



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Benjamin Zimmermann

Segeln mit Leanströmung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Benjamin Zimmermann

Segeln mit LEEANSTRÖMUNG

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. rer. nat. Bernd Baumann
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf

Abgegeben am 27. März 2017

Zusammenfassung

Benjamin Zimmermann

Thema der Bachelorthesis

Segeln mit Leeanströmung

Stichworte

Auftriebsbeiwert, CFD, Leeanströmung, Segeln, Simulation, Vortriebskraft, Vorwindkurs, Widerstandsbeiwert

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Untersuchung von Leeanströmungen beim Segeln auf Vorwindkursen. Mithilfe von CFD-Simulationen werden Widerstands- und Auftriebsbeiwerte ermittelt und daraus Vortriebskräfte für verschiedene Kurse errechnet. Es können empirische Aussagen von Seglern bestätigt werden, dass durch eine Leeanströmung eine Vortriebskraftehöhung möglich ist. Es ist plausibel, dass die erhöhte Vortriebskraft zu einer größeren Geschwindigkeit des Bootes führt.

Benjamin Zimmermann

Title of the paper

Sailing by the lee

Keywords

CFD, downwind, drag coefficient, driving Force, lift coefficient, Sailing, Sailing by the lee, Simulation

Abstract

This Thesis studies the effect of sailing by the lee on downwind courses. Using CFD-simulations the drag- and lift coefficient are determined. From this the driving force can be calculated for various courses. This study confirms empirical evidence by sailors that sailing by the lee increases the driving force. It is plausible that higher driving forces result in higher velocities.

Bachelorarbeit „Segeln mit Leeanströmung“

Hintergrund

An den Segeln von Booten entsteht auf Amwindkursen, auf Halbwindkursen und auf Raumschotskursen dynamischer Auftrieb. Fällt das Boot aber bei gleichzeitigem Auffieren der Schoten auf Vorwindkurs ab, geht der dynamische Auftrieb verloren und der Vortrieb wird durch Strömungswiderstand erzeugt. Hierbei geht die laminare Strömung in eine turbulente Strömung über. Das Segeln mit Strömungswiderstand ist nicht so effektiv wie das Segeln mit dynamischem Auftrieb. Ein weiteres Problem auf Vorwindkursen ist die Gefahr, dass der Baum unkontrolliert mit hoher Dynamik auf die andere Seite schlägt. Man spricht dann von einer Patenthalse.

Im Internet finden sich Aussagen von Seglern, dass es insbesondere bei katgetakelten Jollen wie Laser, Europe etc. auf Vorwindkursen in Bezug auf die Bootsgeschwindigkeit vorteilhaft sei, wenn mit Leeanströmung gesegelt wird. Beim Segeln mit Leeanströmung strömt die Luft vom Achterliek zum Mast hin, also in die entgegengesetzte Richtung wie beim konventionellen Segeln. Beim Segeln mit Leeanströmung soll erreicht werden, dass auch auf Vorwindkursen dynamischer Auftrieb entsteht. Teilweise wird auch geäußert, dass beim Segeln mit Leeanströmung die Gefahr einer Patenthalse gegenüber dem herkömmlichen Vorwindsegeln verringert ist.

Aufgabenstellung

In der Bachelorarbeit soll mittels CFD-Simulation systematisch untersucht werden, ob sich der Geschwindigkeitsvorteil des Segelns mit Leeanströmung gegenüber dem konventionellen Vorwindsegeln nachweisen lässt. Dazu sind folgende Arbeitsschritte zu bearbeiten:

1. Recherche des Profils eines für die Fragestellung geeigneten Großsegels und dessen formelmäßige Darstellung. Dabei soll die Auswirkung der Einstellung des Baumniederholers Berücksichtigung finden.
2. Aufbau eines CFD-Modells für die Strömung um das Segel. Zielgröße ist die Vortriebskraft in Windrichtung. Das CFD-Modell soll eine stationäre und turbulente Strömung mit einem RANSE-Turbulenzmodell (z.B. k-omega-SST) abbilden können. Bei der Erfassung der Grenzschicht am Segel ist zwischen einem High-Re-Ansatz (mit Wandfunktionen) und einem Low-Re-Ansatz (ohne Wandfunktionen) auszuwählen. Die Eignung des sich daraus ergebenden Netzes ist nachzuweisen (y^+ -Kriterien).
3. Untersuchung des Einflusses, den das Mastprofil auf die Vortriebskraft hat.
4. Die sich ergebenden Strömungsprofile sollen auf Hinweise betreffend eine erhöhte Stabilität gegen Patenthalsen analysiert werden.

Die Vorgehensweise, die erzielten Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse sind in der Thesis unter Beachtung der formalen Anforderungen an das wissenschaftliche Schreiben strukturiert darzustellen. Der Arbeit ist ein Datenträger (CD oder DVD) mit der Arbeit selbst (im PDF-Format) sowie allen relevanten Dateien beizulegen.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
1. Einleitung	10
1.1. Motivation	10
1.2. Ziel der Bachelorarbeit	10
1.3. Vorgehen	11
2. Grundlagen	12
2.1. Kurse beim Segeln	12
2.2. Segelgeometrie	14
2.3. Anstellwinkel	14
2.4. Kräfte am Segel	15
2.5. Beiwerte	16
3. Erstellung des Modells	17
3.1. Erstellung des geometrischen Modells	17
3.2. Gittergenerierung	21
3.3. Netzverfeinerung	22
3.4. Abschätzung der Grenzschicht	23
3.5. Überprüfung des erstellten Netzes	26
3.6. Auswahl des RANS-Modell	27
3.6.1. Standard-k- ϵ -Turbulenzmodell	28
3.6.2. Realizable-k- ϵ -Turbulenzmodell	28
3.6.3. Wilcox-k- ω -Turbulenzmodell	28
3.6.4. Menter-SST-k- ω -Turbulenzmodell	28
3.7. Randbedingungen	29
3.8. Auswahl der Lösungsmethoden	31
4. Simulation und Auswertung	32
4.1. Vorversuch	32
4.2. Validierung der Modellierung	35
4.3. Vorgehen bei der Segeluntersuchung	35

4.4. Auswertung L1B1 ohne Mast	37
4.4.1. Kurs 180°	37
4.4.2. Kurs 175°	38
4.4.3. Darstellung der Kurse 180° bis 170°	39
4.4.4. Kurs 135°	41
4.5. Auswertung L2B2 ohne Mast	42
4.5.1. Kurs 180°	42
4.5.2. Kurs 175°	43
4.6. Vergleich der Segelgeometrien L1B1oM und L2B2oM	44
4.7. Auswertung L1B1 mit Mast	45
4.7.1. Kurs 180°	45
4.7.2. Kurs 175°	45
4.8. Auswertung L2B2 mit Mast	45
4.8.1. Kurs 180°	45
4.8.2. Kurs 175°	45
4.9. Auswirkungen der Mastgeometrien auf die Widerstandsbeiwerte der Segel	46
4.9.1. Segelform L1B1	46
4.9.2. Segelform L2B2	47
5. Fazit	49
Literaturverzeichnis	50
A. Anhang	51
A.1. Vorversuch	51
A.2. Darstellung der Kurse 180° bis 170°	53
A.3. Auswertung L1B1 mit Mast	56
A.4. Auswertung L2B2 mit Mast	57
Glossar	58

Tabellenverzeichnis

3.1. Segelvermessung	19
3.2. Oberflächen der unterschiedlichen Segel	20
3.3. Übersicht über die Netzverfeinerungen	22

Abbildungsverzeichnis

2.1. Kurse zum Wind	12
2.2. Vergleich einer orthogonalen Anströmung (links) mit der Leeanströmung (rechts) auf einem Vorwindkurs	13
2.3. Bezeichnungen am Segel	14
2.4. Anstellwinkel α	14
2.5. Geometrischer Zusammenhang zwischen den Reaktionskräften und den Vortriebskräften	15
3.1. Schematische Darstellung der Abmessungen des Segels	17
3.2. Ausgabe Sailpack	18
3.3. CAD-Modell	20
3.4. Schematische Darstellung des Berechnungsvolumens	22
3.5. y^+ -Werte des Segels L2B2 mit Mast für ein Anstellwinkel von 40°	26
3.6. Bedingungen auf den Rändern des Berechnungsgebietes	29
4.1. Residuen der Simulation mit Second-Order Upwind Second-Order Upwind	33
4.2. Beiwerte C_w und C_a mit Second Second	33
4.3. Beiwerte C_w und C_a mit Second-Order Upwind	33
4.4. Beiwerte C_w und C_a mit Power-Law	34
4.5. Beiwerte C_w und C_a mit First-Order Upwind	34
4.6. Polardiagramme verschiedener Segel (in Anlehnung an [5, S. 109 Abbildung 5.23])	35
4.7. Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind	37
4.8. Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind.	38
4.9. Anteile Widerstandskraft und Auftriebskraft der Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind	39
4.10. Vergleich der Vortriebskräfte der Kurse 180° bis 170°	40
4.11. Vergleich der Vortriebskräfte der Kurse 180° bis 170°	40
4.12. Anteile Widerstandskraft und Auftriebskraft der Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 135° zum scheinbaren Wind	41
4.13. Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkel α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind	42

4.14. Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind	43
4.15. Vergleich des Gesamtwiderstandsbeiwerts der Segel L1B1oM und L2B2oM auf einem reinen Vorwindkurs	44
4.16. Vergleich des Widerstandsbeiwertes c_w der Segel L1B1oM und L1B1mM	46
4.17. Vergleich des Auftriebsbeiwertes c_a der Segel L1B1oM und L1B1mM	47
4.18. Vergleich des Widerstandsbeiwertes c_w der Segel L2B2oM und L2B2mM	48
4.19. Vergleich des Auftriebsbeiwertes c_a der Segel L2B2oM und L2B2mM	48
A.1. Residuen der Simulation mit Second-Order Upwind	51
A.2. Residuen der Simulation mit Power-Law	52
A.3. Residuen der Simulation mit First-Order Upwind	52
A.4. Vergleich der Vortriebskräfte des Segels L1B1mM auf den Kursen 180° bis 170°	53
A.5. Vergleich der Vortriebskräfte des Segels L2B2oM auf den Kursen 180° bis 170°	53
A.6. Vergleich der Vortriebskräfte des Segels L2B2mM auf den Kursen 180° bis 170°	54
A.7. Vergleich der maximalen Vortriebskräfte des Segels L1B1mM auf den Kursen 180° bis 170°	54
A.8. Vergleich der maximalen Vortriebskräfte des Segels L2B2oM auf den Kursen 180° bis 170°	55
A.9. Vergleich der maximalen Vortriebskräfte des Segels L2B2mM auf den Kursen 180° bis 170°	55
A.10. Vortriebskraft des Segels L1B1mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind	56
A.11. Vortriebskraft des Segels L1B1mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind	56
A.12. Vortriebskraft des Segels L2B2mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind	57
A.13. Vortriebskraft des Segels L2B2mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind	57

1. Einleitung

1.1. Motivation

Beim Segeln mit einem Großsegel werden die Vortriebskräfte bei verschiedenen Kursrichtungen durch unterschiedliche Umströmungen des Segels erzeugt. Bei „Am Wind“- , „Halber Wind“- und „Raumschot“-Kursen entsteht der Vortrieb durch den dynamischen Auftrieb und den Widerstand des Segels. Deshalb ist es auf solchen Kursen möglich, schneller als die Windgeschwindigkeit zu segeln. Bei Kursen, die „Vor dem Wind“ liegen, wird vorwiegend mit einem Anstellwinkel¹ von 90° gearbeitet. Dabei wird die Vortriebskraft fast ausschließlich über den Strömungswiderstand erzeugt. Dadurch ist es nicht möglich, schneller als der Wind zu sein.

Viele Segler stellen die Behauptung auf, dass insbesondere bei katgetakelten² Jollen wie dem Laser© auf Vorwindkursen eine schnellere Bootsgeschwindigkeit erreicht werden kann, wenn das Segel auf eine Leeanströmung eingestellt wird [2, S. 125]. D.h. das Segel wird von der dem Mast abgewandten Seite angeströmt. Dabei soll sich der dynamische Auftrieb so stark vergrößern, dass es zu einer merklichen Erhöhung der Bootsgeschwindigkeit kommt. Diese Behauptung wird durch empirische Beobachtungen der Segler gestützt. In der wissenschaftlichen Literatur wie z.B. dem Buch Physik des Segelns von Wolfgang Püschl [5] findet man jedoch wenig zum Thema Geschwindigkeitsverbesserung durch Leeanströmung.

1.2. Ziel der Bachelorarbeit

Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe von Simulation die Behauptung, dass sich eine Leeanströmung auf Vorwindkursen vorteilhaft auf die Geschwindigkeit auswirkt, zu überprüfen. Da die Geschwindigkeit des Bootes von vielen verschiedenen Faktoren wie z.B. Rumpfform, Eintauchtiefe, Krängung abhängt, wird als Untersuchungsgegenstand die Vortriebskraft festgelegt. Es ist plausibel, dass bei gleichen Bedingungen eine höhere Vortriebskraft in einer höheren Geschwindigkeit resultiert. Für den Segler ist der Vergleich von verschiedenen Kursen mittels einer VMG-Analyse (Velocity Made Good) von Interesse. Dies ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, da viele Faktoren, die für

¹Winkel zwischen der Sehne des Segelprofils und dem scheinbaren Wind

²Das Boot besitzt nur ein Großsegel

die Bestimmung der Geschwindigkeit notwendig sind, vernachlässigt werden. Weiterhin ist es auch kein Teil dieser Arbeit, die errechneten Werte experimentell zu überprüfen.

1.3. Vorgehen

Um die Umströmung des Segels zu simulieren, wird zunächst die Segelgeometrie des Großsegels einer Laser-Jolle aufgenommen und in ein CAD-Modell (Computer Aided Design) umgewandelt.

Aus dem CAD-Modell wird ein CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics) abgeleitet, das eine stationäre turbulente Strömung beschreibt. Dazu wird ein Rechenetz aufgebaut und die Eignung des Netzes überprüft. Es folgen die Auswahl eines geeigneten Turbulenzmodells und die Festlegung der Randbedingungen und Lösungsmethoden.

Eine CFD-Simulation liefert für verschiedene Anstellwinkel Widerstands- und Auftriebsbeiwerte, die in Vortriebskräfte auf unterschiedlichen Vorwindkursen umgerechnet werden.

Die resultierenden Vortriebskräfte werden in Hinblick auf die Aufgabenstellung ausgewertet und die Ergebnisse in einem Fazit zusammengefasst.

2. Grundlagen

2.1. Kurse beim Segeln

Beim Segeln werden die Kurse über den Winkel zwischen der Bootsbewegung und dem einfallenden Wind benannt (siehe Abbildung 2.1) [8, S. 48 ff]. Der einfallende Wind wird auch scheinbarer Wind genannt. Er ist die Überlagerung des eigentlichen Windes mit dem Fahrtwind der Bootsbewegung. Der scheinbare Wind ist der Wind, der vom Segler wahrgenommen wird. Zur Bestimmung des Kurses dient eine Vorrichtung an der Mastspitze, eine Windanzeige, die die Richtung des Windes angibt. Sie ist an der Mastspitze angebracht, da dort der Einfluss des Segels auf die Luftströmung am geringsten ist. Der wahre Wind kann nur schwer abgelesen werden.

