

HTWG
MA

Hochschule Konstanz
Fakultät Maschinenbau

Projektarbeit Aluminiumsegeljolle

Betreuer: Prof. Dr. Stein

HTWG Konstanz
Alfred-Wachtel-Straße 8
D-78462 Konstanz

Erstellt von:
Manuel Andris
Marcel Schach

Konstanz, den 04.03.2024

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Anforderungen an die Projektarbeit	2
3	Rechtliche Vorgaben	4
3.1	Richtlinie über Bau- und Ausrüstung von Vergnügungsfahrzeuge.....	4
3.2	Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr zur Einführung der Bodensee Schifffahrtsordnung (EinfVO-BSO)	5
4	Benchmarking zu Rumpfformen und Strukturaufbau	7
4.1	Laser Bahia.....	7
4.2	Lelie Class 560	8
4.3	Alucrest Aluminium Boot	11
4.4	USB Dinghy	11
4.5	ILCA 7 Laser Segeljolle.....	13
5	Strömungssimulation mit ANSYS CFD	15
5.1	Domaingröße	15
5.2	Vernetzung.....	16
5.3	Pre-Processing der Strömungssimulation	17
5.4	Post-Processing und Plausibilitätscheck	21
5.5	Netzunsicherheit	25
5.6	Weiter Unsicherheiten	27
6	Rumpfkonstruktion.....	28
6.1	Vergleichbarkeit der Boote	28
6.2	Entwicklung der Rumpfformen	30
7	Referenzboot Laser Bahia	39
8	Auswahl des Rumpfs.....	41
9	CAD-Konstruktion.....	43

9.1	Rumpf	43
9.2	Rippenkonstruktion	44
9.2.1	Grundgerüst	45
9.2.2	Verstärkungen der Rippen.....	46
9.2.3	Aufnahme Schwert	46
9.2.4	Leichtbaumaßnahmen.....	47
9.1	Aufnahme Ruder	48
9.2	Boden	49
9.3	Sitzfläche	50
9.4	Sonstiges	50
9.4.1	Wasserablauf	50
9.4.2	Aufnahmen Mast	51
9.4.3	Aufnahme Gennaker	51
9.4.4	Fixierungsmöglichkeiten	52
9.5	Überblick der Gesamtkonstruktion Aluminium Segeljolle.....	53
9.6	Fazit.....	56
10	FEM-Simulation.....	57
10.1	Technische Daten	57
10.2	Belastungsfall 1 (Rumpfstabilität)	57
10.2.1	Simulationsgeometrie	58
10.2.2	Vernetzung.....	58
10.2.3	Auswertung	59
10.3	Belastungsfall 2 (Aufnahme des Masts)	61
10.3.1	Simulationsgeometrie	62
10.3.2	Vernetzung.....	63
10.3.3	Auswertung	64
10.4	Fazit und Ausblick der Simulation	66
11	Schlussfolgerung.....	68

Abbildungsverzeichnis.....	69
Tabellenverzeichnis.....	72
Literaturverzeichnis	73

1 Einleitung

Der Segelsport ist bereits seit vielen Jahren ein etablierter Sport am Bodensee. Die hierbei verwendeten Segeljollen werden standardmäßig aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Diese bieten eine gute Balance zwischen Festigkeit und Kosten. Traditionelle Segeljollen werden aus Holz gebaut, haben jedoch den Nachteil, dass mehr Pflege und Wartung benötigt wird. Insbesondere Regattaboote werden aus kohlefaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Diese Boote sind leicht, steif und bieten eine ausgezeichnete Leistung, sind jedoch oft teuer. Segeljollen aus Aluminium sind aktuell nur sehr selten zu finden. Jedoch sind Aluminiumboote sehr leicht, robust, wartungsarm und widerstandsfähig gegenüber äußeren Einflüssen.

Daher ist das Ziel dieser Projektarbeit eine Aluminiumsegeljolle zu entwickeln. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Segeljolle einen dynamischen und sportlichen Fahrstil aufweist. Um das sicherzustellen, soll das Rumpfgewicht von 150 kg nicht überschritten werden. Ebenfalls soll sich an den aktuell etablierten Segeljollen orientiert werden. Die Aluminiumsegeljolle soll so konstruiert werden, dass sie den Richtlinien auf dem Bodensee entspricht und hierbei zugelassen werden kann.

Da es sich um ein neues Projekt handelt, für welches es nur wenig Erfahrungswerte gibt, ist eine Strömungsanalyse mit einer CFD-Simulation unabdingbar. Ebenfalls soll die Segeleigenschaften mithilfe eines Laborversuchs quantifiziert werden. Nach einer detaillierten Konstruktion des Rumpfes, soll die Stabilität der Aluminiumsegeljolle mithilfe einer FEM-Analyse bewertet werden.

Insgesamt eröffnet die Konstruktion dieser Aluminium-Segeljolle nicht nur neue Horizonte für Segelsport-Enthusiasten, sondern stellt auch eine wegweisende Entwicklung in der Aluminiumbootkonstruktion dar. Die Kombination aus Leichtigkeit, Stabilität und Wartungsarmut macht diese Jolle zu einer inspirierenden Grundlage für zukünftige Innovationen und Verbesserungen im Bereich der Aluminiumboottechnologie.

2 Anforderungen an die Projektarbeit

Für diese Projektarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Betreuer ein Lastenheft erstellt, welche für den Bau einer Segeljolle eingehalten werden muss. Bei den Richtlinien, die für den Bau der Segeljolle eingehalten werden müssen, stehen Leichtbau, Herstellbarkeit mit herkömmlichen Fertigungsverfahren, sportliches Segeln und die Zulassung am Bodensee an vorderster Stelle.

Da die Gesamtentwicklung des Bootes auf Leichtbau ausgelegt werden soll, darf das Rumpfgewicht von maximal 150 kg nicht überschritten werden. Zudem soll bei dieser Gewichtsvorgabe die Stabilität und die Handhabbarkeit mit herkömmlichen Segeljollen vergleichbar sein.

Eine weitere Vorgabe des Lastenheftes ist es, dass der Rumpf komplett aus Aluminium gefertigt werden soll. Lediglich das Segel, Mast und bei etwaigen zusätzlichen Komponenten (Ruder, seitliche Auftriebskörper, etc.) kann das Material frei gewählt werden und darf auch als Kaufteile geführt werden. Lediglich ist bei der Fertigung eines Aluminiumrumpfes die möglichen Fertigungsverfahren zu beachten und das ein seewassertaugliches Material verwendet wird.

Um mit der Segeljolle ein sportliches Segeln zu ermöglichen, wird sich bei Abmaßen an der „Laser Bahia“ orientiert. Die Länge soll dabei zwischen 4,5 m – 5 m liegen und die Gesamtbreite zwischen 1,5 m – 2 m.

Zudem soll die Segeljolle so ausgelegt werden, dass vier Personen transportiert werden können.

Des Weiteren soll eine Validierung des Bootes stattfinden. In dieser Validierung muss rechnerisch bewiesen sein, dass das Boot beim Kentern nicht untergeht. Zudem soll ein Festigkeitsnachweis für den Rumpf durchgeführt werden und die Wasserumströmung soll im CFD simuliert werden. Um diese Ergebnisse tatsächlich validieren zu können, soll die Konstruktion skaliert und im Wasserkanal der HTWG-Konstanz untersucht werden.

Mit diesen Ergebnissen soll es am Ende ermöglicht werden, die Seetauglichkeitskategorie C für den Bodensee (CE-Zulassung) zu erhalten. Das entspricht den Kriterien von Wellen bis 2 m und Windstärke bis max. 6 Beaufort (13,9 m/s). Diese Anforderung soll mit angemessenen Sicherheitsfaktoren in einem Festigkeitsnachweis ebenfalls ersichtlich gemacht werden.

Der letzte Punkt für die Anforderungen an die Segeljolle ist, dass die Konstruktion möglichst in der Werkstatt der HTWG-Konstanz gebaut werden kann und wenig bis keine Bauteile extern gefertigt werden müssen. So sollen die Fertigungskosten geringgehalten werden.

3 Rechtliche Vorgaben

Bei dieser Projektarbeit handelt es sich um ein Segelboot, welches als Eigenbau konzipiert wird. Als Eigenbau zugelassene Schiffe dürfen innerhalb von 5 Jahren nicht veräußert oder anderweitig auf dem Unionsmarkt in den Verkehr gebracht werden. Für die Zulassung eines eigenkonzipierten Bootes ist es notwendig die aktuell geltenden Regeln des technischen Standards einzuhalten. Daher wird für diese Segeljolle die Richtlinien angewendet, welche für eine Zulassung am Bodensee notwendig sind. Für eine Zulassung am Bodensee sollen die Regeln der BSO (Bodensee-Schiffahrts-Ordnung) und die dazugehörigen Bau- und Ausrüstungsrichtlinie (Richtlinien über Bau und Ausrüstung von Vergnügungsfahrzeugen) verwendet werden. Da die Segeljolle als Eigenbau konzipiert wird, muss sie nicht nach der EU-Sportbootrichtlinie 2013/53 (EU Parlament) zertifiziert werden.

3.1 Richtlinie über Bau- und Ausrüstung von Vergnügungsfahrzeuge

Diese Richtlinie wurde durch die Internationale Schifffahrtskommission für den Bodensee anlässlich der 66. Sitzung vom 1./2. April 2008 in Berlin verabschiedet (Richtlinien über Bau und Ausrüstung von Vergnügungsfahrzeugen). Im Folgenden werden die einzelnen Richtlinien benannt, welche für die Segeljolle relevant sind.

Grundregeln:

Jegliche Verschalungen, Fußböden und dergleichen sind derart anzubringen, dass technische Untersuchungen möglich sind.

Schwimmfähigkeit:

In voll ausgerüstetem, unbeschädigtem Zustand und vollgelaufenem Zustand muss die Segeljolle schwimmfähig bleiben. Zusätzlich gilt, dass die Segeljolle einen Restauftrieb von 100 N je Person im vollgelaufenen Zustand haben muss.

Stabilität und Freibord:

Für jede zugelassene Person muss eine Sitzgelegenheit mit einer Platzbreite von min. 40 cm vorhanden sein. Die Anzahl der höchstzulässigen Personenzahl kann mit der folgenden Formel bestimmt werden:

$$P = \frac{(L * B)}{3}$$

mit:
P = Anzahl Personen
L= Länge
B = Breite

Schallgeräte:

Auf der Segeljolle muss ein von einer Fremdenenergiequelle unabhängiges Signalhorn (z.B. Mundsignalhorn) mit tiefem Ton vorhanden sein.

Lenzeinrichtung:

Bei der Segeljolle muss eine Lenzeinrichtung vorhanden sein. Hierbei genügt es bei Jollen, wenn eine Klappe im Boden der Jolle verbaut ist. Wird diese Klappe bei hohen Geschwindigkeiten aufgeklappt, saugt das am Rumpf vorbeifließende Wasser das eingedrungene Spritzwasser ab.

Rettungsmittel:

Für jede erwachsene Person muss eine Rettungsweste, -ring, -kragen mit einem Mindestauftrieb von 100 N vorhanden sein.

3.2 Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr zur Einführung der Bodensee Schifffahrtsordnung (EinfVO-BSO)

Die Verordnung über die Schifffahrt auf dem Bodensee ist seit dem 15. Oktober 2009 in Kraft (Bodensee-Schifffahrts-Ordnung). Wie bereits im vorherigen Kapitel werden hier die Richtlinien benannt, welche für die Zulassung der Segeljolle relevant sind. Richtlinien, welche bereits in der Richtlinie über Bau- und Ausrüstung von Vergnügungsfahrzeuge abgedeckt sind, werden nicht erneut beschrieben.

Lichter:

Die Lichter müssen bei unsichtigem Wetter am Tag sowie von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang geführt werden. Bei Segelfahrzeugen muss ein weißes Rundumlicht angebracht werden, welches von allen Seiten sichtbar ist. Bei Nacht (bei klarer Luft) muss die Sichtweite mindestens 3,7 km aufweisen.

Mindestdicke für Boden, Kimm- und Seitenbeplattung:

Es gibt in der Verordnung Berechnungsformeln, um die Mindestdicke der Außenhaut bei stählernen Fahrgastschiffen zu bestimmen. Hierbei gilt, dass an keiner Stelle die Plattenstärke der Außenhaut den Wert von 3 mm unterschreiten darf. Bei Segeljollen handelt es sich nicht um ein Fahrgastschiff. Somit müssen die Berechnungsformeln nicht angewendet werden. Aus Sicherheitsgründen, wird dennoch definiert, dass die Außenhaut der Segeljolle den Wert von 3 mm nicht unterschreiten darf.

Bau und Ausrüstung von Fahrzeugen:

Für die Segeljolle wird eine Zulassungsurkunde benötigt. Hierbei sind die Art und Fabrikat des Fahrzeugs, der Name des Fahrzeugs und der gewöhnliche Standort des Fahrzeugs festgelegt.

Schifferpatent:

Segeljollen ohne Maschinenantrieb und einer Segelfläche von mehr als 12 m² fallen unter die Kategorie D. Der Inhaber des Patents muss mindestens 14 Jahre alt sein. Für das Schifferpatent ist eine praktische und theoretische Prüfung notwendig.

4 Benchmarking zu Rumpfformen und Strukturaufbau

In der Anfangsphase der Entwicklung wird ein Benchmarking durchgeführt, bei dem Boote analysiert werden, die ähnliche Anforderungen erfüllen wie sie in dieser Projektarbeit definiert sind oder die selbst aus Aluminium gefertigt sind. Die Schwerpunkte der Suche liegen dabei auf Aspekten wie dem Boots Aufbau und den potenziellen Materialstärken für Aluminiumbleche.

4.1 Laser Bahia

Zu Beginn der Planungsphase für dieses Projekt wurde die Entscheidung getroffen, die Abmessungen der zu entwickelnden Aluminium-Segeljolle in etwa an die Maße einer Laser Bahia anzupassen. Infolgedessen wird eine eingehende Analyse dieses spezifischen Modells durchgeführt, um wertvolle Erkenntnisse und Einblicke zu gewinnen. In Abbildung 1 ist dieses Bootsmodell zu erkennen.



Abbildung 1: Laser Bahia (oceanplay)

Die für dieses Boot frei vorhandenen Explosionszeichnungen, Bilder und Videos sind unabdingbar, um ein besseres Verständnis zu entwickeln, welche Aspekte in der Entwicklungsphase relevant werden könnten.

Zu Beginn wird die Rumpfform der Laser Bahia analysiert. Sie besitzt eine V-förmige Wölbung, welche ungefähr in der Mitte des Bootes die tiefste Stelle besitzt. In Richtung des Hecks flacht diese Wölbung stark ab und läuft annähernd horizontal aus (Abbildung 2).

Durch diese Rumpfform soll einerseits die Gleitfahrt besser und schneller erreicht werden und ein stabiles Fahrverhalten bei geringen Geschwindigkeiten garantiert sein. Zudem wird

in dieser Abbildung deutlich, dass das Bug einen spitzen Winkel von Boden des Rumpfes zu der Reling besitzt.



Abbildung 2: Rumpfform Laser Bahia (oceanplay)

In Abbildung 3 ist das Heck im Detail dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass zwischen dem Boden und der Seitenwand des Rumpfes eine „Fase“ vorhanden ist (in der Abbildung mit rot markiert). Mit dieser „Fase“ soll vermutlich das Segelverhalten während einer Kurvenfahrt verbessern und stabilisieren.

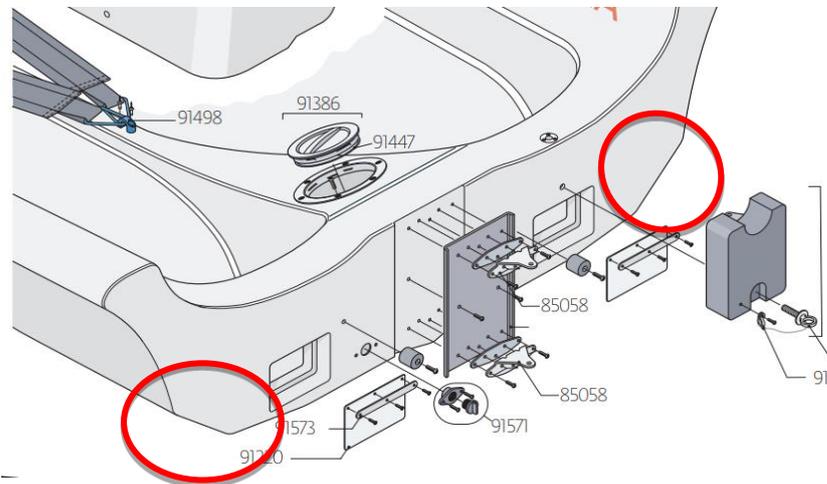


Abbildung 3: Detaillierte Betrachtung des Hecks der Laser Bahia (oceanplay)

4.2 Lelie Class 560

Im nächsten Schritt wurde die Segeljolle LelieClass 560 (Abbildung 4) genauer analysiert. Diese Segeljolle ist vollständig aus Aluminium gefertigt und besitzt zudem ähnliche Grundmaße, wie in der Anforderungsliste definiert.

Der Grund, weshalb diese Segeljolle hergestellt wurde, war dass die Entwickler eine Jolle entwerfen wollten die schnell, robust und wartungsfreies ist (lelieclass).



Abbildung 4: Segeljolle LelieClass 560 (lelieclass)

In Abbildung 5 ist die Unterseite des Rumpfes abgebildet. Hierbei ist ersichtlich, dass die Entwickler sich für einen vollständig ebenen Boden des Rumpfes entschieden haben. Ein flacher Boden besitzt fertigungstechnisch viele Vorteile und ist zudem weniger Komplex. Anhand dieser Abbildung ist davon auszugehen, dass der gesamte Boden aus einem Aluminiumblech besteht.



Abbildung 5: Boden der Lelie Class 560 (lelieclass)

Bei Betrachtung der Abbildungen 4,5 und 6 wird deutlich, dass die Seitenwand aus zwei Teilen besteht. Einem relativ stark gebogenen Blech, welches direkt mit dem flachen Boden verbunden ist. Auf dieses Blech folgt ein nahezu vertikales Blech, welches den Abschluss der Seitenwand bildet.

Zusätzlich wird in Abbildung 6 Details für den strukturelle Aufbau der Jolle deutlich. Hierbei ist zu erkennen, dass die Entwickler im hinteren Bereich des Bootes (Abbildung 6 links oben) Quer- und Längsverstrebungen eingebaut haben, um den Aufbau zu stabilisieren.

Dieser Aufbau dient dazu, dass ein doppelter Boden in das Boot eingebaut werden kann. Der Riffelblech Aluminium Boden wird auf den Querstreben aufgelegt und verschweißt. Somit wird gewährleistet, dass Luft eingeschlossen wird und das Boot bei einer Kenterung nicht sinkt.

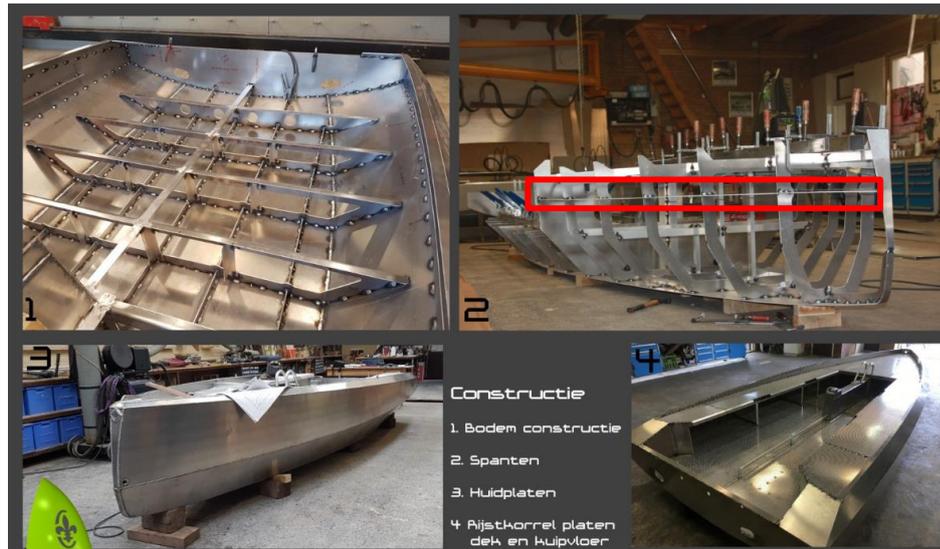


Abbildung 6: Struktureller Aufbau (lelieclass)

Ein weiterer interessanter Aspekt ist in Abbildung 6 zu erkennen. Im rot markierten Kasten ist eine Längsverstärkung verbaut. Eine solche Maßnahme könnte auch erforderlich sein, um möglicherweise größere Belastungen auf den Bug des Schiffes abfangen zu können

Bei weiterer Recherche zu der Lelie Class 560, konnten wichtige Informationen zu den Materialstärken und verwendeten Materialien ausfindig gemacht werden. Diese Details sind relevant für eine Leichtbaukonstruktion.

Das Material, das für den Aufbau des Bootes verwendet wird, besteht ausschließlich aus seewasserbeständigem Aluminium (EN AW 5083). Zudem wurde für den vollständigen Rumpf eine Materialstärke von 4 mm verwendet (lelieclass).

Lediglich für die Sitzflächen, den Boden und das Deck wurde ein Riffelblech aus Aluminium (EN AW 5754) verwendet. Dieses Riffelblech soll die Rutschgefahr verringern. Diese Bleche besitzen eine Materialstärke von 3 mm.

Genaueren Abmessungen des Rumpfes waren nicht verfügbar.

4.3 Alucrest Aluminium Boot

Bei weiteren Recherchen zu Aluminiumbooten wird der Fokus zunächst auf den Leichtbau ausgerichtet. Da sehr viele Fischerboote aus Aluminium bestehen und deutlich bei dem Gewichtungsfaktor herausstechen, werden diese Boote für den Leichtbau genauer untersucht.

Besonders hervorzuheben sind hierbei die "Alucrest" Fischerboot. Die Modellvariante „Alucrest 420 ist in Abbildung 7 zu erkennen.



Abbildung 7: Alucrest 420 (kleinanzeigen)

Dieses Boot besitzt eine Gesamtlänge von 4,2 m und eine Breite von 1,65 m, was der Anforderung der zu entwickelnden Segeljolle entspricht. Laut Herstellerangaben werden beim Rumpf nur Materialstärken von 2 mm verwendend (kimpleboating). Dies spricht für extremen Leichtbau. Das Gesamtgewicht ist laut Hersteller bei ca. 100 kg.

Interessant ist bei diesem Modell auch, dass die Seitenwände und der Boden eine Art von Trapezstruktur besitzen. Somit können geringere Materialstärken bei gleicher Festigkeit verwendet werden. Im Innenraum sind U-förmige Verstärkungen für die Stabilität angeschweißt. Das Boot weist keinen doppelten Boden auf. Beim Kentern würde diese Boot untergehen.

4.4 USB Dinghy

Für eine genauere Analyse der Geometrie und Abmessungen des Bootes wird die USB Dinghy herangezogen. Hierbei handelt es sich um eine Selbstbauanleitung für eine Sperrholz Segeljolle. Die USB Dinghy Segeljolle ist in (Abbildung 8) dargestellt (USB Dinghy).

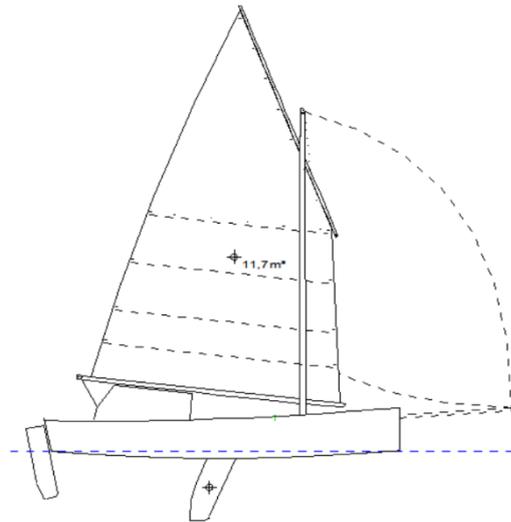


Abbildung 8: USB Dinghy (USB Dinghy)

Diese Segeljolle besitzt eine Gesamtlänge von 5 m und eine Breite von 1,53 m. Zudem wird das segelfertige Boot auf ein Gesamtgewicht von ca.110 kg geschätzt (aw-marine). Somit passt dieses Boot in das Anforderungsprofil für ein Benchmarking.

