 TC aus.

Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschriebenen erforderlichen Umbaumaßnahmen werden auf der Grundlage des ausgewählten Motors Weber MPE 750 TC beschrieben.

### **3 Antriebsanlage**

Für den Bau des Prototypen ist bereits ein Rumpf inklusive Aufbauten vorhanden. Dieser wurde vom Vorgängerprojekt Seewiesel I übernommen und soll an die neu gestellten Anforderungen angepasst werden.

Der vorhandene Rumpf ist mit einer festen Schraubenanlage und einem separaten Ruderblatt ausgestattet.

Dieses Antriebskonzept hat jedoch einige Schwachpunkte.

Zum Beispiel ist das Manövrieren mit einem Ruderblatt bei langsamer Fahrt schwierig, da das Ruder bei geringer Anströmung einen schlechten Wirkungsgrad aufweist.

Durch den bei Schiffsschrauben stark ausgeprägten „Radeffekt“ und eine schlechte Ruderwirkung ist ein kontrolliertes Manövrieren bei Rückwärtsfahrt mit der Drohne nur schwer bis gar nicht möglich.

Ein weiterer Schwachpunkt ist der relativ große Tiefgang und die daraus resultierende Gefahr einer Beschädigung der Antriebsanlage.

Als Antrieb von Sea Skitty I soll zukünftig ein Wasserstrahlantrieb der Firma Weber verwendet werden. Die Funktionsweise sowie die Vor- und Nachteile des Wasserstrahlantriebes (auch Jet-Antrieb genannt) werden im Folgenden näher erläutert.

### 3.1 Funktionsweise des Wasserstrahlantriebs

Bei einem Wasserstrahlantrieb (Abbildung 6) im folgenden auch Jet-Antrieb genannt, handelt es sich im Prinzip um eine Axial-Pumpe.

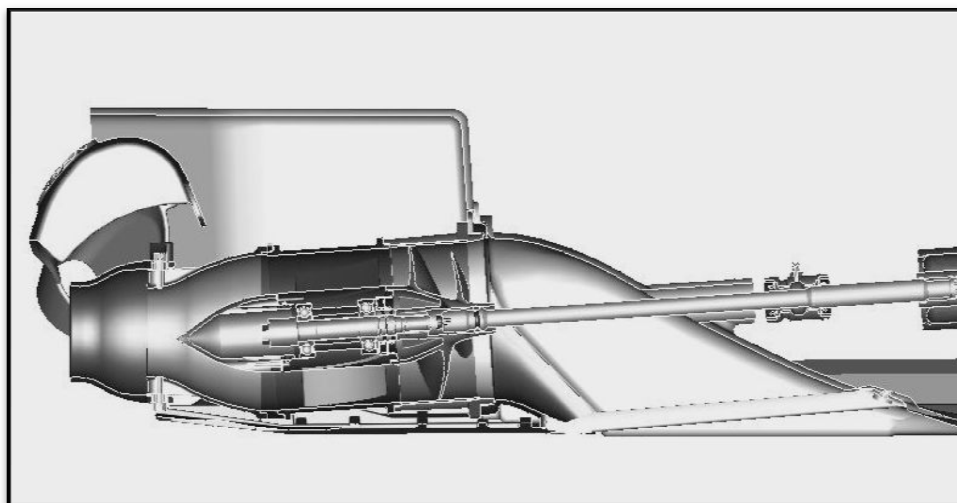


Abbildung 6: Weber Jet 148 [6]

Das Wasser wird durch eine Einlassöffnung im Rumpf mit Hilfe eines Impellers angesaugt und durch eine Düse am Heck des Schiffes beschleunigt und ausgestoßen. Dadurch entsteht ein Impuls, der das Fahrzeug in entgegengesetzte Richtung beschleunigt. Die Lenkung wird durch eine Steerdüse, die sich nach links und rechts schwenken lässt ermöglicht. Durch diese Ausführung der Lenkung wird das Fahrzeug sehr wendig und reagiert auch bei geringer Fahrt sehr direkt auf Lenkimpulse.

Die Rückwärtsfahrt wird durch eine Schubumkehrklappe ermöglicht, die den Wasserstrahl unter dem Rumpf nach vorne umlenkt. Die Umlenkklappe muss so gestaltet werden, dass der Wasserstrahl nicht wieder von der Jetpumpe angesaugt werden kann, da sich dadurch der Wirkungsgrad erheblich verschlechtern würde.

Mit Hilfe der Umlenkklappe ist es möglich, den Wasserstrahl senkrecht nach unten zu lenken. In diesem Zustand bleibt das Fahrzeug bewegungslos auf der Stelle stehen. Daher kann auf eine schaltbare Kupplung verzichtet werden.

### **3.1.1 Der Ansaugvorgang**

Um eine große Menge Wasser möglichst verlustarm ansaugen zu können, sollte die Ansaugöffnung strömungsgünstig geformt und angeordnet werden. Ziel ist es einen stetigen, möglichst laminaren Wasserstrom in Richtung des Impellers zu leiten. Um das Ansaugen von Luft zu verhindern, darf die Strömung an der Ansaugöffnung zu keinem Zeitpunkt abreißen.

Das einströmende Wasser wird durch den Ansaugkanal in Richtung des Impellers geleitet. Dabei verjüngt sich der Kanaldurchmesser auf den Durchmesser des Impellers.

Normalerweise wird die Ansaugöffnung mit einem Gitter geschützt, um das Eindringen von Gegenständen zu verhindern.

### **3.1.2 Der Impeller**

Beim Impeller handelt es sich um ein Laufrad, welches das Wasser durch den Ansaugkanal ansaugt. Das Laufrad versetzt das Wasser im Gegensatz zu einer klassischen Schiffsschraube weniger in Schub, als vielmehr in Rotation.

Aus diesem Grund ist es nicht wie eine klassische Schiffsschraube geformt, sondern lässt sich eher mit einer Förderschnecke vergleichen ( Abbildung 7). Um Verluste zu reduzieren, sollte der Spalt zwischen dem Laufrad und dem Gehäuse so gering wie möglich gehalten werden.



Abbildung 7 : Blick auf den Impeller des Weber Jet 148 <sup>[8]</sup>

### 3.1.3 Der Stator

Der Stator besteht aus einem Leitrad, dessen Aufgabe es ist, die im Drall gespeicherte Energie in eine gerichtete, möglichst drallfreie Strömung umzulenken und sie somit zu beschleunigen.

Das Leitrad ist fest mit dem Gehäuse des Jetantriebes verbunden und besteht, bei kleineren Antrieben meist aus vier, bei größeren auch aus mehr, symmetrisch angeordneten Leitrad-schaufeln (Abbildung 8).

Die Krümmung der Leitrad-schaufeln ist so geformt, dass ein möglichst sauberer Strömungsübergang von Lauf- zu Leitrad ermöglicht wird. Der Abstand zwischen Lauf- und Leitrad sollte, um Verluste zu vermeiden, so gering wie möglich gehalten werden.

Wie in Abbildung 6 ersichtlich dient die Nabe des Leitrades zur Aufnahme der Lagerung für die Antriebswelle. Die Welle des Weber Jet 148 wird durch zwei Wälzlager, von denen eines als Fest- und das andere als Loslager ausgelegt ist, gelagert. Gegen eindringendes Wasser werden die Lager durch einen Wellen-Dichtring geschützt.