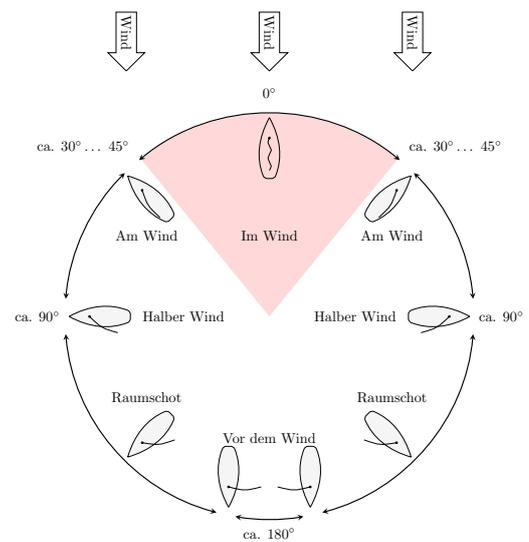


Abbildung 2.1.: Kurse zum Wind

Kurswinkel im Bereich von 0° werden unter dem Begriff „Im Wind“ zusammengefasst. Auf einem solchen Kurs kann man jedoch keine Fahrt aufnehmen. Das Segel erzeugt keinen Vortrieb, da der Wind direkt aus der Fahrtrichtung kommt und so das Boot abbremst. Bei diesem Kurs fängt das Segel an zu flattern. Der Segler spricht vom „Killen“ der Segel. Man kann ein Ziel auf diesem Kurs erreichen, indem man „kreuzt“, d.h. man fährt abwechselnd auf Kursen mit ca. $+45^\circ$ und -45° , die sich zu einer Bewegung in 0° Richtung zusammensetzen. Bei modernen Segelbooten verringert sich der Winkel auf ca. $\pm 30^\circ$.

Ein Kurs von ca. 45° wird als „Hoch am Wind“ bezeichnet. Obwohl der scheinbare Wind immer noch von „vorn“ kommt, können Segelboote wie Jollen auf solchen Kursen segeln. Der Vortrieb wird dabei durch Auftrieb des Segels erzeugt. Das Segel wird auf einem solchen Kurs dichtgeholt, also zur Mitte des Bootes gebracht. Der kleinste segelbare Kurs wird Wendewinkel genannt. Er liegt je nach Bootstyp bei ca. 30° - 45° . Es ist jedoch nicht der schnellste Kurs. In der Regel wird der Steuermann etwas vom Wind abfallen und auf einen vollen Stand der Segel achten.

Zeigt die Windanzeige ca. 90° zwischen Kurs und scheinbaren Wind an, spricht man von "halbem Wind". Bei halbem Wind entsteht der Vortrieb zu einem großen Teil durch einen Auftrieb des Segels, teilweise aber auch durch die Widerstandskraft, die auf das Segel wirkt. Da die Summe beider Kräfte nicht in Fahrtrichtung wirkt, entsteht ein krängendes Moment um die Längsachse des Bootes.

Kurse mit einem Winkel von ca. 135° werden Raumschotkurse genannt. Der Wind kommt für das Segelboot schräg von hinten. Der Vortrieb wird aus der Summe der Auftriebskraft und der Widerstandskraft erzeugt. Diese Kurse sind sehr stabil, es treten so gut wie keine Verdrehungen des Bootes auf. Das spricht dafür, dass die Vortriebskraft komplett durch die Umströmung des Bootsrumpfes ausgeglichen werden kann.

Der Vorwindkurs ist für diese Arbeit entscheidend. Dabei wird ein Winkel von $180^\circ \pm 5^\circ$ gesegelt. Der scheinbare Wind kommt direkt von hinten und stimmt mit der Richtung des wahren Windes überein. Auf diesen Kursen wird üblicherweise das Segel in einem 90° Winkel zur Bootslängsachse gestellt. In dieser Stellung wird die Vortriebskraft ausschließlich durch die Widerstandskraft des Segels erzeugt. Dieser Kurs erzeugt daher weniger Fahrt als Raumschotkurse.

Eine Alternative zu der üblichen Segelstellung auf Vorwindkursen ist die in der Einleitung besprochenen Lee-Stellung des Segels. Bei dieser Stellung wird das Segel um wenige Grad dicht geholt, sodass der Wind über die dem Mast abgewandte Seite auf das Segel einfällt. Durch die Schrägstellung soll das Segel besser umströmt werden und somit eine zusätzliche Auftriebskraft erzeugen, die eine Vergrößerung der Vortriebskraft bewirkt. Die Abbildung 2.2 zeigt eine vereinfachte Darstellung der orthogonalen Anströmung bzw. Leeanströmung.

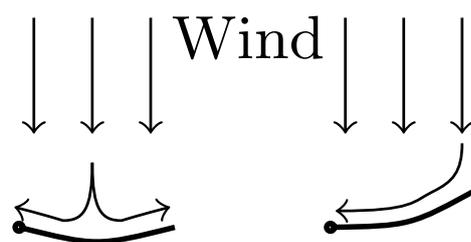


Abbildung 2.2.: Vergleich einer orthogonalen Anströmung (links) mit der Leeanströmung (rechts) auf einem Vorwindkurs

2.2. Segelgeometrie

Ein Großsegel hat in grober Näherung die Form eines Dreiecks (siehe Abbildung 2.3). Am oberen Ende ist die Spitze abgeschnitten, dort befindet sich der Kopf des Segels. Die am Mast anliegende Seite des Segels wird als Vorliek bezeichnet, die am Baum anliegende Seite als Unterliek und die freie Seite als Achterliek. Am Baum sind zwei Vorrichtungen angebracht, mit denen man die Form des Segels beeinflussen kann: Der Unterliekstrecker ist ein Flaschenzug, mit dem man eine Zugkraft auf das Unterliek ausüben kann, um so die Wölbung des Unterlieks zu bestimmen. Mit dem Baumniederholer kann man den Baum zum Bootsrumf ziehen und so über das gesamte Segel eine Kraft auf den Mast ausüben. Dadurch werden die Mastkrümmung und die Segelwölbung des oberen Teils des Segels beeinflusst.

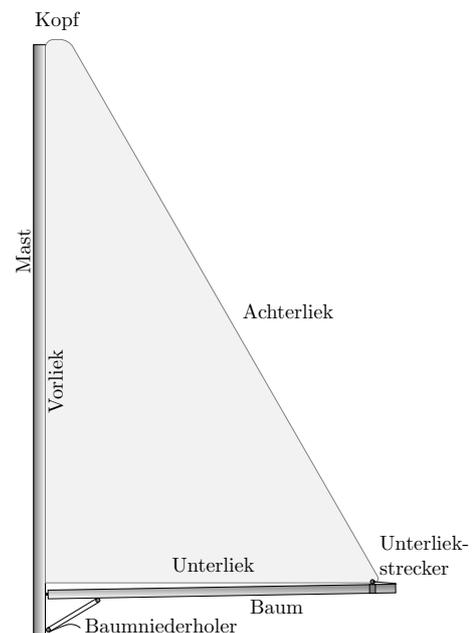


Abbildung 2.3.: Bezeichnungen am Segel

2.3. Anstellwinkel

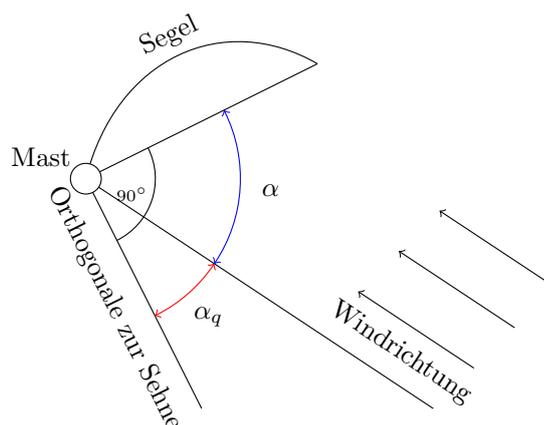


Abbildung 2.4.: Anstellwinkel α

Der Anstellwinkel α beschreibt den Winkel zwischen der Stömungsrichtung des Fluids und der Sehne des Segelprofils [5, S. 17]. Für das Segel wird die Sehne ungefähr über den Baum beschrieben. Üblicherweise wird beim Segeln das Segelprofil über das Vorliek angeströmt. In dieser Arbeit werden jedoch die orthogonale Anströmung und die LEEANSTRÖMUNG, bei der

das Segel vom Achterliek angeströmt wird, untersucht. Daher wurde ein Queranstellwinkel $\alpha_q = 90^\circ - \alpha$ definiert, der bei orthogonaler Anströmung einen Betrag von Null besitzt. Je weiter die Anströmungsrichtung zum Achterliek wandert, desto größer wird der Queranstellwinkel α_q .

2.4. Kräfte am Segel

Die Kräfte am Segel werden durch den sogenannten scheinbaren Wind erzeugt. Der scheinbare Wind \vec{V}_s ist die Differenz des wahren Windes \vec{V}_t und der Bootsgeschwindigkeit \vec{V}_b [10, S. 29].

$$\vec{V}_s = \vec{V}_t - \vec{V}_b \quad (2.1)$$

Die Widerstandskraft \vec{F}_w wird in Strömungsrichtung des scheinbaren Windes gemessen und die Auftriebskraft \vec{F}_a orthogonal dazu [5, S. 17]. Der Winkel β zwischen dem Kurs des Bootes und der Richtung des scheinbaren Windes bestimmt, welche Anteile der Segelkräfte in die Vortriebskraft \vec{F}_V fließen und welche in die Seitenkraft \vec{F}_S . Die Kräfte und Winkel sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

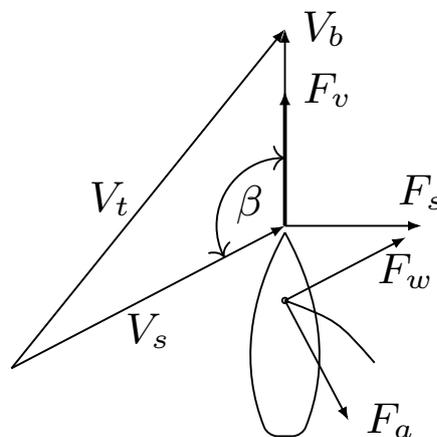


Abbildung 2.5.: Geometrischer Zusammenhang zwischen den Reaktionskräften und den Vortriebskräften

Für die Beträge der Kräfte besteht folgender geometrischer Zusammenhang [10, S. 35]:

$$F_v = F_a \cdot \sin(\beta) - F_w \cdot \cos(\beta) \quad (2.2)$$

$$F_s = F_a \cdot \cos(\beta) + F_w \cdot \sin(\beta) \quad (2.3)$$

2.5. Beiwerte

Die entstehenden Kräfte an einem Segel sind von der Anströmungsgeschwindigkeit U_∞ , die in diesem Fall identisch mit der scheinbaren Windgeschwindigkeit V_s ist, der Luftdichte ρ und der Segelfläche A abhängig. Um ähnliche Geometrien miteinander vergleichbar zu machen, werden der dimensionslose Widerstandsbeiwert c_w und der Auftriebsbeiwert c_a definiert [4, S. 100].

$$c_w = \frac{2 \cdot F_w}{\rho \cdot A \cdot U_\infty^2} \quad (2.4)$$

$$c_a = \frac{2 \cdot F_a}{\rho \cdot A \cdot U_\infty^2} \quad (2.5)$$

Mit Hilfe von CFD-Simulationen können die Beiwerte für bestimmte Anstellwinkel berechnet werden und so die Widerstandskräfte F_w und die Auftriebskräfte F_a von verschiedenen Segelgeometrien und Größen miteinander verglichen werden, indem die Gleichungen (2.4) und (2.5) nach F_w bzw. F_a aufgelöst werden:

$$F_w = c_w \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_\infty^2 \right) \quad (2.6)$$

$$F_a = c_a \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_\infty^2 \right) \quad (2.7)$$

3. Erstellung des Modells

3.1. Erstellung des geometrischen Modells

Für eine realitätsnahe Simulation ist eine genaue Beschreibung der Geometrie eines Segels nötig. Da eine mathematische Beschreibung einer Segelfläche und die Ableitung dieser Fläche in ein CAD-Modell sehr aufwendig wäre, wurde das Großsegel einer Laser-Jolle Mark II vermessen und daraus ein CAD-Modell erstellt. Für die Aufnahme der Form des Segels wurde SailPack-Vision¹ verwendet, um die Abmessungen in ein CAD-Modell umzuwandeln, wurde sailcut² benutzt. Beide Programme werden auch von Segelmachern verwendet, wenn sie Segel vermessen wollen.

Zunächst wurden die äußeren Abmessungen des Segels gemessen (siehe Abbildung 3.1).

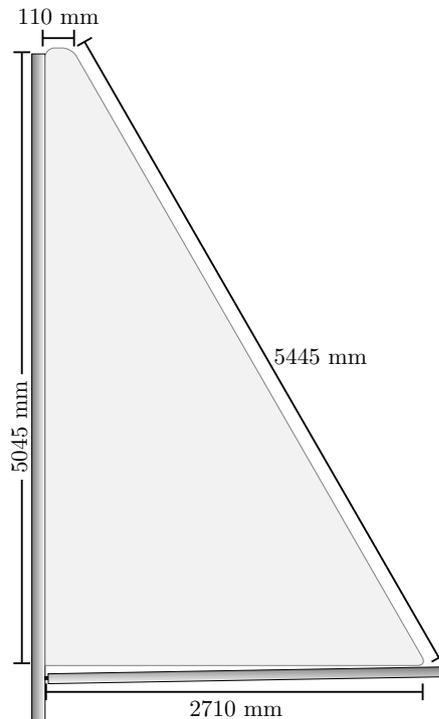


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung der Abmessungen des Segels

¹ Quelle: <http://www.bsgdev.com/CMS3/index.php/menuproducts/sailpack-vision>

² Quelle: <http://www.sailcut.com>

Die äußeren Abmessungen des Segels reichen allein nicht aus, um ein Segel zu beschreiben. Zusätzlich muss die Wölbung des Segels bestimmt werden. Dazu wurden schwarze Klebestreifen auf $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Höhe des Vorlieks und des Achterlieks geklebt. Das Segel wurde nun in den Wind gestellt, sodass sich das Segel wölben kann. Wenn man von unterhalb des Segels ein Foto (siehe Abbildung 3.2 (a)) macht, ist die Kurve der Klebestreifen eine gute Näherung für die Krümmung des Segels. Es wurden zwei Segelpositionen bzw. Stellungen des Baumniederholers und des Unterliekstreckers aufgenommen.

Innerhalb von SailPack-Vision (SPV) können Kurven auf die Klebestreifen gelegt werden. SPV gibt nun den Eingangswinkel (Entry) und den Ausgangswinkel (Exit) der Wölbung sowie die Tiefe (Camber) und die Position der tiefsten Stelle (Draft) des Segels (siehe Abbildung 3.2 (b)) aus.