In Abbildung 9 ist eine technische Zeichnung der USB Dinghy zu erkennen. In dieser Abbildung sind die Form der Seitenwände und des Bodens sehr gut zu erkennen. Zudem ist es durch die angegebene Längenangaben und Hilfsschnitte möglich, den Aufbau des Bootes besser verstehen zu können. Ebenfalls sind die Verstärkungsrippen sehr gut erkennbar.

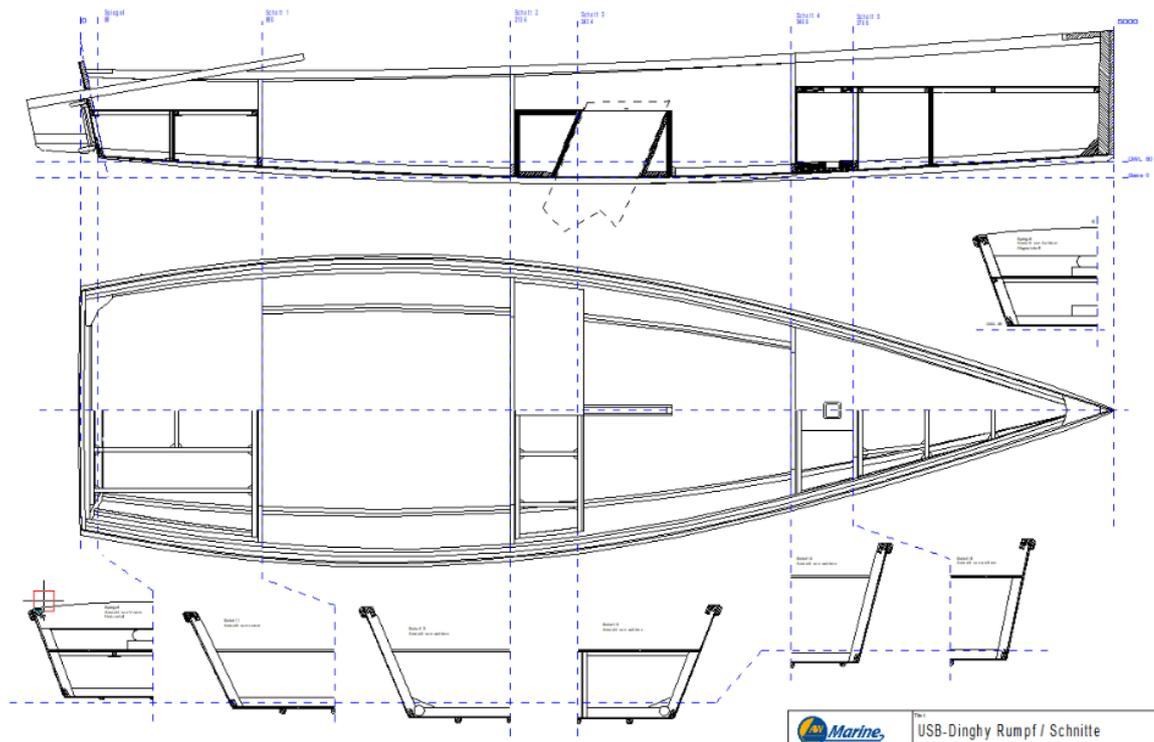


Abbildung 9: Technische Zeichnung USB Dinghy (aw-marine)

Interessant ist bei dieser Segeljolle, dass der Boden nur eine sehr leichte Wölbung (Knickspant) besitzt. Dies soll die Stabilität beim Segeln verbessern. (aw-marine). Die Wölbung ist zwar schwächer ausgebreitet als bei der Laser Bahia, jedoch kann deutlich eine ähnliche Form erkannt werden. Daraus wird vermutet, dass die gebogene Form besonders für die Segeleigenschaften sehr relevant sein wird.

4.5 ILCA 7 Laser Segeljolle

Die ILCA 7 Segeljolle ist eine Einhandsegeljolle, die weltweit sehr verbreitet ist. Das Boot unterscheidet sich etwas von der Laser Bahia. Der Rumpf ist etwas kleiner, die Biegung des Rumpfes etwas geringer und dieses Boot ist nur für zwei Personen ausgelegt. Dennoch wird dieses Boot genauer untersucht, da im Internet ein frei zugängliches 3D – Modell zu finden war (boatdesign). Daher kann diese Segeljolle sehr gut als Orientierung für die Konstruktion genutzt werden. Dieses CAD-Modell ist in Abbildung 10 dargestellt.

Ein CAD-Modell von einer solchen Segeljolle zu besitzen, bietet unter anderem auch noch den Vorteil, dass ein solches Modell in einer späteren Strömungsanalyse, Vergleichswerte bzw. Richtwerte schafft, welche mit unserer eigenen Konstruktion ungefähr erreicht werden müssen.

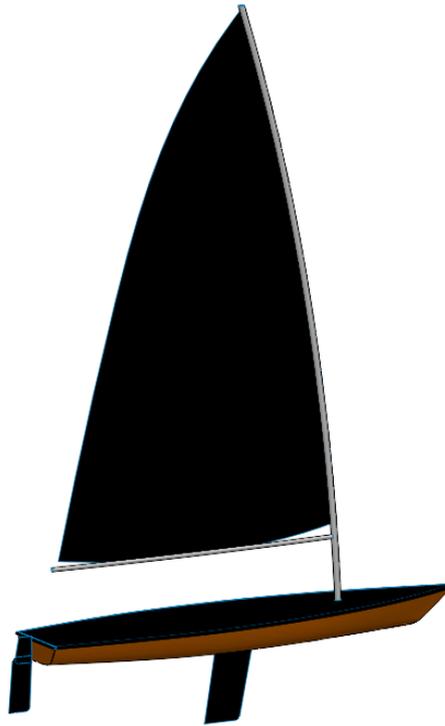


Abbildung 10: CAD-Modell ILCA 7

5 Strömungssimulation mit ANSYS CFD

Für die Entwicklung der Schiffsrümpfe wird eine Strömungssimulation aufgesetzt. Dadurch können vorab bereits Informationen kostengünstig gewonnen werden. Besonders interessant sind hierbei das Strömungsverhalten und die Widerstandskräfte der Bootsrümpfe. Für die Strömungssimulation wird die Software ANSYS-CFD mit der Studentenlizenz verwendet. Hierbei ist die Simulation mit einer maximalen Knotenanzahl von 512 000 begrenzt. Die Strömungssimulation wird in der ANSYS Workbench durchgeführt. Das hat den Vorteil, dass nur ein Setup für die Simulation hinterlegt werden muss und anschließend schnell und effizient die verschiedenen Rumpfformen ausgetauscht und simuliert werden können. In diesem Kapitel wird erläutert, wie die Simulation aufgebaut ist und welche Einstellungen hinterlegt werden

Die Bilder in diesem Kapitel, die eine Rumpfform aufzeigen, sollen nur die Simulation verdeutlichen. Es wird damit keine Aussage getroffen wie geeignet der Rumpf für den Bau einer Segeljolle ist. Es wird das CAD-Modell der ILCA 7 verwendet.

5.1 Domaingröße

Für eine Strömungssimulation muss ein Negativmodell erstellt werden. Das Negativmodell ist in Abbildung 11 gezeigt. Die Bezeichnungen an den Randflächen dienen zur Orientierung für die spätere Simulation.

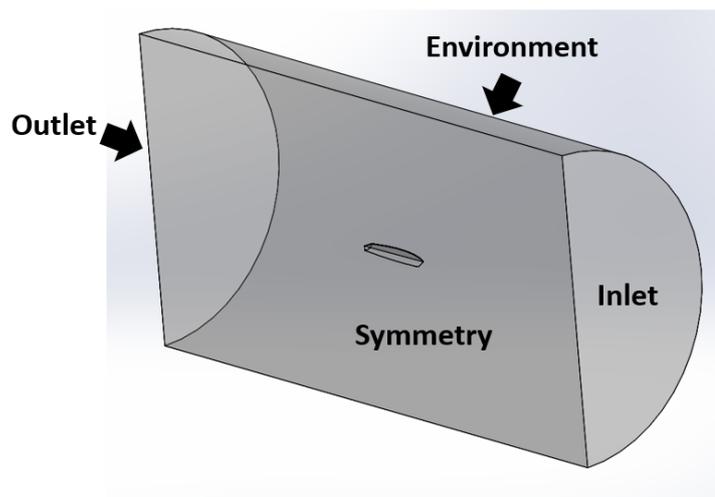


Abbildung 11 Geometrie des CAD-Negativmodells

Das Boot hat einen großen Abstand zu allen Wandbegrenzungen. Der Bereich von Heck zum Outlet ist etwas größer gewählt als der Bereich vom Bug zum Inlet. Das liegt daran,

dass die Wellen sich hinter dem Boot ausbreiten und die Auflösung in diesem Bereich von besonders großem Interesse ist. Die Begrenzung nach außen wurde in Form eines Zylinders erstellt. Das hat den Vorteil, dass „unnötige“ Knoten in den Eckpunkten bei beispielsweise einem Rechteck vermieden werden können und dass bei einer Simulation der Kurvenfahrt der Randabstand identisch ist. Da das Boot Spiegelsymmetrisch ist reicht für die Simulation eine Seitenhälfte aus. Dadurch können Knotenpunkte eingespart und es kann feiner vernetzt werden. Das Boot hat eine Rumpflänge von 4 m und eine Breite von 0,65 m (hälfte der Gesamtbreite). Die Domaingröße besitzt von der Mitte des Zylinders einen Radius von 7,5 m. Vom Bug bis zum Inlet sind es 10,75 m und vom Bug zum Outlet 19,25 m.

5.2 Vernetzung

Bevor mit der eigentlichen Vernetzung gestartet wird, müssen noch die Bereiche, die feiner aufgelöst werden sollen definiert werden. Hierfür wird mithilfe des ANSYS DesignModeler die Bereiche als Volumenkörper definiert. In Abbildung 12 werden die Bereiche deutlich, die feiner aufgelöst werden sollen.

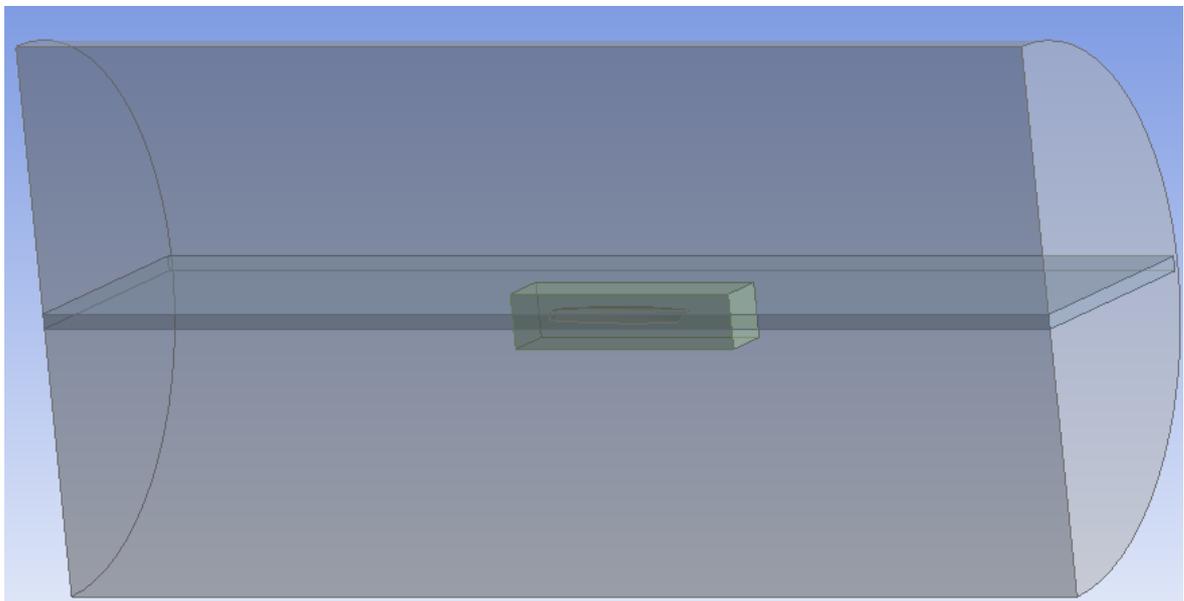


Abbildung 12 Bereiche für die Netzverfeinerung

Es werden zwei Bereiche genauer aufgelöst. In dunkelgrau ist ein Quader dargestellt, welcher sich über den gesamten Bereich erstreckt. Die Höhe wird dabei so hoch gewählt, wie die Wellenbildung erwartet wird. Das Ziel dieser Netzverfeinerung ist es, die

Wasseroberfläche fein aufzulösen und die Wellenbildung vor und hinter dem Boot zu betrachten.

Als weitere Netzverfeinerung wird ein Quader um das Boot erzeugt. Das Ziel hierbei ist, dass die Umströmung des Boots fein dargestellt wird. Ebenso muss der Bootsrumpf fein aufgelöst werden, da hierbei die Drücke, welche auf den Bootsrumpf wirken, eine Auskunft darüber geben, wie stabil der Bootsrumpf ausgelegt werden muss.

Durch die lokale Verfeinerung durch die generierten Einflusskörper ergibt sich ein Netz für die Strömungssimulation. Dieses Netz am Beispiel der ILCA 7 Segeljolle ist zur Verdeutlichung in Abbildung 13 und Abbildung 14 gezeigt.

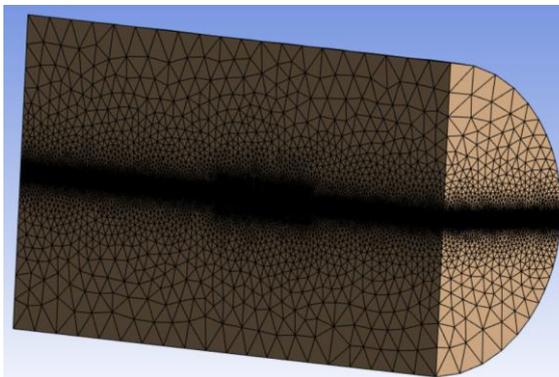


Abbildung 13: Netz der gesamten Simulationsumgebung

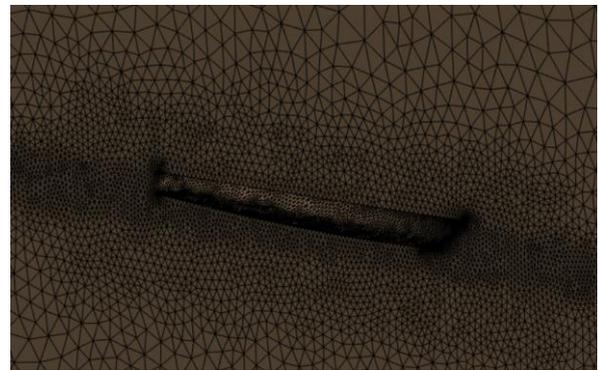


Abbildung 14: Netz im Bereich des umströmenden Boots

Durch die eingestellte Wachstumsrate der Elementgröße von 1,2 wird der umliegende Bereich der Netzverfeinerungen feiner aufgelöst. Die Bereiche, welche sich weiter weg von der Wasseroberfläche und dem Boot befinden, werden somit gröber aufgelöst. Somit können in den „uninteressanten“ Bereichen Knoten eingespart und somit die Rechenleistung erhöht werden. Da das Netz eine hohe Unsicherheit birgt, muss für die einzelnen Rumpfsimulationen eine Netzstudie durchgeführt werden, auf die im Kapitel 5.5 eingegangen wird.

5.3 Pre-Processing der Strömungssimulation

Bei der Umströmung eines Bootsrumpfs sind zwei Fluide zu berücksichtigen. Die Wasseroberfläche trennt hierbei die Luft und das Wasser. Um eine Wellenbildung zu simulieren, und die Realität näherungsweise abzubilden muss demnach eine Zwei-Phasen Simulation durchgeführt werden.

Prinzipiell befindet sich das Boot im bewegten Zustand und eine transiente Simulation würde die Realität genauer abbilden. Jedoch wird durch den deutlich höheren Aufwand auf eine transiente Simulation verzichtet und eine stationäre Simulation durchgeführt. Das Boot befindet sich somit an einer stationären Position und wird von Wasser und Luft mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit umströmt. Da es sich hierbei um ein fließendes Medium handelt, wird der Domain Typ als *Fluid Domain* eingestellt. Zusätzlich muss noch in der Simulation die Oberflächenspannung zwischen Wasser und Luft berücksichtigt werden. Die Oberflächenspannung ist eine Grenzflächenspannung, die zwischen Flüssigkeiten und Gasphasen auftritt. Für die Simulation wird die Temperatur der Medien mit 25 °C festgelegt, wodurch sich eine Oberflächenspannung von $0,072 \frac{N}{m}$ einstellt.

Der Referenzdruck wird auf 1 bar eingestellt. Da jedoch der relative Druck an den Wandbegrenzungen abhängig davon ist wo man sich in der Simulationsumgebung befinden, muss dieser mithilfe einer Formel beschrieben werden. Oberhalb der Wasseroberfläche muss ein Umgebungsdruck (Atmosphärendruck) von 1 bar herrschen. Unterhalb der Wasseroberfläche überlagert sich der Atmosphärendruck und der hydrostatische Druck. Wasser wird hierbei als inkompressibel angenommen. Daraus ergibt sich der Wasserdruck an den Begrenzungen nach der folgenden Formel:

$$p = p_0 + \rho * g * h$$

mit:

- p = Absolut-druck [Pa]
- p_0 = Atmosphärendruck [Pa]
- ρ = Dichte von Wasser mit $997 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- g = Erdbeschleunigung mit $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- h = Tiefe unterhalb der Wasseroberfläche in [m]

Da der Referenzdruck auf 1 Bar eingestellt wurde, kann der Atmosphärendruck herausgestrichen werden und die Formel vereinfacht sich wie folgt:

$$p_{relativ} = \rho * g * h$$

Der relative Druck muss daher oberhalb der Wasseroberfläche 0 Bar betragen und unter der Wasseroberfläche muss dieser abhängig von der Wassertiefe berechnet werden. Die Formel wird in ANSYS als Expression wie folgt hinterlegt:

$$(997 \text{ [kg/m}^3\text{]}) * g * ((-z) + \text{Wasserhoehe}) * \text{step}((-1 * (z - \text{Wasserhoehe}))) / 1 \text{ [m]}$$

Abbildung 15 Relativer Wasserdruck abhängig von der Wassertiefe

Die Formel bezieht sich auf das globale Koordinatensystem aus der CAD-Datei des Negativmodells. Die Boote werden so konstruiert, dass das globale Koordinatensystem sich am Heck an der Unterseite des Rumpfs befinden. Die Z-Achse zeigt dabei nach oben. In Abbildung 16 wird die Position des Koordinatensystems nochmal verdeutlicht.

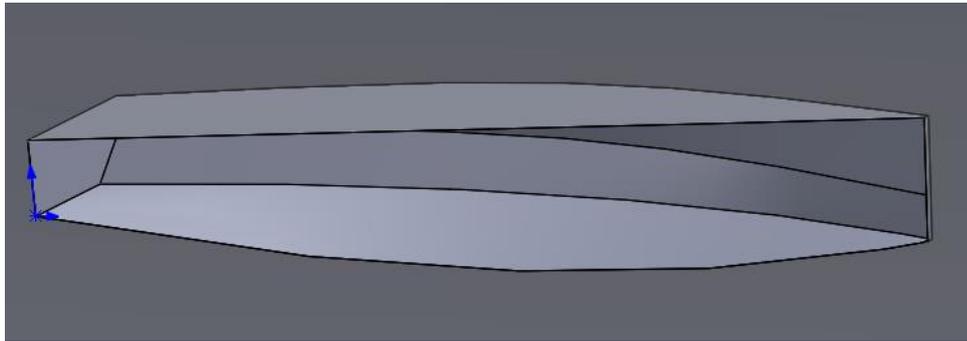


Abbildung 16: Position des Koordinatensystems im CAD-Modell

Die Variable „Wasserhoehe“ wird ebenfalls als Expression hinterlegt. Diese gibt an, wo sich die Wasserlinie (im stehenden Gewässer also ohne Wellenbildung) befindet, ausgehend vom Koordinatensystem aus dem CAD-Modell. Somit wird durch die Rechnung

$$h = (-z) + \text{Wasserhoehe}$$

die Höhe definiert. Bei einer Wasserlinie oberhalb des Koordinatensystems ist der Wert für z Positiv und der Wert für die *Wasserhoehe* ebenfalls. Durch das negative Vorzeichen vor dem z gleicht sich das mit der eingestellten Wasserhöhe aus. Somit ist der Wert h bei variable einstellbaren Wasserhöhe immer Null an der Wasseroberfläche. Sinkt der Wert von z steigt somit die Summe von h . Somit lässt sich die Tiefe der Wasserhöhe variabel für jeden Punkt in der Simulation berechnen.

Für die Simulation ist jedoch noch zusätzlich relevant, dass der Druck oberhalb der Wasserlinie 0 bar ist. Dafür ist der hintere Teil der Formel

$$\text{step} \left(\frac{-1 * (z - \text{Wasserhoehe})}{1 \text{ m}} \right)$$

verantwortlich. Die *step*-funktion in ANSYS ist eine binäre Funktion. Wenn das Argument in der Klammer positiv ist, wird der Wert 1 ausgegeben und bei einem negativen Wert in der Klammer wird der Wert 0 ausgegeben. Es wird noch durch die Einheit [m] geteilt, da die Funktion nur Einheitenlos verwendet werden kann. Somit wird sichergestellt, dass bei der gesamten hinterlegten Funktion nur Drücke $p > 0 \text{ Pa}$ unterhalb der Wasserlinie auftreten können und oberhalb der Wasserlinie immer der relative Druck von 0 Pa herrscht.

Am *inlet* wird die Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben, mit der die Fluide den Bootsrumpf umströmen. In diesem Beispiel wird das Boot in der Verdrängerfahrt mit 5 Knoten ($\approx 2,57$ m/s) umströmt.

Am Outlet hingegen wird nur der *VariableDruck* angegeben, welcher bereits im Kapitel beschrieben wurde. Durch die Definition als *Outlet* wird zusätzlich noch die Randbedingung vorgegeben, dass die Fluide nur aus der Simulation-Umgebung raus, aber nicht mehr reinströmen können.

Für die Seitenbegrenzung *Environment* wird gleich wie beim Outlet nur der *VariableDruck* angegeben. Die Wandbegrenzung wird hierbei aber als *Opening* definiert. Das bedeutet, dass die Fluide sowohl aus der Simulation-Umgebung raus und rein strömen können. Das hat den Vorteil, dass die Strömung, falls die Domaingröße widererwartend zu klein gewählt wurde, nicht durch die Wandbegrenzung beeinflusst, werden kann.

Die Seitenbegrenzung *Symmetry* lässt keine weiteren Einstellungen zu. In der Simulation ist somit hinterlegt, dass diese Wand spiegelsymmetrisch zur Simulationsumgebung ist.

Als Turbulenzmodell wird das Shear-Stress-Modell verwendet. Dieses Turbulenzmodell ist ein Wirbelviskositätsmodell, welches stabil und richtungsunabhängig ist. Das Turbulenzmodell kann Wandgrenzschichten und den turbulenten Freistrahlf lösen.

Strömungssimulationen können mit den Grundgleichungen der Strömungsmechanik nicht analytisch gelöst werden. Daher werden die Differenzialgleichungen durch Differenzgleichungen ersetzt und numerisch gelöst. Dieses Verfahren wird als Diskretisierung bezeichnet. ANSYS CFD hat die Möglichkeit das Diskretisierungsverfahren auszuwählen. Dabei kann manuell ein Blendingfaktor zwischen 0 und 1 oder das Diskretisierungsverfahren High-Resolution ausgewählt werden. Ein Blending-Faktor von 0 entspricht einer Diskretisierung erster Ordnung. Das bedeutet, dass die Differenzgleichungen zum nächsten Gitterpunkt gebildet werden. Bei dem Diskretisierungsverfahren zweiter Ordnung werden die Differenzgleichungen über eine zentrale Differenz gebildet und entsprechen einem Blending-Faktor von 1. Mit einer steigenden Ordnung des Diskretisierungsverfahren wird das Modell zwar genauer gelöst, hat, aber den Hang zu einem instabilen Verhalten, was zu einer Nichtkonvergenz führen kann. Bei einer niedrigeren Ordnung tritt numerische Diffusion auf, wodurch die Lösung „verschmiert“. Um hierbei Abhilfe zu schaffen, hat ANSYS CFD das Diskretisierungsverfahren High Resolution entwickelt. Dieses hat nahezu die Genauigkeit einer Diskretisierung zweiter Ordnung, weist jedoch ein sehr stabiles Verhalten auf. Daher

wird für diese Strömungssimulation das High Resolution Diskretisierungsverfahren angewendet.