Abbildung 8 : Stator<sup>[9]</sup>

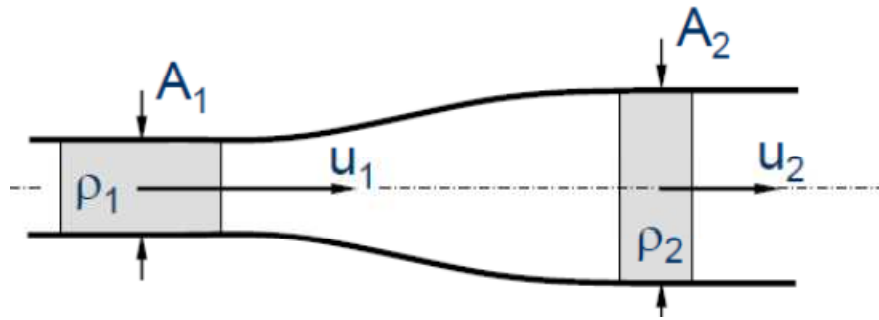
### 3.1.4 Die Schubdüse

Das Wasser strömt hinter dem Stator durch eine Düse, die es weiter beschleunigt.

Der Durchmesser der Austrittsöffnung der Düse ist etwa 20-30% kleiner als der Durchmesser des Impellers. Da Wasser nicht kompressibel ist, es aber trotz der Querschnittsverjüngung am Ende der Düse wieder ausströmen muss, wird es auf die Düsenaustrittsgeschwindigkeit beschleunigt. Dieser Effekt wird durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben.

Die Kontinuitätsgleichung für inkompressible Fluide sagt aus, dass bei konstanter Dichte  $\rho$  der Massenstrom, der in eine Stromröhre eintritt, an deren Ende auch wieder austreten muss.

Da sich in der Düse der Querschnitt verjüngt bedeutet dies, dass sich, um die Kontinuitätsgleichung zu erfüllen, die Strömungsgeschwindigkeit erhöhen muss.



Kompressible Fluide

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 U_1 = \rho_2 A_2 U_2 = \text{const}$$

Inkompressible Fluide ( $\rho = \text{const}$ )

Abbildung 9: Kontinuitätsgleichung einer Stromröhre<sup>[10]</sup>

Somit entsteht am Austritt der Düse ein drallfreier Wasserstrahl mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit. Das ausströmende Wasser erzeugt einen Impuls, der das Fahrzeug in entgegengesetzter Richtung beschleunigt. Dieser Vorgang wird durch das dritte Newtonsche Axiom beschrieben:

Actio et Reactio

Eine gewisse Drehzahl des Laufrades sollte nicht überschritten werden, da es bei einem zu großen Druckabfall an den Laufradschaufeln zu Kavitation kommen kann.

Bei auftretender Kavitation bilden sich in Folge des Druckabfalls Dampfblasen an der Schaufeloberfläche. Durch diese Dampfblasen kommt es zu einem sehr hohen Materialverschleiß, durch den die Laufradschaufeln in kürzester Zeit beschädigt, beziehungsweise zerstört werden können. Bei einer herkömmlichen Schiffsschraube kommt es allerdings schon bei deutlich niedrigeren Drehzahlen zu Kavitation, als bei einem Jet-Antrieb.

### 3.1.5 Die Steuerdüse

Das Boot wird mit Hilfe einer Schubvektorsteuerung gelenkt. Dafür ist hinter der Schubdüse zusätzlich eine seitlich drehbare Steuerdüse montiert. Sie kann lediglich in einem Winkel von ca. +/- 30° verstellt werden. Da jedoch der gesamte Wasserstrahl und somit der Impuls umlenkt wird, ist das Boot dennoch äußerst wendig und sehr direkt steuerbar.

### 3.1.6 Die Schubumkehrklappe

Da ein Jetantrieb nur in eine Strömungsrichtung funktioniert, ist es nicht möglich, wie bei einem herkömmlichen Schraubenantrieb, für die Rückwärtsfahrt die Drehrichtung der Schraube einfach umzukehren. Um mit dem Fahrzeug dennoch rückwärts fahren zu können wird am Jetantrieb eine Schubumkehrklappe installiert.

Diese Klappe lässt sich in den Wasserstrahl fahren und ist so geformt, dass sie den Strahl und somit den Impuls um etwa 180° in die entgegengesetzte Fahrtrichtung umlenkt.

Dabei ist es wichtig, dass der umgelenkte Strahl nicht wieder in die Ansaugöffnung gerät, da sonst ein sogenannter Schubrückschlag auftreten kann. In diesem Fall kann es dazu kommen, dass der aufgesaugte Wasserstrahl in der Summe einen Schub von Null ergibt.

Um einen ungewollten Schubrückschlag zu vermeiden, ist es möglich den Wasserstrahl in zwei Hälften aufzuteilen, um ihn links und rechts an der Ansaugöffnung vorbeizuleiten. Je nach Hersteller werden dafür verschiedene konstruktive Lösungen, die größtenteils patentrechtlich geschützt sind, verwendet.

Der Effekt des Schubrückschlages kann jedoch auch gezielt genutzt werden. Zum Beispiel ist es möglich den Effekt bei einer bestimmten Klappenstellung in Verbindung mit einer bestimmten Motordrehzahl hervorzurufen und so das Fahrzeug auf der Stelle verharren zu lassen. Dadurch wird im Leerlauf eine große Schubleistung bereitgestellt, die in eine hohe Anfahrbeschleunigung umgesetzt werden kann.

Der Vorteil der Schubumkehr besteht darin, dass das Boot während der Rückwärtsfahrt sehr manövrierfähig bleibt. Diese Manövrierfähigkeit wird zum einen durch die direkte Lenkung mit Hilfe der Steerdüse ermöglicht, zum anderen entfällt bei einem Jetantrieb der sogenannte „Radeffekt“, der bei klassischen Schraubenantrieben auftritt. Dabei handelt es sich um ein, durch die Drehung der Schraube erzeugtes Moment um die Hochachse, das eine Drehung des Bootes um selbige verursacht. Bei Vorwärtsfahrt ist dieser Effekt durch die Richtungsstabilität des Rumpfes im Allgemeinen nicht spürbar, bei der Rückwärtsfahrt wird die Manövrierfähigkeit jedoch stark beeinträchtigt. Mit der Schubumkehrklappe und der Steerdüse ist eine sehr gute Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs gewährleistet.

Da eine Drehrichtungsumkehr des Impellers für die Rückwärtsfahrt nicht notwendig ist, kann auf ein entsprechendes Getriebe und eine schaltbare Kupplung verzichtet werden. Dadurch wird eine erhebliche Gewichtseinsparung erreicht.

Die Schubumkehrklappe lässt sich auch bei voller Antriebsleistung betätigen, ohne Schäden an der Antriebslage zu verursachen. Dadurch ist es möglich, das Fahrzeug auf kürzester Distanz zu stoppen. Jet-Boote haben im Allgemeinen einen Bremsweg aus voller Fahrt von etwa 1,5- 2 Bootslängen. Um einer solchen Belastung standhalten zu können, sollte die Klappe entsprechend stabil ausgelegt werden.

Beim Weber Jet 148 kommt eine Schubumkehrklappe, die am Statorgehäuse des Jet-Antriebs installiert ist, zum Einsatz. Die Klappe ist so geformt, dass der Wasserstrahl in zwei Hälften geteilt an der Ansaugöffnung vorbeigeleitet wird. Bei Steuerbewegungen der Düse wird entsprechend auf einer Seite mehr und auf der anderen Seite weniger Wasser umgelenkt. Dadurch kommt es zu einer Drehung des Rumpfes um die Hochachse.