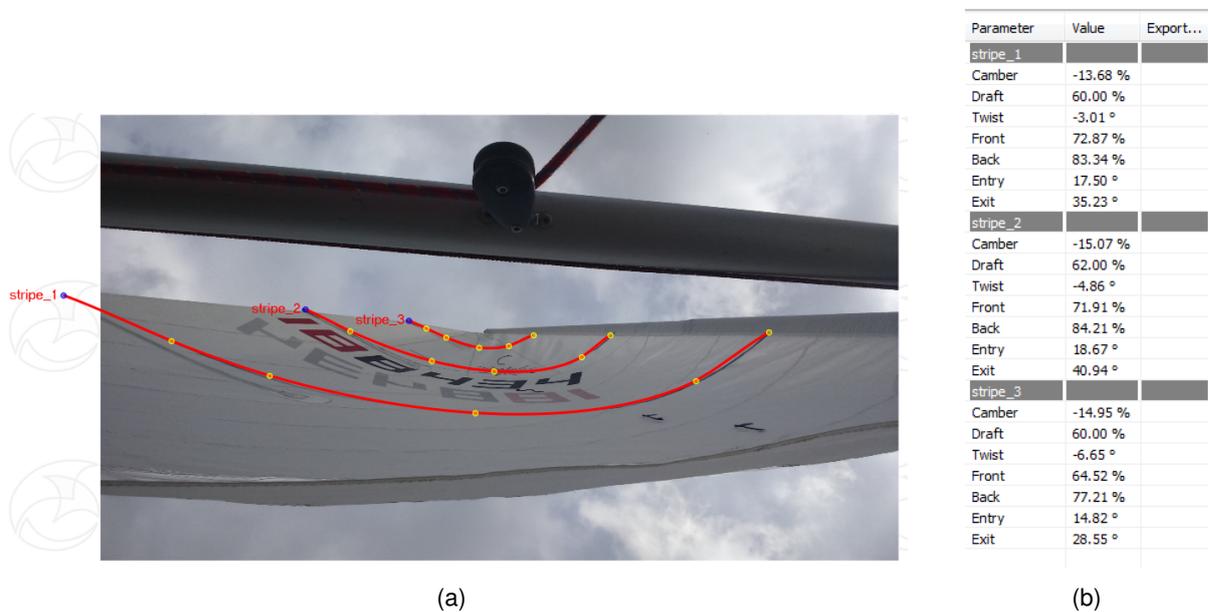


Abbildung 3.2.: (a) Foto eines Segels mit eingelegten Kurven
(b) Ausgabe der Winkel bzw. Krümmung des Segels

Zusätzlich wurden die Krümmung des Mastes und die des Unterlieks aufgenommen und zur Erstellung der Segelgeometrie verwendet. Die geometrischen Daten können in sailcut eingegeben und ein Modell der Segelgeometrie abgeschätzt werden. Die Tabelle 3.1 stellt die Messungen zusammen. Die Wölbung lässt sich innerhalb von Sailcut nur näherungsweise einstellen. Daher gibt es kleine Abweichungen zwischen dem gemessenen Segel und dem verwendeten Segel. Es ist davon auszugehen, dass trotz der Unterschiede zum gemessenen Segel die mit sailcut erstellte Geometrie realistisch ist, da die mit sailcut erstellten Segelgeometrien in der Praxis Anwendung finden.

		Segel L1B1		Segel L2B2	
		gemessen	verwendet	gemessen	verwendet
1/4 Höhe	Achterliekwinkel	17,68°	19,00°	17,98°	18,00°
	Vorliekwinkel	37,44°	38,00°	40,02°	36,00°
	Wölbung	15,32%	15,00%	13,68%	14,00%
	Position d. Wölbung	59,00%	58,00%	60,00%	58,00%
1/2 Höhe	Achterliekwinkel	20,11°	21,00°	18,50°	19,00°
	Vorliekwinkel	40,98°	40,00°	35,78°	38,00°
	Wölbung	15,79%	16,00%	14,74%	15,00%
	Position d. Wölbung	58,00%	58,00%	60,00%	58,00%
3/4 Höhe	Achterliekwinkel	14,38°	15,00°	15,50°	17,00°
	Vorliekwinkel	39,88°	44,00°	24,51°	34,00°
	Wölbung	15,58%	15,00%	14,93%	13,00%
	Position d. Wölbung	64,00%	64,00%	58,00%	58,00%

Tabelle 3.1.: Segelvermessung

Für die Untersuchungen wurden zwei Segelflächen erstellt: das erste Segel (L1B1) wurde mit losem Baumniederholer und Unterliekstrecker und das zweite Segel (L2B2) mit angezogenem Baumniederholer und Unterliekstrecker modelliert. Der angezogene Baumniederholer und Unterliekstrecker führen zu einer geringeren Wölbung und einer Änderung der Position. Durch die geringere Wölbung reduzieren sich die Vorliekwinkel und Achterliekwinkel. Sailcut erstellt ein Schnittmuster der Segelgeometrie. Dieses Muster wurde als DFX-Datei exportiert und in AutoCAD³ in eine iges-Datei umgewandelt. Iges steht für Initial Graphics Exchange Specification und ist ein neutrales Datenformat, welches ermöglicht, Daten zwischen verschiedenen CAD-Programmen auszutauschen. Die iges-Datei besteht aus einem Polygon-Flächenmodell, in das an spezifischen Punkten Splines gelegt wurden, aus denen eine geschlossene Fläche erstellt wurde.

Die Fläche wurde in ein Volumenmodell umgewandelt und mit einem Mast versehen. Dadurch, dass die Segelgeometrien leicht unterschiedlich sind, ergeben sich für die vier Segelflächen leichte Unterschiede. Für CFD-Untersuchungen müssen Referenzflächen angegeben werden. Die Referenzfläche gibt an, auf welche Fläche die entstehende Kraft bezogen wird. Üblicherweise wird als Referenzfläche die Fläche benutzt, über die das Fluid strömt. Für die Untersuchungen wurde die Hälfte der Oberflächen der Segel als Referenzflächen gewählt (siehe Tabelle 3.2).

³ Quelle: <http://www.autodesk.com/education/free-software/autocad>

Segelgeometrie	Fläche	Referenzfläche
Segel L1B1	15,10 m ²	7,55 m ²
Segel L2B2	15,14 m ²	7,57 m ²
Segel L1B1 m. Mast	15,86 m ²	7,93 m ²
Segel L2B2 m. Mast	15,90 m ²	7,95 m ²

Tabelle 3.2.: Oberflächen der unterschiedlichen Segel

Die Mastneigung für die Segelformen L1B1 und L2B2 werden im Ansys-Modell eingebunden. Sie betragen für das Segel L1B1 1° und für das Segel L2B2 6°.

Die Abbildung 3.3 zeigt eine fertige Segelgeometrie.

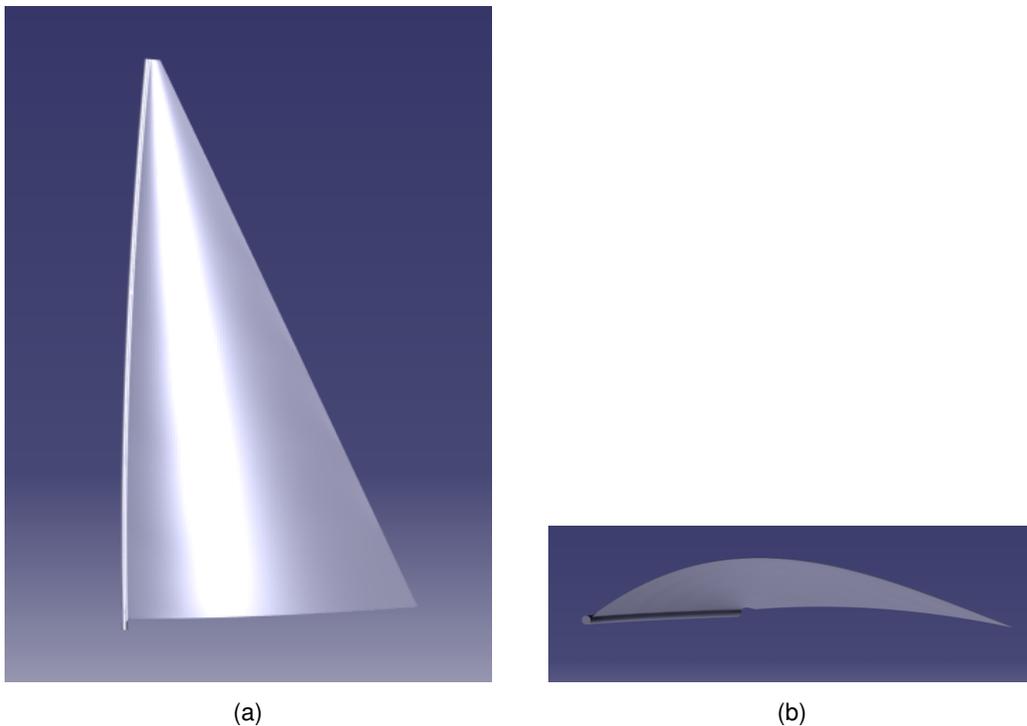


Abbildung 3.3.: Segelgeometrie mit Mast dargestellt in CATIA (a) von vorn, (b) von unten

3.2. Gittergenerierung

Bei Strömungssimulationen wird nicht die eigentliche Geometrie der Untersuchung vernetzt, sondern ein Berechnungsvolumen um die Geometrie aufgespannt, in der das Fluid gegen bzw. um das Objekt strömt. Für die Vernetzung des Berechnungsvolumens gibt es zwei Ansätze: die strukturierte und die unstrukturierte Vernetzung. Beide Vernetzungstypen besitzen ihre Vor- und Nachteile. Die Vernetzung wurde mithilfe des in ANSYS Workbench enthaltenen Vernetzers durchgeführt. Ein Vernetzer ist ein Programm, das ein Gitter in einem Volumen erstellt.

Strukturierte Netze bestehen aus einer Aneinanderreihung von sich in Größe und Form sehr stark ähnelnden Hexaedern [7, S. 23 ff]. Diese Darstellung ermöglicht es, jeden Knotenpunkt des Netzes durch ein Indextripel eindeutig darzustellen. Dadurch kann der Vernetzer die Netze schnell erstellen. Strukturierte Netze besitzen, im Vergleich zu unstrukturierten Netzen, bei gleichen Kantenlängen eine geringere Anzahl von Zellen und verfügen somit über einen geringeren Rechenaufwand. Durch ihren strukturierten Aufbau sind sie jedoch nicht für komplexe Geometrien mit vielen unterschiedlichen Krümmungen einsetzbar. Zudem lassen sich in einem strukturierten Netz keine lokalen Netzverfeinerungen realisieren, da es vermieden wird, unterschiedliche Zellengeometrien und -größen zu erstellen. Die Netzverfeinerung würde sich also über das gesamte Gitter erstrecken und so ein deutlich feineres Rechengitter und damit einen wesentlich höheren Rechenaufwand erzeugen.

Unstrukturierte Netze bestehen im dreidimensionalen Raum aus Tetraedern [7, S. 23 ff]. Die Erstellung des Gitters ist deutlich unstrukturierter, dafür aber flexibler als bei einem strukturierten Netz. Die Verbindungen der einzelnen Punkte folgt keinem klaren Prinzip und benötigen daher eine „connectivity matrix“, in der die Verbindungen der Punkte hinterlegt sind. Durch ihre Flexibilität und Anpassungsfähigkeit sind sie gut dafür geeignet, komplizierte Geometrien zu vernetzen und lokale Netzfeinheiten einzustellen. Leider sind sie in der Erstellung des Gitters deutlich aufwändiger und führen zu längeren Vernetzungszeiten. Die unstrukturierten Gitter besitzen einen deutlich höheren Speicheraufwand als die strukturierten Gitter.

Da sich die Segelgeometrie durch die vielen unterschiedlichen Krümmungen nicht dazu eignet, mit einem strukturierten Gitter abgebildet zu werden, wurde eine Kombination der beiden Klassen in einem Blockgitter benutzt. Dazu wurde das Berechnungsvolumen in mehrere Blöcke aufgeteilt, die unterschiedliche Strukturen besitzen können.

Das Berechnungsvolumen (siehe Abbildung 3.4) besteht aus einem Halbkreis mit einem Radius von 50 Meter, an dem ein Rechteck mit einer Höhe von 100 Meter und der Breite von 50 Meter anschließt. Bei kleineren Abmessungen ergaben sich Rückströmungen in den Rändern des Volumens, die zu einem Abbruch der Berechnung führten. Das Volumen besitzt eine Dicke von 100 Meter. Im Zentrum des Volumens ist das Segel eingebracht. Um das Segel herum ist ein Block, der unstrukturiert vernetzt wurde, damit die Wandgeometrie des Segels gut abgebildet werden konnte. Die restlichen Blöcke des Volumens wurden strukturiert vernetzt, um geringere

Rechenzeiten zu erzielen. Dabei wurden die Blöcke in der Ebene des Segels im Bereich der abgelösten Strömung feiner vernetzt als die außen liegenden Blöcke.

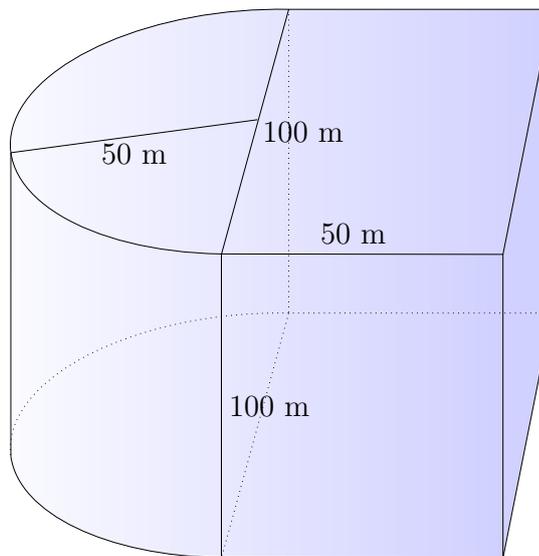


Abbildung 3.4.: Schematische Darstellung des Berechnungsvolumens

3.3. Netzverfeinerung

Bei Simulationen führen zu grobe Netze zu großen Fehlern in den Ergebnissen. Deshalb ist es üblich, das Netz systematisch in mehreren Stufen zu verfeinern. Bei ausreichender Feinheit des Netzes ändern sich die Ergebnisse bei weiterer Verfeinerung nur minimal. Man spricht in diesem Fall von einer Netzunabhängigen Lösung. Es wurde eine Netzverfeinerung an dem im Kapitel 3.2 erstellten Netz durchgeführt, um abzuschätzen zu können, ob das Gitter fein genug ist. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Anzahl der Zellen mit jeder Verfeinerung signifikant erhöht. Es wurden zwei Verfeinerungen durchgeführt und die so generierten Netze untersucht.

	Zellenanzahl	C_w
Netz 1	8387411	1,2033
Netz 2	12260303	1,1866
Netz 3	15643776	1,1942

Tabelle 3.3.: Übersicht über die Netzverfeinerungen

Die Untersuchung zeigte, dass sich die Widerstandsbeiwerte bei der ersten Verfeinerung des Netzes nur um ungefähr 1,4% ändern würde (siehe Tabelle 3.3). Da diese Änderung für die gestellte Aufgabe als gering eingestuft wurde, wurde in weiteren Simulationen das Netz 1 verwendet.

3.4. Abschätzung der Grenzschicht

In der Simulation kann bei Fluiden wie Luft und Wasser die Viskosität vernachlässigt werden, da praktisch keine Reibung innerhalb des Fluids auftritt [6, S. 27]. In der Nähe von Objekten ist diese Vereinfachung jedoch nicht zulässig, da durch das Weglassen der Reibung die Haftbedingung an der Wand nicht erfüllt werden kann. Die Haftbedingung besagt, dass die Geschwindigkeit des Fluids in Wandnähe abnimmt, bis sie direkt an der Wand einen Wert von Null erreicht.

In der Strömungstheorie wird das Strömungsfeld in zwei Bereiche unterteilt: Die Außenströmung, in der die Viskosität vernachlässigt werden kann, und eine wandnahe Schicht, die nach L. Prandtl als Grenzschicht bezeichnet wird [6, S. 27].

Obwohl die Grenzschicht oftmals nur sehr dünn ist, hat sie einen großen Einfluss auf aerodynamischen Eigenschaften, wie z.B. die Widerstandsbeiwerte von Körpern [7, S. 150]. Für die Simulation der Strömung ist es daher wichtig, die Grenzschicht gut abzubilden.

Für die Charakterisierung der Grenzschicht wird die Reynoldszahl Re benutzt. Die Reynoldszahl ist eine dimensionslose Kennzahl der Strömung und bezeichnet das Verhältnis von Impulskonvektion zu Impulsdiffusion im System (siehe Formel (3.1)). Sie spielt daher bei der Beschreibung von turbulenten Verhalten eine wesentliche Rolle.

Für die Beschreibung der Grenzschicht einer Strömung gibt es zwei Modelle: Das High- Re und das Low- Re -Modell [7, S. 150 ff].