Mit den eingestellten Parametern kann die Simulation durch den Solver gelöst werden. Als Ausgabeparameter wird die Auftriebskraft und die Widerstandskraft definiert.

5.4 Post-Processing und Plausibilitätscheck

Allgemein wird zwischen drei verschiedenen Fahrzuständen unterschieden. Der Verdränger-fahrt, der Halbgleiter-fahrt und der Gleiter-fahrt (wie in Abbildung 17 dargestellt). Es gibt noch den Fahrzustand „Fliegen“ (Foiling) auf den hier aber nicht eingegangen wird.

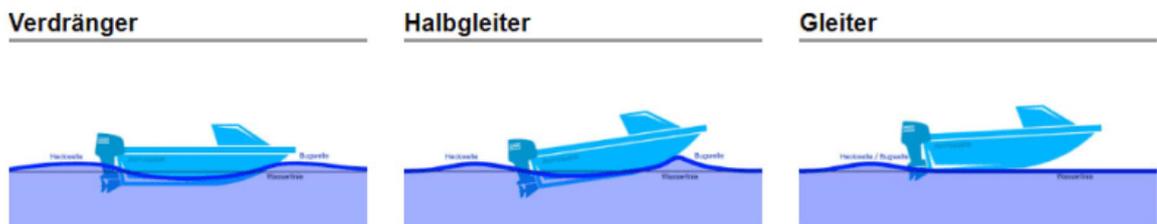


Abbildung 17 Verschiedene Fahrzustände (Gocht)

Welcher Fahrzustand sich einstellt hängt von der Geschwindigkeit und der Rumpfgeometrie ab. Zur Validierung der Simulation, wurde vorgegeben, dass sich der Rumpf in der Verdränger-fahrt befindet. Somit muss die Wellenbildung in der Simulation identisch wie in Abbildung 18 schematisch gezeigt sein.

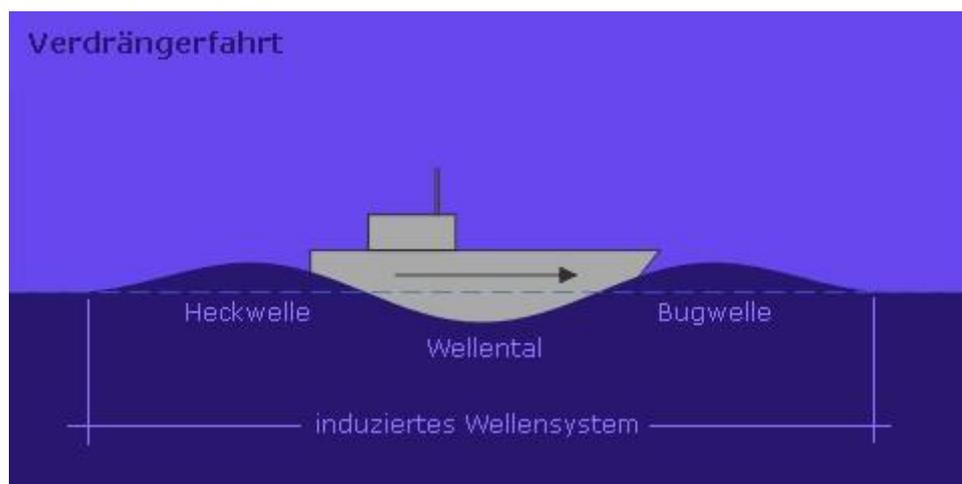


Abbildung 18 Wellenbildung Verdränger-fahrt (Schwarzer)

Durch die Vorwärtsbewegung entsteht eine Bug- und eine Heckwelle. Beide Wellen breiten sich im Wasser in die gleiche Richtung aus, in die das Boot fährt. Im Bugbereich entsteht

die Bugwelle, anschließend das Wellental und hinter dem Rumpf die Heckwelle. In Abbildung 19 ist die Bugwelle aus der Simulation dargestellt. Die Bugwelle befindet sich an der erwarteten Position und ist somit plausibel.

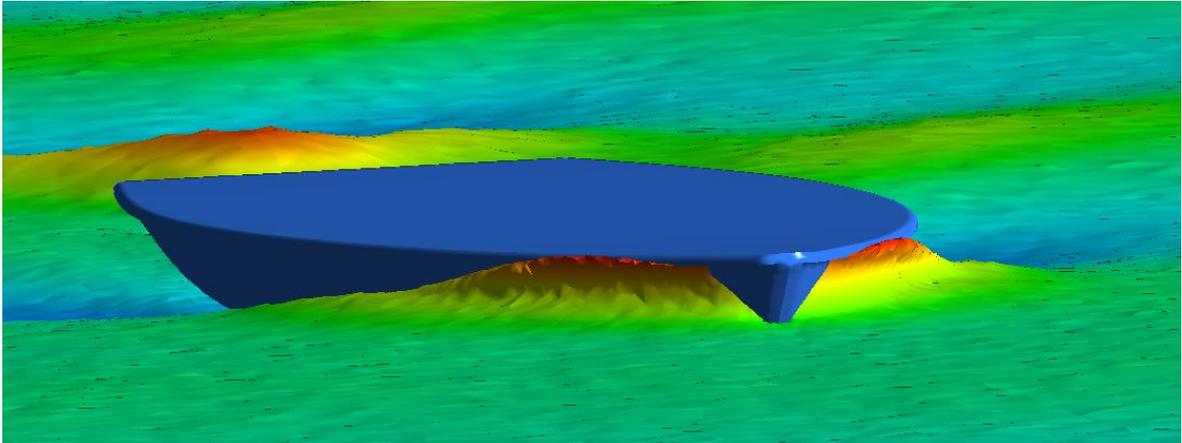


Abbildung 19 Bugwelle der Simulation

In Abbildung 20 ist die Bugwelle eines Modell Segelboots dargestellt, welches sich ebenfalls in der Verdränger-fahrt befindet. Die Ähnlichkeit der beiden Bugwellen wird hierbei sehr deutlich. Der spitz zulaufende Bug verdrängt das Wasser und back- und steuerbordseitig wird das Wasser „weggespritzt“.



Abbildung 20: Bugwelle Modellsegelboot (Bartholomä)

Somit kann gesagt werden, dass der Verlauf der Bugwelle aus der Simulation plausibel ist.

Aus der Seitenansicht der Simulation ergibt sich Abbildung 21.

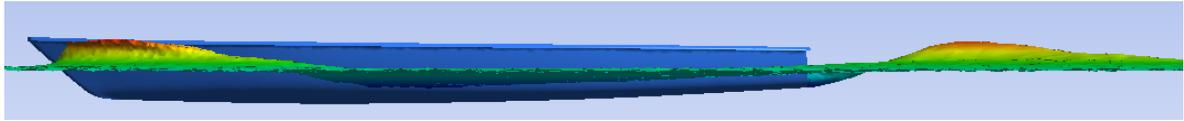


Abbildung 21: Seitenansicht des Wellensystems der Simulation

Ebenfalls kann man hier die Bugwelle im vorderen Bereich des Rumpfs an dem Anstieg des Wasserspiegels erkennen. Anschließend wird das Wellental sehr deutlich und ist ungefähr in der Mitte des Rumpfs zu erkennen. Hinter dem Bootsumpf wird dann auch die Heckwelle deutlich. Da das Boot in der Verdränger-fahrt simuliert wurde und die Wellenbildung einer Verdränger-fahrt entspricht, ist somit dieser Plausibilitätscheck erfüllt.

Der britische Physiker Lord Kelvin (William Thomas) hat herausgefunden, dass die Wellenausbreitung hinter Schiffen oder anderen schwimmenden Objekten in stillen Gewässern immer $19,47^\circ$ beträgt, solange die Froude-Zahl $\leq 0,49$ beträgt (Rabaud und Moisy). Die Froude-Zahl berechnet sich wie folgt:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g * L}}$$

mit:

- U = Geschwindigkeit des Schiffes [m]
- g = Erdbeschleunigung mit $9,81 [m/s^2]$
- L = Länge des Schiffsrumpfs [m]

Durch die Vorgaben im Pre-Processing ergibt sich eine Froude-Zahl von 0,41 und ist somit kleiner als 0,49. Daher muss der Winkel der Wellenausbreitung $19,47^\circ$ betragen. Um zu verstehen, woher dieser Winkel kommt, wird zur Veranschaulichung die Bugwelle als unendlich kleines Überdruckgebiet vorgestellt. Dieser Druckpunkt bewegt sich mit der Schiffsgeschwindigkeit und erzeugt ein System von Diagonal- und Querwellen. Durch die leicht gekrümmten divergierenden Diagonalwellen breitet sich die Wellen mit einem halben Öffnungswinkel von $19,47^\circ$ aus (Abdel-Maksoud und Rieck). Die Ausbreitung der einzelnen Wellen ist in Abbildung 22 verdeutlicht.

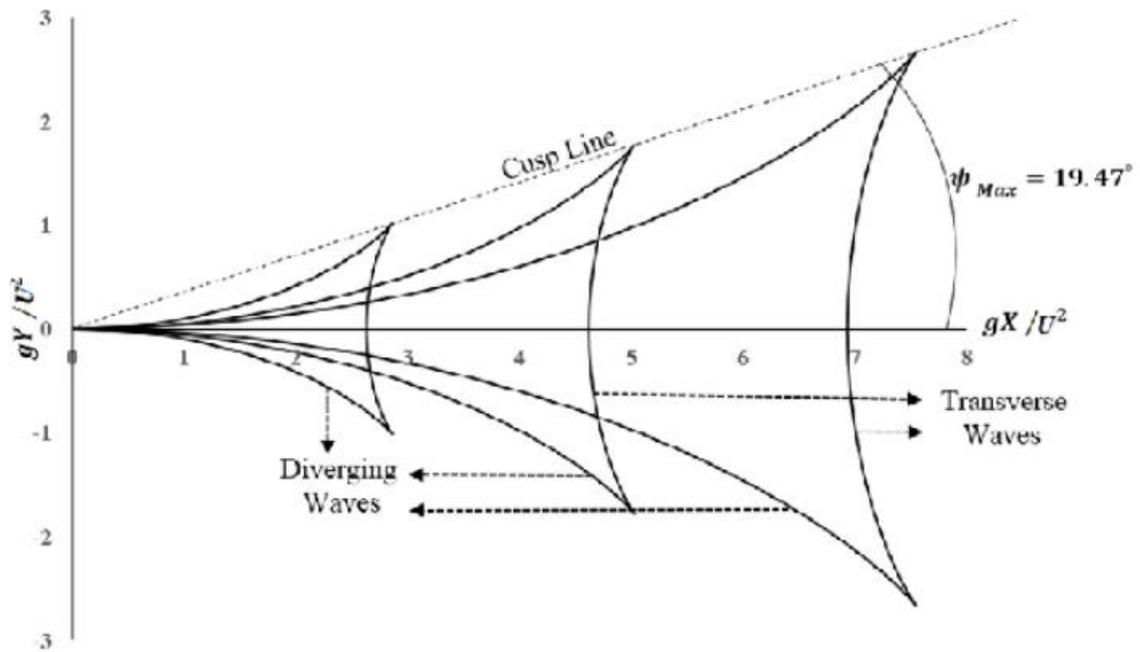


Abbildung 22: Verdeutlichung des Kelvin Ship Wake Angle (Sphaier, Amiri und Vitola)

Dieser Winkel muss in der Simulation ebenfalls zu finden sein. Die Wellenausbreitung hinter dem Boot ist in Abbildung 23 dargestellt.

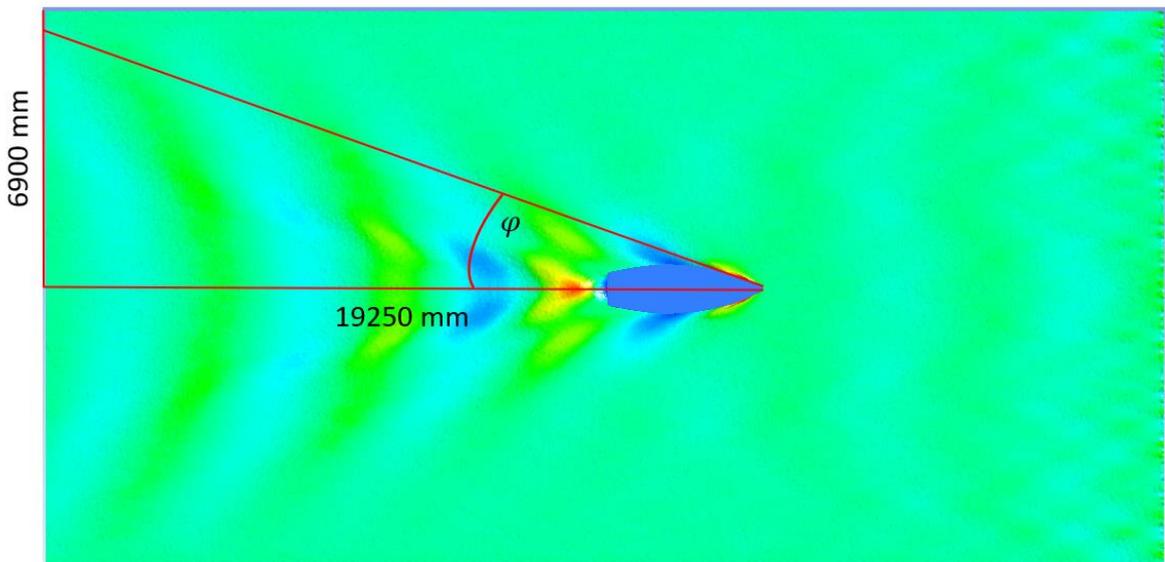


Abbildung 23: Wellenausbreitung der CFD-Simulation

Die Länge vom Bug bis zum Outlet ist durch die CAD-Datei definiert und beträgt 19250 mm. Die Breite bis zu der seitlichen Begrenzung ist ebenfalls mit 7500 mm definiert. Da sich die Wellen jedoch nicht bis zur seitlichen Begrenzung ausbreiten, wird der Breite von 6900 mm

graphisch definiert. Ebenfalls ist die Wellenausbreitung nicht eindeutig, wodurch die eine Unsicherheit berücksichtigt werden muss. Aus den geometrischen Beziehungen ergibt sich:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{6900 \text{ mm}}{19250 \text{ mm}}\right) = 19,72^\circ$$

Mit der Berücksichtigung der Unsicherheiten wird der Abstrahlwinkel als plausibel erachtet.

Insgesamt ist sowohl die Wellenbildung als auch der Abstrahlwinkel der Wellen sehr plausibel und stimmt mit den Literaturwerten bzw. dem realen Verlauf gut überein. Auf die Kräfte, die auf den Bootsrumpf wirken, wird hierbei nicht eingegangen, da es sich hierbei nur um eine exemplarische Darstellung handelt und die Plausibilität der Simulation überprüft werden soll.

5.5 Netzunsicherheit

Eine besonders hohe Unsicherheit bei CFD-Simulation geht von dem erzeugten Netz aus. Um den Effekt genauer zu untersuchen, wird eine Netzstudie von der Simulation durchgeführt. Es wird der Einfluss von sechs verschiedenen Netzen untersucht mit jeweils unterschiedlichen Knotenanzahlen. Die Einstellungen aus der Simulation wie in Kapitel 5.3 sind bei allen Netzen identisch. Das erste Netz besitzt 50'000 Knoten, das zweite 150'000 Knoten, das dritte 200'000 Knoten, das vierte 300'000 Knoten, das fünfte 400'000 Knoten und das sechste mit nahezu der maximalen Knotenanzahl (der Studentenlizenz) von 500'000 Knoten. Der Einfluss wird hierbei an der Auftriebskraft und der Widerstandskraft des Bootes bewertet. Es wird hierbei nur auf den Netzeinfluss eingegangen und nicht auf die Höhe der wirkenden Kräfte.

In Abbildung 24 ist die Auftriebskraft des Bootes dargestellt.

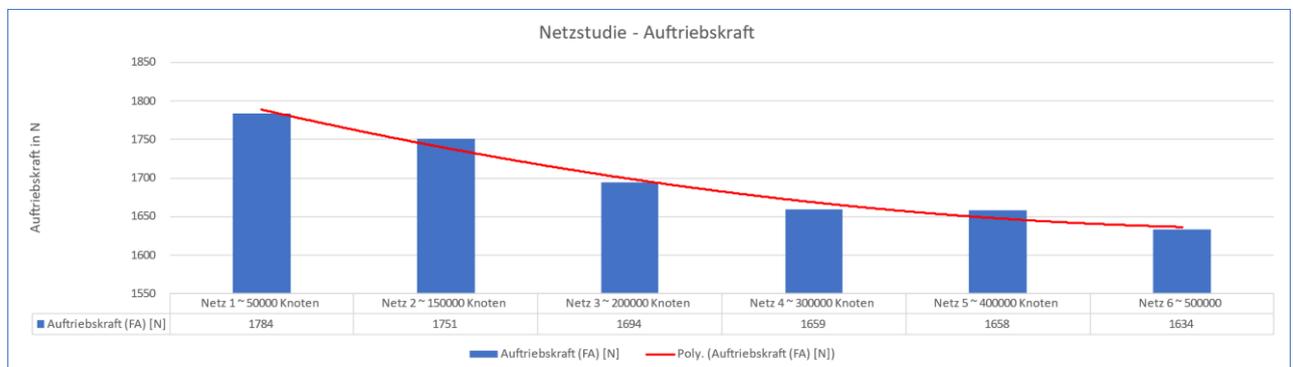


Abbildung 24 Netzstudie - Auftriebskraft

Hierbei wird der Netzeinfluss sehr deutlich. Bei einer niedrigen Knotenanzahl wird die Auftriebskraft deutlich höher berechnet als bei einer hohen Knotenanzahl. Die simulierten Werte sind als blaue Säulen dargestellt. In Rot ist eine Trendlinie, welche ein Polynom zweiter Ordnung ist. Hierbei wird deutlich, dass die Simulation, je feiner das Netz aufgelöst wird, einem stationären Wert annähert. Sobald dieser stationäre Wert erreicht ist, kann von einer Netzunabhängigkeit gesprochen werden. In diesem Fall wird selbst bei der feinsten Auflösung noch keine Netzunabhängigkeit erreicht. Jedoch kann schon eine Tendenz erkannt werden. Ab 300'000 Knoten ändert sich der Wert deutlich weniger verglichen mit den groben Netzen unterhalb von 300'000 Knoten.

Etwas anders sieht der Verlauf bei der Widerstandskraft aus, die in Abbildung 25 dargestellt ist.

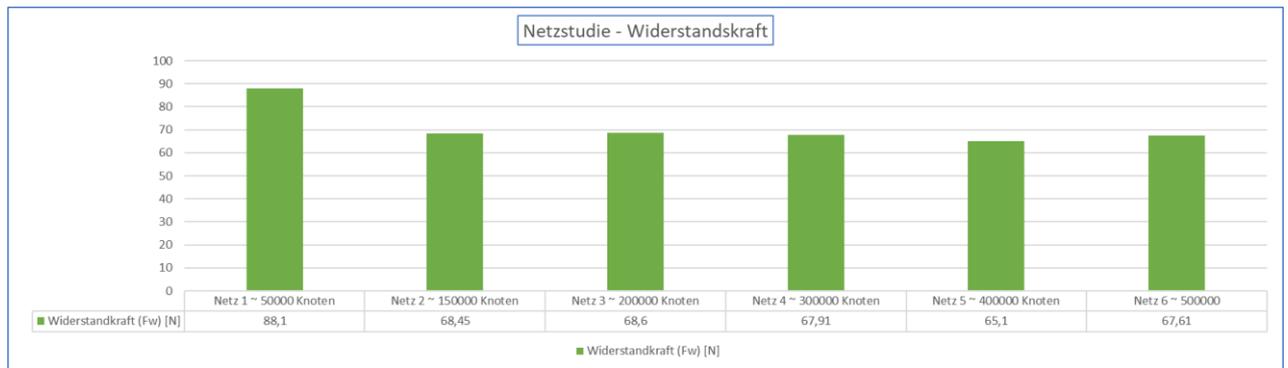


Abbildung 25 Netzstudie Widerstandskraft

Bei 50'000 Knoten ist die berechnete Widerstandskraft deutlich höher als bei den anderen Netzen. Ab 150'000 Knoten unterscheiden sich die Werte je nach Netz um maximal 3 N. Dieser Einfluss ist relativ gering und daher kann für die Widerstandskraft gesagt werden, dass das Netz nahezu unabhängig ist. Theoretisch wäre bei einem unendlich feinen Netz kein Unterschied zum nächstgrößeren Netz zu erkennen. Dadurch würde jedoch der Rechenaufwand und somit die Rechendauer ins Unermessliche steigen.

Da jedoch bei jeder Rumpfform ein anderes Netz erzeugt wird, kann nicht pauschal gesagt werden, ab wann die Netzunabhängigkeit erreicht wird. Jedoch haben verschiedene Rumpfe einen ähnlichen Aufbau, wodurch ein ähnlicher Verlauf wie in Abbildung 24 und Abbildung 25 erwartet wird. Für einen ersten Vergleich werden daher die folgenden Simulationen bei einer Knotenanzahl von 300'000 Knoten durchgeführt, da hierbei bereits gute Ergebnisse erzielt werden können.

5.6 Weiter Unsicherheiten

Eine Simulation ist immer nur ein an die Realität angenähertes Modell. Somit hat nicht nur das Netz einen Einfluss auf die Simulation, sondern hängt von vielen weiten Faktoren ab, die hier benannt werden.

Turbulenzmodell:

Als Turbulenzmodell wurde das SST-Model verwendet, da es häufig als Standardmodell verwendet wird. Jedoch gibt es viele weitere Modelle, wie beispielsweise das Reynoldsspannungsmodell, mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen.

Stationäre und Transiente Simulation:

Die hier beschriebene Simulation ist eine stationäre Simulation. Da jedoch die Realität ein System in Bewegung ist, würde eine transiente Simulation die Realität besser abbilden. Durch den hohen Rechenaufwand, wird jedoch darauf verzichtet und die Unsicherheit bleibt bestehen.

Vernachlässigung der Dichteunterschiede:

Bei der Simulation werden alle Medien als inkompressibel angenommen und die Dichteunterschiede werden vernachlässigt. Vereinfacht kann Wasser auch als inkompressibel berücksichtigt werden. Luft hingegen ist in der Realität sehr wohl kompressibel. Die Machzahl der Luft bei einer Temperatur von 25 °C und bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 5 Knoten beträgt 0,007. In der Simulation tritt zwar eine Unsicherheit auf, jedoch ist bei so geringen Machzahlen diese Unsicherheit vernachlässigbar.

6 Rumpfkonstruktion

In diesem Kapitel wird näher auf die unterschiedlichen Konstruktionen der Rümpfe eingegangen. Wie die unterschiedlichen Konstruktionen verglichen werden können, wird im ersten Kapitel erläutert. Im Anschluss wird die Entwicklung der unterschiedlichen Rumpfformen beschrieben und dargestellt.

6.1 Vergleichbarkeit der Boote

Das Ziel ist es die Ergebnisse der Widerstandskraft und die Auftriebskraft aus der Strömungssimulation bei den verschiedenen Rümpfen vergleichen zu können. Daher wird für die Strömungssimulation festgelegt, dass sich alle Rumpfformen in der in der Verdrängerfahrt befinden. Eine Analyse und Auswertung der Gleitfahrt ist in der Strömungssimulation zwar möglich, jedoch durch zu viele unbekannte Parameter nicht sinnvoll. Ebenfalls lassen sich dadurch die verschiedenen Rumpfformen nicht vergleichen und eine Aussage über die Eignung bzw. wo Verbesserungspotenzial besteht, kann nicht getroffen werden. Daher werden alle Rumpfformen in der Verdrängerfahrt simuliert.