Eine Besonderheit ist dabei jedoch, das im Vergleich zu herkömmlichen Antriebssystemen spiegelverkehrte Steuerverhalten. Das heißt, wenn die Steerdüse z.B. nach rechts gedreht wird, erfolgt die Bewegung des Rumpfes nach links.

Bei einer Steuerung der Drohne mit Hilfe einer Fernsteuerung oder des Autopiloten wäre es möglich, die Lenkbewegung des Servomotors elektronisch umzukehren. Damit wäre eine Bedienung der Drohne gewährleistet, die keine große Umstellung des Bedienpersonals erfordert.



Die Schubumkehrklappe des Weber-Jet 148 ist, um eine hohe Bauteilfestigkeit zu gewährleisten, aus Aluminiumguss hergestellt. Daraus resultiert jedoch ein relativ hohes Bauteilgewicht.

Denkbar wäre es, die Klappe bei einer späteren Version von Sea Skitty I aus GFK oder CFK herzustellen, um so bei gleichen Festigkeitswerten das Gewicht zu reduzieren und die Form der Umlenkklappe optimal an die Erfordernisse des Rumpfes anzupassen.

### 3.1.7 Ansteuerung des Jet-Antriebs

Für die Bedienung der Steurdüse und der Schubumkehrklappe kommen verschiedene Systeme in Frage.

- Eine Möglichkeit ist es, die Anlenkung der Komponenten mit Hilfe eines Hydrauliksystems vorzunehmen.  
Die Kraftübertragung würde in diesem Fall mit Hilfe von Hydraulikzylindern vorgenommen.  
Der Vorteil ist, dass sich die Zylinder sehr präzise und schnell betätigen lassen und so eine feinfühlige Steuerung des Jet-Antriebs möglich ist.  
Dafür muss jedoch ein System bestehend aus Pumpe, Flüssigkeitstank, Steuer-Ventilen, Hydraulikleitungen und Zylindern installiert werden.
- Eine zweite Möglichkeit wäre es die Kraftübertragung mit Hilfe von Bowdenzügen, Steuerstangen oder Steuerseilen zu realisieren.  
Die Bowdenzüge würden in diesem Fall von elektrischen Servomotoren, wie z.B. Getriebemotoren, mit einem Hebelarm für die Kraftübertragung oder mit Hilfe von Spindelantrieben betätigt werden.  
Der Vorteil dieser Bauart läge unter anderem darin, dass das System weniger komplex und demzufolge auch weniger stör anfällig ist als die Hydraulikvariante.  
Von Nachteil könnte jedoch die schlechtere/ geringere Kraftübertragung der Bowdenzüge sein.  
Die Bowdenzüge müssen außerdem möglichst gerade verlegt werden, da sonst die Kraftübertragung durch erhöhte Reibung verschlechtert wird.

- Die dritte Möglichkeit ergibt sich aus einer Kombination der beiden erstgenannten Systeme.  
In diesem Fall könnte die Ansteuerung von einem Getriebemotor auf einen Hydraulikzylinder erfolgen. Die Kraft würde dann über eine Hydraulikleitung an einen Arbeitszylinder, der die Düse / Klappe betätigt, weiter geleitet werden.

### 3.2 Vorteile des Jetantriebs

Der für die Drohne vorgesehene Wasserstrahlantrieb hat gegenüber der ursprünglich installierten, festen Schrauben- und Ruderanlage eine Reihe von Vorteilen. Dazu gehören z.B.:

- Die Schubvektorsteuerung ermöglicht eine sehr direkte Steuerung. Diese ist insbesondere bei langsamer Fahrt und Manövern auf engem Raum von Vorteil, da das ursprünglich vorgesehene Ruderblatt bei geringer Anströmung einen sehr schlechten Wirkungsgrad hat.
- Das Fahrverhalten bei Rückwärtsfahrt wird erheblich verbessert, da der sogenannte Radeffekt, der bei klassischen Schraubenantrieben auftritt, entfällt.
- Der Jetantrieb ermöglicht dem Fahrzeug eine sehr hohe Beschleunigung und ein ruhiges Fahrverhalten.
- Durch die Schubumkehrklappe kann auf ein Rückwärtsganggetriebe und eine schaltbare Kupplung verzichtet werden. Dadurch lässt sich einiges an Gewicht, Platz und Kosten einsparen.
- Es ist möglich bei voller Fahrt in den Rückwärtsgang zu schalten, ohne Motor, Kupplung oder Getriebe zu beschädigen. Dadurch wird ein extrem kurzer Bremsweg erreicht.
- Durch das fehlende Getriebe und den im Rumpf liegenden Antrieb ist die Geräuschemission sehr gering. Zu hören sind in erster Linie die vom Motor verursachten Geräusche.

- Durch die geschlossene Bauweise wird die Verletzungsgefahr und die Gefahr, dass Gegenstände wie z.B. die Schleppleine in die Antriebsanlage geraten und diese beschädigen minimiert.
- Durch die im Rumpf liegende Bauweise wird die Gefahr einer Beschädigung der Antriebsanlage durch Grundberührung vermieden und es ist möglich in sehr flachen Gewässern zu operieren.

### 3.3 Nachteile des Jetantriebs

Zu den Nachteilen des Jetantriebs gehören z.B.:

- Der aufwendigere Einbau, da der Rumpf mit einem Ausschnitt, in den der Einlasskanal einlaminiert wird, versehen werden muss. Es wäre allerdings möglich, den Einlasskanal beim Laminierten des Rumpfes von vornherein mit einzuarbeiten.
- Der Jet hat ein höheres Gewicht als die herkömmliche Schraubenanlage. Dieses Gewicht wird jedoch durch den Wegfall des Getriebes und der Kupplung wieder ausgeglichen.
- Bei langsamer Fahrt ist eine relativ hohe Impeller Drehzahl nötig um ausreichenden Schub zu erzeugen, wodurch es in diesem Betriebszustand möglicherweise zu einer höheren Geräuschemission kommen könnte.
- Der Jet-Antrieb hat bei hoher Geschwindigkeit einen sehr guten Wirkungsgrad. Dieser wird aber mit abnehmender Geschwindigkeit schlechter. Dadurch ist der Antrieb zum Schleppen von schweren Gegenständen bei langsamer Fahrt nur bedingt geeignet.

## 4 Erforderliche Umbaumaßnahmen

Alle für den Umbau erstellten CAD-Zeichnungen wurden mit dem Programm Solid Works 2011 angefertigt.

### 4.1 Der Rumpf

Der Rumpf von Sea Skitty I ist als Gleitrumpf und somit für hohe Geschwindigkeiten ausgelegt.

Er wird in Faserverbundbauweise aus Epoxidharz mit Glasfasergewebe in einer Form laminiert. Zusätzlich wird der Rumpf mit einer Kohlefaserarmierung verstärkt.

Der für den Umbau vorhandene Rumpf verfügt über eine sogenannte Gleitstufe. Diese Stufe soll den Rumpfwiderstand in der Gleitphase reduzieren. Dies wird durch ein Luftpolster, das sich hinter der Stufe ausbildet, erreicht (Abbildung 10, oben). Diese Technik kommt häufig bei Rennbooten und Schwimmern von Wasserflugzeugen zur Anwendung. Bei letzteren soll das Luftpolster das Lösen der Schwimmer von der Wasseroberfläche während der Startphase erleichtern.