Das High- Re -Modell basiert auf der Feststellung, dass bei vielen Experimenten an vollturbulenten Strömungen im wandnahen Bereich ähnliche Geschwindigkeitsverteilungen vorliegen. Der Geschwindigkeitsverlauf kann durch die Analyse der Strömung zwischen zwei parallelen, sich relativ zu einander bewegenden Platten (Couette-Strömung) beschrieben werden [6, S. 517 ff]. Das Ergebnis wird als Wandgesetz bezeichnet. Es beschreibt den Verlauf der mittleren wandparallelen Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Wandabstand. Dieses Wandgesetz kann man dimensionslos gestalten, sodass man es auf verschiedene Modelle übertragen kann. Die Standard-Wandfunktion approximiert die wandnahe Grenzschicht und ist für viele Strömungen gut. Bei Modellen mit starker dreidimensionaler Strömungsstruktur bildet die Approximation die Grenzschicht nicht ausreichend genau ab.

Das Low- Re -Modell kann die Grenzschicht von Bereichen mit hohen Reynoldszahlen bis hin zu Bereichen mit kleinen Reynoldszahlen gut auflösen und modellieren. Dazu dämpft das Modell die Turbulenz in Bereichen mit kleinen Reynoldszahlen, sodass die Strömung und die Turbulenz bis an die Wand beschrieben und berechnet werden können. Dadurch, dass das Low- Re -Turbulenzmodell die Grenzschicht modelliert und nicht approximiert, wird es in fast jeder Simulation zu besseren Ergebnissen führen als das High- Re Modell.

Da nicht genau bekannt ist, wodurch der Geschwindigkeitsvorteil beim Lee-Segeln entsteht, wurden die Simulationen mit einem Low- Re -Modell durchgeführt.

Um mit dem Low-Re Modell gute Ergebnisse erzielen zu können, muss das Rechengitter eine bestimmte Auflösung besitzen. Um den Abstand des ersten Gitterpunktes von der Wand zu beschreiben, wird ein dimensionsloser Wandabstand y_p^+ verwendet. Dieser Wert sollte idealerweise bei $y_p^+ \approx 1$ liegen.

Um den Abstand im Modell zu realisieren, werden Inflationsschichten an den Wänden erzeugt. Das Benutzen einer Inflationsschicht erstellt eine Schicht entlang einer Wand. Die Schicht besitzt die gleiche Dicke und somit den gleichen Wandabstand in den Gitterpunkten. Man kann mehrere Schichten mit unterschiedlichen Schichtdicken aufeinander legen, um so die Grenzschicht zu modellieren. Durch einen Wachstumskoeffizienten kann festgelegt werden, um wie viel die nachfolgende Schicht wächst.

Um die Dicke y der ersten Inflationsschicht zu errechnen, wurde ein Tool von Pointwise verwendet⁴. Es berechnet die nötige Dicke für ein vorgegebenes y_p^+ mit Hilfe der Reynoldszahl Re . Das Programm basiert auf der Grenzschicht-Theorie für flache Platten von Frank White [12, S. 467].

$$Re = \rho \cdot \frac{U_\infty \cdot L}{\eta} \quad (3.1)$$

Dabei ist η die dynamische Viskosität und L die Länge der umströmten Fläche. Aus der Reynoldszahl lässt sich ein Reibungskoeffizient C_f für die Wand bestimmen.

$$C_f = \frac{0.027}{Re^{\frac{1}{7}}} \quad (3.2)$$

Mithilfe von C_f lassen sich die Schubspannungen an der Wand τ_w und die Schubspannungsgeschwindigkeit U_τ berechnen.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \quad (3.3)$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.4)$$

Für die Abschätzung der Dicke der ersten Inflationsschicht y gilt die Formel:

$$y = \frac{y_p^+ \cdot \eta}{U_\tau \cdot \rho} \quad (3.5)$$

⁴Quelle: <http://www.pointwise.com/yplus/>

Setzt man die Formeln (3.2), (3.3) und (3.4) in die Formel (3.5) ein, erhält man die Formel (3.6), die nur von der Reynoldszahl und von dem gewünschten y_p^+ abhängt.

$$y = \frac{L}{Re} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{0,027}{Re^{\frac{1}{7}}}}} \cdot y_p^+ \quad (3.6)$$

Bei der Verwendung der Fluent Standard Luft ergibt sich für die Dichte der Luft $\rho = 1,225 \frac{kg}{m^3}$ und für die dynamischen Viskosität der Luft $\eta = 1,7894 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$. Für die Anströmungsgeschwindigkeit U_∞ wurde ein für die Anwendung sinnvoller Wert von $5 \frac{m}{s}$ angenommen. Die Länge der überströmten Fläche L ergibt sich aus der Breite des Segel bei halber Höhe. In diesem Fall beträgt sie 1,770 m. Setzt man diese Werte in die Formel (3.1) ein, ergibt sich für die Reynoldszahl $Re = 606000$. Bei einem gewünschten Wandabstand von $y_p^+ = 1$ ergibt sich aus den Formeln (3.1) und (3.6) ein Wandabstand $y = 6,632 \cdot 10^{-5}$ m. Für das Modell wurde eine Größe von 0,065 mm verwendet.

Mit Hilfe der Reynoldszahl lässt sich auch die Dicke der Grenzschicht abschätzen:

$$\delta = \frac{0,16}{Re^{\frac{1}{7}}} \cdot L \quad (3.7)$$

Aus der Formel ergibt sich mit den oben verwendeten Werten eine Grenzschichtdicke von $\delta = 0,042$ m. Bei 20 Inflationsschichten benötigt man einen Wachstumskoeffizienten von 1,3, um die Grenzschicht vollständig abzudecken.

3.5. Überprüfung des erstellten Netzes

Da es sich bei der Erstellung der Grenzschichtmodellierung nur um eine Abschätzung handelt, muss für die erstellten Inflationsschichten überprüft werden, ob die y_p^+ -Werte in dem im Kapitel 3.4 definierten Rahmen liegen, für das verwendete Low-Re Modell also im Bereich von 1. Dazu wurde eine Segelstellung gewählt, bei der die Strömung teilweise an dem Segel anliegt. Dafür wurde der Queranstellwinkel $\alpha_q = 40^\circ$ angenommen. Höhere Winkel sind für die Beantwortung der Fragestellung nicht ausschlaggebend.

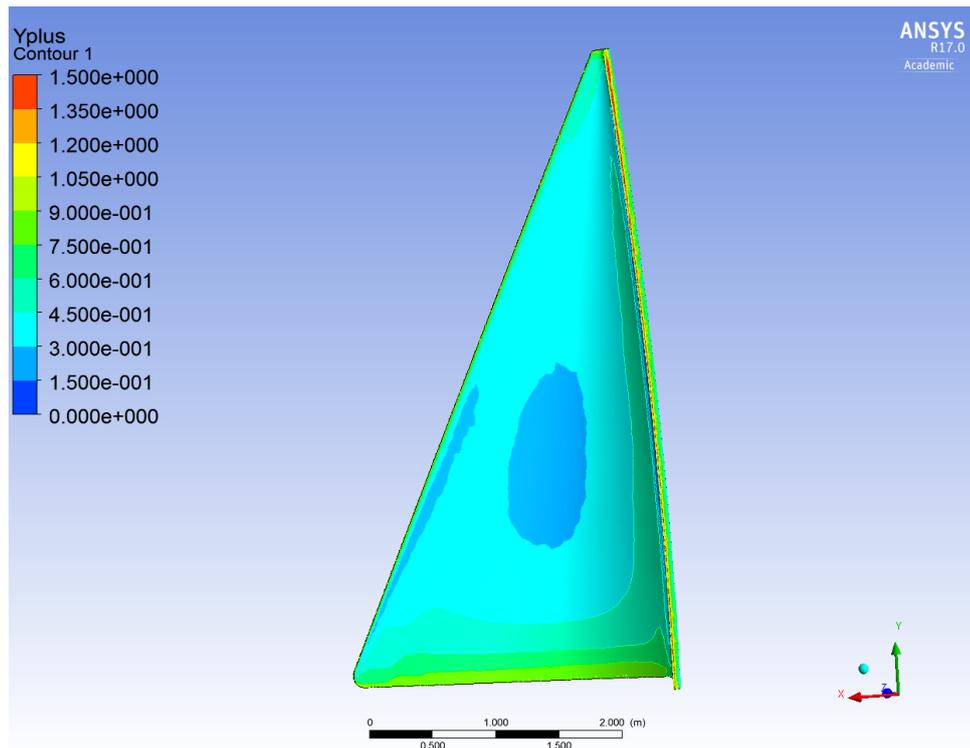


Abbildung 3.5.: y^+ -Werte des Segels L2B2 mit Mast für ein Anstellwinkel von 40°

Betrachten wir die Konturen der y_p^+ -Werte auf der Segelgeometrie, stellen wir fest, dass die Werte für y_p^+ im Zentrum im Bereich von 0,3 liegen und zum Rand des Segels ansteigen und einen Wert von bis zu 0,9 erreichen (siehe Abbildung 3.5). Am Mast erkennen wir einen dünnen Streifen, in dem der y_p^+ -Wert ungefähr 1,5 erreicht. Werte, die unterhalb von 1 liegen, sind unproblematisch, sie führen zu keiner Verbesserung der Ergebnisse und erhöhen nur den numerischen Aufwand. Eine Neuvernetzung und erneute Rechnung führt zu einem höheren zeitlichen Aufwand als die Nutzung der feineren Inflationsschichten. Der Bereich am Mast ist ebenfalls unproblematisch, eine Abweichung in diesem Ausmaß ist annehmbar. Daher wird weiterhin mit einer ersten Inflationsschichtdicke von $0,065\text{ mm}$ gerechnet.

3.6. Auswahl des RANS-Modell

Die Auswahl des Turbulenzmodells lässt sich anhand der aufgelösten Strömungsstrukturen treffen. Für die Untersuchung eines Segels, das mit einem Anstellwinkel von ungefähr $\alpha_q = 0^\circ$ angeströmt wird, benötigt man ein Modell, das Staupunkte auflösen kann. Da die turbulente Grenzschicht einen großen Einfluss auf die Widerstandsbeiwerte umströmter Körper hat, muss das gewählte Modell eine gute und genaue Auflösung der Grenzschicht ermöglichen. Bei der Auswahl eines geeigneten Modells wurde sich auf die RANS-Turbulenzmodelle (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) beschränkt, da sie durch ihre Vereinfachungen keine großen Rechenressourcen benötigen [7, S. 137].

Sie basieren auf der Reynolds-gemittelten Kontinuitäts- und Navier-Stokes Gleichung. Sie berechnen die mittleren Strömungs- und Turbulenzgrößen von stationären Strömungen. Eine Vereinfachung der Modelle ist die Annahme, dass es sich um eine inkompressible, isotherme Strömung handelt. Diese Annahme führt bei Mach-Zahlen $\ll 1$ zu vernachlässigbaren Fehlern [5, S. 35 ff].

Durch diese Annahme vereinfachen sich die Differenzialgleichungen für das Strömungsfeld \underline{u} und das Druckfeld p [7, S. 138 ff].

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (3.8)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\underline{u}\underline{u}) \right] = -\nabla p + \eta \nabla \cdot (\nabla \underline{u} + \rho \underline{g}) \quad (3.9)$$

Werden die Feldgrößen in den Reynolds-Mittelwert $\underline{\bar{u}}$, \bar{p} und die turbulente Fluktuation \underline{u}' , p' zerlegt und in die Formeln (3.8) und (3.9) eingesetzt, ergeben sich nach nochmaliger Mittelung die Reynolds-gemittelte Kontinuitäts- und Navier-Stokes-Gleichungen:

$$\nabla \cdot \underline{\bar{u}} = 0 \quad (3.10)$$

$$\rho \nabla \cdot (\underline{\bar{u}}\underline{\bar{u}} + \overline{u'u'}) = -\nabla \bar{p} + \eta \nabla \cdot (2\nabla \underline{\bar{S}}) \quad (3.11)$$

Der in der Gleichung (3.11) vorkommende Tensor der mittleren Deformationsgeschwindigkeiten $\underline{\bar{S}}_{ij}$ ist definiert durch:

$$\underline{\bar{S}} = \frac{1}{2} [\nabla \underline{\bar{u}} + (\nabla \underline{\bar{u}})^T] \quad (3.12)$$

Diese Gleichungen sind die Grundlage für die RANS-Turbulenzmodellierung.

3.6.1. Standard-k- ε -Turbulenzmodell

Das k- ε -Modell nach Launder und Spalding [3] ist dazu geeignet, einfache Strömungen wie zum Beispiel Rohrströmungen zu beschreiben. Es ist weniger dazu geeignet, Strömungen mit Staupunkten und gekrümmten Stromlinien zu berechnen [7, S. 142]. Durch die schlechten Ergebnisse beim Lösen von Strömungen mit Staupunkten ist dieses Modell nicht dazu geeignet, ein Segel, das voll im Wind steht, zu berechnen.

3.6.2. Realizable-k- ε -Turbulenzmodell

Im Gegensatz zum Standard-k- ε -Turbulenzmodell, in dem Parameter als konstant angesehen werden, werden in dem von Shih [9] vorgeschlagenen Modell einige der Modellparameter durch funktionale Zusammenhänge bestimmt. Die wesentliche Besonderheit des RLZ-k- ε -Modells ist die Beschreibung des Parameters C_μ durch einen funktionalen Zusammenhang aus \overline{S}_{ij} und der mittleren Rotation $\overline{\Omega}_{ij}$. Dadurch lassen sich Staupunkte besser berechnen. Jedoch ist die Abbildung von wandnahen Bereichen ein Problem dieses Modells, sodass es Schwierigkeiten bei der Berechnung der Widerstandsbeiwerte des Segels hat [7, S. 144 f]. Dieses Modell ist somit für die Lösung der Aufgabe auch nicht geeignet.

3.6.3. Wilcox-k- ω -Turbulenzmodell

Das Wilcox-k- ω -Turbulenzmodell beschreibt die mittlere Turbulenz in der Nähe von festen Wänden deutlich besser als die herkömmlichen k- ε -Modelle. Die freien Außenströmungen werden dagegen deutlich schlechter abgebildet [7, S. 145 f]. Die freien Strömungen wirken sich auf die Umströmung des Segels aus und sollten genau beschrieben werden.

3.6.4. Menter-SST-k- ω -Turbulenzmodell

Das Menter-SST-k- ω -Turbulenzmodell gleicht die Schwäche des Wilcox-k- ω -Turbulenzmodell dadurch aus, dass zwei Ansätze verwendet werden. Im wandnahen Bereich werden die Gleichungen eines k- ω Modells verwendet und die freie Strömung wird durch die Gleichungen der k- ε Modelle beschrieben. Durch die Kombination der beiden Ansätze werden ihre jeweiligen Vorteile genutzt und die Nachteile kompensiert [7, S. 146]. Dadurch ist das Menter-SST-k- ω -Turbulenzmodell gut geeignet, um die Umströmung des Segels zu beschreiben.

3.7. Randbedingungen

Die Definition von Bedingungen auf den Rändern des Berechnungsvolumens sorgt dafür, dass die Bilanzgleichungen eindeutig lösbar sind. Dazu müssen die Ränder klar definiert sein und die Randbedingungen physikalisch und mathematisch sinnvoll spezifiziert werden.

Für das Berechnungsvolumen gibt es sieben Flächen, auf denen Bedingung gesetzt werden müssen:

- der Halbkreis am linken Ende und
- die Ebene am rechten Ende,
- die beiden Seiten und
- die Decke und
- der Boden des Gebietes
- sowie das eigentliche Segel

Um verschiedene Anstellwinkel berechnen zu können, müsste man die Segelgeometrie im Berechnungsvolumen drehen und neu vernetzen. Da dies jedoch durch die hohe Anzahl der Rechnungen mit erheblichem Aufwand verbunden ist, wurde nicht das Segel gedreht, sondern die Anströmungsrichtung des Fluids um das Segel gedreht.

Für die Randbedingungen in Fluent gibt es verschiedene Typen [1, S. 7-56 ff]: Das Inlet (Einströmrand) und das Outlet (Ausströmrand), über die die Strömung das Volumen betritt und verlässt, Wandrandbedingungen, durch die das Fluid nicht durchströmen kann, sowie periodische Randbedingungen, die zwei Flächen mit einander verknüpfen.