Durch die unterschiedlichen Formen der Rümpfe unterscheidet sich dann die Eintauchtiefe im Wasser. Um hierbei die Rümpfe zu vergleichen, muss die Eintauchtiefe vorab bestimmt werden. Für die Bestimmung der Eintauchtiefe, wird das Boot rein statisch (ohne Berücksichtigung der Wellenbildung) betrachtet. Die Boote müssen so weit im Wasser eintauchen, bis durch das verdrängte Volumen eine Auftriebskraft entsteht, die genauso groß wie die Gewichtskraft ist.

$$F_G = F_A$$

Mit:

F_G = Gewichtskraft

F_A = Auftriebskraft

Die Gewichtskraft setzt sich dabei zusammen aus:

$$F_G = m_{ges} * g$$

Mit:

m_{ges} = Gesamtmasse

g = Erdbeschleunigung ($9.81 \frac{m}{s^2}$)

Die Gesamtmasse besteht aus der vorgegebenen Rumpfmasse aus der Anforderungsdefinition mit 150 kg, der Gesamtmasse der Personen an Bord und etwaige

Zusatzgewichte (Mast, Ruder etc.) die mit 30 kg angenommen werden. Daraus ergibt sich eine Gesamtmasse von:

$$m_{ges} = m_{Rumpf} + m_{Personen} + m_{Zusatz}$$

$$m_{ges} = 150 \text{ kg} + 4 * 80 \text{ kg} + 30 \text{ kg} = 500 \text{ kg}$$

Daraus resultiert dann eine Gewichtskraft von:

$$F_G = m_{ges} * g = 500 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4905 \text{ N} = F_A$$

Mit Hilfe dieser Berechnung ist somit auch die Mindestauftriebskraft des Bootes bekannt. Über diese Auftriebskraft kann anschließend das verdrängte Volumen des Bootes ermittelt werden und somit die Ausgangsbasis für einen Vergleich geschaffen werden:

Die Auftriebskraft F_A berechnet sich wie folgt:

$$F_A = \rho_{wasser} * V * g$$

Mit:

$$\rho_{wasser} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ Dichte von Wasser}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ Gewichtskraft}$$

$$V = \text{Verdrängtes Volumen}$$

Die Formel muss dann nach dem verdrängen Volumen umgestellt werden

$$V = \frac{F_A}{\rho_{wasser} * g}$$

Mit konkreten Werten ergibt es ein verdrängtes Volumen von:

$$V = \frac{4905 \text{ N}}{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$V = 0,501 \text{ m}^3$$

Mit dem ermittelten Volumen, das das Boot verdrängen muss, um die Anforderungen zu erfüllen, kann nun mithilfe des CAD-Modells eine Wassertiefe für jede Modellvariante individuell bestimmt werden, bei der dieses Volumen auftritt. Dadurch können die verschiedenen Rumpfvvarianten anhand der ermittelten Widerstandskraft und Auftriebskraft gut verglichen werden.

6.2 Entwicklung der Rumpfformen

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Entwicklung der Rumpfformen und der Darstellung der Weiterentwicklungen.

Durch Internetrecherche konnte ein geeignetes CAD-Modell einer ILCA 7 LASER Segeljolle gefunden werden, das ähnliche Anforderungen an Leistung und Performance erfüllt wie das zu entwickelnde Modell. Somit dient dieses Modell als Referenz bei der Entwicklung.

Zu Beginn der Konstruktion liegt das Hauptaugenmerk darauf, ein einfaches und fertigungsgerechtes Modell zu erstellen, das alle grundlegenden Anforderungen erfüllt. Dabei wird speziell darauf geachtet, dass die Konstruktion mit Aluminium umgesetzt werden kann und eine einfache Herstellbarkeit möglich ist. Dieser Ansatz half dabei, ein besseres Verständnis für die Konstruktion des Bootes zu entwickeln und frühzeitig mögliche Herausforderungen zu erkennen. Das Ziel bestand darin, eine solide Grundlage für die weitere Entwicklung zu schaffen, die sowohl die geforderte Leistungsfähigkeit als auch die praktische Umsetzbarkeit gewährleistet.

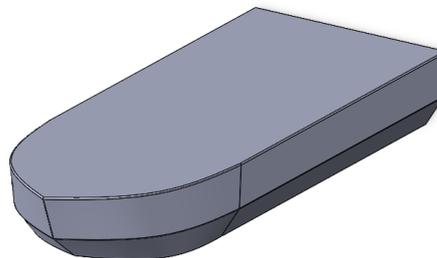


Abbildung 26: Boot V1

Mithilfe des beschriebenen CFD-Modells aus Kapitel 5 wird die Rumpfform auf Widerstandskraft und Auftriebskraft untersucht und mit dem Referenzmodell der ILCA 7 LASER Segeljolle verglichen. Hierdurch werden Stärken und Schwächen der Konstruktion aufgedeckt und Optimierungspotenziale identifiziert. Für den Vergleich wurde mit Hilfe des CADs ermittelt, dass die Modellvariante Boot V1 (in Abbildung 26 dargestellt) bei einer Wassertiefe von 0,096m das gewünschte verdrängte Volumen von $V = 0,5 \text{ m}^3$ erreicht (siehe Kapitel 6.1).

Die Simulation ist konvergiert und die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse

Modell Varianten	Wassertiefe [m]	Widerstandskraft [N]	Auftriebskraft [N]	Verhältnis (FA/FW)
Laser Segeljolle	0,153	68,44	1750,65	25,58
Boot V1	0,096	195,05	2342,61	12,01

Im Vergleich der Modellvarianten ist deutlich erkennbar, dass die Variante "Boot V1" bei einer geringeren Wassertiefe von 0,096 m eine deutlich höhere Widerstandskraft von 195,04 N im Wasser aufweist. Im Gegensatz dazu hat die "ILCA 7 Laser Segeljolle" bei einer Wassertiefe von 0,153 m eine niedrigere Widerstandskraft von 68,44N.

Das Ziel bei einer Segeljolle besteht in der Regel darin, eine geringe Widerstandskraft zu haben, um die Gleiteigenschaften des Bootes zu verbessern und somit höhere Geschwindigkeit zu erreichen. Zudem weist die "Laser Segeljolle" ein Verhältnis von Auftriebskraft zu Widerstandskraft (FA/FW) von 25,57 auf, während "Boot V1" ein Verhältnis von 12,01 hat. Ein höheres Verhältnis deutet auf eine effizientere Leistung hin.

Im nächsten Entwicklungsschritt werden die Bootvarianten V5 und V6 vorgestellt. Variante 5 (in Abbildung 27 dargestellt) ist darauf ausgerichtet, sich noch stärker an die ILCA 7 Laser Segeljolle anzupassen, indem sie eine relativ schmale Rumpfform aufweist und das Heck eng zuläuft. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Aluminiumbleche nicht gebogen werden müssen. Somit könnte das Boot gut von der Werkstatt der HTWG hergestellt werden.

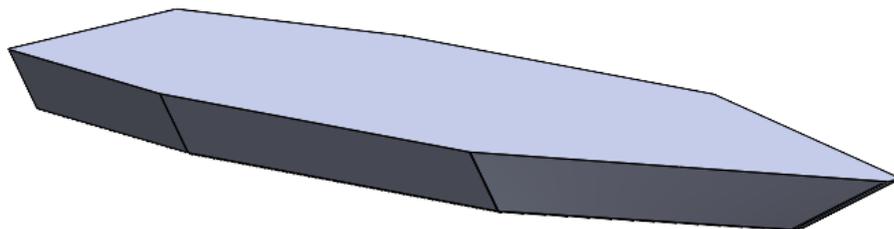


Abbildung 27: Boot V5

Variante 6 stellt eine Modifikation von Variante 5 dar und ist in Abbildung 28 zu sehen. Hier wurde der Übergang von dem Boden zur Seitenwand in zwei Bereiche unterteilt. Der untere Bereich des Rumpfes folgt dabei weiterhin der schmalen Form von Variante 5. Auch hierbei werden ausschließlich flache, nicht gebogene Aluminiumbleche verwendet.

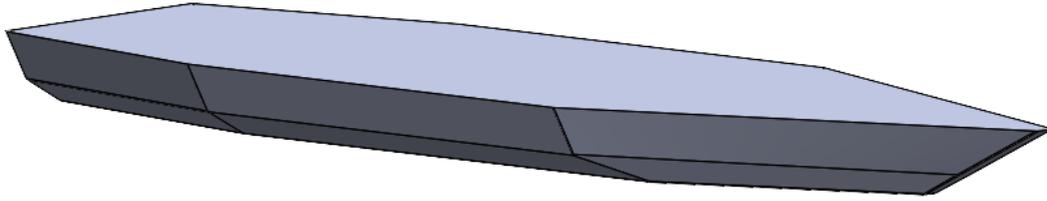


Abbildung 28: Boot V6

Beide Varianten wurden ebenfalls in der CFD-Simulation analysiert und mit den vorherigen Berechnungen verglichen.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse

Modell Varianten	Wassertiefe [m]	Widerstandskraft [N]	Auftriebskraft [N]	Verhältnis (FA/FW)
Laser Segeljolle	0,153	68,45	1750,65	25,58
Boot V1	0,096	195,05	2342,61	12,01
Boot V5	0,155	112,25	1626,4	14,49
Boot V6	0,163	112,35	1590,82	14,16

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die Bootvarianten V5 und V6 eine ähnliche und insgesamt verbesserte Leistung im Vergleich zur Variante V1 aufweisen. Ihr Verhältnis von Auftriebskraft zu Widerstandskraft liegt zwischen den Werten der Laser Segeljolle und der Boot V1-Variante, was auf eine bessere Gleitfähigkeit und Effizienz hinweist.

Allerdings erreichen sowohl V5 als auch V6 eine etwas geringere Auftriebskraft im Vergleich zur ILCA 7 Laser Segeljolle. Die Widerstandskräfte von V5 und V6 sind nahezu identisch und liegen näher an der Laser Segeljolle als an der V1-Variante. Besonders interessant ist hierbei, dass die eintauchtiefe des Bootes V6 deutlich höher, jedoch die Widerstandskraft nahezu identisch ist. Jedoch nahezu doppelt so hoch wie bei der ILCA 7 Laser Bahia. Das Boot V5 zeigt dabei eine etwas bessere Performance in der Auftriebskraft. Dies zeigt, dass die Weiterentwicklungen von V5 und V6 in die richtige Richtung gehen. Allerdings ist man bei dem Verhältnis von Auftriebskraft zur Widerstandskraft weit entfernt von dem Referenzmodell.

Im nächsten Entwicklungsschritt wird die Bootvariante V10 vorgestellt. Hierbei ist das Ziel, eine optimale Umströmung zu erreichen und dadurch die Widerstandskraft zu senken und die Gleiteigenschaften zu verbessern. Abbildung 28 zeigt das Boot V10.

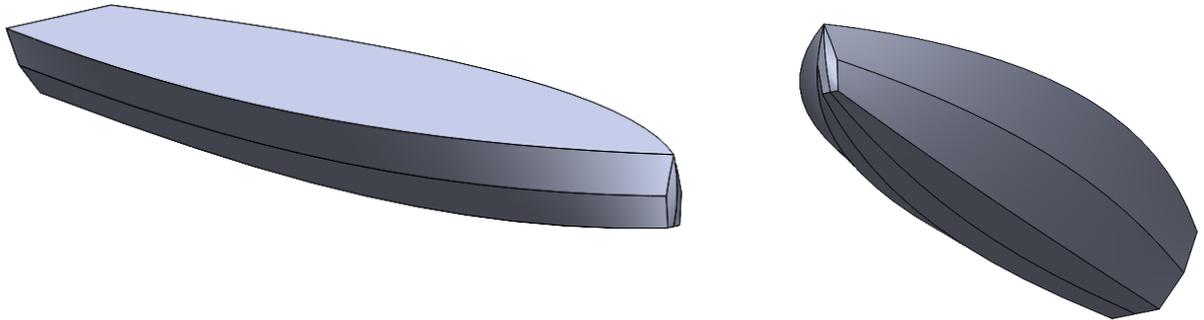


Abbildung 29: Boot V10

Ein wesentlicher Unterschied der Bootvariante V10 im Vergleich zu den bisherigen Varianten besteht darin, dass der Boden dieses Modells nicht flach ist, sondern eine Wölbung aufweist. Diese Gestaltung wurde auf Grund des Benchmarkings eingebaut und übernommen.

Um diese Modellvariante nun Validieren zu können wurde hier ebenfalls die Simulation durchgeführt und erzielte folgende Ergebnisse (Tabelle 3).

Tabelle 3: Simulationsergebnisse

Modell Varianten	Wassertiefe [m]	Widerstandskraft [N]	Auftriebskraft [N]	Verhältnis (FA/FW)
Laser Segeljolle	0,153	68,45	1750,65	25,58
Boot V1	0,096	195,046	2342,61	12,01
Boot V5	0,155	112,25	1626,4	14,49
Boot V6	0,163	112,35	1590,82	14,16
Boot V10	0,135	86,28	2093,31	24,26

Die Bootvariante V10 wurde in der CFD-Simulation bei einer Wassertiefe von 0,135 m analysiert. Dabei zeigte sie vielversprechende Eigenschaften mit einer Widerstandskraft von 86,28 N und einer Auftriebskraft von 2093,31 N. Das Verhältnis von Auftriebskraft zu Widerstandskraft (FA/FW) beträgt 24,26, was darauf hindeutet, dass diese Modellvariante dem Referenzmodell, der Laser Segeljolle, sehr ähnlich ist und somit eigentlich als optimal einzustufen wäre.

Jedoch ist zu beachten, dass diese Kennzahl nicht immer allein ausreicht, um die Eignung eines Segelbootes zu beurteilen. Trotz der vielversprechenden hydrodynamischen Eigenschaften in der Simulation können andere Faktoren das Fahrverhalten stark beeinflussen. Insbesondere bei der Bootvariante V10 mit ihren sehr rundlichen Formen besteht die Gefahr, dass das Segelboot schnell anfangen kann zu kippen, was vermieden

werden sollte, um die Sicherheit und Stabilität während des Segelns zu gewährleisten. Ebenfalls ist bei der Laser Bahia im Bereich des Hecks ein nahezu flacher Rumpfboden zu erkennen. Somit weist die Laser Bahia gute Gleiteigenschaften in der Gleitfahrt auf. Das Boot V10 hat im hinteren Bereich eine sehr runde Form, wodurch vermutet wird, dass die Gleiteigenschaften in der Gleitfahrt nicht besonders gut ausfallen.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen die herausfordernde Aufgabe, die besten hydrodynamischen Eigenschaften für eine Segeljolle zu erreichen, die sowohl in der Simulation als auch in der realen Anwendung optimal funktionieren. Die Optimierung eines Segelbootes erfordert eine sorgfältige Abwägung verschiedener Faktoren, wie Stabilität, Manövrierfähigkeit, Geschwindigkeit und Gleitfähigkeit, um die bestmögliche Gesamtleistung zu erzielen.

Im nächsten Entwicklungsschritt wurde ein Bootsrumpf entwickelt, der einerseits eine optimale Formgebung für eine effiziente Umströmung ermöglicht und gleichzeitig einfach in der Fertigung ist. Somit könnte der Bootsrumpf in der Werkstatt der HTWG hergestellt werden. Dabei entstand das in Abbildung 29 dargestellte Boot V12. Das Boot besitzt einen flachen Boden während der Seiten durch kleine Aluminiumbleche eine runde Form bekommen. Die Bleche selbst sind nicht gebogen, wodurch es einfach zu verschweißen wäre und nicht zu Spannungen im Material führt. Ebenfalls können diese Bleche in der HTWG-Werkstatt hergestellt werden und es werden keine großen Biegewerkzeuge benötigt, wodurch vermutlich von externe Unternehmen Unterstützung benötigt werden würde. Durch die kleinen Bleche konnte die Form der ILCA 7 Laser Bahia nachgeahmt werden.

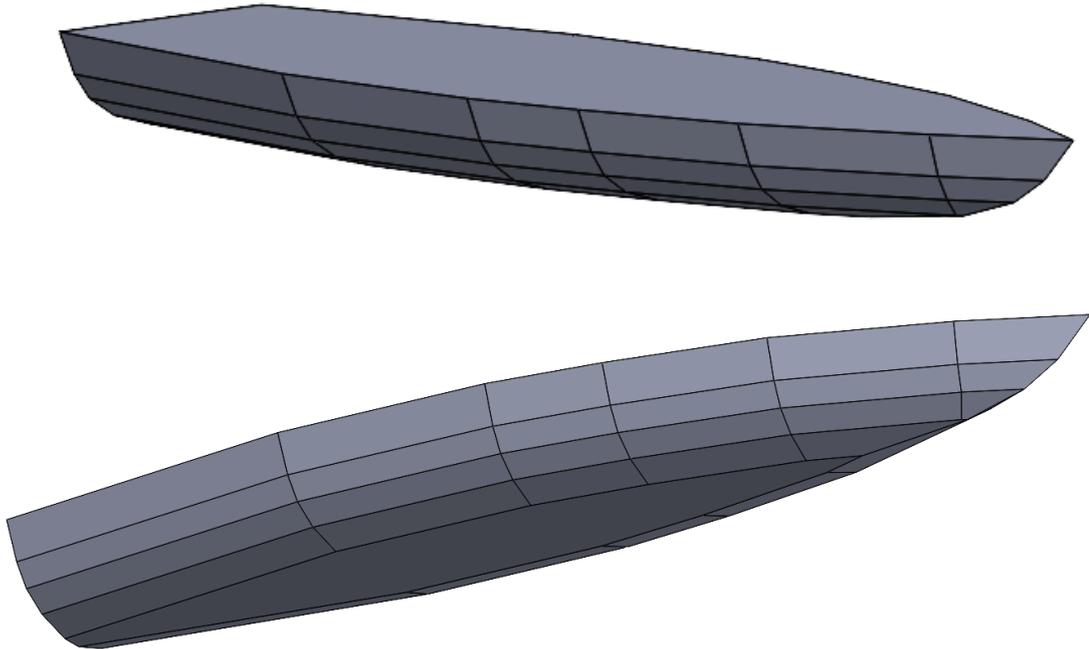


Abbildung 30: Boot V12

Allerdings wurde dieser Ansatz bald verworfen und nicht weiterverfolgt bzw. in die Rumpfungwicklung integriert. Der Grund dafür liegt darin, dass eine erhebliche Menge an Schweißarbeit erforderlich wäre und bei der Verwendung von Aluminium der Nachteil des Verzugs auftreten könnte. Zudem birgt jede Schweißnaht das Risiko von Undichtigkeiten, dem entgegengewirkt werden sollte. Nach Rücksprache mit der Werkstatt stellte sich heraus, dass das Biegen dünner und längerer Bleche sie vor keine große Herausforderung stellt.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den bereits entwickelten Bootsrümpfen, wurden schließlich zwei finale Bootsmodelle konzipiert, die in einem Laborversuch näher untersucht werden sollten. Für jede der beiden Bootsversionen, V21 und V22, sind zudem zwei Untermodelle vorgesehen, um die Erkenntnisse aus dem Benchmarking genauer zu überprüfen.

Abbildung 31 zeigt die Bootsvariante V21. Diese Variante verfügt über einen gewölbten Rumpf und weist einen geradlinigen Übergang von der Bodenfläche zu den Seitenwänden auf (siehe rote Markierung). Diese geradlinige Form wurde vom Benchmarking der Laser Bahia übernommen. Sie soll ermöglichen, dass das Boot bei seitlicher Neigung auf diesem Übergang segeln kann und dadurch eine solide Grundstabilität gewährleistet wird. Ebenfalls wurde hierbei darauf geachtet, dass der hintere Bereich des Rumpfes relativ flach ist, um gute Gleiteigenschaften zu erzielen.

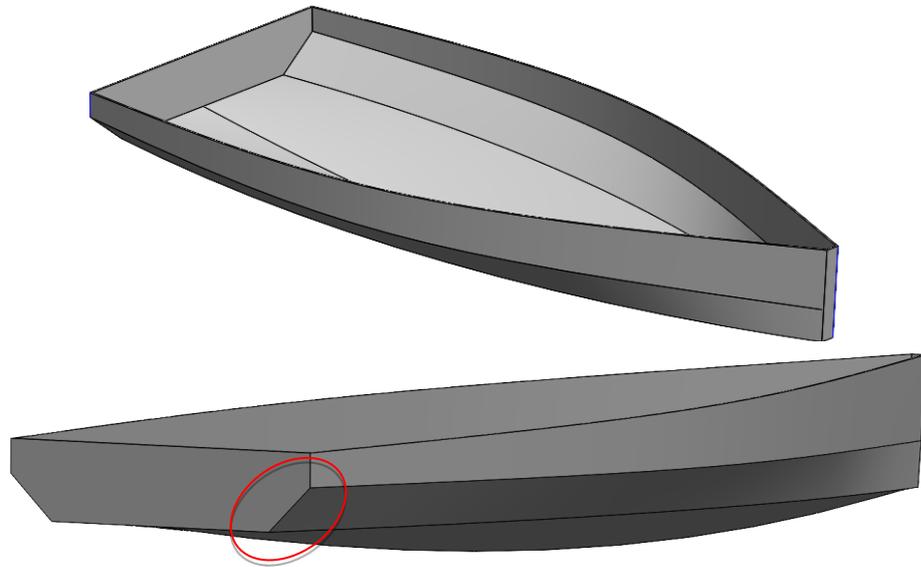


Abbildung 31: Boot V21 mit gewölbtem Boden und flacher Seitenwand

Die zweite Variante der Bootsmodellierung V21 zeigt anstelle des geradlinigen Übergangs einen gewölbten Übergang (erkennbar an der roten Markierung in Abbildung 32). Diese Variation wurde aufgrund der Erkenntnisse aus dem Benchmarking eingeführt, da viele andere Boote, die im Rahmen des Benchmarkings untersucht wurden, ähnliche Übergangsformen aufweisen. Es wird vermutet, dass ein gewölbter Übergang zu einer besseren Umströmung führt.

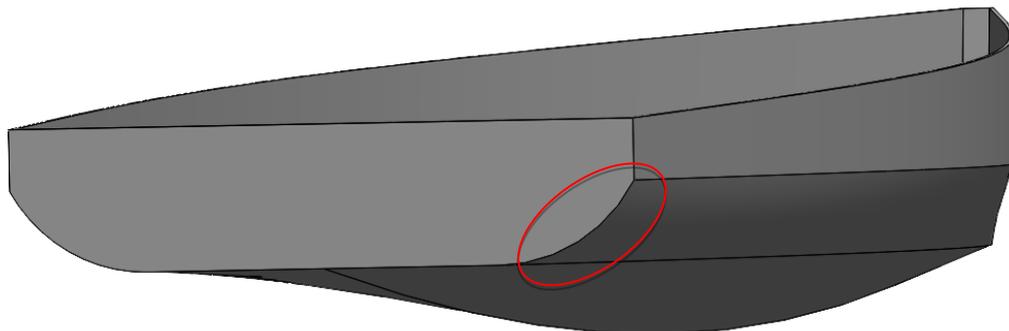


Abbildung 32: Boot V21 mit gewölbtem Boden und gewölbter Seitenwand

In Tabelle 4 sind herausragende Ergebnisse sowohl für die Widerstandskraft als auch für die Auftriebskraft bei beiden Varianten ersichtlich. Besonders bemerkenswert ist, dass das Verhältnis in beiden Modifikationen das des Referenzmodells übertrifft. Dies lässt den Schluss zu, dass bedeutende Fortschritte in der Rumpfentwicklung erzielt wurden und signifikante Verbesserungen erreicht wurden. Jedoch muss dabei darauf hingewiesen

werden, dass die entwickelten Bootsrümpfe größer sind als die ILCA 7 Laser Segeljolle. Damit lässt sich die deutlich höhere Auftriebskraft erklären.

Entgegen den Erwartungen weist du die Bootsvariante mit der seitlich rund gestalteten Seitenwand eine etwas höhere Widerstandskraft auf als die flach gestaltete Variante. Es wurde erwartet, dass durch die Rundung eine bessere Umströmung stattfindet und somit die Widerstandskraft geringer sein sollte. Das wurde jedoch bei der Simulation widerlegt. Die Variante mit dem flachen Übergang weist eine etwas geringere Widerstandskraft auf. Zusätzlich besitzt die Variante mit dem flachen Übergang eine höhere Auftriebskraft von 40 N.