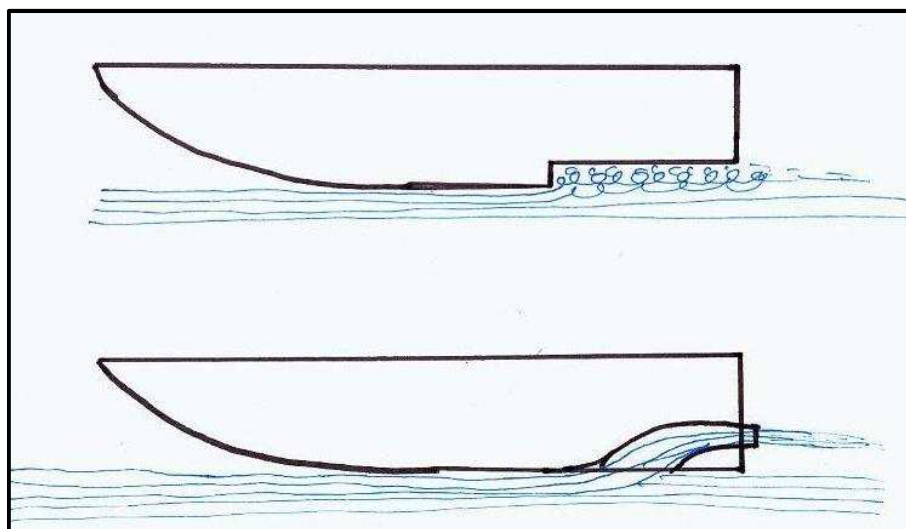


Abbildung 10: Rumpf mit und ohne Gleitstufe

Für das Antriebskonzept mit einem Jetantrieb ist eine Gleitstufe im Rumpf jedoch nicht geeignet. Die Öffnung des Einlasskanals für den Jetantrieb würde sich unmittelbar hinter der Gleitstufe befinden, wodurch der Jet unweigerlich Luft ansaugen würde. Dadurch würde die Funktion der Jet-Pumpe schwer beeinträchtigt und es würde zu einem Schubverlust und einer Beschädigung der Antriebsanlage kommen.

Aus diesem Grund muss die Gleitstufe im Zuge der Umbaumaßnahmen entfernt werden.

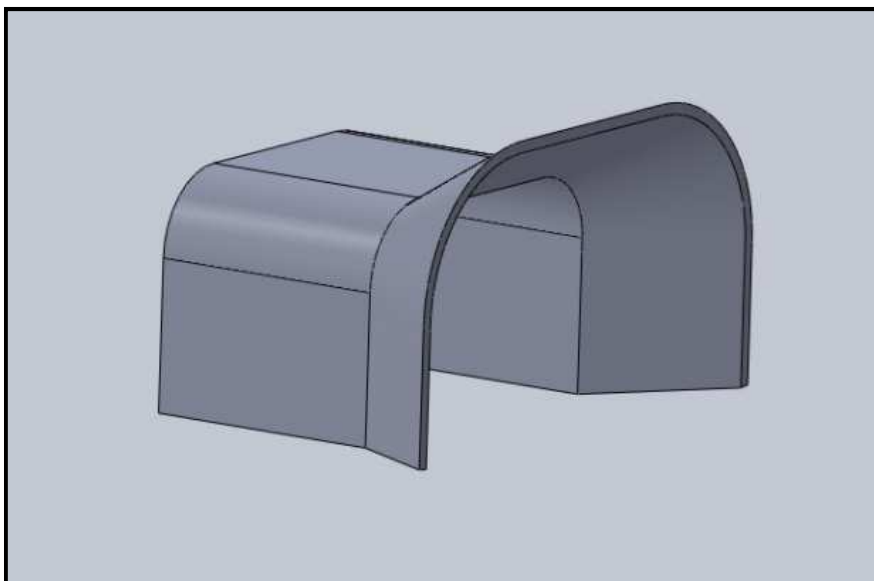
Der Rumpf erhält durch das Entfernen der Gleitstufe im Heckbereich einen größeren Auftrieb, denn das Volumen des Rumpfes wird vergrößert.

Diese Auftriebszunahme wirkt sich positiv aus, da die Masse im Heckbereich durch den Einbau des Jet-Antriebs zunimmt.

Die vorhandene Antriebsanlage wird aus dem Rumpf entfernt und durch den Weber Jet 148 ersetzt.

Die genaue Einbauposition des Jet-Antriebes (vor allem auf der Hochachse) muss mit der Position des Motors abgestimmt werden, um einen Versatz zwischen den Antriebswellen zu vermeiden.

Da der Jet in den Rumpf integriert werden soll und möglichst nicht über das Heck des Rumpfes herausragen sollte, wird im Heckbereich ein nach hinten und unten geöffneter Kasten einlaminieren, in dem der Jet montiert wird ( Abbildung 11 und Abbildung 13).



**Abbildung 11 : Kasten für Jet-Antrieb**

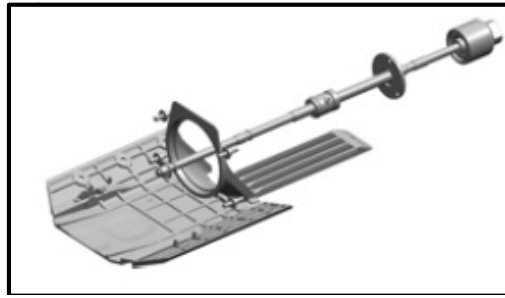


Abbildung 12: ride plate und Schutzgitter <sup>[11]</sup>

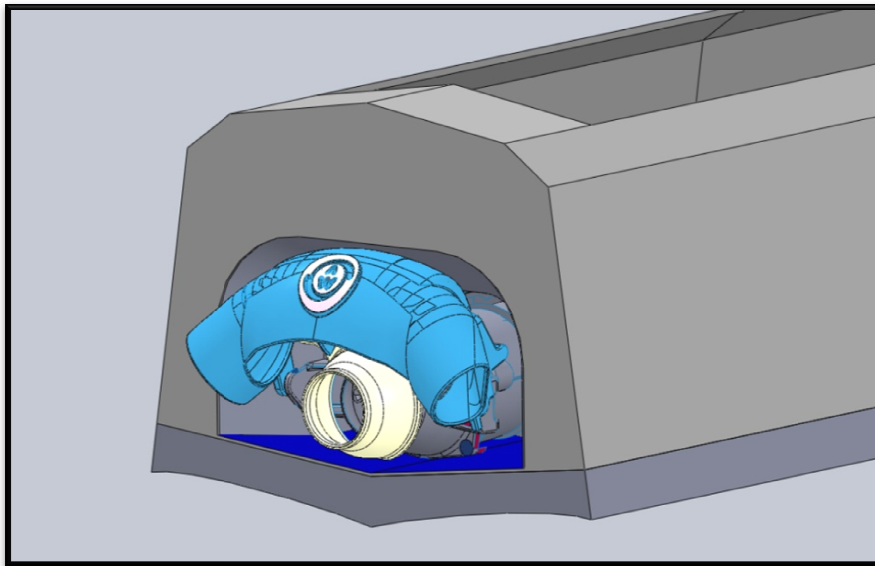


Abbildung 13 : Rumpf mit eingebautem Kasten und Jet-Antrieb

Zunächst muss die vorhandene Antriebsanlage aus dem Rumpf entfernt werden. Im Bereich hinter der Gleitstufe wird der Lack bzw. das Gelcoat vollständig abgeschliffen und so das Laminat freigelegt. Dies ist notwendig, um beim Laminieren eine optimale Anbindung des neuen mit dem vorhandenen Laminat zu erreichen.