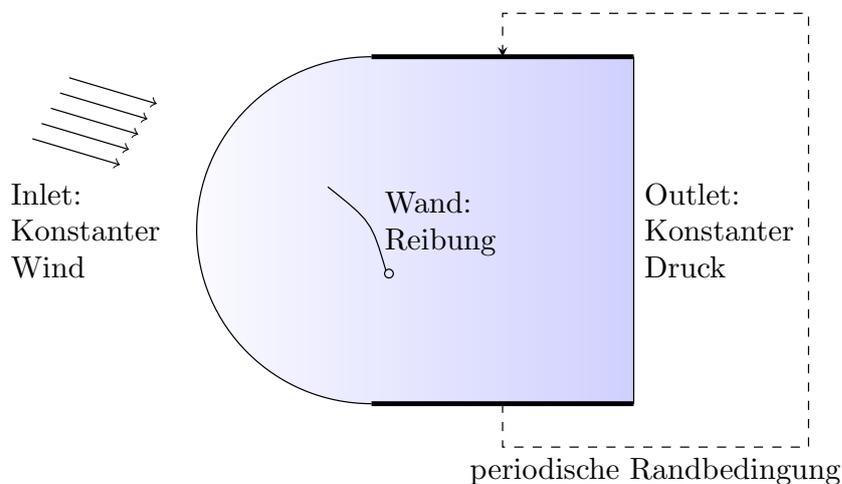


Abbildung 3.6.: Bedingungen auf den Rändern des Berechnungsgebietes

Wie in der Abbildung 3.6 ersichtlich, wurde auf dem Halbkreis ein Velocity Inlet gesetzt. Es beschreibt die Eingangsströmung. Mit ihm wird die Richtung und der Betrag der Geschwindigkeit der Strömung festgelegt. Da reale Luftströmungen immer einen gewissen turbulenten Anteil haben, wurde die Intensität und die Länge von Luftwirbeln eingestellt. Die Intensität beschreibt das Verhältnis zwischen dem quadratischen Mittel der turbulenten Geschwindigkeitsschwankung in einem Wirbel und der Geschwindigkeit der Anströmung. Die Länge beschreibt die Größe der Turbulenzen. Für diese Berechnung wurde eine Intensität von 5% und eine Länge von 0.05 m benutzt⁵. Es handelt sich hierbei um eine mittlere Turbulenz gemäß der Fluent Dokumentation [1, S. 7-58].

Das Outlet wurde auf der gegenüberliegenden Seite gesetzt. Da die Kontinuitätsgleichung nicht verletzt werden darf, muss das Outlet als ein Pressure Outlet definiert werden. Da es sich um eine Strömung in einem unendlichen Medium handelt, gibt es keinen Druckunterschied zwischen Berechnungsgebiet und der Umgebung, daher wird kein Druckpotential eingestellt. Für die Intensität der Turbulenz des Outlets wird ein Wert von 5% verwendet und für die Länge 0,1 m. Diese Werte beschreiben ungefähr das Fluid beim Verlassen des Berechnungsraumes und sind ebenfalls geschätzt.

Für die Seiten wurden periodische Randbedingungen benutzt. Mit ihnen wurden die beiden Seiten miteinander verbunden. Wenn die Strömung auf der einen Seite das Berechnungsgebiet verlässt, wird sie auf der anderen Seite wieder eingebracht. Dadurch lässt sich das Drehen der Strömungsrichtung korrekt umsetzen.

Die Decke und der Boden wurden als Wand angesehen, an denen das Fluid nicht haftet.

Das Segel wird auch als eine Wand betrachtet, jedoch haftet die Strömung an der Wand. Zusätzlich wird auf dem Segel eine Rauheit von 25 μm gesetzt. Dieser Wert ist eine Schätzung auf der Basis der Untersuchung von Sölar [11]. Für die Rauheit gilt, dass sie nicht größer als die Hälfte der ersten Inflationsschicht sein darf [1, S. 7-127 ff]. Mit einer Dicke der ersten Inflationsschicht von 65 μm ist diese Bedingung erfüllt.

⁵Geschätzt aus Erfahrungswerten von Prof. Dr.-Ing. Wulf

3.8. Auswahl der Lösungsmethoden

Für die Lösung der Differenzialgleichungen werden verschiedene Lösungsmethoden angeboten [1, S. 26-6 ff]:

Die Lösungsmethode First-Order Upwind bietet gute Konvergenzeigenschaften. Bei Strömungen, die in Gitter-Richtung liegen, ist die Genauigkeit der Lösung akzeptabel. Bei der First-Order Upwind Methode werden die Werte innerhalb der Zellen gemittelt, so dass ein Polynom der ersten Ordnung verwendet werden kann.

Bei einem Tetraeder-vernetzten Block liegt die Richtung jedoch nicht in Gitter-Richtung. Da auch die Strömungsrichtung variiert, bietet in diesem Fall Second-Order Upwind vermutlich die besseren Ergebnisse. In diesem Verfahren wird in den Zellen ein Polynom höherer Ordnung verwendet. Daher wurde zunächst Second-Order Upwind als Lösungsmethode gewählt.

Bei der Überprüfung des CFD-Modells stellte sich heraus, dass die Lösungsmethode Second-Order Upwind sich nicht für die Lösung dieses Modells eignet. Daher wurde in Kapitel 4.1 eine neue Lösungsmethode ausgewählt.

4. Simulation und Auswertung

4.1. Vorversuch

Um die Einstellungen der Simulation zu testen, wurde an dem Modell L1B1 ohne Mast eine Voruntersuchung durchgeführt. Der Queranstellwinkel α_q wurde auf 40° und die Strömungsgeschwindigkeit U_∞ auf $5 \frac{m}{s}$ gesetzt. Als Konvergenzkriterium für die Residuen der Simulation wurde ein aus Erfahrungswerten abgeleitetes Kriterium von $5 * 10^{-5}$ gewählt, da normalerweise Fehler in der Approximation der Geometrie und Fehler in den Randbedingungen größer sind als dieser Wert. Innerhalb von 5000 Iterationen kam es zu keiner Konvergenz in den Widerstandsbeiwerten. Wenn man die Residuen der Simulation anschaut (siehe Abbildung 4.1), erkennt man in allen Residuen einen ähnlichen Verlauf. Sie erreichen nach ca. 2500 Iterationen ein Plateau, schwingen jedoch mit gleichbleibender Amplitude. Eine mögliche Ursache für diese Schwingung könnte die Verwendung des quadratischen Ansatzes in den Lösungsmethoden sein. Aus diesem Grund wurden drei weitere Testsimulationen mit demselben Queranstellwinkel und derselben Segelgeometrie durchgeführt.

Dazu wurde die Lösungsmethode für die turbulente kinetische Energie von Second-Order Upwind auf First-Order Upwind reduziert. Für die Lösung des Impulses wurden die drei Lösungsansätze Second-Order Upwind (Abbildung A.1), Power-Law (Abbildung A.2) und First-Order Upwind (Abbildung A.3) ausgewählt. Diese Lösungsmethoden führten auch zu Schwingungen in den Residuen und den Widerstandsbeiwerten. Daher ist davon auszugehen, dass die hochrangigen Lösungsmethoden zumindest nicht alleine für die Schwingung verantwortlich sind. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die Umströmung eines Segels ein instationärer Prozess ist, der in eine stationäre Betrachtung gezwungen wird. Um einen solchen Effekt zu umgehen, müsste die Simulation instationär durchgeführt werden. In Anbetracht des sehr hohen Rechenaufwandes einer solchen Rechnung wurde ein anderer Weg gewählt. Bei der Betrachtung der Widerstandsbeiwerte der Rechnungen erkennt man ebenfalls eine Schwingung in den Beiwerten (Abbildung 4.2 bis 4.5). Um die Ergebnisse der Simulationen verwendbar zu machen, wurden die Widerstandsbeiwerte über die letzten Schwingungen gemittelt und die Lösungsmethode mit der geringsten Amplitude verwendet (siehe Abbildung 4.4).

Als Ergebnis dieser Überlegungen wurde für die weiteren Berechnungen die Lösungsmethode Power-Law gewählt, ein Mittelweg zwischen Second-Order Upwind und First-Order Upwind. Alle

weiteren Simulationen wurden daher mit dem Power-Law durchgeführt. Es können jedoch keine Aussagen darüber getroffen werden, ob eine höherrangige Lösungsmethode realitätsnähere Ergebnisse liefern würde.

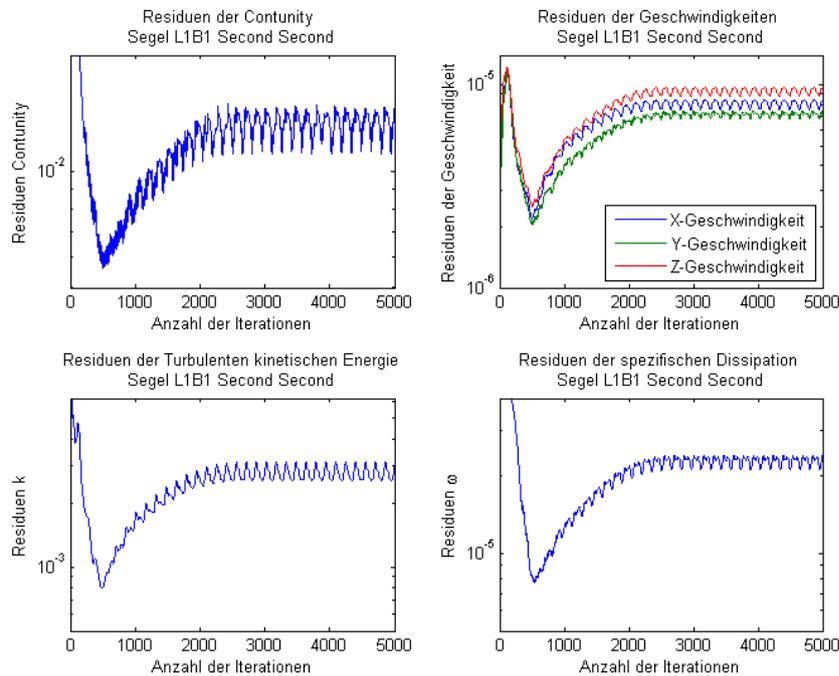


Abbildung 4.1.: Residuen der Simulation mit Second-Order Upwind Second-Order Upwind

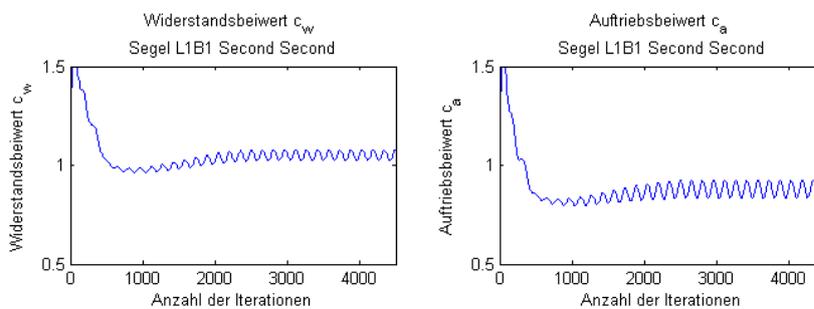


Abbildung 4.2.: Beiwerte C_w und C_a mit Second Second

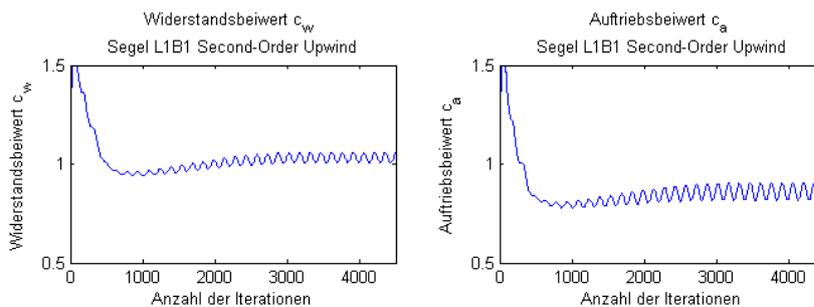
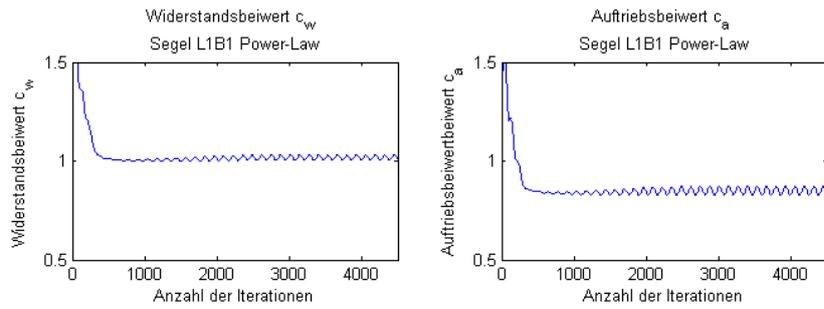
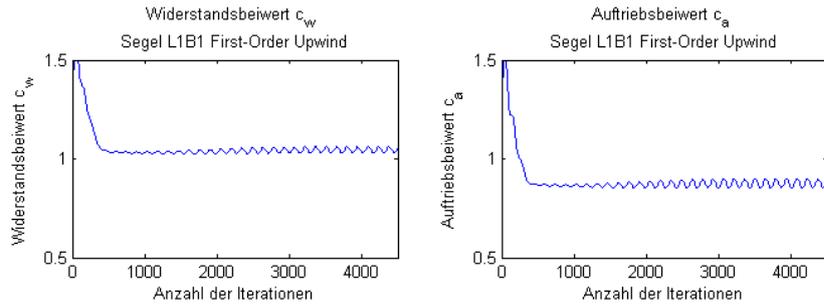


Abbildung 4.3.: Beiwerte C_w und C_a mit Second-Order Upwind

Abbildung 4.4.: Beiwerte c_w und c_a mit Power-LawAbbildung 4.5.: Beiwerte c_w und c_a mit First-Order Upwind

4.2. Validierung der Modellierung

Um die Gültigkeit der Ergebnisse abzuschätzen, wurden die Beiwerte mit Polardiagrammen anderer Segel verglichen [5, S. 109 Abbildung 5.23]. Die Polardiagramme zeigen die aerodynamischen Eigenschaften von Großsegeln mit einem Seitenverhältnis von sechs bzw. drei. Die untersuchte Segelgeometrie besitzt ein Seitenverhältnis von ungefähr zwei. Zudem haben die Großsegel nur eine Wölbungstiefe von 13,5% im Gegensatz zu einer Wölbungstiefe von 16%. Außerdem wurden die Segel vom Achterliek her angeströmt.

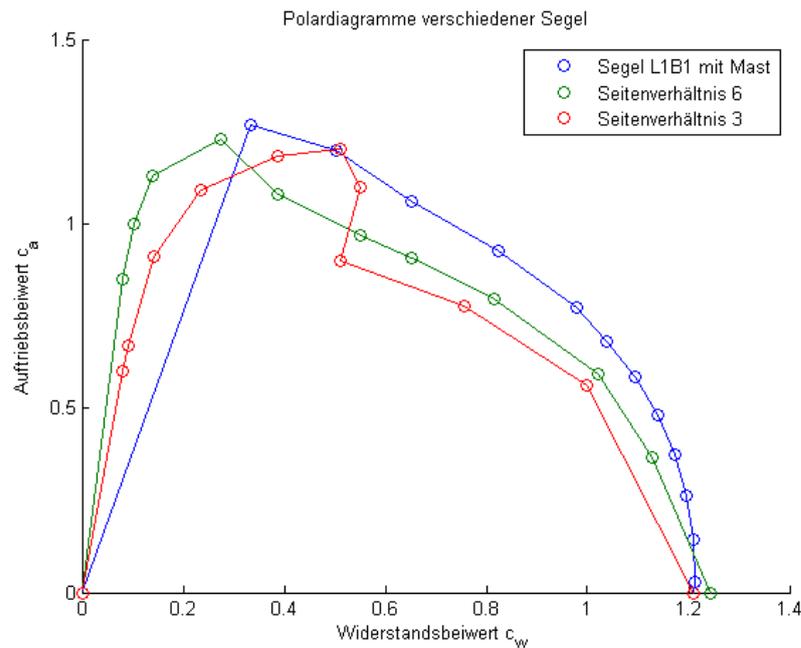


Abbildung 4.6.: Polardiagramme verschiedener Segel (in Anlehnung an [5, S. 109 Abbildung 5.23])

Vergleicht man die einzelnen Kurven, stellt man fest, dass die Polardiagramme bei einem ähnlichen c_w -Wert die X-Achse schneiden (siehe Abbildung 4.6). Jedoch fallen die c_w -Werte des Segels L1B1 mit Mast weniger stark ab, was an der starren Segelgeometrie oder den unterschiedlichen Wölbungstiefen liegen könnte. Trotzdem zeigen die Kurven einen ähnlichen Verlauf und ähnliche Maximal-Werte. Man sieht einen Wendepunkt vor dem Maximum im c_a -Wert. Im Allgemeinen kann man die Polardiagramme als ähnlich bezeichnen, sodass man annehmen kann, dass die Ergebnisse für eine Auswertung verwendbar sind.