Tabelle 4: Simulationsergebnisse

Modell Varianten	Wassertiefe [m]	Widerstandskraft [N]	Auftriebskraft [N]	Verhaeltnis (FA/FW)
Laser Segeljolle	0,153	68,45	1750,65	25,58
Boot V1	0,096	195,05	2342,61	12,01
Boot V5	0,155	112,25	1626,40	14,49
Boot V6	0,163	112,35	1590,82	14,16
Boot V10	0,135	86,28	2093,31	24,26
Boot V21 seitlich flach	0,039	85,87	2444,43	28,47
Boot V21 seitlich rund	0,039	88,54	2404,58	27,16

Abschließend erfolgt die Vorstellung der Variante V22 (Abbildung 33 und 33). Diese Variante unterscheidet sich lediglich von Boot V21 darin, dass der Boden nicht gewölbt, sondern flach ist. Mit dieser Untersuchung sollte der Einfluss einer solchen Formgebung, insbesondere in Kombination mit einer gewölbten bzw. geradlinigen Seitenwand, beleuchtet werden.

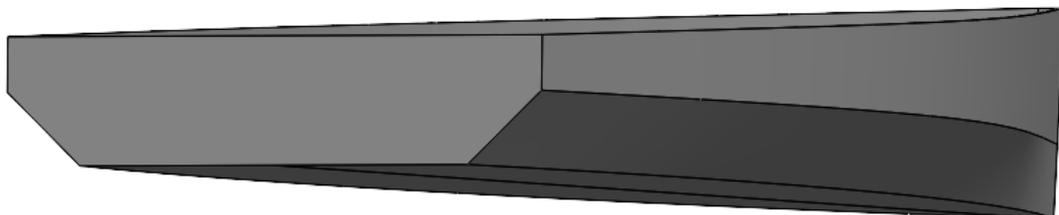


Abbildung 33: Boot V21 flache Seitenwand

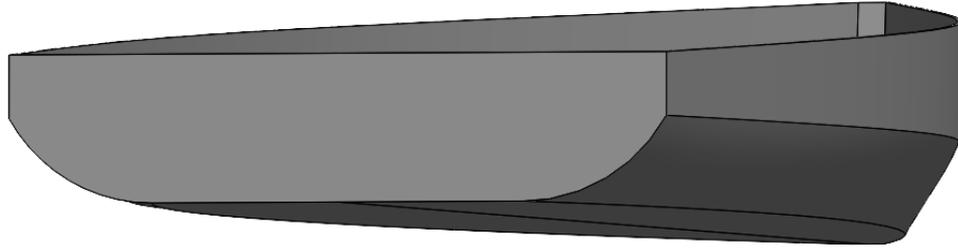


Abbildung 34: Boot V21 gewölbter Seitenwand

Die Inspiration für diese Untersuchung stammt aus dem Benchmarking-Modell LelieClass 560 (Kapitel 4.2). Dieses Modell verfügt ebenfalls über einen flachen Boden und zieht durch diese Formgebung den Vorteil einer einfacher Herstellbarkeit mit sich.

Hierbei wurde ebenfalls eine Simulation mit diesen beiden Varianten durchgeführt und führte zu folgenden Ergebnissen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Simulationsergebnisse

Modell Varianten	Wassertiefe [m]	Widerstandskraft [N]	Auftriebskraft [N]	Verhaeltnis (FA/FW)
Laser Segeljolle	0,153	68,45	1750,65	25,58
Boot V1	0,096	195,05	2342,61	12,01
Boot V5	0,155	112,25	1626,40	14,49
Boot V6	0,163	112,35	1590,82	14,16
Boot V10	0,135	86,28	2093,31	24,26
Boot V21 seitlich flach	0,039	85,87	2444,43	28,47
Boot V21 seitlich rund	0,039	88,54	2404,58	27,16
Boot V22 seitlich flach	0,099	129,34	2454,37	18,98
Boot V22 seitlich rund	0,096	127,95	2384,05	18,63

Das Resultat aus der Simulation ergab, dass die Widerstandskraft durch einen flachen Boden um mehr als 40 % gesteigert wurde und somit in der Verdrängerfahrt deutlich weniger mobil ist als durch einen gewölbten Unterboden. Die Auftriebskraft ist bei den Varianten V21 und V22 vergleichbar. Die Segeleigenschaften sollen aber in einem Laborversuch noch quantifiziert werden.

7 Referenzboot Laser Bahia

Mit dem Laborexperiment in Kapitel 7 konnten keine entscheidenden Erkenntnisse zur Bestimmung der optimalen Rumpfform gewonnen werden. Somit wurde nach qualitativen Alternativen gesucht. Um weiter Erkenntnisse zu gewinnen, wurde ein regionaler Aluminium-Boothändler kontaktiert, um dessen Expertenmeinung einzuholen. Allerdings zeigte dieser keine Interesse daran, seine Informationen mit der Hochschule Konstanz zu teilen oder eine Kooperation einzugehen.

Als Alternative die Rumpfformen zu bewerten und zu optimieren wird daher das Referenzboot, die Laser Bahia, besichtigt, inspiziert, vermessen und relevante Bereiche genauer analysiert.

Bei dem Besichtigen des Bootes war die Position des Segelmastes von entscheidender Bedeutung. Da die Abmaße zwischen der Aluminiumsegeljolle und der Laser Bahia nahezu identisch sind konnte die Position des Segelmastes direkt von der Laser Bahia übernommen werden.

Ebenfalls ist die Position und der Mechanismus des Schwertes entscheidend. Für die Position werden ebenfalls die Abmaße der Laser Bahia verwendet. Der Mechanismus wie das Schwert sich bewegen lässt, ist leider bei der Laser Bahia, ohne eine Demontage nicht zu sehen. Jedoch konnte anhand der Größe des Schwertkastens verstanden werden, wie der Mechanismus allgemein funktioniert. Genauer wird dabei in Kapitel 9.2.3 eingegangen. Ebenfalls konnte die Befestigung des Genackers die Position am Bug (wie in Abbildung 35 dargestellt) von der Laser Bahia übernommen werden.



Abbildung 35 Befestigung Genacker an der Laser Bahia

Besonders wichtig um ähnliche Strömungs- und Segeleigenschaften bei der Aluminiumsegeljolle wie die Laser Bahia zu erreichen wurde ein besonderes die Rumpfform analysiert. Bei der Laser Bahia wird deutlich, dass die die Rumpfunterseite etwas gewölbt ist und der tiefste Punkt ungefähr beim Schwert ist. In Abbildung 36 ist das gut zu erkennen.



Abbildung 36 Laser Bahia Seitenansicht

Ebenfalls wurde bei der Inspektion deutlich, dass die Laser Bahia im vorderen Bereich relativ spitz an der Unterseite zusammenläuft und am Heck eine nahezu gerade Rumpffläche zu erkennen ist. Der vordere Bereich ist entscheidend, um gute Strömungseigenschaften und der flache hintere Bereich, um gute Gleiteigenschaften beim Segeln zu erreichen. Diese Rumpfform soll bei der Auswahl für die geeignete Aluminiumsegeljolle berücksichtigt werden.

8 Auswahl des Rumpfs

In diesem Kapitel wird auf die finale Rumpfgeometrie eingegangen. Hierfür wird die Simulation und der Vergleich mit dem Referenzboot herangezogen. Zusätzlich werden noch die Fertigungskriterien der HTWG-Werkstatt berücksichtigt.

Wie bereits bei der Versuchsdurchführung im Wasserkanal beschrieben, wurde hierbei eine Vorauswahl der Bootsrümpfe getroffen, die bei der Simulation die besten Ergebnisse erzielt haben. Hierbei wird unterschieden zwischen einer flachen Rumpfform und einer gewölbten Rumpfform wie bei der Laser Bahia. Ebenfalls gibt es jeweils noch die Option den Übergang von der Unterseite zu den Seitenelementen gerade oder gebogen zu fertigen.

Bereits in der Simulation hat sich gezeigt, dass die Rumpfgeometrie mit dem flachen Boden ein niedrigeres Verhältnis zwischen der Auftriebskraft und der Widerstandskraft aufweist. Daher wird aus rein simulativer Sicht sich für das Boot mit dem gewölbten Unterboden entschieden. Verglichen mit dem Referenzboot wird diese Aussage untermauert. Denn die Laser Bahia mit ihrer sehr guten Segeleigenschaft weist ebenfalls diese gebogene Rumpfform auf. Nach Nachfrage bei der Werkstatt wurden die verschiedenen Möglichkeiten diskutiert. Prinzipiell ist eine Fertigung mit einem flachen Boden einfacher. Da jedoch vermutet wird, dass mit einem gewölbten Boden deutlich bessere Segeleigenschaften erreicht werden, hat die Werkstatt die Möglichkeit ein Negativmodell des Rumpfes herzustellen. Es ist zwar mit höherem Aufwand verbunden, jedoch möglich diese Geometrie herzustellen.

Des Weiteren muss entschieden werden, ob der Übergang von Unterboden zur Seitenwand flach oder gewölbt hergestellt wird. In der Simulation ist kein Unterschied zu erkennen. Bei der Laser Bahia ist dieser Übergang gerade und für die Werkstatt ist ein gerader Übergang auch einfacher herzustellen. Daher wird sich auf einen geraden Übergang geeinigt.

Die Rumpfgeometrie für die sich nun entschieden wird, ist die Bootsvariante 21 mit geradem Übergang. Die Version ist in Abbildung 37 dargestellt.

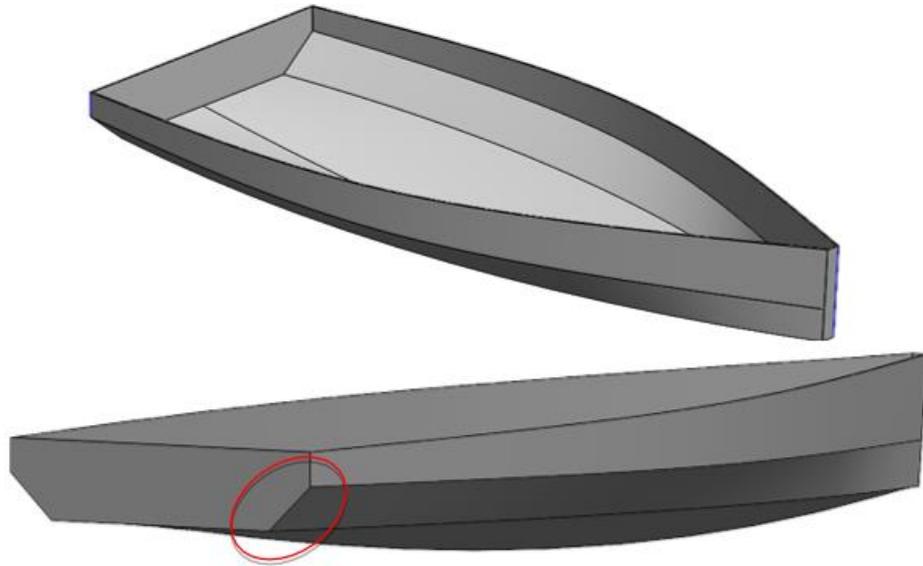


Abbildung 37 Finale Rumpfform der Aluminiumjolle

An dieser Version werden auch die weitem Konstruktionen vorgenommen.

9 CAD-Konstruktion

Nachdem sämtliche Entscheidungen zur Rumpfform der Segeljolle getroffen wurden, unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Formen sowie nach Durchführung eines Benchmarkings in verschiedenen Bereichen, wird nun mit der endgültigen Konstruktion der Segeljolle begonnen. Ein wichtiger Punkt hierfür ist, dass das Boot in einer fertigungsgerechten Konstruktion aufgebaut wird.

Im folgenden Abschnitt wird dieser Prozess näher erläutern und die einzelnen Bereiche im Detail vorgestellt.

9.1 Rumpf

Zu Beginn stand die Anforderung im Vordergrund, den Rumpf so zu gestalten, dass er fertigungsgerecht aufgebaut und mittels geeigneter Fügeverfahren miteinander verbunden werden kann. Hierbei kommt dem Fügeverfahren eine entscheidende Rolle zu, da es den Belastungen standhalten und gleichzeitig dicht sein muss. Das Vermeiden von Undichtigkeiten ist von großer Bedeutung, da eindringendes Wasser den Rumpf gefährden und das Boot zum Sinken bringen könnte. Zudem muss das gewählte Fertigungsverfahren kostengünstig, einfach umzusetzen und innerhalb der Hochschulwerkstatt realisierbar sein. Infolgedessen wurde die Wahl getroffen, den gesamten Rumpf und die späteren Anbauteile durch Schweißverfahren zu verbinden.

Der für die Fertigung geeignete Rumpf, wie in Abbildung 38 dargestellt, setzt sich aus insgesamt sieben separaten Blechen zusammen. Dabei handelt es sich um ein durchgängiges Blech im Heckbereich sowie die Seitenwände, die jeweils aus zwei spiegelbildlichen Teilen bestehen. Ebenfalls besteht der Boden aus zwei Blechhälften.

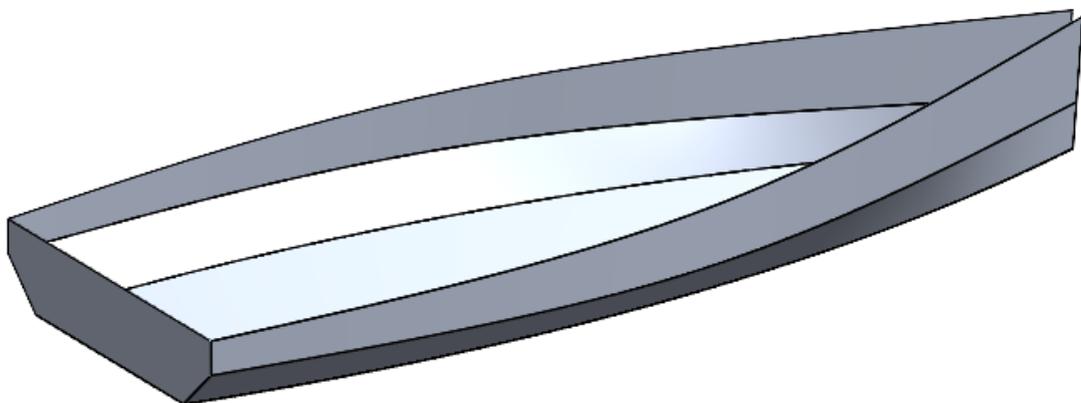


Abbildung 38: Fertigungsgerechter Rumpf

Während der Konstruktionsphase wurde spezielles Augenmerk daraufgelegt, dass eine vordefinierte Form für die Schweißnaht bereits in die Gestaltung integriert ist. Dies ermöglicht eine gleichmäßige und stabile Verbindung der einzelnen Bleche. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass der Rumpf von außen geschweißt werden kann, da eine bessere Zugänglichkeit damit gewährleistet ist.

Im Anschluss sind Bilder dargestellt (Abbildung 39) in denen keilförmige Übergänge zwischen den einzelnen Blechen zu erkennen sind. In diesen Bereichen soll die Schweißnaht angebracht werden. Gleichzeitig rundet es auch das Gesamtbild des Rumpfes ab.

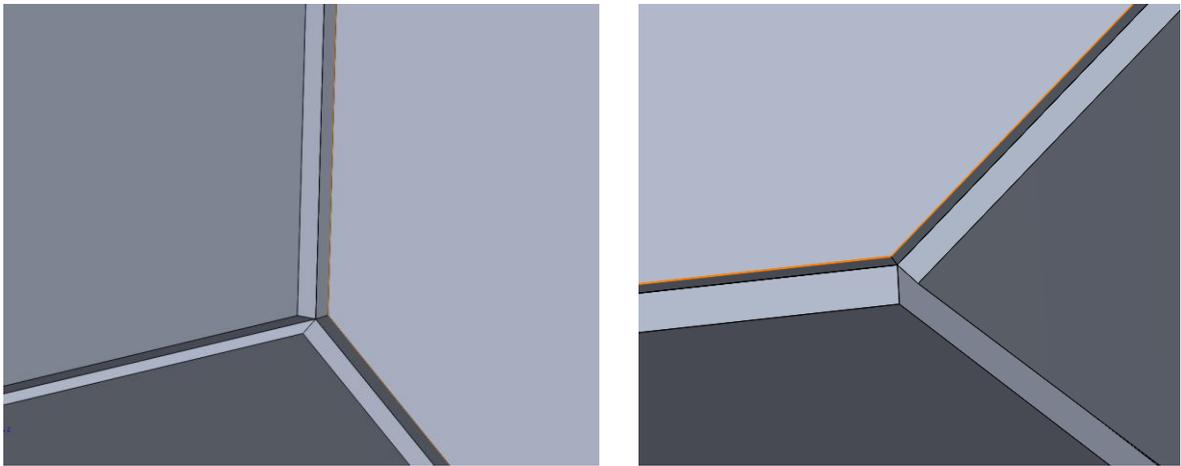


Abbildung 39: Schweißstellen Rumpf

Zum Schluss wurde nach Absprache mit der Werkstatt und der Recherche sich dafür entschieden, dass die Wandstärken von allen Blechen bis auf den Boden 3 mm betragen. Der Boden besteht aus Sicherheitsgründen aus 4 mm Alublech.

9.2 Rippenkonstruktion

Der wichtigste Bestandteil dieser Segeljolle ist die Rippenkonstruktion. Diese Konstruktion dient dazu, die auftretenden Kräfte aufzufangen und gleichmäßig zu verteilen. Es ist besonders wichtig, in diesem Bereich darauf zu achten, an geeigneten Stellen Material einzusparen, um die Gesamtkonstruktion wirtschaftlich zu gestalten und den Leichtbau zu gewährleisten.

In Abbildung 40 ist der gesamte Aufbau der Rippenstruktur zu erkennen und wird anschließend im Detail näher erläutert.

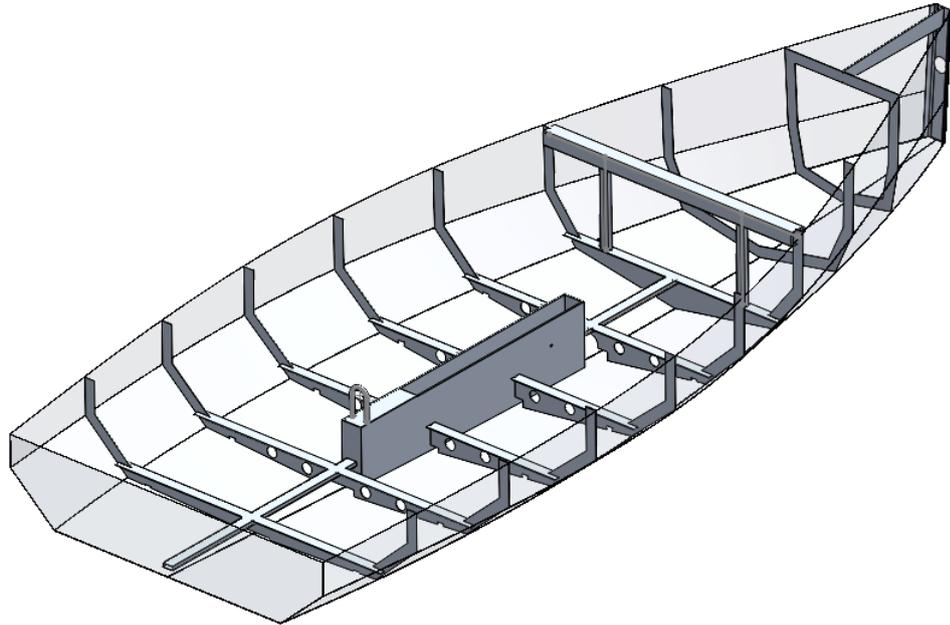


Abbildung 40: Rippenkonstruktion

9.2.1 Grundgerüst

Im ersten Konstruktionsschritt wurde in einem gleichmäßigen Abstand von 500 mm die Rippen in den Rumpf eingebaut (Abbildung 41). Die vordersten drei Elemente (vom Bug) sehen in der Struktur und Form ein wenig unterschiedlich zu den restlichen Rippen aus. Der Grund hierfür liegt darin, dass auf den restlichen Rippen der Boden fixiert bzw. angebracht wird. Zudem wird in Verbindung mit dem Boden und den Rippen der benötigte Lufteinschluss hergestellt, damit das Boot bei einer Kenterung nicht sinken kann.

Die Materialstärke von dem gesamten Grundgerüst beträgt jeweils 3 mm.

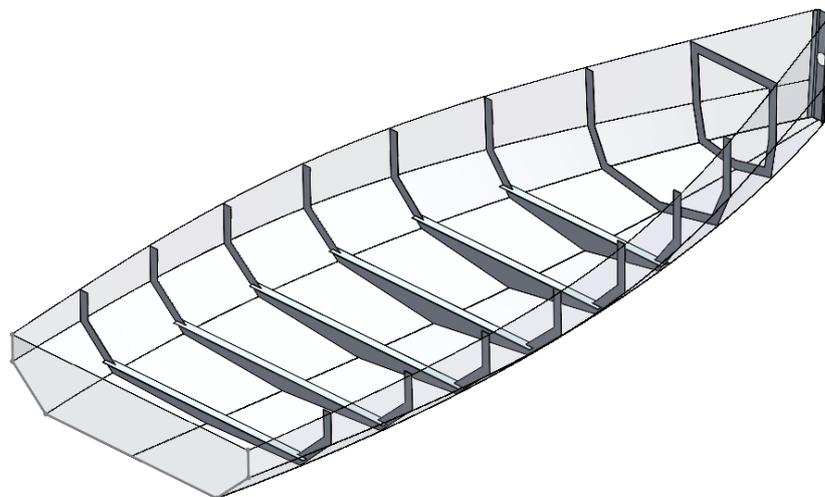


Abbildung 41: Erster Schritt der Rippenkonstruktion

9.2.2 Verstärkungen der Rippen

Im nächsten Schritt werden in das Gesamtsystem noch Verstärkungsstreben eingearbeitet, um einerseits eine gute Grundstabilität gewährleisten zu können und eine weitere Fixiermöglichkeit für den späteren Boden erhalten zu können. In diesem Fall wurden standard Vierkanthohlprofile 50x20x2 mm verwendet (lila Markierung in Abbildung 42).

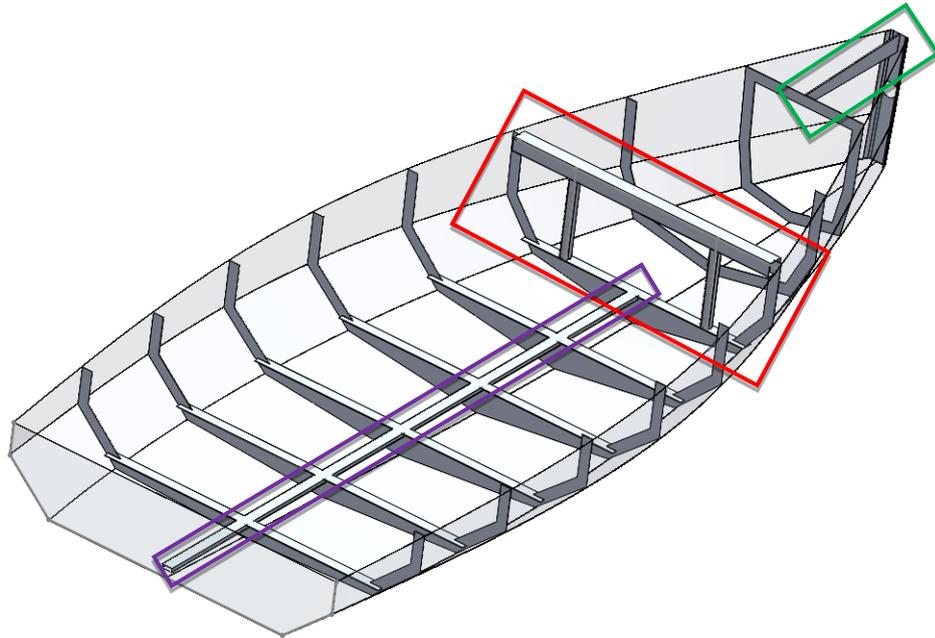


Abbildung 42: Verstärkung der Rippenkonstruktion

In dem rot markierten Bereich in der vorherigen Abbildung ist die Abstützung bzw. die Aufnahme für den Mast geplant. Das querlaufende Vierkantprofil besitzt die Maße 50x20x2,6 mm und die zwei senkrecht dazu laufenden Abstützungen sind quadratische Hohlprofile mit den Maß 40x40x4 mm.