Der Bereich hinter der Gleitstufe wird zunächst mit einem Schaumkern aufgefüllt. Dieser Schaumkern wird in Form geschliffen und so an die Kontur des vorderen Rumpfbereiches angepasst.

Der Bereich wird mit mehreren Lagen Glasfasergewebe überzogen.

Im Anschluss an diese Arbeiten werden die Öffnungen für den Kasten des Jetantriebes und den Einlaufkanal in den Rumpf geschnitten. Der Kasten wird aus GFK angefertigt und in den Rumpf einlamiert. Nach unten bleibt der Kasten geöffnet, um einen guten Zugang zum Jetantrieb, z.B. für Montage und Wartungsarbeiten zu gewährleisten. Aus strömungstechnischen Gründen wird diese Öffnung für den Betrieb des Fahrzeugs mit einer GFK Platte, der sog. ride plate( Abbildung 12), verschlossen.

## 4.2 Einbau des Einlasskanals

Der Einlasskanal ( Abbildung 14) wird ebenfalls aus GFK-Gewebe laminiert. Für den Prototypen wird zunächst ein fertiger Kanal der Firma Weber verwendet und an den Rumpf angepasst. Später soll eine eigene Laminierform für einen speziell für Sea Skitty I optimierten Einlasskanal angefertigt werden.

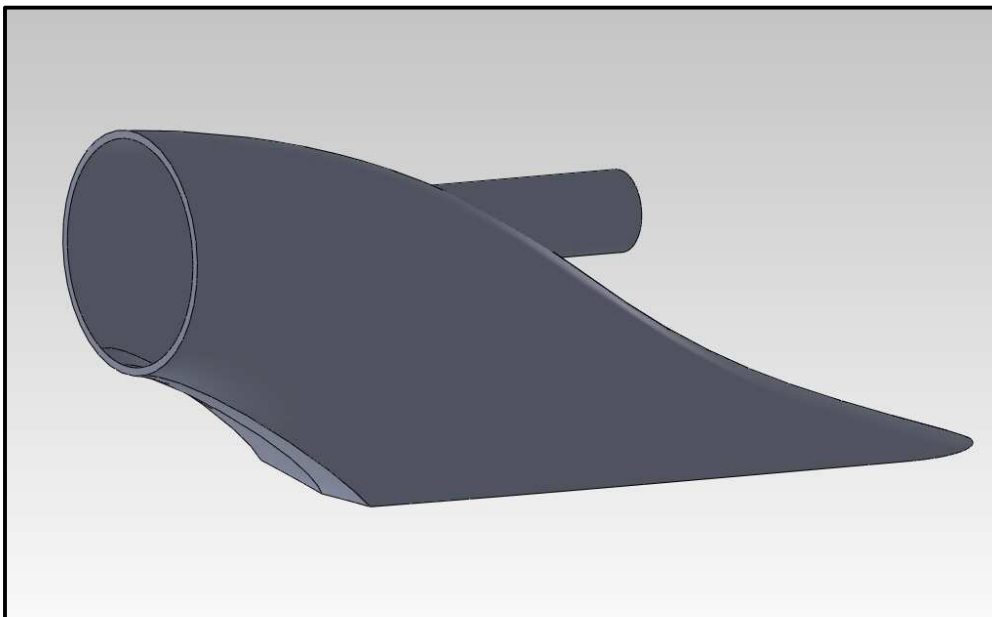


Abbildung 14 : CAD-Modell Einlasskanal

In den Einlasskanal ist eine Durchführung für die Antriebswelle integriert. Die Antriebswelle wird mit einem Wellendichtring abgedichtet, um das Eindringen von Wasser in den Rumpf zu verhindern. Außerdem sorgt der Dichtring dafür, dass der Jet während des Betriebes keine Luft aus dem Inneren des Rumpfes ansaugt.

Das Ansaugen von Luft muss unbedingt verhindert werden, da es zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades und im schlimmsten Fall zu einer Beschädigung des Antriebs führt.

Die Einlassöffnung wird mit einem abnehmbaren Schutzgitter( Abbildung 12), das das Ansaugen von Gegenständen verhindern soll, geschützt.

Um das Glasfasergewebe vor dem Eindringen von Feuchtigkeit zu schützen, müssen die von den Umbaumaßnahmen betroffenen Bereiche mit Gelcoat beschichtet und neu lackiert werden.

### **4.3 Montage des Motors**

Die geplanten Einbaupositionen des Motors und des Jet-Antriebs lassen sich auf den CAD-Zeichnungen Abbildung 15 und Abbildung 16 erkennen.