4.3. Vorgehen bei der Segeluntersuchung

Da im Vorfeld der Simulationen nicht bekannt war, ob und in welchem Maß Effekte zur Vortriebskraftsteigerung auftreten, wurden zwei unterschiedliche Segelgeometrien untersucht. Auch war

nicht bekannt, welchen Einfluss der Mast haben kann. Deshalb wurden die Segelgeometrien jeweils mit und ohne Mast simuliert. Insgesamt ergeben sich vier Szenarien:

1. L1B1oM ist eine Segelgeometrie mit lockerem Unterliekstrecker und Baumniederholer und ohne Mast mit einer Mastneigung von 1%.
2. L2B2oM hat einen angezogenen Unterliekstrecker und Baumniederholer ohne Mast und mit einer Neigung von 6%.
3. L1B1mM und
4. L2B2mM sind die selben Geometrien wie L1B1oM und L2B2oM nur mit eingefügtem Mast.

Als Variation in den Simulationen wurde der Queranstellwinkel α_q gewählt: im Winkelbereich von 0° bis 40° in 5° Schritten und von 40° bis 80° in 10° Schritten.

Es ist davon auszugehen, dass die starre Segelgeometrie bei kleinen Winkeln eine gute Näherung darstellt, denn diese Anströmung entspricht der aufgenommenen Segelform. Bei größeren α_q jedoch wird die aufgenommene Segelgeometrie von der Wirklichkeit abweichen, denn es ist unrealistisch anzunehmen, dass bei einer extremen Leeanströmung das Segel in der gleichen Art und Weise aufwölbt wie bei orthogonaler Anströmung. Dennoch wurden die größeren Werte von α_q hinzugenommen, um Vergleichswerte zu haben, die die Plausibilität der Messungen belegen können.

Die Ergebnisse der Segeluntersuchungen sind die c_w und c_a Widerstandsbeiwerte der Segel. Aus diesen wurde mit den Formeln (2.6) und (2.7) die Widerstandskraft und die Auftriebskraft errechnet und mit der Formel (2.2) die Vortriebskraft für verschiedene Kurse berechnet.

Um die Abhängigkeit der Vortriebskraftsteigerung vom gewähltem Vorwindkurs einschätzen zu können, wurden die Ergebnisse der Segeluntersuchungen auf zwei markanten Vorwindkursen ausgewertet: dem reinen Vorwindkurs, der einen Winkel von 180° zwischen dem scheinbaren Wind und der Bewegungsrichtung besitzt, und dem von Frank Bethwaite [2] vorgeschlagenen Kurs bei einem Winkel von 175° [2, S. 125].

Um die Änderungen bei verschiedenen Kursen zu verdeutlichen, wurden die Kurse 180° bis 170° in einer Grafik dargestellt.

Der Vergleich von verschiedenen Segelkursen ist problematisch, da ein gleiches Ziel auf unterschiedlichen Wegen erreicht wird. Auf jedem Kurs werden somit unterschiedlich lange Strecken zu einem Ziel zurückgelegt. Um eine Aussage über die Geschwindigkeit, in der ein Ziel erreicht werden kann, treffen zu können, werden VMG-Analysen (Velocity Made Good) durchgeführt [10, S. 270 f]. In einer solchen VMG-Analyse werden die Geschwindigkeiten von verschiedenen Kursen in ihre Anteile direkt zum Zielpunkt zerlegt. So können Aussagen über die Eignung der Kurse

für ein bestimmtes Ziel getroffen werden. Wie in der Einleitung erläutert, braucht eine VMG-Analyse nicht durchgeführt zu werden, da lediglich überprüft wird, ob auf einem bestimmten Kurs ein Vortriebskraftvorteil erzielt werden kann, wenn eine Leeanströmung eingestellt wird.

4.4. Auswertung L1B1 ohne Mast

4.4.1. Kurs 180°

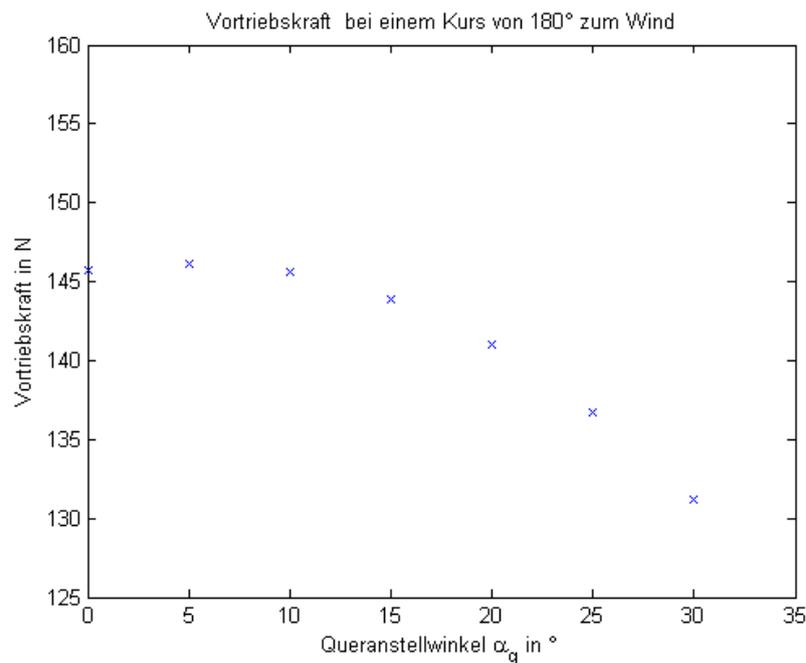


Abbildung 4.7.: Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind

Betrachtet man den Verlauf der Vortriebskraft in Abbildung 4.7, erkennt man zunächst einen leichten Anstieg der Kraft und darauf folgend das schnelle Abfallen der Vortriebskraft. Das Abfallen der Vortriebskraft ist nicht weiter verwunderlich, da auf einem reinen Vorwindkurs die Widerstandskraft in Richtung der Fahrtrichtung und die Auftriebskraft senkrecht zur Fahrtrichtung des Bootes wirken. Dadurch kann die Auftriebskraft keinen Einfluss auf die Vortriebskraft haben. Der Verlauf der Vortriebskraft hängt folglich nur von der Widerstandskraft des Segels ab. Dreht man ein Objekt aus einer direkten Anströmung heraus, fällt der Widerstandsbeiwert ab. Bei gewölbten Objekten erreicht man den höchsten Widerstandsbeiwert, wenn die Strömung direkt orthogonal auf den Punkt mit der größten Wölbung trifft. Dieser liegt beim Segel nicht in der Mitte, sondern ist leicht zum Mast versetzt. Dadurch erhöht sich der Widerstandsbeiwert leicht, wenn man eine Leeanströmung einstellt. Dieser Effekt führt dazu, dass die Vortriebskraft leicht ansteigt, bevor sie abfällt.

Zu Beginn beträgt die Vortriebskraft ca. 145,7 N. Sie erreicht ihr Maximum bei ca. 5° und steigt dort auf ca. 146,1 N an. Dies ist eine Steigerung von etwa 0,3%.

4.4.2. Kurs 175°

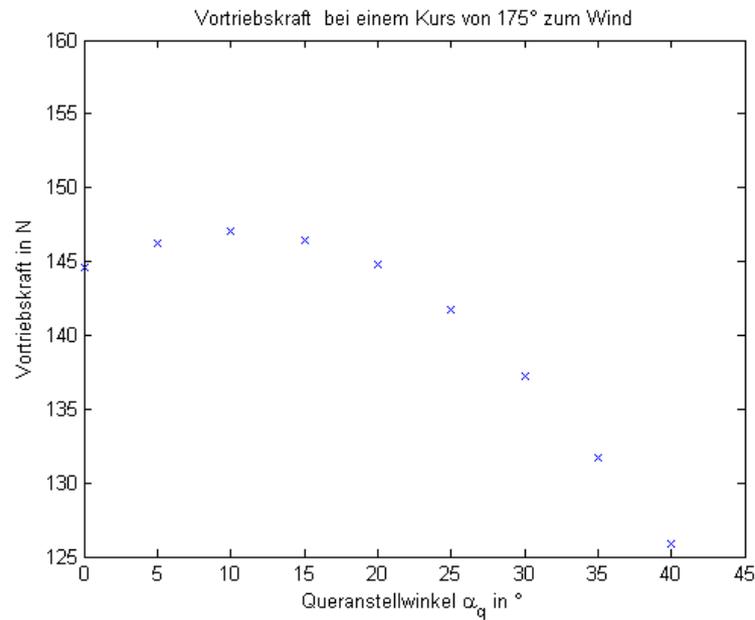


Abbildung 4.8.: Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind.

Bei einem Kurs von 175° setzt sich die Vortriebskraft aus der Widerstandskraft und einem Teil der Auftriebskraft zusammen. Betrachten wir den Verlauf der Vortriebskraft, zeigt sich ein deutliches Maximum bei einem Anstellwinkel von ca. 10° (siehe Abbildung 4.8). Dieses Maximum liegt bei 147,0 N. Dies ist eine Steigerung von ca. 1,6% gegenüber der Vortriebskraft von 144,6 N, die bei einem Queranstellwinkel von 0° entsteht.

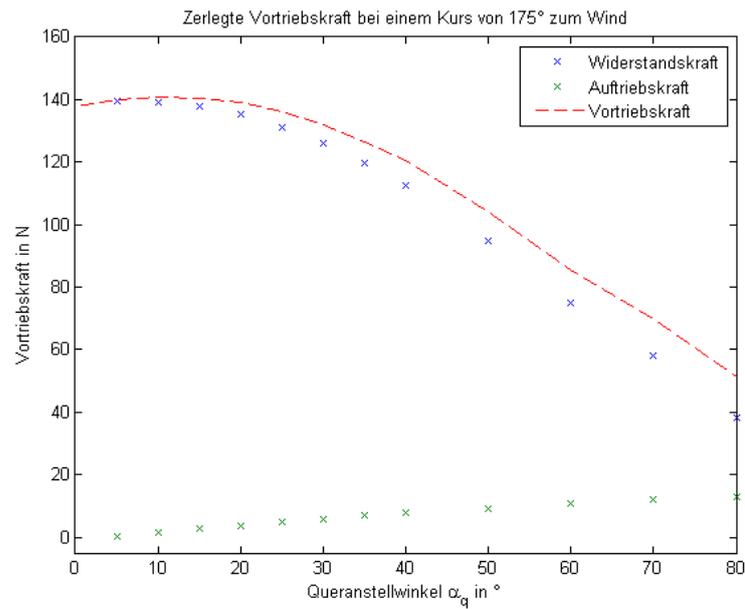


Abbildung 4.9.: Anteile Widerstandskraft und Auftriebskraft der Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind

Spaltet man die Vortriebskraft wieder in die Widerstandskraft und die Auftriebskraft auf (siehe Abbildung 4.9), erkennt man, dass die Steigerung der Vortriebskraft dadurch entsteht, dass die Widerstandskraft in diesem Bereich einen annähernd horizontalen Verlauf hat und die Auftriebskraft eine zusätzliche Steigerung der Vortriebskraft bewirkt.

4.4.3. Darstellung der Kurse 180° bis 170°

Vergleicht man die Vortriebskräfte auf den Kursen 180° und 175° , erkennt man, dass auf einem 175° Kurs die höhere maximale Vortriebskraft herrscht. Man kann den Schluss ziehen, dass die maximale Vortriebskraft immer größer wird, wenn man weiter vom reinen Vorwindkurs abweicht. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurden die Kurse 180° bis 170° in der Abbildung 4.10 zusammengefasst.

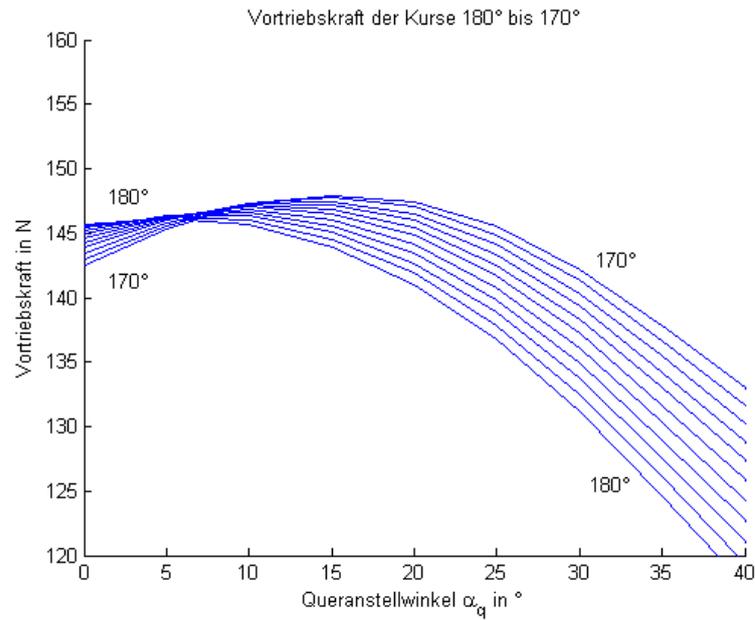


Abbildung 4.10.: Vergleich der Vortriebskräfte der Kurse 180° bis 170°

Man erkennt, dass bei steigender Abweichung von dem 180° Kurs die Kraft bei einem Queranstellwinkel $\alpha_q = 0$ abfällt, das Maximum jedoch ansteigt und bei einem höheren Queranstellwinkel liegt. Durch die steigende Abweichung vom reinen Vorwindkurs kann die Auftriebskraft besser verwendet werden. Bei den anderen Segelformen erkennt man eine ähnliche Abhängigkeit der Vortriebskraft vom Kurs (siehe Abbildungen [A.4](#), [A.5](#), [A.6](#)).

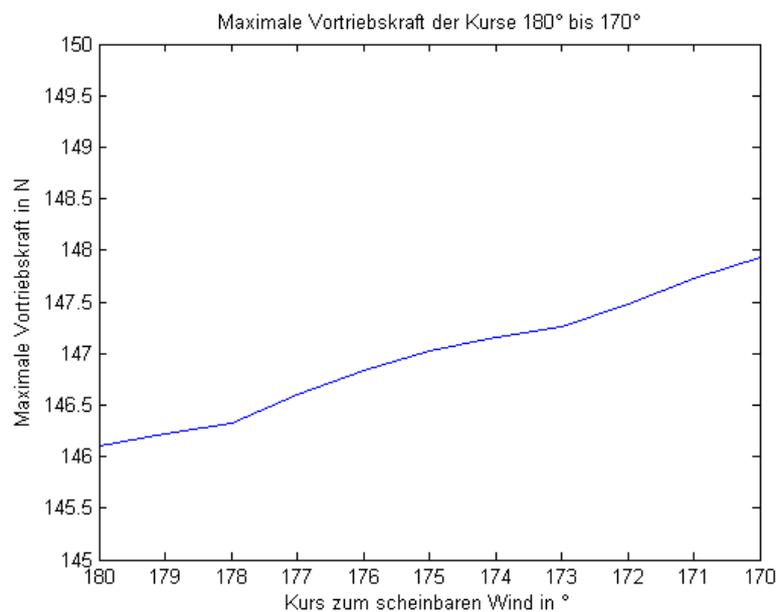


Abbildung 4.11.: Vergleich der Vortriebskräfte der Kurse 180° bis 170°

Wie in der Abbildung [4.11](#) erkennbar, steigt die Vortriebskraft gleichmäßig an, wenn sich die Abweichung vom reinen Vorwindkurs erhöht. Dieses Verhalten zeigt sich auch bei den anderen Segelformen (siehe Abbildungen [A.7](#), [A.8](#), [A.9](#)).