Zum Schluss wird am Bug des Schiffes noch eine Längsverstärkung (grüner Kasten) eingebaut. Diese soll einerseits die vorderste Rippe des Bootes abstützen und gleichzeitig als Verstärkung dienen für weitere Fixiermöglichkeiten, welche im weiteren Verlauf des Kapitels gezeigt werden.

9.2.3 Aufnahme Schwert

Nachdem die Verstärkungsstreben in das Rippensystem eingebaut wurden, muss das Schwert eingebaut bzw. eingebunden werden

In diesem Fall konnten keine genauen Abmessungen von einem Schwert gefunden, welches für diese Modelle benutzt wird. Daher wird sich an den Abmaßen der Laser Bahia orientiert.

Im Bereich der Rippen wird ein Rechteckprofil eingebaut, in dem das Schwert untergebracht wird. Mechanisch soll das Schwert wie in Abbildung 43 bewegt werden. Die Umsetzung und Einbindung sind in Abbildung 40 zu erkennen. Jedoch wird die mechanische Umsetzung im weiteren Verlauf nicht konstruktiv umgesetzt.

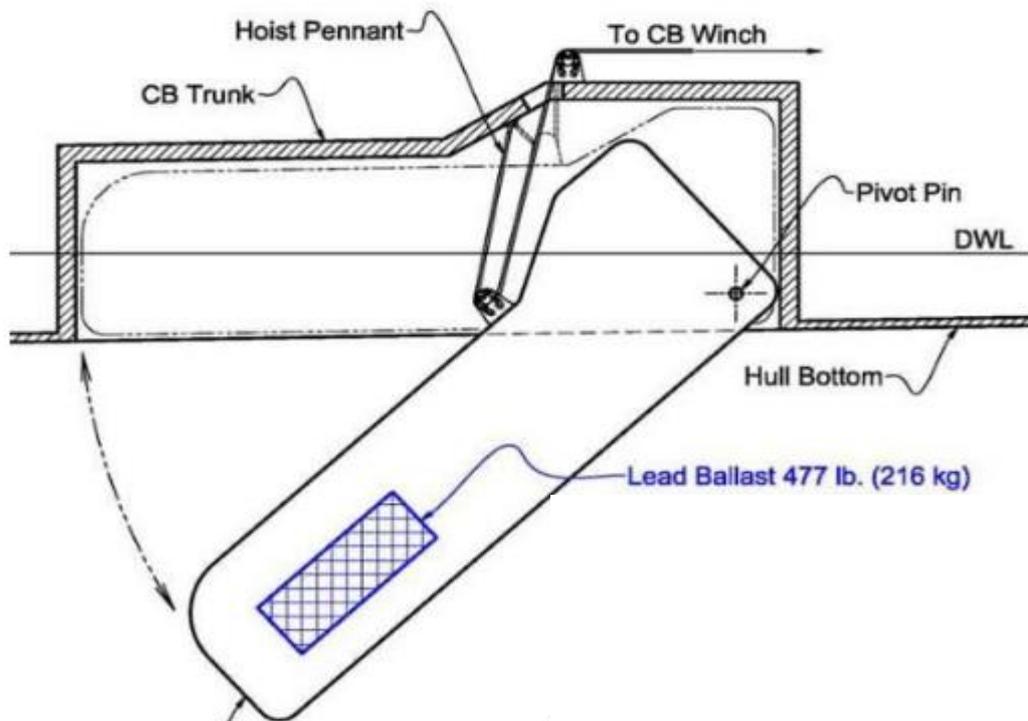


Abbildung 43: Beispielsmechanismus Schwert (pinterest)

9.2.4 Leichtbaumaßnahmen

Um auch an der Rippenkonstruktion Material einzusparen, wurden Leichtbaumaßnahmen ergriffen. In erster Linie wurden runde Durchgangslöcher in Teile der Rippenstruktur integriert (siehe Abbildung 44). Darüber hinaus wurden rechteckige Ausschnitte eingearbeitet, die bis zum Rumpfboden reichen.

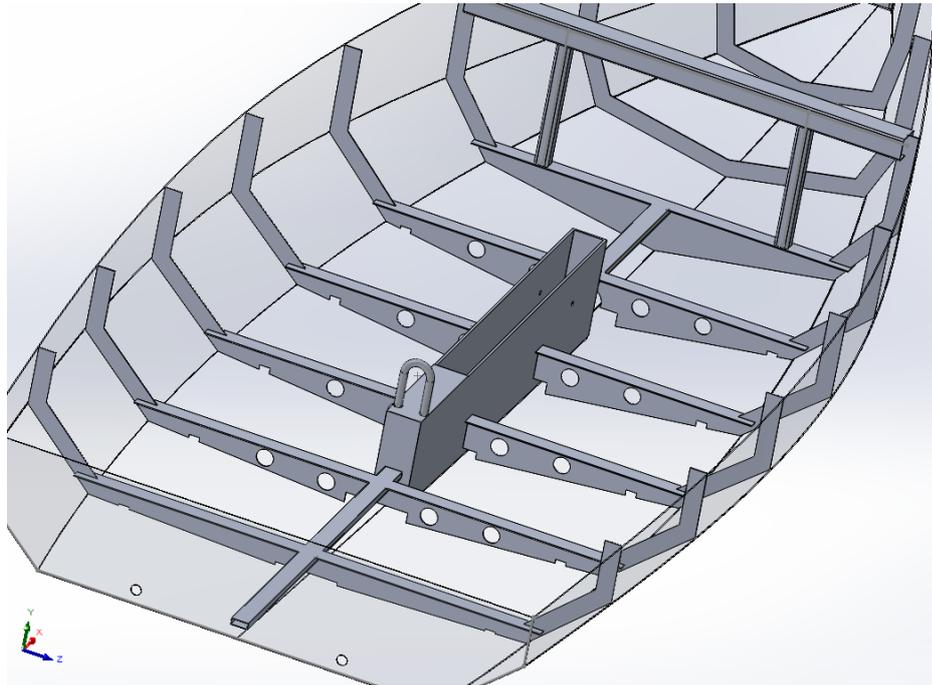


Abbildung 44: Leichtbaumaßnahmen

9.1 Aufnahme Ruder

Da das Ruder und die Steuerung als Kaufteile vorgesehen sind, muss lediglich sichergestellt werden, dass eine problemlose Montage des Ruders möglich ist. Aufgrund der Ähnlichkeit der Aluminiumsegeljolle mit der Laser Bahia wurden unter anderem auch die Ruderaufnahme übernommen, welche bereits in Abbildung 3 ersichtlich ist. Die technische Umsetzung ist in Abbildung 45 dargestellt.

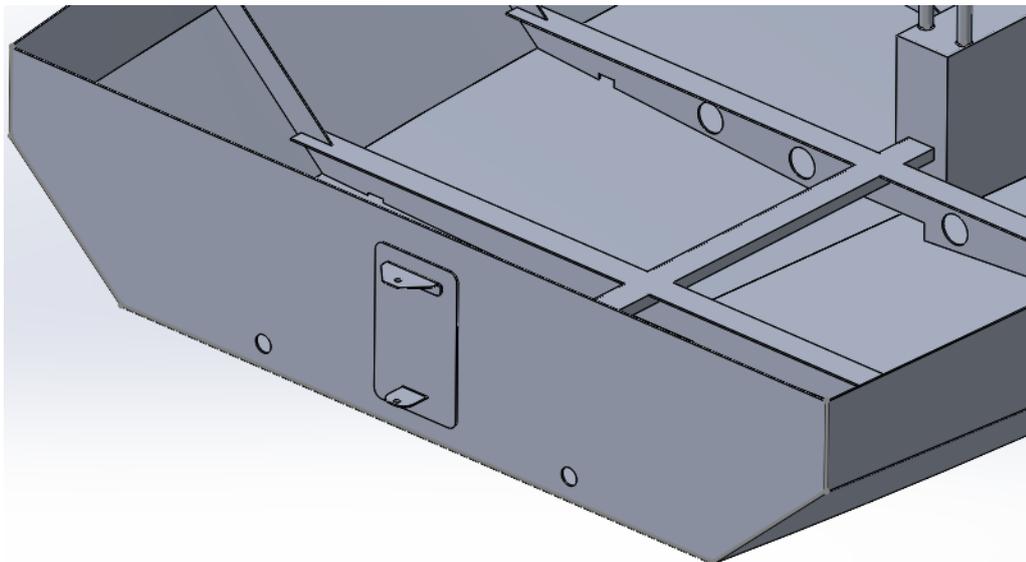


Abbildung 45: Aufnahme Ruder

9.2 Boden

Der Boden setzt sich aus insgesamt 12 einzelnen Blechen zusammen, von denen jedes eine Materialstärke von 1,5 mm aufweist. Zusätzlich weist der Boden eine strukturierte Oberfläche auf (siehe Abbildung 46). Das minimiert das Risiko von Rutschunfällen bei Nässe. Die Beschaffenheit der Oberfläche bietet zudem den Vorteil, dass bei geringerer Materialstärke dennoch eine hohe Stabilität gewährleistet wird.



Abbildung 46: Oberflächenstruktur des Bodens (alufritze)

Die einzelnen Bodenbleche können, nachdem der Rumpf mit der Rippenstruktur verbunden worden ist, von außen eingelegt werden und mit sich selbst und dem Rippengerüst verschweißt werden. Dies ist in Abbildung 47 zu erkennen.

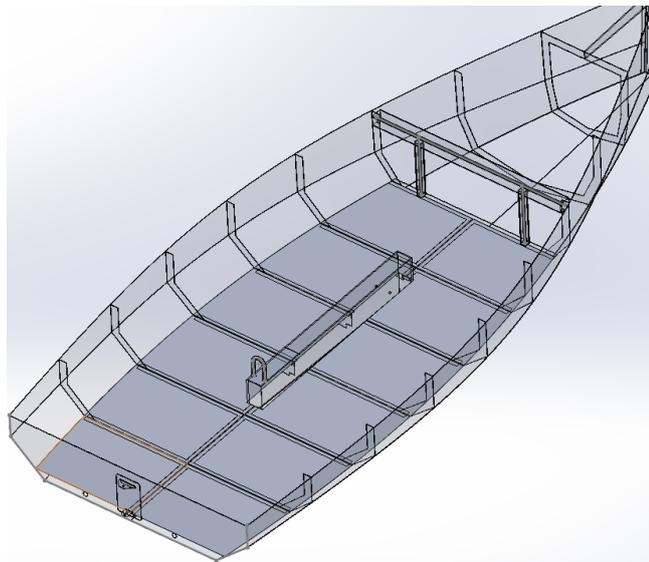


Abbildung 47: Bodenbleche

Insgesamt ist in dem Boden dann ca. $0,5 \text{ m}^3$ Luft eingeschlossen. Dadurch ergibt sich eine Auftriebskraft von ca. 4890 N.

$$F_A = \rho_{\text{Wasser}} * V * g = \rho_{\text{Wasser}} * 0,5\text{m}^3 * g \approx 4890 \text{ N}$$

Mit:

$$\rho_{\text{Wasser}} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ Dichte von Wasser}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ Gewichtskraft}$$

$$V = \text{Verdrängtes Volumen}$$

Mit dieser Auftriebskraft kann das Boot mit der eingeschlossenen Luft beim Kentern die rechtlichen Bedingungen aus Kapitel 3 erfüllen und sogar deutlich übertreffen. Es sind 100 N pro Besatzungsmitglied gefordert.

9.3 Sitzfläche

Der finale Entwurf der Sitzfläche ist in Abbildung 48 ersichtlich. Beide Sitzflächen weisen eine Materialstärke von 1,5 mm auf und wird von zwei Rohren (26,9 x 3,6 mm) gestützt. Im weiteren Verlauf erfolgt die Verschweißung der Sitzfläche mit den Seitenwänden des Rumpfes, dem Boden und dem Rippengerüst.

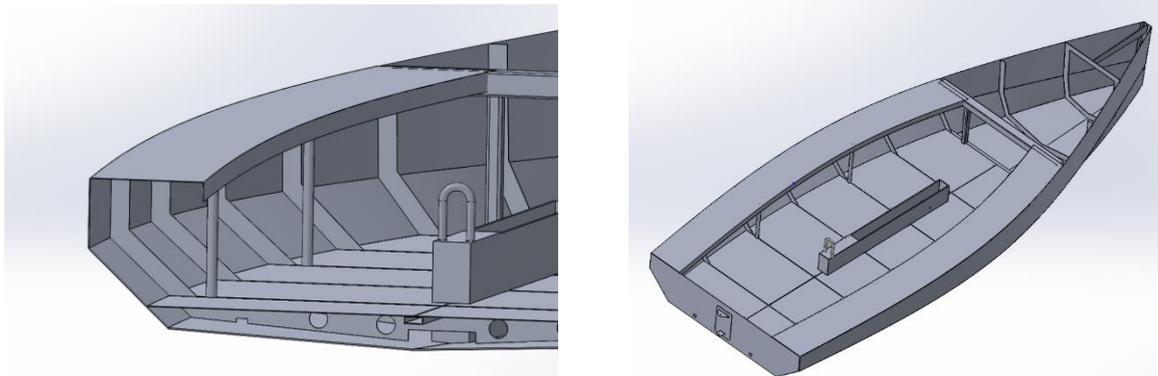


Abbildung 48: Sitzfläche

9.4 Sonstiges

Nachdem die Grundstruktur der Segeljolle steht und die Konstruktion so gut wie abgeschlossen ist, müssen noch weitere kleine konstruktive Maßnahmen getroffen werden. Diese werden in diesem Unterkapitel aufgeführt werden.

9.4.1 Wasserablauf

Falls sich Wasser im Bereich der Sitzfläche sammelt, muss dieses abgelassen werden können. Hierbei diente die Laser Bahia erneut als Inspirationsquelle. In diesem Fall wurden zwei Löcher im Heckbereich vorgesehen (Abbildung 49), die bei Bedarf mit Kunststoffstopfen verschlossen oder geöffnet werden können. In der folgenden Abbildung

ist lediglich die Darstellung der Löcher zu sehen, während die Kunststoffstopfen als Kaufteile separat erworben werden und daher nicht im CAD abgebildet ist.

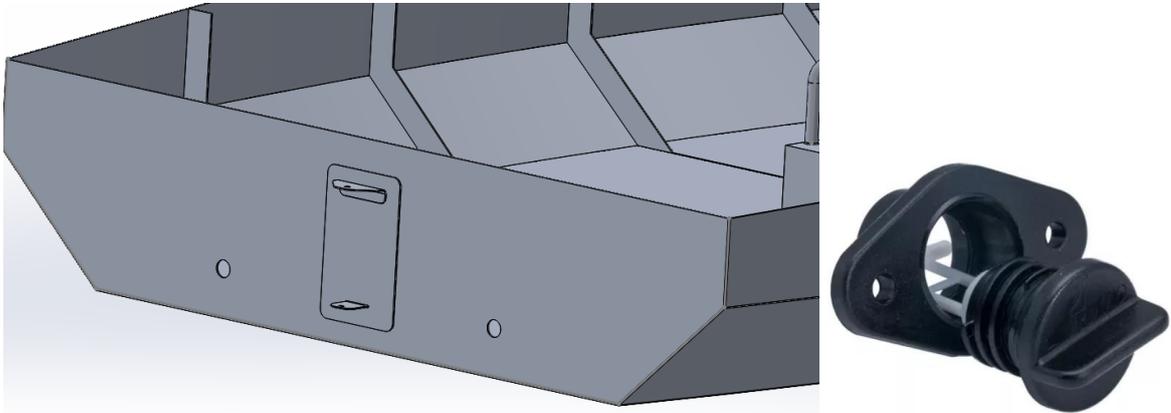


Abbildung 49: Wasserablauf Heck (sailcenter)

9.4.2 Aufnahmen Mast

Die Position des Mastes ist bereits durch die Konstruktion festgelegt. Dennoch waren weitere Überlegungen zur sicheren Fixierung des Mastes erforderlich. Hierfür wird ein Zubehörteil von der Laser Bahia verwenden, welches die sichere Fixierung des umklappbaren Mastes ermöglicht, wie in Abbildung 50 (roter Kasten) dargestellt.

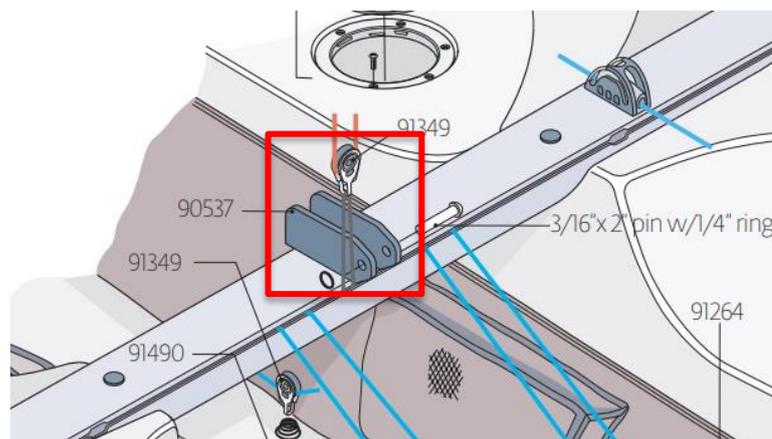


Abbildung 50: Mastaufnahme

9.4.3 Aufnahme Gennaker

Ein weiteres Bauteil, das in diese Kategorie fällt, ist die Gestaltung der Aufnahme für den Gennaker. Bereits in der Rumpfkonstruktion ist vorne eine Durchgangsbohrung

eingearbeitet, durch die bei Bedarf der Gennaker ausgefahren werden kann (siehe Abbildung 40).

Jedoch reicht diese Aufnahme allein nicht aus, um das Rohr zu fixieren. Um das Gennacker zu fixieren wird die Aufnahme aus Abbildung 51 verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Zukaufteil. Diese Aufnahme ist speziell für die Befestigung eines Gennackerrohrs geeignet und kann am Rumpfrippenrahmen (roter Rahmen, Abbildung 52) angeschweißt werden.



Abbildung 51: Aufnahme Gennacker (SVB)

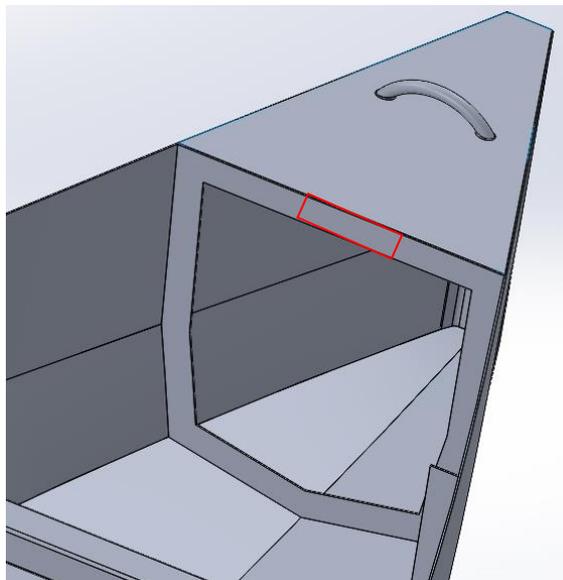


Abbildung 52: Fixierungsmöglichkeit der Gennakeraufnahme

9.4.4 Fixierungsmöglichkeiten

Im Bereich des Segelns erfordert die Arbeit mit Tauen, Leinen und anderen Befestigungselementen eine sorgfältige Planung, um die Möglichkeit zu schaffen, diese am Segelboot zu befestigen. Da keine genaue Abschätzung über die Anzahl dieser Elemente vorliegt und sich diese Projektarbeit hauptsächlich auf die Entwicklung eines Aluminiumrumpfes und dessen Segel-Eigenschaften konzentriert, wurden mögliche

Befestigungsmöglichkeiten nicht im Detail betrachtet. Lediglich im Bug des Schiffes wurde eine Fixierungsmöglichkeit eingearbeitet, die gleichzeitig als Haltegriff dienen kann, um das Boot an Land ziehen zu können.

Da in der Regel die meisten Aufnahmen bzw. Fixierungsmöglichkeiten aus Metall bestehen, können diese bei Bedarf für einen möglichen Zusammenbau individuell angeschweißt werden.

9.5 Überblick der Gesamtkonstruktion Aluminium Segeljolle

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 53 bis Abbildung 57) ist die Gesamtkonstruktion der Aluminiumsegeljolle dargestellt. An etwaigen scharfen Kanten, muss entweder ein Kantenschutz angebracht werden, oder die Bleche müssen in dem Bereich umgebogen werden. Aufgrund des zu hohen konstruktiven Aufwand wird hierbei nur darauf verwiesen, in der Konstruktion jedoch nicht umgesetzt.