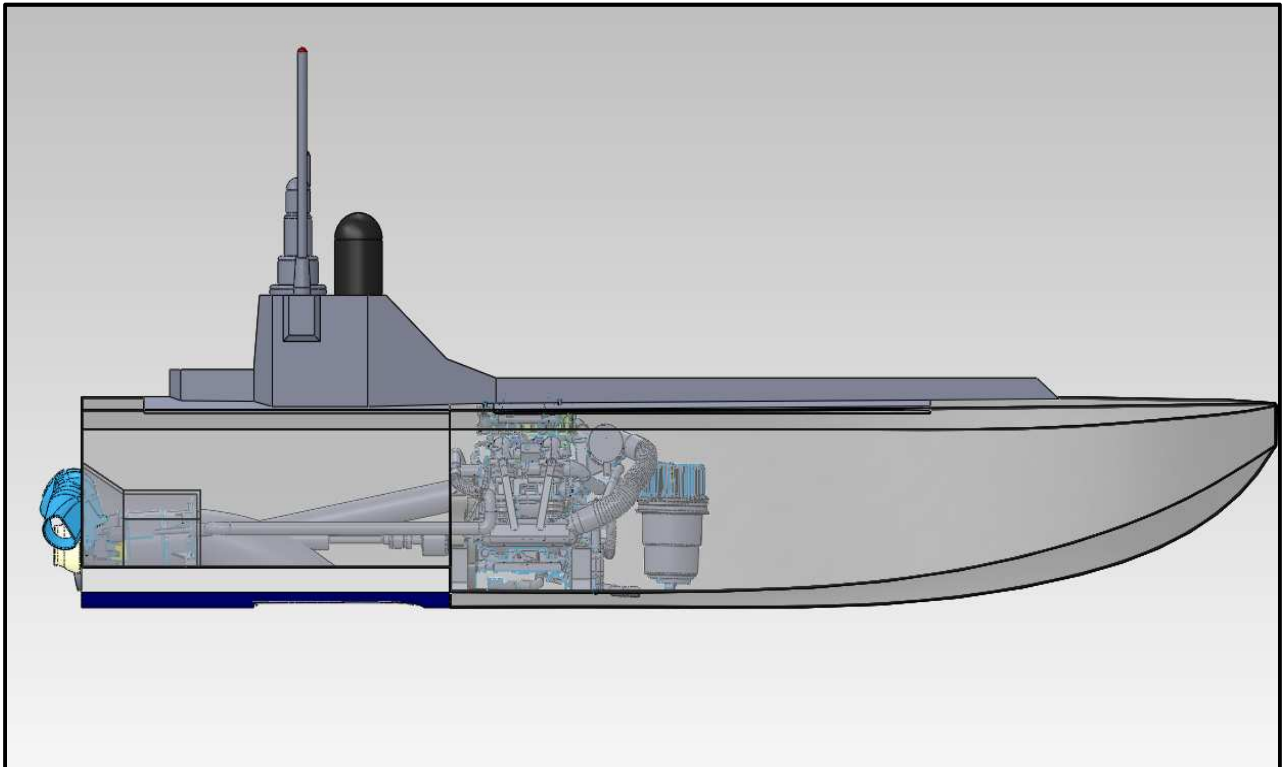


Abbildung 15 : Einbauposition des Motors, Seitenansicht

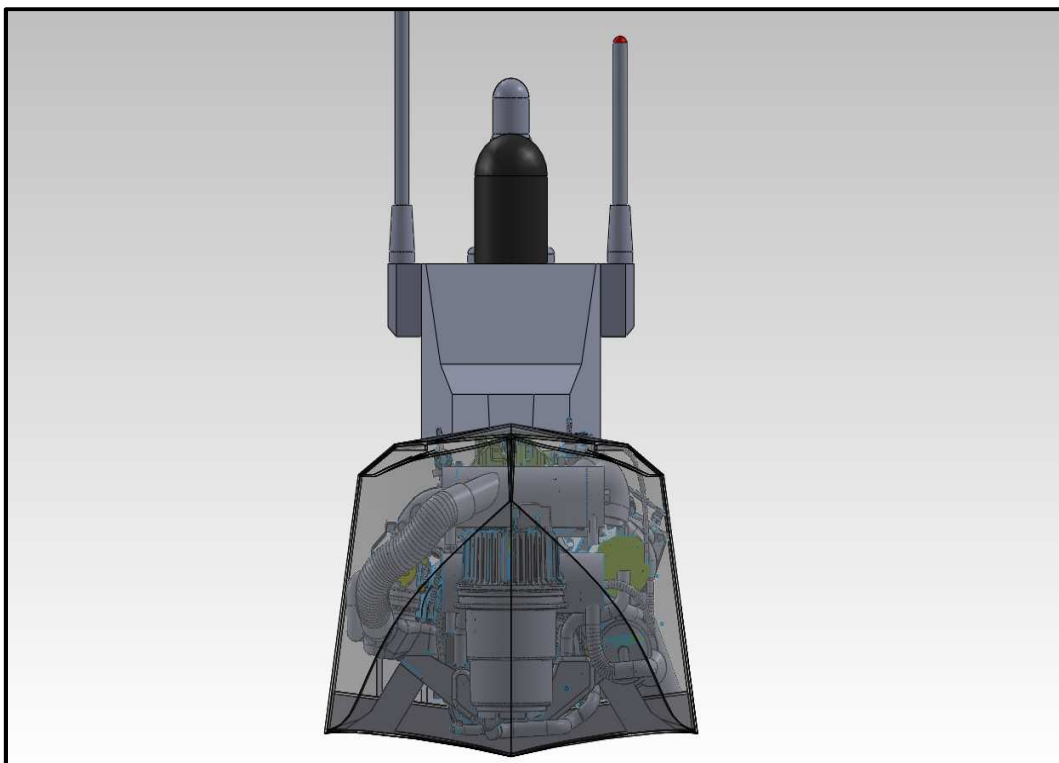


Abbildung 16: Einbauposition des Motors, Bugansicht

Bei der Bestimmung der Einbaulage des Motors in Längsrichtung, ist darauf zu achten, dass der Rumpf weder bug- noch hecklastig wird.

Eine ausgeglichene Schwimmlage ist wichtig, um das Geschwindigkeitspotential des Rumpfes voll ausschöpfen zu können und für ein gutmütiges Fahrverhalten zu sorgen. Der Rumpf sollte im Stillstand möglichst gerade im Wasser liegen, tendenziell aber etwas tiefer mit dem Heck eintauchen.

Im Bereich des Hecks befindet sich mit dem Jet-Antrieb und dem Decksaufbau ein großer Teil der Masse. Um ein zu starkes Eintauchen des Heckbereiches zu verhindern, sollte der Motor tendenziell ein Stück vor dem Schwerpunkt eingebaut werden. Dabei sollte allerdings nicht außer Acht gelassen werden, dass im Bugbereich neben dem Tank und dem Akkumulator gegebenenfalls noch Nutzlast untergebracht werden soll.

Der Tank und der Akkumulator können durch Verschieben noch zum „fein Trimm“ eingesetzt werden. Ihre genaue Einbauposition sollte deswegen erst während der Testphase festgelegt werden.

Der Motor wird auf vier Haltern aus Aluminium gelagert. Zwischen den Auflagern und dem Motor werden Gummidämpfer installiert. Diese sollen die Übertragung von Vibrationen auf den Rumpf dämpfen. Die Motorhalter werden an die Rumpfform angepasst und einlaminieren.

Dabei ist auf einen guten Kraftfluss vom Motorhalter auf den Rumpf zu achten.

Motor und Jetantrieb werden mit einer Antriebswelle direkt verbunden. Für die Verbindung wird eine gedämpfte Wellenkupplung verwendet.

#### **4.4 Lufteinlass**

Die vom Motor benötigte Frischluft wurde beim Vorgängerprojekt, durch einen Einlass im Aufbau, direkt von außen angesaugt. Dies birgt jedoch die Gefahr, dass der Motor bei überkommenden Wellen, Wasser ansaugt und dadurch beschädigt wird. Deswegen soll bei Sea Skitty I die Luft im Innenraum der Drohne angesaugt werden.

Die Luft gelangt durch zwei in den Rumpf einlaminieren Rohre in den Innenraum. Der Querschnitt der Rohre wird so bemessen, dass dem Motor in jedem Fall ausreichend Frischluft zur Verfügung steht.

Der Einlass der Rohre ist auf der außen liegenden Seite gegen das Eindringen von Spritzwasser geschützt. Im Innenraum reichen die Rohre bis unter die Wasserlinie, dadurch wird das Eindringen von Wasser im Fall einer Kenterung verhindert.

Das Wasser, das dennoch in den Rumpf eindringt, sammelt sich in der Bilge (Tiefste Stelle des Rumpfes) und wird mit Hilfe der Lenzeinrichtung über Bord befördert.

Durch das Ansaugen der Luft im Innenraum wird für eine gute Durchlüftung des Rumpfes gesorgt. Dadurch soll ein unnötiges Aufheizen des Rumpfes vermieden werden. Für den Fall, dass es im Rumpf trotz dem zu warm wird muss noch ein zusätzliches Lüftungssystem installiert werden. Dies sollte allerdings vermieden werden, da es zu einem höheren Bau- und Kostenaufwand führen würde.

Ein weiterer Faktor ist, dass durch jede zusätzliche Öffnung Wasser in den Rumpf eindringen könnte.

## 4.5 Kühlsystem

Die Motorkühlung wird im Prototypen zunächst als sogenannte „open loop“ Kühlung konzipiert. Dabei handelt es sich um ein Einkreissystem, bei dem der Kühlkreislauf des Motors direkt von Seewasser durchströmt wird. Das bedeutet allerdings, dass das Kühlsystem nach jedem Einsatz mit Süßwasser gespült werden muss um Korrosion im Motor zu vermeiden. Für eine spätere Serienvariante ist es sinnvoll, ein Zweikreiskühlsystem zu installieren, um das Auftreten von Korrosion im Motor zu vermeiden und das System bedienerfreundlicher zu gestalten.

Das für die Kühlung benötigte Wasser wird dem Jet-Antrieb hinter dem Stator abgezapft. Dadurch wird eine stetige Versorgung mit Wasser gewährleistet, und es kann auf eine zusätzliche Kühlwasserpumpe verzichtet werden. Das Kühlwasser wird, bevor es den Motor durchströmt, durch den Ladeluftkühler geleitet. Ein Teil des Kühlwassers wird für den Betrieb des Ölkühlers abgezweigt und dient anschließend zur Kühlung des Abgassystems.