4.4.4. Kurs 135°

Zur Verifizierung der Auswertungen wurden die Ergebnisse der Simulation an einem Raumschotkurs überprüft. Als Ergebnis sieht man in [Abbildung 4.12](#) ein Maximum bei einem Anstellwinkel von 45°. Das Maximum hat einen Wert von 152,8 N. Die maximale Vortriebskraft auf einem Vorwindkurs beträgt ca. 147,9 N. Wir erkennen eine weit größere Vortriebskraft als auf einem Vorwindkurs. Dies deckt sich mit der Aussage, dass Raumschotkurse deutlich schneller sind als Vorwindkurse. Die beiden Kurse lassen sich jedoch nicht direkt vergleichen, da auf dem Raumschotkurs im Vergleich zum Vorwindkurs bei gleichem wahren Wind und gleicher Bootsgeschwindigkeit ein deutlich größerer scheinbarer Wind wirkt. Zwar lässt sich dadurch keine Aussage über die Bootsgeschwindigkeit treffen, aber man erkennt, dass bei gleichem scheinbarem Wind die Kraft auf Raumschotkursen größer ist als auf Vorwindkursen.

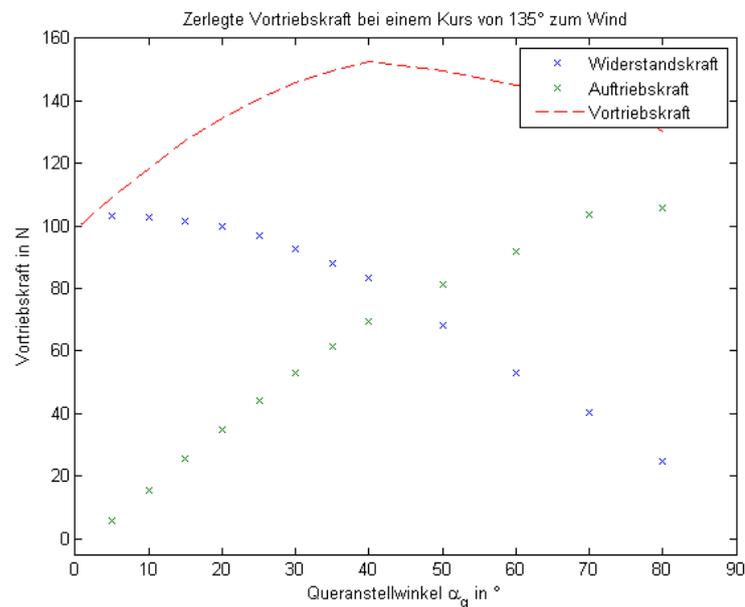


Abbildung 4.12.: Anteile Widerstandskraft und Auftriebskraft der Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 135° zum scheinbaren Wind

Eine weitere Aussage ist, dass dieser Kurs sehr ruhig gesegelt wird. Dies spricht dafür, dass die Widerstands- und Auftriebskraft komplett in die Vortriebskraft eingehen. Um das auf einem 135° Kurs zu erreichen, müssen die beiden Kräfte ungefähr gleich groß sein. Betrachtet man die aufgespaltene Vortriebskraft, erkennt man, dass die Kurven der Auftriebskraft und Widerstandskraft sich ungefähr bei einem Queranstellwinkel von 45° schneiden (siehe [Abbildung 4.12](#)). Da sich die Ergebnisse mit der Aussage decken, dass Raumschotkurse schneller sind Vorwindkurse, kann man die Ergebnisse als plausibel bezeichnen.

4.5. Auswertung L2B2 ohne Mast

4.5.1. Kurs 180°

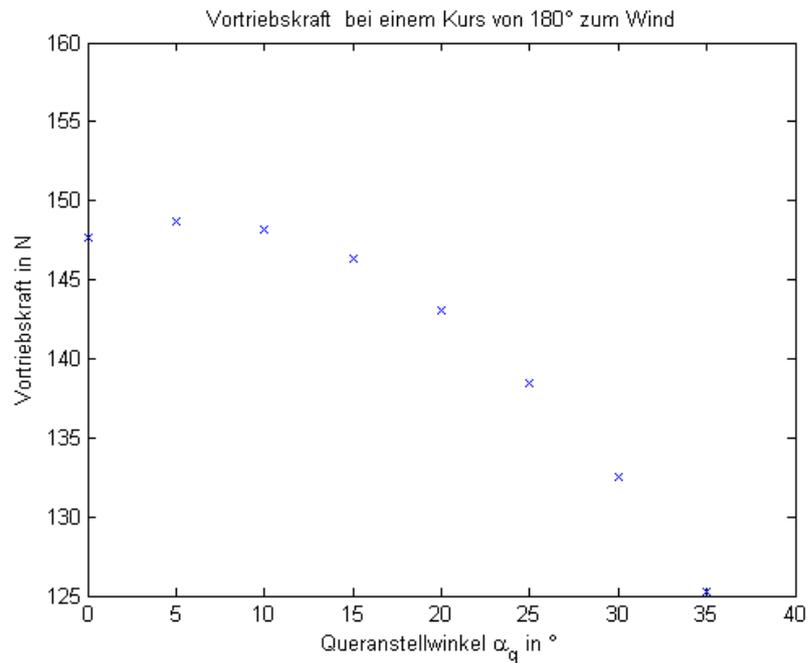


Abbildung 4.13.: Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkel α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind

Die Abbildung 4.13 zeigt den Kräfteverlauf des Segels L2B2 ohne Mast. Der Verlauf zeigt einen ähnlichen Anstieg wie bei dem Segel L1B1 ohne Mast. Bei einem Queranstellwinkel von ca. 5° befindet sich ein Maximum. Die Vortriebskraft bei einem Queranstellwinkel $\alpha_q = 0$ beträgt ca. 147,7 N und im Maximum ca. 148,7 N. Das ist eine Steigerung von ca. 0,67%.

Es ist bemerkenswert, dass bei einem straffer gespannten Segel der prozentuale Effekt der Leeanströmung signifikant größer ist.

4.5.2. Kurs 175°

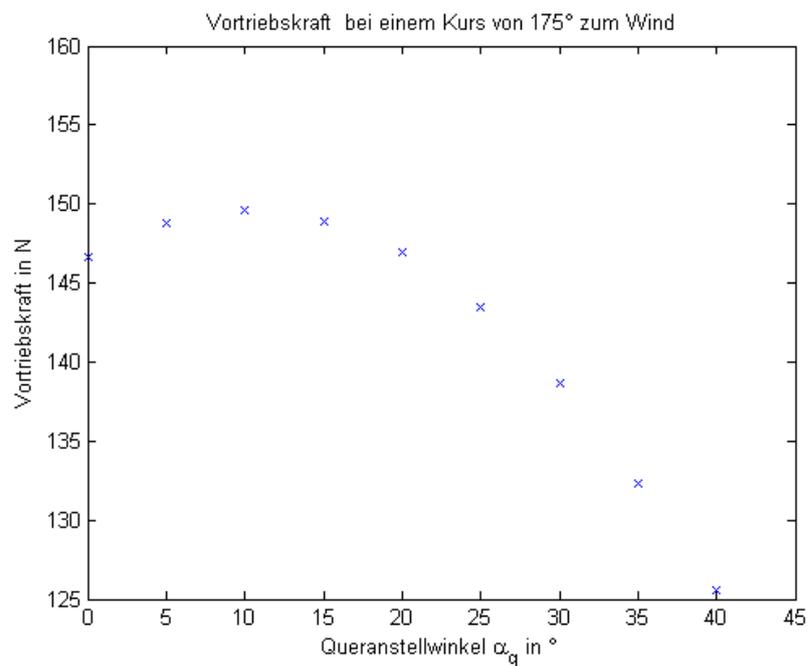


Abbildung 4.14.: Vortriebskraft bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind

Wie in der Abbildung 4.14 zu erkennen ist, steigt der Verlauf der Vortriebskraft von ca. 146,7 N bei 0° steigt gleichmäßig an, bis er bei ca 10° sein Maximum von 149,6 N erreicht. Danach fällt die Vortriebskraft schnell ab. Das Maximum zeigt eine Steigerung von ca. 1,6%.

Der im Kapitel 4.5.1 festgestellte Effekt, dass durch erhöhte Straffung des Segels eine größere prozentuale Vortriebskraftsteigerung durch die Leeanströmung erzielt werden kann, tritt auf diesem Kurs nicht auf. Die prozentuale Erhöhung vom Segel L2B2oM entspricht der vom Segel L1B1oM.

4.6. Vergleich der Segelgeometrien L1B1oM und L2B2oM

Da die beiden Segelgeometrien L1B1oM und L2B2oM wie in Tabelle 3.2 dargestellt unterschiedliche Oberflächen besitzen, kann der Vergleich nicht anhand der resultierenden Vortriebskraft erfolgen. Eine größere angeströmte Fläche erzeugt eine größere Vortriebskraft (siehe Formel 2.6). Deshalb wurde ein Gesamtwiderstandsbeiwert c_g erstellt. Er wirkt in Richtung der Bootsbewegung und ist ähnlich zu den beiden Widerstandsbeiwert c_w und Auftriebsbeiwert c_a definiert:

$$c_g = \frac{2 \cdot F_V}{\rho_L \cdot A \cdot U_\infty^2} \quad (4.1)$$

Vergleicht man die beiden Segel auf einem reinen Vorwindkurs miteinander (siehe Abbildung 4.15), stellt man fest, dass das Segel L2B2oM in dem für das Segeln mit Leeanströmung relevanten Bereich von 0° bis 20° einen höheren Gesamtwiderstandsbeiwert hat. Da das Segel L2B2oM zusätzlich zu seiner größeren Fläche auch einen größeren Gesamtwiderstandsbeiwert besitzt, wird die höhere Vortriebskraft nicht nur durch die größere Segelfläche sondern auch durch eine günstigere Segelform erzeugt. Für den 175° Kurs gelten die gleichen Ergebnisse.

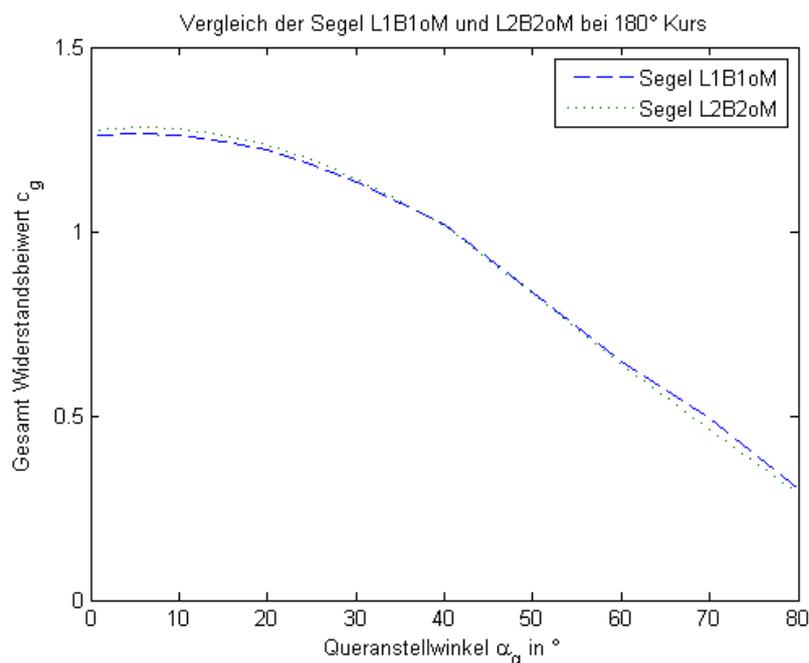


Abbildung 4.15.: Vergleich des Gesamtwiderstandsbeiwerts der Segel L1B1oM und L2B2oM auf einem reinen Vorwindkurs

4.7. Auswertung L1B1 mit Mast

4.7.1. Kurs 180 °

Wie auch bei dem Segel ohne Mast kann ein Maximum der Vortriebskraft bei ca. 5° erkannt werden. Durch die Leeanströmung erhöht sich die Vortriebskraft von 146,1 N auf 147,1 N (siehe Abbildung [A.10](#)).

Die relative Steigerung der Vortriebskraft beträgt in diesem Fall ca. 0,68%. Entsprechend der Argumentation aus Kapitel [4.4.1](#) könnte der verstärkte Effekt auf die Hinzunahme der Mastes und die damit einhergehende Erhöhung der Wölbung zurückzuführen sein.

4.7.2. Kurs 175 °

Auch bei diesem Kurs kann ein Wachstum der Vortriebskraft durch Einstellen einer Leeanströmung erreicht werden (siehe Abbildung [A.11](#)). Die Vortriebskraft beginnt bei 144,6 N und endet bei einem Maximum von 147,7 N bei ca. 10°. Dies ist eine Steigerung um ca. 2%.

4.8. Auswertung L2B2 mit Mast

4.8.1. Kurs 180 °

Das Segel L2B2 mit Mast zeigt ebenfalls ein Maximum der Vortriebskraft bei ca. 5° (siehe Abbildung [A.12](#)). Die Erhöhung von ca. 147,5 N auf ca. 148,7 N beträgt ca. 0,8%.

4.8.2. Kurs 175 °

Ebenso wie bei allen anderen Segeln zeigt sich eine Verbesserung der Vortriebskraft bei 10° (siehe Abbildung [A.13](#)). In diesem Fall steigt die Kraft von ca. 146 N auf ca. 149,4 N. Dies entspricht einer Steigerung von 2,3%.

4.9. Auswirkungen der Mastgeometrien auf die Widerstandsbeiwerte der Segel

Wie schon in Kapitel 4.6 angesprochen, kann ein Vergleich der Segelgeometrien mit und ohne Mast nicht über die Vortriebskraft erfolgen, da sich durch das Hinzufügen der Mastgeometrie ebenfalls die Fläche ändert. Daher werden in diesem Kapitel die Widerstandsbeiwerte und Auftriebsbeiwerte der Segel mit und ohne Mast untersucht.