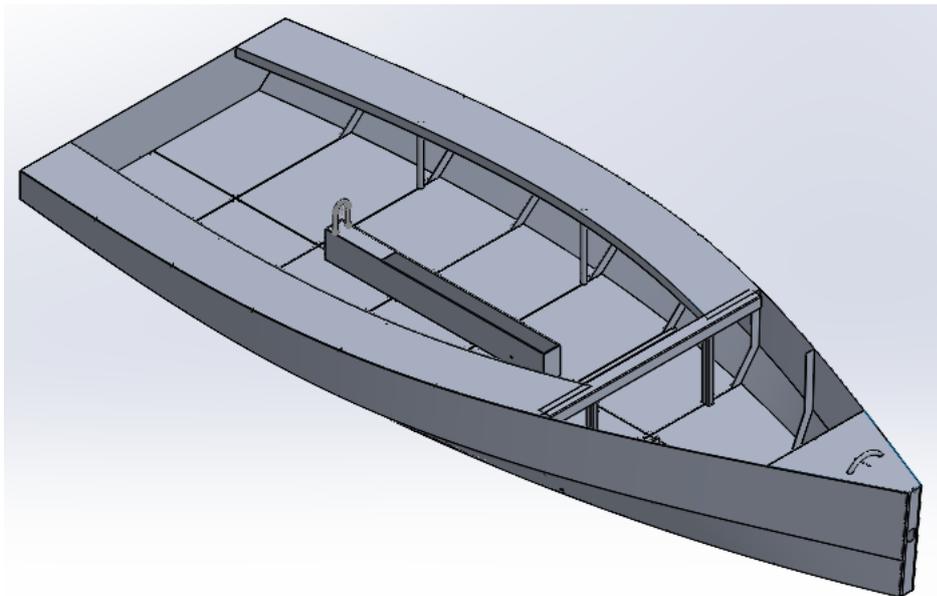


Abbildung 53 Gesamtkonstruktion Isometrische Ansicht 1

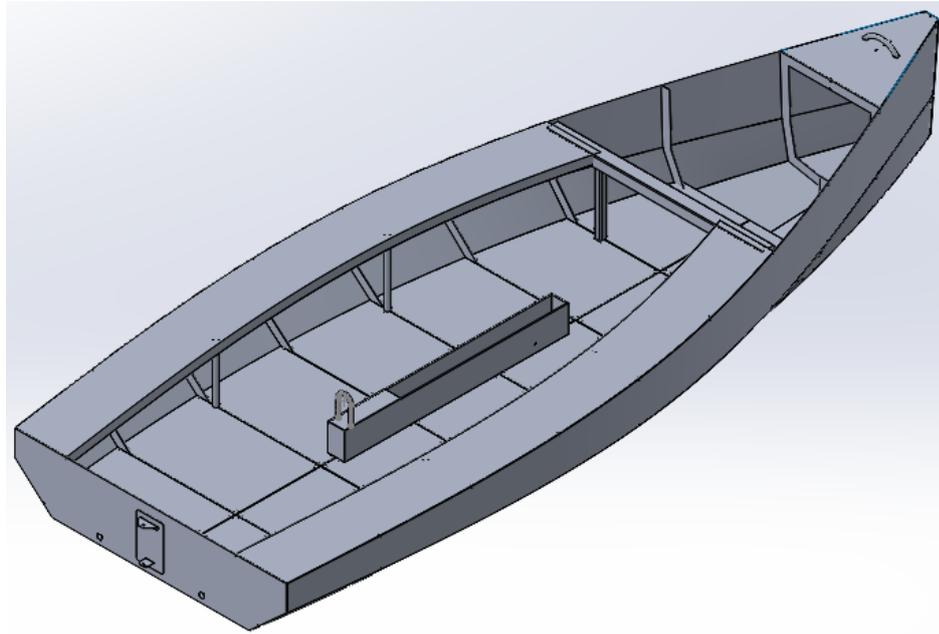


Abbildung 54 Gesamtkonstruktion Isometrische Ansicht 2

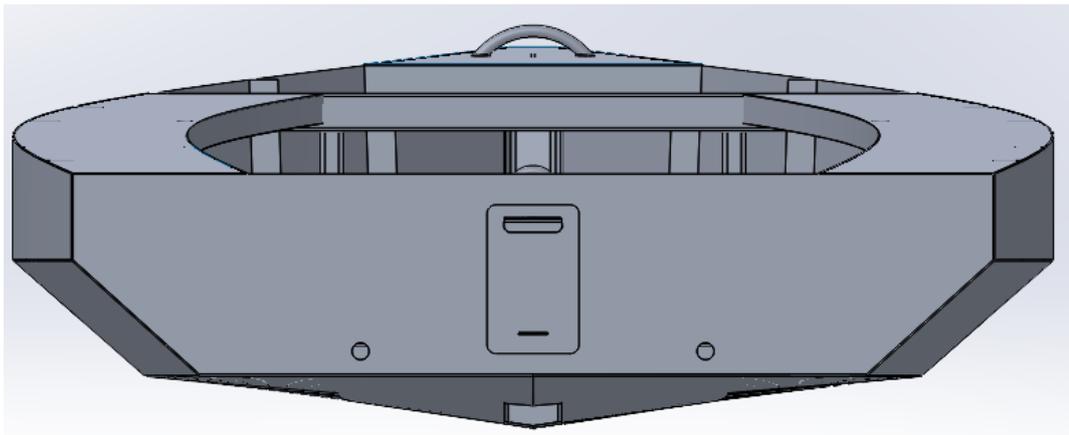


Abbildung 55 Gesamtkonstruktion Seitenansicht

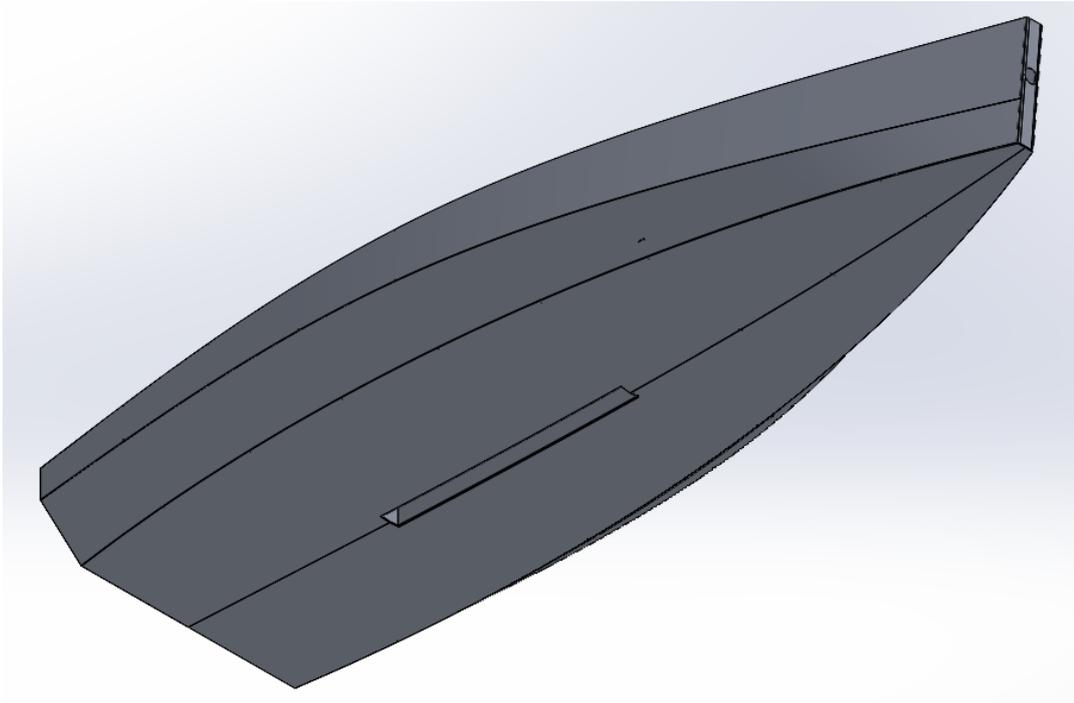


Abbildung 56 Gesamtkonstruktion - Untersicht

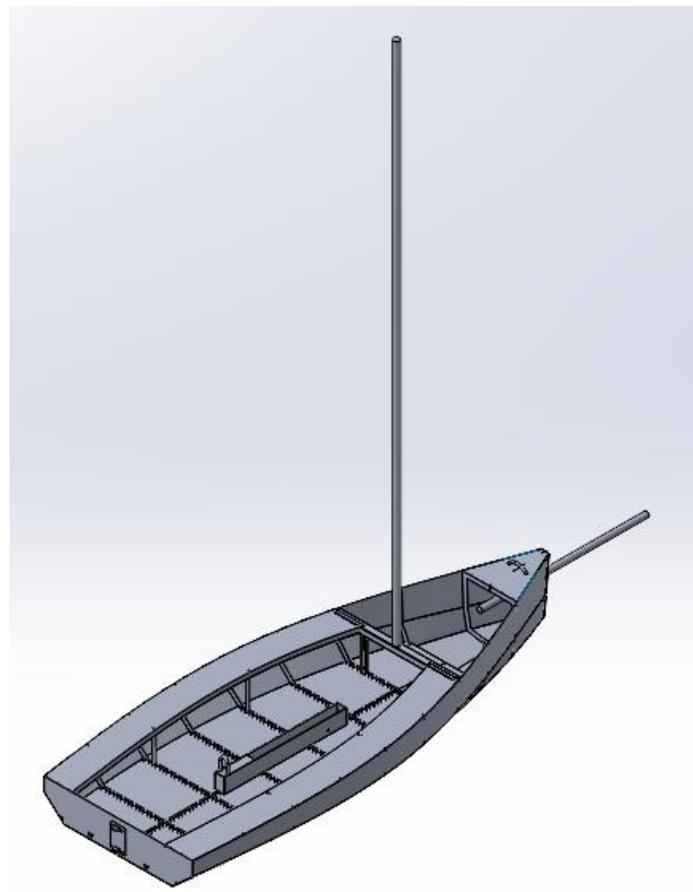


Abbildung 57 Gesamtkonstruktion mit Mast

9.6 Fazit

Nach Abschluss der Konstruktion und der Erstellung des Segeljollen-Modells im CAD soll die grundlegende Anforderung des Leichtbaus erfüllt sein. Es wurde festgelegt, dass die Segeljolle ohne Masten und sonstige benötigte Zubehörteile ein Gewicht von etwa 150 kg haben sollte. Mithilfe des CAD-Modells konnte das Gesamtgewicht des Bootes bestimmt werden, welches in diesem Fall bei 151,5 kg liegt. Somit liegt das Ergebnis nach der Konstruktion im akzeptablen Bereich.

Letztendlich kann mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) eine abschließende Bewertung darüber getroffen werden, ob die Konstruktion den erforderlichen Belastungen standhalten kann und in welchen Bereichen eventuelle Nachbesserungen erforderlich sind. Dieser Untersuchung wird im folgenden Kapitel durchgeführt.

10 FEM-Simulation

Nach der Konstruktion muss mithilfe einer FEM-Analyse sichergestellt werden, dass die gewählten Materialstärken und die Strukturanordnung den erforderlichen Belastungen standhalten können. Dabei werden nicht nur die definierten Belastungsfälle erläutert, sondern auch sämtliche sonstigen Einstellungen für die Simulation detailliert dargelegt.

10.1 Technische Daten

Vor dem Beginn der Simulation sind die technischen Daten zu hinterlegen. In diesem Fall gestaltete sich der Prozess unkompliziert, da die Materialdaten einer weit verbreiteten Aluminiumlegierung aus den Voreinstellungen von ANSYS übernommen wurden. Die technischen Eigenschaften der Aluminiumlegierung EN AW 5083, wie bei der Leile Class 560 (siehe Kapitel 4.2) verwendet wurde, wurden in ANSYS zusätzlich hinterlegt. Die spezifischen Eigenschaften der verwendeten Aluminiumlegierung sind in Abbildung 58 detailliert dargestellt.

	A	B	C
1	Eigenschaft	Wert	Einheit
2	Field Variables des Materials	Tabelle	
3	Dichte	2770	kg m ⁻³
4	Isotroper Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Sekante)		
6	Isotrope Elastizität		
12	S-N Kurve	Tabellarisch	
16	Zug-Streckgrenze	2,8E+08	Pa
17	Druck-Streckgrenze	2,8E+08	Pa
18	Max. Zugfestigkeit	3,1E+08	Pa
19	Druckfestigkeit	0	Pa

Abbildung 58: Technische Eigenschaften von Aluminium

10.2 Belastungsfall 1 (Rumpfstabilität)

Nach Festlegung der technischen Daten des Materials kann mit der Simulation des ersten Belastungsfalls, welcher die Rumpfstabilität bewerten soll, begonnen werden.

Um die Rumpfstabilität des Bootes zu simulieren, wird ein spezifischer Belastungsfall definiert. In diesem Szenario befindet sich das Boot auf ruhigem Gewässer und ist somit dem hydrostatischen Druck sowie den Lasten der Besatzung ausgesetzt. Die gesamte Gewichtskraft beträgt hierbei 4950 N. Wie bereits in Kapitel 6.1 erläutert muss die Auftriebskraft der Gewichtskraft entsprechen. Daher wird die Auftriebskraft als Flächenlast auf der Rumpfseite unterhalb der Wasserlinie angebracht.

Ziel dieses Belastungsfalls ist es, die Rumpfstabilität und -integrität des Bootes unter realistischen Bedingungen zu bewerten.

Um den Versuch durchzuführen, wird noch die Wassergrenze des Bootes benötigt, die bereits für die CFD-Simulation ermittelt wurde und somit für diesen Belastungsfall übernommen werden kann. Bei dieser spezifischen Bootsmodellkonfiguration und den definierten Belastungen liegt die Wassergrenze bei 0,039 m.

Wegen des symmetrischen Aufbaus des Bootes wird nur die Hälfte des Bootes simuliert. Da nur die Hälfte des Rumpfes simuliert wird, muss auch nur die Hälfte der Auftriebskraft auf den Rumpf wirken. Jedoch wurde sich aus Sicherheitsgründen dazu entschieden einen Sicherheitsfaktor von 2 zu verwenden. Daher wird auf die Hälfte des Rumpfes die gesamte Auftriebskraft von 4905 N angewendet.

10.2.1 Simulationsgeometrie

Nachdem die technischen Daten und der Belastungsfall definiert wurden, erfolgte das Einlesen der Geometrie des Simulationsobjekts (Abbildung 59). Im ersten Schritt wird sichergestellt, dass das Modell als eine zusammenhängende Einheit betrachtet wird. Zusätzlich wird an geeigneten und relevanten Stellen Radien eingefügt, um Spannungsspitzen während der Berechnung zu vermeiden.

Im Bereich der Symmetrieebene werden die Verschiebungen der Flächen in alle Richtungen gesperrt.

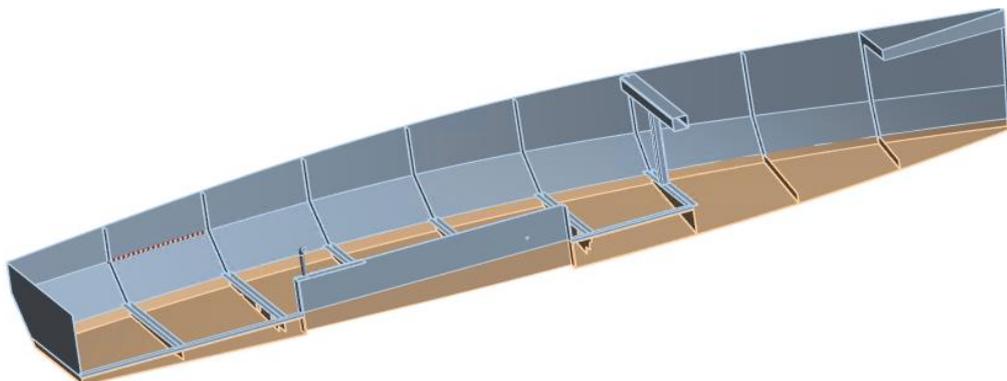


Abbildung 59: Simulationsgeometrie

10.2.2 Vernetzung

Nachdem die Simulationsgeometrie geladen wurde, erfolgte die Vernetzung des Modells, wie in Abbildung 60 ersichtlich. Das Modell mit einer Elementgröße von 30 mm vernetzt, was zu einer Gesamtanzahl von 115.907 Knoten führt (vgl. Abbildung 61).

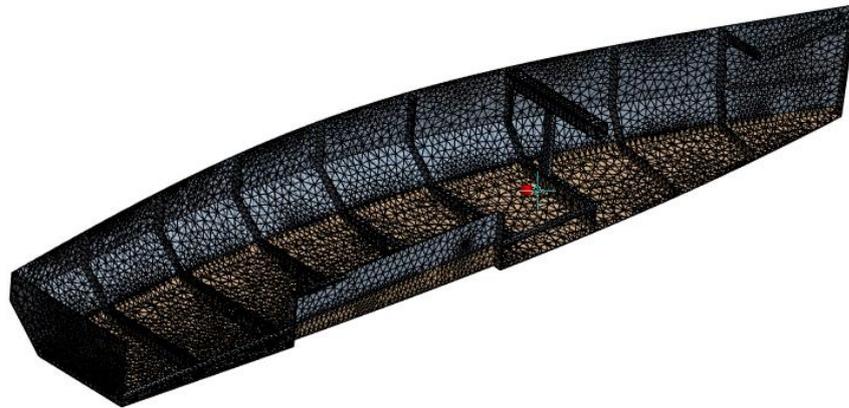


Abbildung 60: Grundvernetzung

Standardeinstellungen	
Physikvoreinstellung	Mechanik
Elementansatzfunktion	Programmgesteuert
<input type="checkbox"/> Elementgröße	30, mm
Elementgröße	
Adaptive Größe verwe...	Ja
Auflösung	Standardeinstellung (2)
Netz-Defeaturing	Ja
<input type="checkbox"/> Defeaturing-Größe	Standardeinstellung
Übergang	Schnell
Spannwinkel	Mittel
Globale Netzgröße be...	Baugruppe
Bauraumdiagonale	4727,4 mm
Mittlerer Flächeninhalt	24876 mm ²
Minimale Kantenlänge	1,9637e-003 mm
Qualität	
Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	
Erweitert	
Statistik	
<input type="checkbox"/> Knoten	115907
<input type="checkbox"/> Elemente	57050
Detaillierte Statistiken...	Nein

Abbildung 61: Einstellungen der Grundvernetzung

10.2.3 Auswertung

In Abbildung 62 ist die Fläche rot markiert, die sich unterhalb der Wassergrenze befindet. Auf diesen Bereich wird die Auftriebskraft gleichmäßig als Flächenlast angewendet.

■ Seitenwand_kraft: 4950, N
Komponenten: 0,;4950,;0,

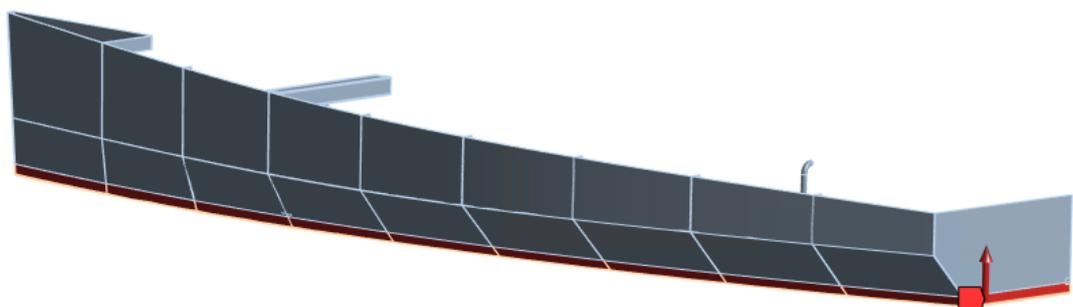


Abbildung 62: Belastungsfall 1

Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind in den Abbildung 63 und Abbildung 64 visualisiert.

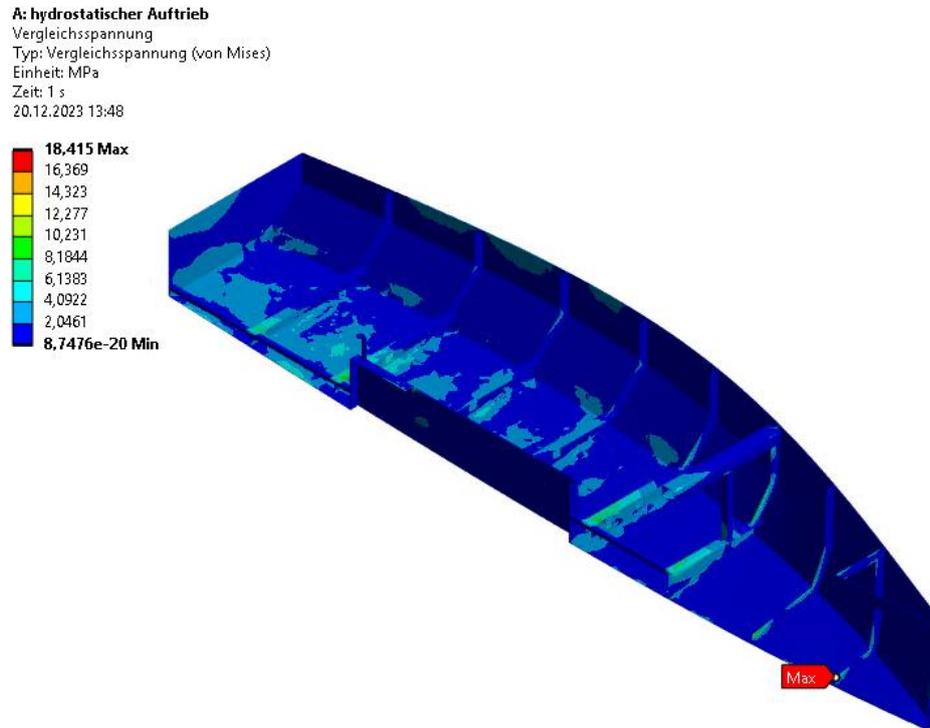


Abbildung 63: Vergleichsspannung Belastungsfall 1

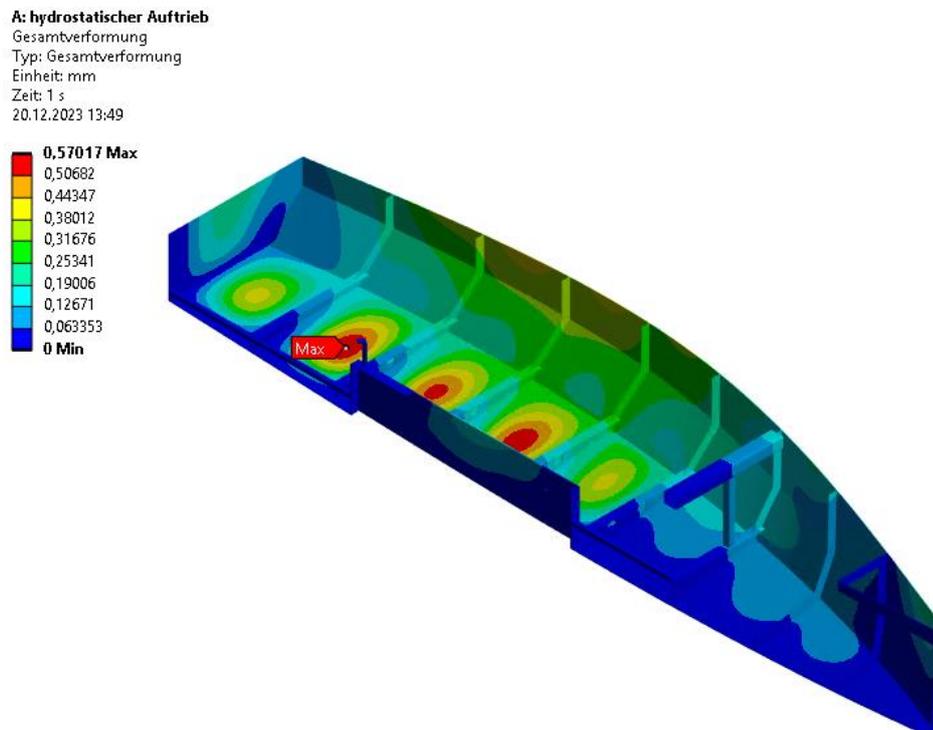


Abbildung 64: Gesamtverformung des Belastungsfall 1

Das Ergebnis der Vergleichsspannung beträgt etwa 18,5 MPa, was deutlich unter der maximalen Belastungsgrenze von 280 MPa liegt. Folglich ist eine ausreichende Rumpfstabilität auf ruhigem Gewässer gewährleistet. Zudem zeigt die Gesamtverformung eine maximale Auslenkung von 0,57 mm. Die maximale Auslenkung tritt im Bereich des Rumpfbodens zwischen den Querverstrebungen auf. Dieses Ergebnis ist daher sinnvoll und logisch, da sich der Großteil des Bodens bei ruhiger Fahrt unterhalb der Wassergrenze befindet und somit dort die größten Verformungen auftreten. Zusätzlich sind in diesem Bereich keine Rippen und kein Schwertkasten, welche das Blech stabilisieren würden.

Resultierend kann davon ausgegangen werden, dass selbst bei Wellengang und unruhiger See die Rumpfstabilität kontinuierlich gewährleistet ist. Dies resultiert sowohl aus der Verwendung einer relativ feinen Vernetzung als auch aus einer mehr als ausreichenden Sicherheitsreserve im Hinblick auf die maximale Belastungsgrenze.

10.3 Belastungsfall 2 (Aufnahme des Masts)

Im zweiten Belastungsfall steht die Untersuchung der Stabilität der Mastaufnahme im Vordergrund, insbesondere hinsichtlich der auftretenden Kräfte auf einen Segelmast. Es wird folgende Formel (harken) verwendet, die zur einfachen Berechnung und Bestimmung der maximalen Mastbelastung beiträgt.

$$SL = SA * V^2 * 0,02104$$

Mit:

SL = Mastlast in kg

SA = Segelfläche in m^2

V = Windgeschwindigkeit in Knoten

Mithilfe dieser Formel wurden die folgenden Annahmen getroffen:

Zunächst wird davon ausgegangen, dass nur das Großsegel mit einer Segelfläche von $10 m^2$ geöffnet ist. Weiterhin wird eine Windgeschwindigkeit von 6 Beaufort (ungefähr 26 Knoten) angenommen. Diese Windgeschwindigkeit wird als starker Wind mit großen Wellen, wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, charakterisiert und stellt die maximale Windbelastung dar, für die eine solche Segeljolle ausgelegt werden muss.

Basierend auf diesen Annahmen und unter Verwendung der ermittelten Formel ergibt sich die folgende resultierende Mastlast:

$$SL = SA * V^2 * 0,02104$$

$$SL = 10 * 26^2 * 0,02104$$

$$SL = 131,5 \text{ kg} = 1290 \text{ N}$$

Die ermittelte Last von 1290 N muss allerdings noch um einen Sicherheitsfaktor erhöht werden, wobei dieser mit den Faktor 1,5 angenommen wird.

10.3.1 Simulationsgeometrie

Für diesen Belastungsfall wurde die gesamte Boots konstruktion als Simulationsgeometrie verwendet, um möglichst aussagekräftige und präzise Ergebnisse zu erzielen. Die Krafteinleitung auf das Boot erfolgte durch die Erzeugung einer externen Kraft, bei der Kräfte von jeweils 1500 N in Längs- und Querrichtung auf die Masten einwirken sollen. Diese Kräfte addieren sich zu einer Gesamtkraft von 2121 N. Das entspricht ungefähr dem Sicherheitsfaktor von 1,5.