Das Kühlwasser wird zusammen mit den Abgasen nach außen geleitet.

## 4.6 Abgasanlage

Um die Standfestigkeit der verwendeten Materialien, insbesondere die des Abgaskrümmers, zu gewährleisten ist es notwendig die Abgasanlage zu kühlen. Dadurch wird ebenfalls erreicht, dass sich der Innenraum des Fahrzeuges nicht übermäßig aufheizt. Dies ist wichtig, um eine störungsfreie Funktion der Elektronik zu erreichen.

Eine an die Umgebung angepasste Rumpf-/Abgastemperatur wirkt sich zu dem positiv auf die Infrarotsignatur der Drohne aus und erschwert so die Möglichkeit das Fahrzeug zu orten oder es mit infrarotgelenkten Abwehrsystemen zu bekämpfen. Dies ist besonders bei Aufklärungs- und Überwachungs- Missionen von Vorteil.

Die Abgasanlage wird mit Hilfe des Motorkühlwassers gekühlt. Für den Fall, dass dieses nicht ausreicht um die Temperaturen auf ein akzeptables Niveau zu bringen, wäre auch ein separater Kühlkreislauf denkbar.

Es könnte auch sinnvoll sein, den Auslass für die Abgasanlage unter die Wasseroberfläche zu legen, um sie zusätzlich zu kühlen und den Schallpegel zu reduzieren.

## 4.7 Kraftstoffversorgung

Die Kraftstoffversorgung des Motors wird zunächst über einen separaten Kraftstofftank, wie er häufig in kleineren Sportbooten verwendet wird, realisiert.

Das hat den Vorteil, dass der Tank während der Testphase zum Trimmen des Bootes verwendet werden kann, um die optimale Schwimmlage zu bestimmen. Bei einer späteren Version, könnte ein fester Tank in den Rumpf integriert werden, um den Platz im Rumpf optimal zu nutzen.

Der Tank hat ein Fassungsvermögen von ca. 20 l.

Der Kraftstoff wird dem Motor über einen Kraftstofffilter und ein elektronisches Sicherheitsventil zugeführt.

Das Sicherheitsventil wird so geschaltet, dass es die Kraftstoffversorgung bei einem Ausfall der Stromversorgung unterbricht.

## **4.8 Lenzsystem**

Eindringendes Wasser sammelt sich in der Bilge. Es wird durch einen Wassersensor registriert und automatisch von einer elektrischen Lenzpumpe von Bord gepumpt. Überschreitet das eindringende Wasser ein kritisches Niveau, wird es von einem zweiten Sensor erfasst. Von diesem Sensor wird automatisch eine Leck-Warnmeldung an die Leitstelle abgegeben und eine weitere Lenzpumpe zugeschaltet.

### **4.8.1 Automatisches Lenzsystem**

Bei diesem System wird das eingedrungene Wasser durch die Sogwirkung des den Jet-Antrieb durchströmenden Wassers nach außen transportiert. Die Sogwirkung kommt zustande, weil der dynamische Druck des vorbeiströmenden Wassers geringer ist als der Umgebungsdruck. Dieser Effekt funktioniert jedoch erst ab einer gewissen Strömungsgeschwindigkeit. Deswegen ist es erforderlich, dass das System mit einem Rückschlagventil versehen ist, damit das Zurückströmen des Wassers im Stillstand zu verhindern.

Dieses System kann die Anordnung mit Sensor und elektrischer Pumpe lediglich unterstützen, da es ohne Fahrt des Fahrzeugs, keine Wirkung hat. Es könnte aber eine der elektrischen Lenzpumpen ersetzen.

## **5 Stromversorgung und Elektronik**

Da das Fahrzeug unbemannt operieren soll sind keine direkten, manuellen Eingriffe des Bedienpersonals, in die Steuerung, möglich. Die zum sicheren Betrieb des Fahrzeuges notwendigen Steuerbefehle werden von der Leitstelle per Funk übermittelt und an Bord von Servomotoren ausgeführt.

Die für den Betrieb des Motors, die Steuerung des Fahrzeuges und die Navigation nötige Elektronik wird in einer wasserdichten Box gut zugänglich im Rumpf installiert.

Die Stromversorgung übernimmt ein 12 V Blei-Akkumulator. Dieser wird von einem 12 V Generator, der vom Verbrennungsmotor angetrieben, wird geladen.

Auf Wunsch wäre es auch möglich die Drohne mit einer Bordspannung von 24 V zu versorgen.

Um die Versorgung der sicherheitsrelevanten Steuerelektronik vom restlichen Bordnetz zu entkoppeln, wäre es sinnvoll für deren Versorgung einen extra Akkumulator zu verwenden.

## **5.1 Sicherheitsschaltung**

Am Heck der Drohne ist ein Haupt- bzw. ein Notausschalter installiert, mit dessen Hilfe alle Systeme abgeschaltet werden können.

Eine rote LED am Heck leuchtet, wenn die Strom- und Kraftstoffversorgung der Drohne eingeschaltet ist.

Der Hauptschalter muss vor jeder Bergung des Fahrzeuges betätigt werden, um Verletzungen der Bergungsscrew sowie Beschädigungen an der Elektronik- und der Antriebsanlage zu vermeiden.

Bei einem Abreißen der Funkverbindung zum Leitstand, wird über eine fail save Schaltung ein Notprogramm aktiviert.

Bei diesem Notprogramm wird die Antriebsanlage abgeschaltet und so das Fahrzeug aufgestopt.

Bei einer zu großen Neigung um die Längsachse der Drohne z.B. in Folge einer Kenterung wird die Antriebsmaschine, um Beschädigungen zu vermeiden, abgeschaltet und die Lenzpumpe automatisch aktiviert.

Die Bewegung des Fahrzeugs um die einzelnen Achsen wird von dem verwendeten Autopiloten registriert und überwacht.

Im Falle einer dieser Notsituationen wird automatisch die letzte bekannte Position der Drohne gespeichert und ein Markersignal aktiviert, das die Ortung des Fahrzeugs erleichtert.

## **5.2 Beleuchtung**

Wenn die Drohne auf öffentlichen Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen bewegt werden soll, ist es nötig sie mit einer den gesetzlichen Vorschriften entsprechenden Beleuchtungsanlage auszurüsten.

Die Beleuchtungsanlage wird mit Hilfe entsprechender LED-Positionslampen verwirklicht.

## **6 Sonstige Ausrüstung**

### **6.1 Schleppleinrichtung**

Wie bereits in Kapitel 1.3 erwähnt, ist der Einsatz von Sea Skitty I in vielen zivilen und militärischen Bereichen denkbar. Der Prototyp soll zunächst für das Schleppen von Zieldarstellungskörpern ausgelegt werden.

Dabei handelt es sich um mit Luft gefüllte Schleppkörper, die für die Ausbildung der Besatzung von Marineschiffen im Umgang mit der Bordbewaffnung verwendet werden.

Bisher wird diese Arbeit von bemannten Schleppbooten übernommen. Dafür ist jedoch ein hoher Personalaufwand nötig und die Besatzungen sind immer einem Risiko ausgesetzt. Um das Risiko zu minimieren werden bisher sehr lange Schlepplein eingesetzt, die die Manövrierfähigkeit des Schleppverbandes einschränken.