Die Angriffspunkte dieser Kraft liegen auf einer Höhe von 4 m, gemessen vom Ursprung des Koordinatensystems, das sich am Übergang vom Heck zum Rumpfboden befindet. Diese Höhe wurde gewählt, basierend auf der Annahme, dass der Gesamtmast eine Länge von 7,5 m hat. Der Mast ist auf dem Träger positioniert und ist ungefähr 0,5 m oberhalb des Koordinatensystems. Das Großsegel beginnt aber erst 1,5 m oberhalb des Koordinatensystems. Es wird angenommen, dass das Großsegel eine dreieckige Form aufweist. Somit wird keine Flächenlast, sondern eine resultierende Kraft verwendet. Diese resultierende Kraft greift im ersten Drittel des Segels an. Die Höhe berechnet sich daher wie folgt:

Das Segel ist insgesamt 6,5 m hoch (Mast = 7,5 m Begin Segel am Mast 1 m oberhalb des Trägers am Rumpf). Der erste Drittel entspricht hierbei 2,15 m. Ausgehend von dem globalen Koordinatensystem ist die Position bei 3,65 m (erster Drittel addiert mit Beginn des Segels auf das globale Koordinatensystem bezogen). Da es sich hierbei um eine Abschätzung handelt wird die Krafteinleitung bei 4 m angenommen. Dadurch kommt ein weiterer Sicherheitsfaktor dazu. Denn je höher die Kraft angenommen wird, desto stärker ist die Hebelwirkung und es führt zu höheren Belastungen. Abbildung 65 veranschaulicht diese Beschreibung.

■ Mastkraft: 2121,3 N
Komponenten: 1500,0,1500,0 N
Position: 0, 0, 0, mm

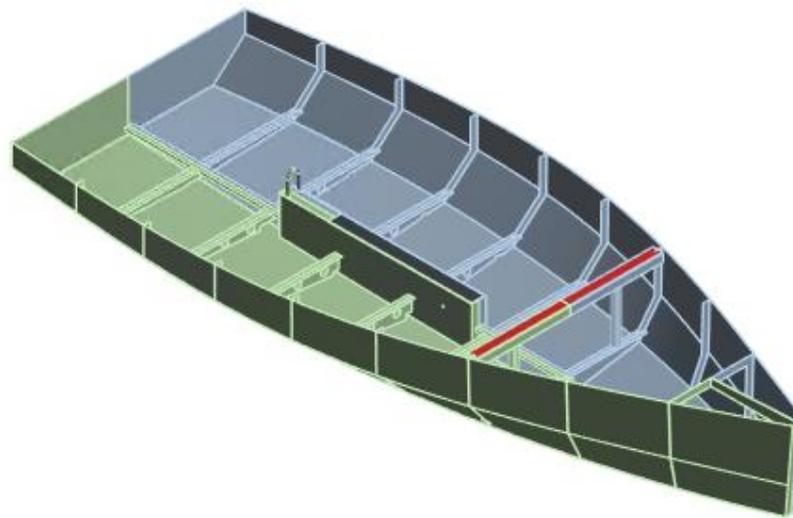
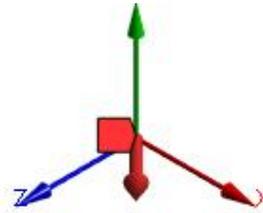


Abbildung 65: Mastkraft und Simulationsgeometrie

10.3.2 Vernetzung

Die Vernetzung der Simulationsgeometrie, erfolgt auf der gleichen Grundlage wie im Belastungsfall 1. Die allgemeine Elementgröße der Vernetzung beträgt 30 mm. Aufgrund vorheriger Überlegungen werden fünf lokale Netzverfeinerungen (Abbildung 66) implementiert, in welchen Bereichen extreme Spannungen auftreten können. Jede dieser Netzverfeinerungen hat einen Einflussbereich von 100 mm mit einer Vernetzungsgröße von 5 mm.

Dies führt zu 510.380 Knoten. In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind die zuvor beschriebenen Details der Netzstruktur dargestellt.

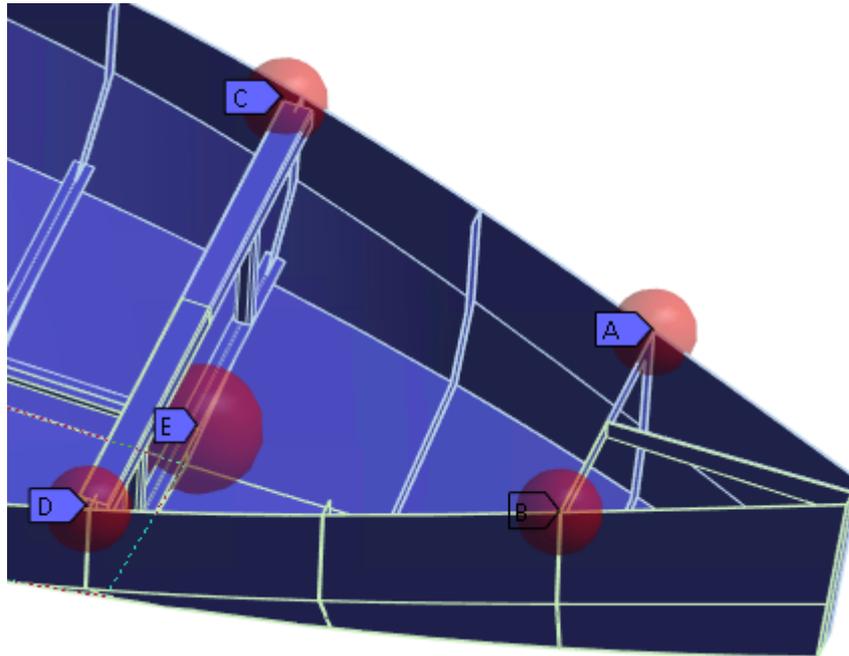


Abbildung 66: Lokale Netzverfeinerung Belastungsfall 2

Anzeige	
Anzeigestil	Geometrieinstellungen verwenden
Standardeinstellungen	
Physikvoreinstellung	Mechanik
Elementansatzfunktion	Linear
<input type="checkbox"/> Elementgröße	30, mm
Elementgröße	
Qualität	
Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	
Erweitert	
Statistik	
<input type="checkbox"/> Knoten	169619
<input type="checkbox"/> Elemente	510380
Detaillierte Statistiken...	Nein

Abbildung 67: Netzdetails Belastungsfall 2

10.3.3 Auswertung

Nachdem alle Einstellungen vorgenommen wurden, wird die Vergleichsspannung (Abbildung 68) genauer betrachtet. Die FEM-Simulation zeigt eine maximale Spannung von etwa 215 MPa. Dieser Wert liegt unterhalb der Streckgrenze der gewählten Aluminiumlegierung, sodass die Konstruktion der Mastaufnahme Belastungen mit einer Sicherheit von über 1,5 gewährleistet. In Abbildung 68 ist die Position dargestellt, wo die maximale Spannung auftritt.

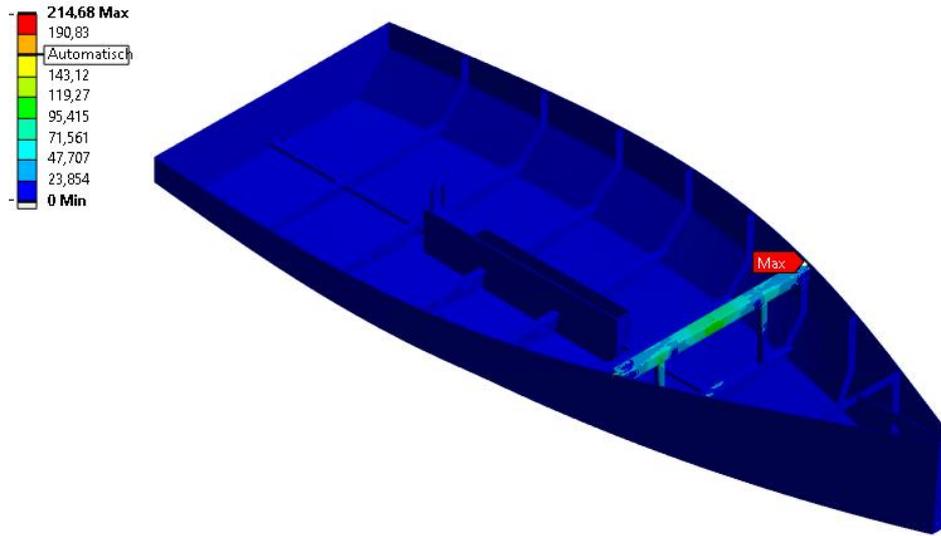


Abbildung 68: Vergleichsspannung Belastungsfall 2

In Abbildung 69 ist eine vergrößerte Darstellung der maximalen Belastung zu erkennen. Wie bereits erwartet, tritt in diesem Bereich die maximale Spannung auf, und somit hat sich die lokale Netzverfeinerung an dieser Stelle als korrekt erwiesen. Aufgrund der hohen Elementanzahl und der lokalen Verfeinerung wird das Ergebnis als aussagekräftig eingestuft, und somit kann davon ausgegangen werden, dass die Konstruktion der Mastaufnahme den Belastungen standhalten kann.

Um die maximale Spannung in diesem Bereich zu verringern, besteht Verbesserungspotenzial durch eine Verlängerung der Querstrebe, die dann einen direkten Übergang mit dem Rumpf bildet.

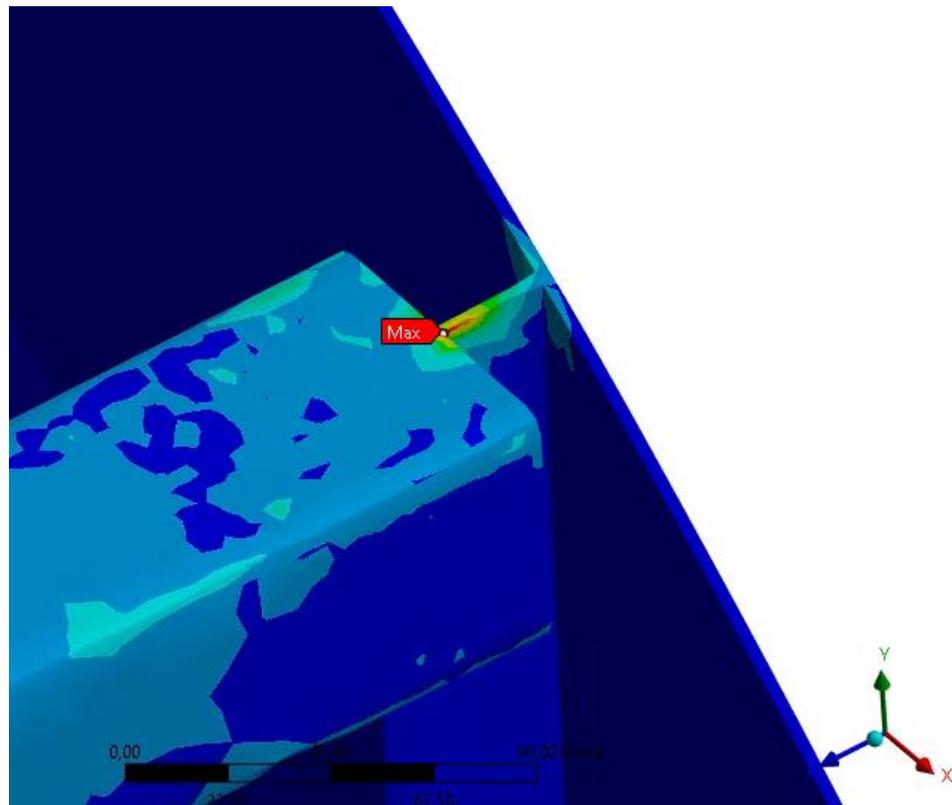


Abbildung 69: Vergrößerte Darstellung von Belastungsfall 2

Durch die gebogene Rumpfform war es konstruktiv nicht möglich die Simulation durchzuführen, während die Querstrebe bis am Rand des Rumpfes geht. Dennoch ist mit der Simulation gezeigt, dass trotz bei der verwendeten nicht optimalen Konstruktion der Rumpf und das Material die Streckgrenze nicht überschreitet.

10.4 Fazit und Ausblick der Simulation

Durch die FEM-Simulation konnte überzeugend nachgewiesen werden, dass die Konstruktion den relevanten und angenommenen Belastungsfällen für den Rumpf und den Aufnahmepunkt des Mastes erfolgreich standhält. Das angewandte Leichtbaukonzept für die Segeljolle erfüllt alle geforderten Kriterien und erweist sich als äußerst vielversprechend. Die Ergebnisse der Simulation bestätigen nicht nur die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Konstruktion, sondern weisen auch darauf hin, dass das Leichtbaukonzept erfolgreich umgesetzt wurde.

Allerdings sollte angemerkt werden, dass trotz des Erfolgs des aktuellen Designs weiteres Optimierungspotenzial vorhanden ist. Insbesondere im Belastungsfall 1 zeigt sich, dass zusätzlicher Leichtbau betrieben werden kann, und es könnte in Erwägung gezogen

werden, die Anzahl der Rippen zu reduzieren, um das Gewicht weiter zu verringern. Diese Optimierungsmaßnahmen könnten die Gesamtleistung des Bootes weiter steigern. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass eine umfassende Neugestaltung und Implementierung dieser Änderungen über den Rahmen der aktuellen Projektarbeit hinausgehen würde.

Wie bereits im Belastungsfall 2 beschrieben, wird vermutet, dass die Spannungsspitze deutlich reduziert werden, wenn die Querstrebe direkt an den Rumpf angebracht wird. Hierbei müssen konstruktive Änderungen getroffen werden und es wird vermutet, dass dadurch weitere Leichtbau Maßnahmen getroffen werden können.

11 Schlussfolgerung

Das Ziel dieser Projektarbeit war es eine Aluminium-Segeljolle zu entwickeln, welche dem aktuellen Stand der Technik von Segeljollen entspricht. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die Segeljolle einen sportlichen Fahrstil aufweist und den Richtlinien für eine Zulassung auf dem Bodensee entspricht.

Nach einer umfassenden Rumpfungwicklung mithilfe der CFD-Strömungssimulation konnte eine Aluminiumsegeljolle entwickelt werden, welche den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Zielvorgabe eines Rumpfgewichts von 150 kg konnte erfolgreich erreicht werden. Der Aufbau der Aluminium-Segeljolle entspricht den aktuellen technischen Standards und besitzt die rechtlichen Anforderungen, die es benötigt, um auf dem Bodensee zugelassen werden zu können. Die Segeljolle kann bis zu 4 Personen befördern.

Der entwickelte Rumpf konnte leider nicht hinreichend auf sein reales Strömungsverhalten getestet werden. Da die Aluminiumsegeljolle sich jedoch an der Laser Bahia orientiert, wird vermutet, dass die Aluminiumsegeljolle und die Laser Bahia ähnliche Segeleigenschaften aufweisen.

Ein entscheidender Schritt in der Absicherung der Konstruktion erfolgte durch eine FEM-Analyse, die eine umfassende Prüfung der strukturellen Integrität ermöglichte. Diese Analyse verdeutlicht, dass die Segeljolle nicht nur den gestellten Anforderungen standhält, sondern auch eine bemerkenswerte Stabilität aufweist. Hierfür wurden zwei repräsentative Belastungsfälle betrachtet. Dabei wurde deutlich, dass die Segeljolle, trotz Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren, die Belastungsgrenze nicht erreicht. Es wird vermutet, dass bei einer Veränderung der Konstruktion an herausgefundenen Schwachstellen das Gewicht der Segeljolle weiter reduziert werden kann.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit dieser Projektarbeit eine neue Aluminiumsegeljolle konstruiert werden konnte, welche dem aktuellen technischen Stand entspricht. Diese Projektarbeit soll als Grundlage für zukünftige Entwicklungen in der Aluminiumbootkonstruktion dienen. Diese erfolgreiche Umsetzung öffnet somit Türen für innovative Ansätze und Verbesserungen im Bereich der Aluminiumboottechnologie.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Laser Bahia (oceanplay) 7

Abbildung 2: Rumpfform Laser Bahia (oceanplay) 8

Abbildung 3: Detaillierte Betrachtung des Hecks der Laser Bahia (oceanplay) 8

Abbildung 4: Segeljolle LelieClass 560 (lelieclass) 9

Abbildung 5: Boden der Lelie Class 560 (lelieclass) 9

Abbildung 6: Struktureller Aufbau (lelieclass) 10

Abbildung 7: Alucrest 420 (kleinanzeigen) 11

Abbildung 8: USB Dinghy (USB Dinghy) 12

Abbildung 9: Technische Zeichnung USB Dinghy (aw-marine) 13

Abbildung 10: CAD-Modell ILCA 7 14

Abbildung 11 Geometrie des CAD-Negativmodells 15

Abbildung 12 Bereiche für die Netzverfeinerung 16

Abbildung 13: Netz der gesamten Simulationsumgebung 17

Abbildung 14: Netz im Bereich des umströmenden Boots 17

Abbildung 15 Relativer Wasserdruck abhängig von der Wassertiefe 18

Abbildung 16: Position des Koordinatensystems im CAD-Modell 19

Abbildung 17 Verschiedene Fahrzustände (Gocht) 21

Abbildung 18 Wellenbildung Verdränger-fahrt (Schwarzer) 21

Abbildung 19 Bugwelle der Simulation 22

Abbildung 20: Bugwelle Modellsegelboot (Bartholomä) 22

Abbildung 21: Seitenansicht des Wellensystems der Simulation 23

Abbildung 22: Verdeutlichung des Kelvin Ship Wake Angle (Sphaier, Amiri und Vitola) .. 24

Abbildung 23: Wellenausbreitung der CFD-Simulation 24

Abbildung 24 Netzstudie - Auftriebskraft 25

Abbildung 25 Netzstudie Widerstandskraft 26

Abbildung 26: Boot V1 30

Abbildung 27: Boot V5 31

Abbildung 28: Boot V6 32

Abbildung 29: Boot V10 33

Abbildung 30: Boot V12 35

Abbildung 31: Boot V21 mit gewölbtem Boden und flacher Seitenwand 36

Abbildung 32: Boot V21 mit gewölbtem Boden und gewölbter Seitenwand 36

Abbildung 33: Boot V21 flache Seitenwand 37

Abbildung 34: Boot V21 gewölbter Seitenwand	38
Abbildung 35 Befestigung Genacker an der Laser Bahia	39
Abbildung 36 Laser Bahia Seitenansicht	40
Abbildung 37 Finale Rumpfform der Aluminiumjolle	42
Abbildung 38: Fertigungsgerechter Rumpf	43
Abbildung 39: Schweißstellen Rumpf	44
Abbildung 40: Rippenkonstruktion	45
Abbildung 41: Erster Schritt der Rippenkonstruktion.....	45
Abbildung 42: Verstärkung der Rippenkonstruktion	46
Abbildung 43: Beispielsmechanismus Schwert (pinterest).....	47
Abbildung 44: Leichtbaumaßnahmen	48
Abbildung 45: Aufnahme Ruder.....	48
Abbildung 46: Oberflächenstruktur des Bodens (alufritze)	49
Abbildung 47: Bodenbleche.....	49
Abbildung 48: Sitzfläche	50
Abbildung 49: Wasserablauf Heck (sailcenter)	51
Abbildung 50: Mastaufnahme	51
Abbildung 51: Aufnahme Gennacker (SVB)	52
Abbildung 52: Fixierungsmöglichkeit der Gennakeraufnahme	52
Abbildung 53 Gesamtkonstruktion Isometrische Ansicht 1	53
Abbildung 54 Gesamtkonstruktion Isometrische Ansicht 2	54
Abbildung 55 Gesamtkonstruktion Seitenansicht.....	54
Abbildung 56 Gesamtkonstruktion - Untersicht.....	55
Abbildung 57 Gesamtkonstruktion mit Mast.....	55
Abbildung 58: Technische Eigenschaften von Aluminium.....	57
Abbildung 59: Simulationsgeometrie	58
Abbildung 60: Grundvernetzung	59
Abbildung 61: Einstellungen der Grundvernetzung.....	59
Abbildung 62: Belastungsfall 1	59
Abbildung 63: Vergleichsspannung Belastungsfall 1	60
Abbildung 64: Gesamtverformung des Belastungsfall 1	60
Abbildung 65: Mastkraft und Simulationsgeometrie	63
Abbildung 66: Lokale Netzverfeinerung Belastungsfall 2	64
Abbildung 67: Netzdetails Belastungsfall 2	64
Abbildung 68: Vergleichsspannung Belastungsfall 2	65

Abbildung 69: Vergrößerte Darstellung von Belastungsfall 2 66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationsergebnisse.....	31
Tabelle 2: Simulationsergebnisse.....	32
Tabelle 3: Simulationsergebnisse.....	33
Tabelle 4: Simulationsergebnisse.....	37
Tabelle 5: Simulationsergebnisse.....	38

Literaturverzeichnis

- A. Mancuso, G. Pitarresi & D. Tumino. „Using FEM simulation to predict structural performances of a sailing dinghy.“ 2017.
- Abdel-Maksoud, M. und K. Rieck. *Wellensystem eines Schiffes bei stationärem Fahrzustand*. Dresden: Bundesanstalt für Wasserbau, 1996.
- alufritze. kein Datum. 23. 09 12. <<https://alufritze.de/riffelblech-aus-almg3-2-5-x-4-0-mm.html>>.
- Autobild. kein Datum. 20. 10 2022. <(https://www.autobild.de/artikel/autos-im-windkanal-666465.html).>.
- aw-marine. kein Datum. 01. 12 22. <<https://aw-marine.com/category/bauplan/>>.
- Bartholomä, Klaus. „Hansa-Jolle von aeronaut.“ 2011.
- boatdesign. kein Datum. 01. 12 2022. <<https://www.boatdesign.net/threads/3d-model-of-a-laser-sailboat.3589/>>.
- Bodensee-Schiffahrts-Ordnung. „Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr zur Einführung der Bodensee-Schiffahrts-Ordnung (EinfVO-BSO).“ 2009.
- Code Knacker. kein Datum. 20. 10 2022. <<https://www.code-knacker.de/cw-wert.htm>>.
- EU Parlament, Europäisches. „Richtlinie 2013/53/EU über Sportboote und Wassermotorräder.“ *Amtsblatt der Europäischen Union* (2013).
- Gocht, Johann. *Greenboatsolution* . 12. May 2023. <<https://www.greenboatsolutions.de/ratgeber/elektro-bootsmotoren/leistung-und-geschwindigkeit>>.
- harken. 2023. 01. 11 2023. <<https://www.harken.com/en/support/selection-tools/calculators/genoa-system-loading-calculator/>>.
- kimpleboating. kein Datum. 23. 04 2023. <<https://de.kimpleboating.com/aluminum-boat-aluminium-boat/aluminum-rowing-boat/all-welded-14-ft-aluminum-boat.html>>.
- kleinanzeigen. kein Datum. 23. 04 2023. <<https://www.kleinanzeigen.de/s-anzeige/alucrest-fish-420-aluminium-boot-aluboot-alu-angelboot-angel/1926044151-211-8190>>.
- lelieclass. kein Datum. 21. 4 2023. <<https://www.lielieclass.nl/filosofie.html>>.

lelieclass. kein Datum. 21. 4 2023. <<https://www.lelieclass.nl/lelieclass/lc-560-bootdetails.html>>.

lelieclass. kein Datum. 21. 04 2023. <(https://www.lelieclass.nl/share/fckfiles/Wie%20wat%20waarom%20LelieClass%20.pdf). >.

oceanplay. kein Datum. 20. 04 23. <<https://www.oceanplay.de/wp-content/uploads/2019/04/explosionszeichnung-bahia-17.01.2011.pdf>>.

oceanplay. kein Datum. 20. 4 2023. <<https://www.oceanplay.de/segeljolle/bahia/>>.

pinterest. kein Datum. 23. 09 13. <<https://www.pinterest.de/pin/387450374199610390/>>.

Rabaud, Marc und Frederic Moisy. „Ship Wakes: Kelvin or Mach Angle?“ 2013.

Richlinien über Bau und Ausrüstung von Vergnügungsfahrzeugen. Berlin: Internationale Schiffsfahrtskommission für den Bodensee, 2008.

sailcenter. kein Datum. 11. 09 23. <<https://www.sailcenter.com/de/zubehor-pro-boot/laser/laser-bug/rumpf-deckbeschlage/rwo-screw-bung-with-socket-and-seal-r2066.html>>.

Schwarzer, Jochen. 152 VO. 12. May 2023. <<https://www.152vo.de/index.php/modelle/hydrodynamik/verdraenger-halbgleitegleiter.html>>.

Sphaier, Sergio Hamilton, et al. „Investigation into the wave system of a generic submarine moving along a straight path beneath the free surface.“ 2019.

SVB. kein Datum. 12. 11 21. <<https://www.svb.de/de/bavaria-gennakerring-fuer-baum.html>>.

USB Dinghy. kein Datum. 01. 12 2022. <<https://aw-marine.com/category/bauplan/>>.