Sea Skitty wird für diese Aufgabe mit einem Schlepp-Haken, der sich bei Bedarf servo-gesteuert öffnen lässt, ausgerüstet (Abbildung 17).

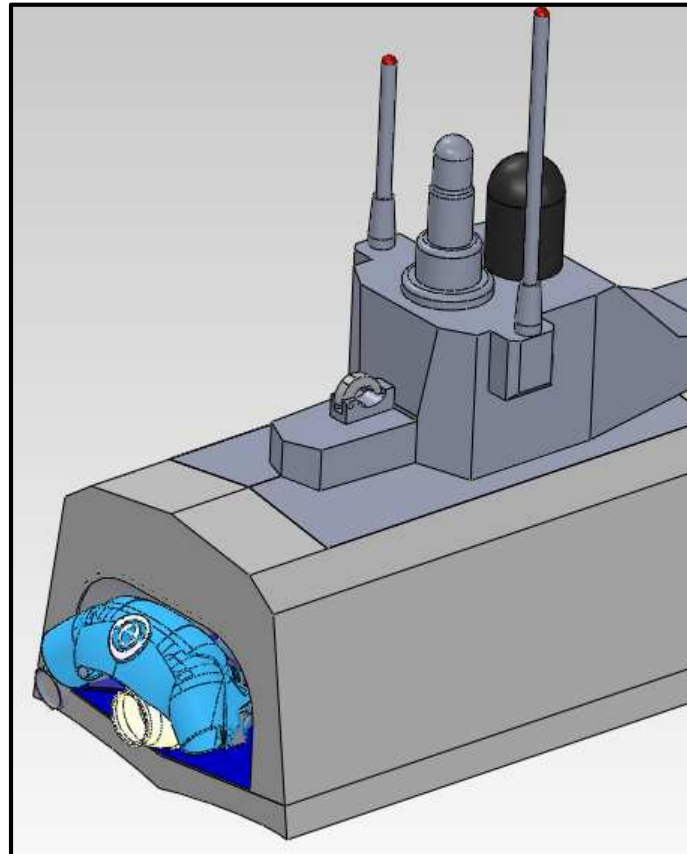


Abbildung 17 : Aufbau mit Schlepphaken

## 6.2 Feuerlöschsystem

Ein Brand an Bord der Drohne ließe sich mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>- Löschsystems bekämpfen.

Da das Volumen des Innenraums der Drohne relativ gering ist, könnte der Raum im Falle eines Brandes komplett mit CO<sub>2</sub> geflutet werden. Um einen Brand an Bord zu erkennen wären Sensoren, die z.B. einen starken Anstieg der Raumtemperatur registrieren nötig.

Wenn das Löschsystem aktiviert wird, wird automatisch die Kraftstoffversorgung unterbrochen und das in Kap. 5.1 beschriebene Notprogramm aktiviert.



## 7 Navigation

Es ist geplant, zwei Varianten der Navigation zu realisieren.

- Ferngesteuerte Navigation
- Autonome Navigation

### 7.1 Ferngesteuerte Navigation

Bei der ferngesteuerten Navigation erfolgt die Steuerung des Fahrzeuges manuell durch das Bedienpersonal im Leitstand. Das Personal kann sich dabei (wenn kein Sichtkontakt zum Fahrzeug besteht) auf Bilder einer Kamera, die im Echtzeit-Stream auf einen Kontrollmonitor im Leitstand übertragen werden stützen. Zusätzlich verfügt es über eine elektronische Seekarte auf der die Position, der Kurs, sowie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs angezeigt werden. Sinnvoll wäre es die Seekarte mit einem Radarbild zu überlagern, um Hindernisse oder andere Fahrzeuge rechtzeitig erkennen zu können. Möglich wäre es auch die Drohne mit einem Antikollisionsradar auszustatten. Das Bedienpersonal wird außerdem ständig über die relevanten Parameter der Antriebsanlage informiert.

Im Prinzip unterscheidet sich die Führung des Fahrzeuges nicht von der Steuerung und Überwachung von manuell geführten Wasserfahrzeugen

## 7.2 Autonome Navigation

Bei der autonomen Navigation wird die Führung des Fahrzeuges von einem Autopiloten übernommen.

Im Leitstand werden auf einer elektronischen Karte verschiedene Wegpunkte sowie die erforderlichen Geschwindigkeiten festgelegt. Diese Daten werden an den Autopiloten übermittelt und von ihm selbstständig abgefahren.

Das Personal überwacht im Leitstand die Fahrzeug-Parameter und das Verkehrsgeschehen. Im Falle unvorhergesehener Ereignisse wie z.B. Hindernissen oder kreuzenden Fahrzeugen ist das Bedienungspersonal jederzeit in der Lage, per Fernsteuerung in die Fahrzeugführung einzugreifen.

## 8 Ausblick

Voraussichtlich wird in den nächsten Wochen, auf Grundlage dieser Arbeit, mit dem Bau des Prototypen von Sea Skitty I begonnen.

Im Anschluss folgt eine ausführliche Testphase mit dem Ziel, die einzelnen Komponenten aufeinander abzustimmen, das Fahrverhalten zu ermitteln und eventuell Schwachpunkte aufzudecken.

Wenn die Testphase erfolgreich abgeschlossen ist, kann mit der Vorbereitung einer Serienfertigung und der Optimierung der Drohne für weitere Einsatzzwecke wie sie in Kap. 1.3 vorgestellt wurden, begonnen werden.

Zusätzlich ist geplant, eine größere Version mit ca. 8 Meter Länge und zwei Antriebsmaschinen zu entwickeln.

## 9 Literatur

1. <http://www.wankel-ag.de/seite1.html> ; 20.02.2012, 20:30 Uhr
2. Sfehan Zima ; Reinhold Ficht : Ungewöhnliche Motoren, 3. Auflage Würzburg 2010
3. Van Basshuysen; Schäfer (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor, 4. Auflage Wiesbaden: Vieweg 2007
4. [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Wankel\\_Cycle.gif&filetimestamp=20041130192954](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Wankel_Cycle.gif&filetimestamp=20041130192954); 20.02.2012, 20:35 Uhr
5. Prof.Dr.-Ing Victor Gherorghiu; Vorlesungsskript Kolbenmaschinen (KoM) und Kolbenverbrennungsmotoren(KVM); HAW-Hamburg; 2012
6. <http://www.weber-motor.com/de/produkte/mpe-750/marine-antriebssysteme/index.html>; 20.02.2012; 20:37
7. <http://www.dmv-bootsdiesel.de/Download/pdf/030HBW.pdf>; 20.02.2012; 21:00 Uhr
8. [http://www.worldsuperyachts.com/news/1847/weber\\_motor\\_mpe\\_750](http://www.worldsuperyachts.com/news/1847/weber_motor_mpe_750) ; 17.02.2012; 17:44 Uhr
9. <http://www.greenhulk.net/forums/attachment.php?attachmentid=239897&d=1306199531> ;19.02.2012;01:01 Uhr
10. Prof.Dr.-Ing. Peter Wulf; Vorlesungsskript Strömungslehre II; Einführung und Grundbegriffe; HAW-Hamburg; 2012
11. <http://weberpower.com/index.html>; 19.02.20012; 23:44 Uhr

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema

**" Auslegung und Optimierung der Antriebsanlage einer  
ferngelenkten / autark operierenden Seezieldarstellungsdrohne"**

selbständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen, die anderen Werken, dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, habe ich in jedem einzelnen Fall durch die Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 21.02.2012

-----  
Jan Kaminski