4.9.1. Segelform L1B1

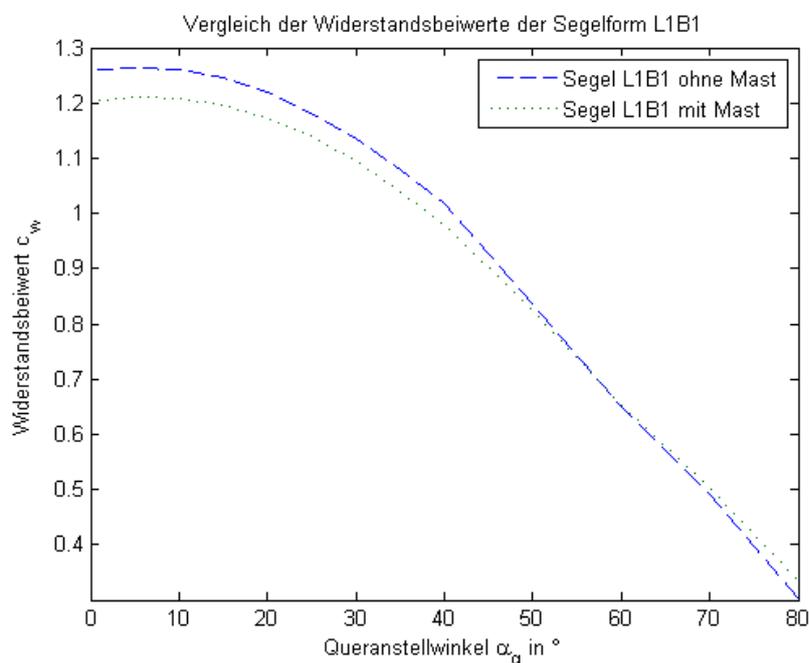


Abbildung 4.16.: Vergleich des Widerstandsbeiwertes c_w der Segel L1B1oM und L1B1mM

Die in der Abbildung 4.16 dargestellten Kurven zeigen die Verläufe der Widerstandsbeiwerte c_w für die Segel L1B1 ohne Mast und L1B1 mit Mast. Man kann erkennen, dass der c_w -Wert des Segels mit Mastgeometrie bei kleinen Queranstellwinkeln deutlich kleiner ist als der des Segels ohne Mast. Dies könnte damit zusammenhängen, dass am Vorliek nun keine scharfe Kante mehr angeströmt wird und der Mast so die Verwirbelungen reduziert. Bei höheren Queranstellwinkeln geht dieser Effekt verloren und die c_w -Werte der beiden Segel nähern sich aneinander an.

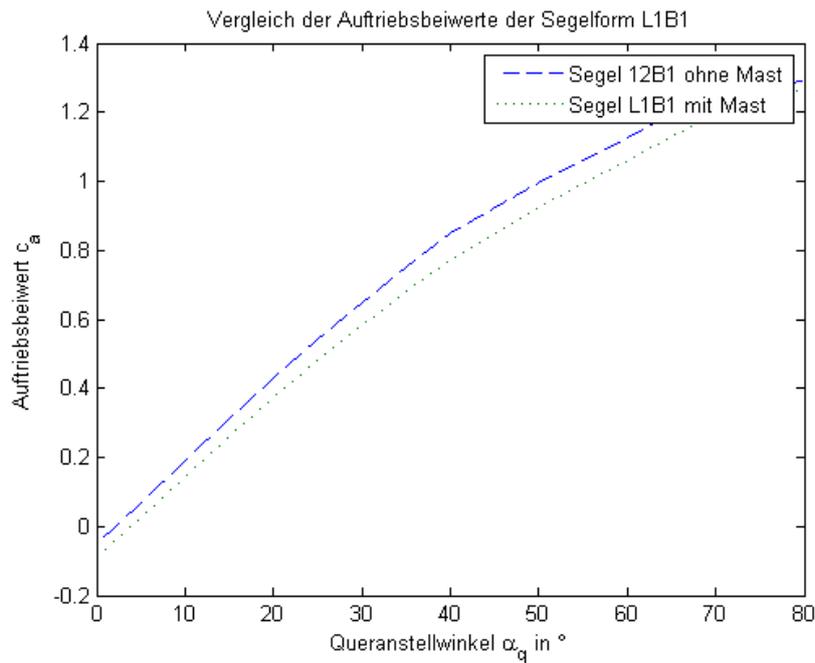


Abbildung 4.17.: Vergleich des Auftriebsbeiwertes c_a der Segel L1B1oM und L1B1mM

Für den Auftriebsbeiwert c_a gilt dieser Zusammenhang jedoch nicht. Das Segel mit Mast hat durchgehend einen geringeren Auftriebsbeiwert als das Segel ohne Mast. Auch erhöht sich die Differenz der beiden Verläufe nur minimal (siehe Abbildung 4.17).

4.9.2. Segelform L2B2

Bei der Segelform L2B2 herrscht ein sehr ähnliches Verhältnis zwischen den Widerstandsbeiwerten wie bei der Segelform L1B1 (siehe Abbildung 4.18 und 4.19). Wie auch beim L1B1 Segel, führt das Einfügen einer Mastgeometrie zu geringeren Beiwerten. Ein ähnlicher Verlauf und Effekt ist zu erwarten, da zwei sehr ähnliche Segelgeometrien auf die gleiche Art und Weise durch einen Mast erweitert wurden. Die Beiwerte der L2B2 Geometrien sind jedoch insgesamt ein wenig größer als die Beiwerte der L1B1 Geometrien.

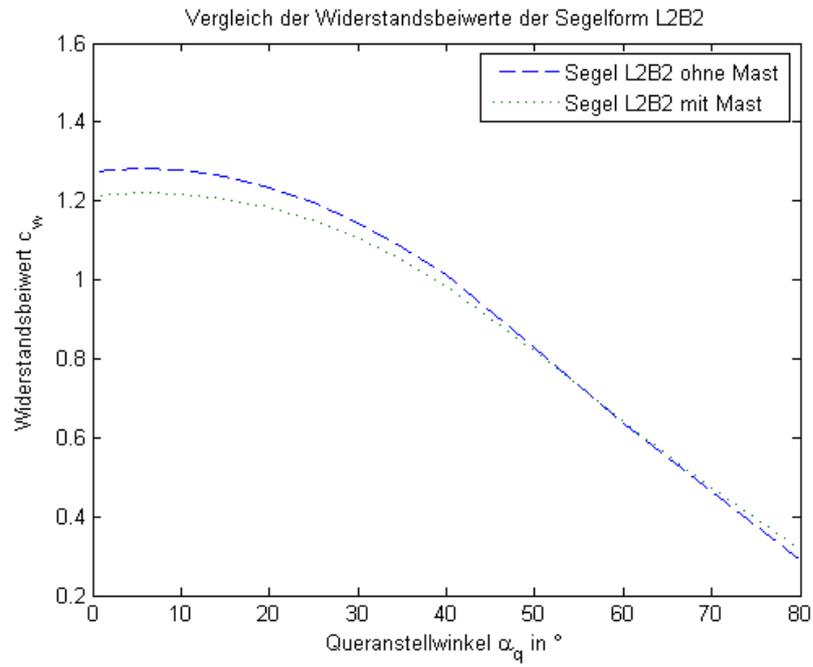


Abbildung 4.18.: Vergleich des Widerstandsbeiwertes c_w der Segel L2B2oM und L2B2mM

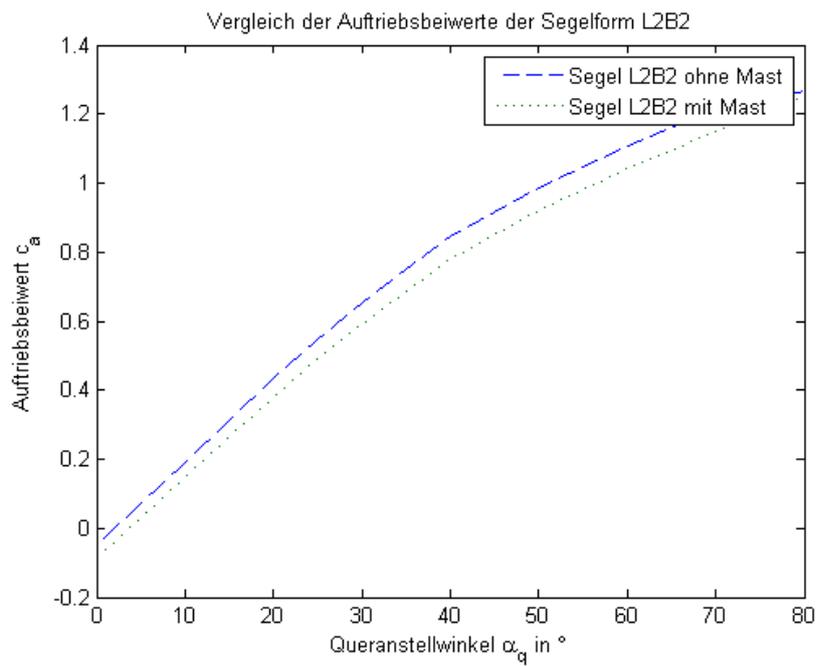


Abbildung 4.19.: Vergleich des Auftriebsbeiwertes c_a der Segel L2B2oM und L2B2mM

5. Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde die Leeanströmung eines Großsegels auf Vorwindkursen untersucht. Ziel war es, die Vortriebskräfte auf unterschiedlichen Kursen zu bestimmen und damit empirische Beobachtungen von professionellen Seglern mit Hilfe von CFD zu bestätigen.

Mit spezieller für die Aufnahme von Segelgeometrien entwickelter Software wurden zwei Segelformen, jeweils mit und ohne Mast modelliert. Aus Strömungssimulationen mit verschiedenen Queranstellwinkeln konnten Widerstands- und Auftriebsbeiwerte abgelesen werden. Es erfolgte eine Umrechnung der Beiwerte in Vortriebskräfte auf Vorwindkursen.

Die Hauptergebnisse dieser Arbeit sind:

- Leeanströmungen erhöhen auch in der Simulation die Vortriebskräfte.
- Größere Abweichungen vom reinen Vorwindkurs ermöglichen größere Vortriebskraftsteigerungen.
- Bei kleinen Abweichungen verstärkt Straffung des Segels den Effekt.
- Einbeziehen des Mastes lässt den Effekt deutlicher werden, obwohl sich die Widerstandsbeiwerte verringern.

Insgesamt können die Behauptungen von erfahrenen Seglern nachvollzogen und unterstützt werden. Zwar legen die Ergebnisse nur eine geringe Vortriebskraftsteigerung nahe, doch bei einer Regatta können auch kleine Vorteile entscheidend sein.

Bei der Arbeit handelt es sich um ein erstes Überprüfen mit stark vereinfachten Modellen. Es kann daher keine Aussage über die resultierenden Geschwindigkeiten getroffen werden. Um in weiteren Untersuchungen ein genaueres Bild von der Problematik zu bekommen, kann man das Modell um folgende Effekte erweitern:

- Instationäre Rechnungen zur besseren Abbildung der Wirklichkeit
- Dynamik des Windes und des Wassers
- Dynamik des Bootsrumpfes (z.B. Krängung, Eintauchtiefe und Strömungswiderstand)
- Abhängigkeit der Segelform von der Anströmrichtung
- Kursoptimierung mittels VMG-Analyse

Literaturverzeichnis

- [1] ANSYS, Inc: ANSYS Fluent 12.0 User's Guide. In: *Canonsburg, PA* (2009)
- [2] BETHWAITE, Frank: *Fast Handling Technique*. 1. Aufl. Bloomsbury, 2013
- [3] LAUNDER, Brian E. ; SPALDING, Dudley B.: The numerical computation of turbulent flows. In: *Computer methods in applied mechanics and engineering* 3 (1974), Nr. 2, S. 269–289
- [4] OERTEL JR, Herbert ; BÖHLE, Martin ; REVIOL, Thomas: *Strömungsmechanik: für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag, 2015
- [5] PÜSCHL, Wolfgang: *Physik des Segelns - Wie Segeln wirklich funktioniert*. New York : John Wiley and Sons, 2012
- [6] SCHLICHTING, Hermann ; GERSTEN, Klaus: *Grenzschicht-Theorie*. Springer-Verlag, 2006
- [7] SCHWARZE, Rüdiger: *CFD-Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Springer-Verlag, 2012
- [8] SCHWARZMEIER, Thomas: *Segeln-aber richtig: Alles über Ausrüstung, Boote, Technik und Manöver*. BLV, 2005
- [9] SHIH, Tsan-Hsing ; LIOU, William W. ; SHABBIR, Aamir ; YANG, Zhigang ; ZHU, Jiang: A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. In: *Computers & Fluids* 24 (1995), Nr. 3, S. 227–238
- [10] SLOOFF, Joop W.: *The aero-and hydromechanics of keel yachts*. Springer, 2015
- [11] SÜLAR, Vildan ; ÖNER, Eren ; OKUR, Ayşe: Roughness and frictional properties of cotton and polyester woven fabrics. (2013)
- [12] WHITE, Frank M.: Fluid mechanics. 5th. In: *Boston: McGraw-Hill Book Company* (2003)

A. Anhang

A.1. Vorversuch

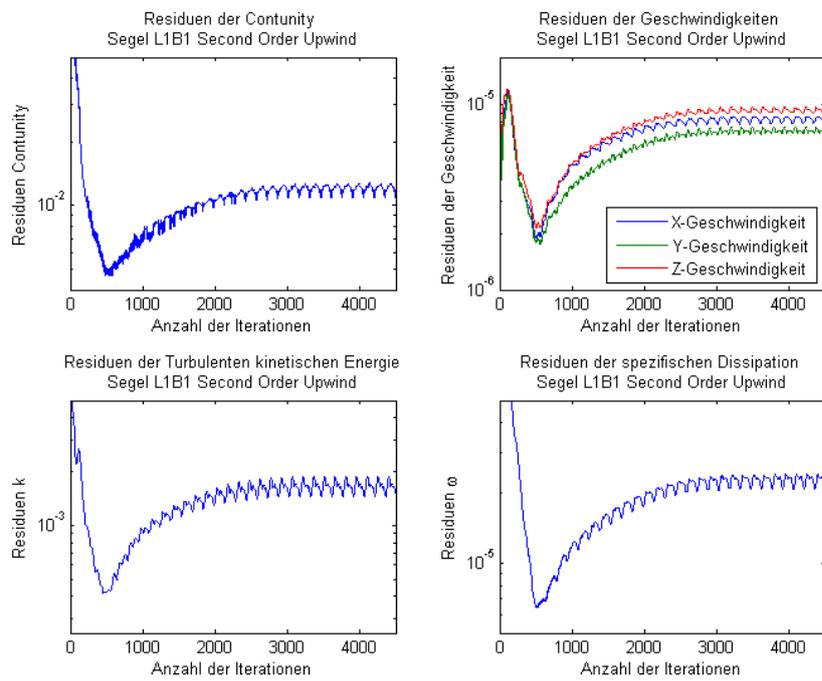


Abbildung A.1.: Residuen der Simulation mit Second-Order Upwind

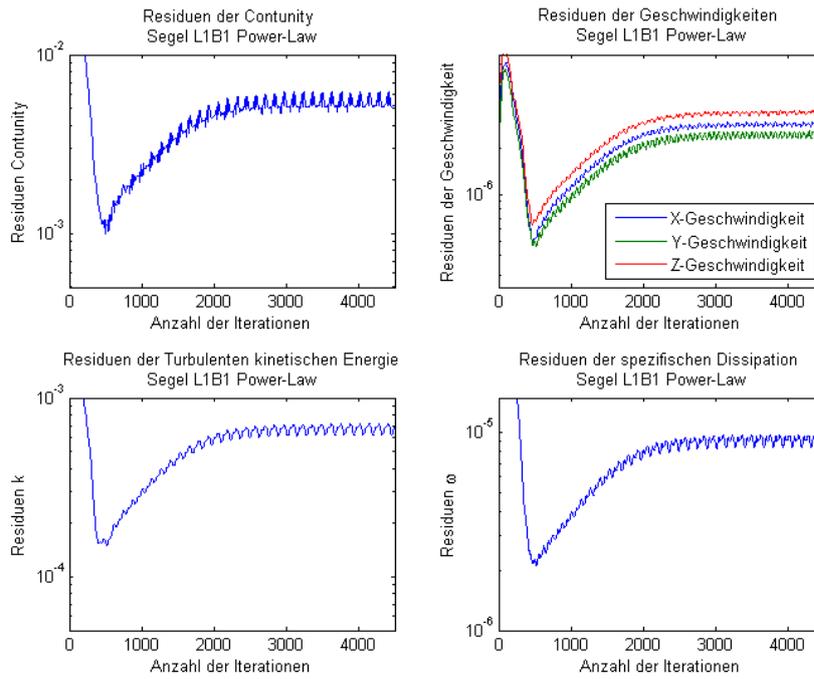


Abbildung A.2.: Residuen der Simulation mit Power-Law

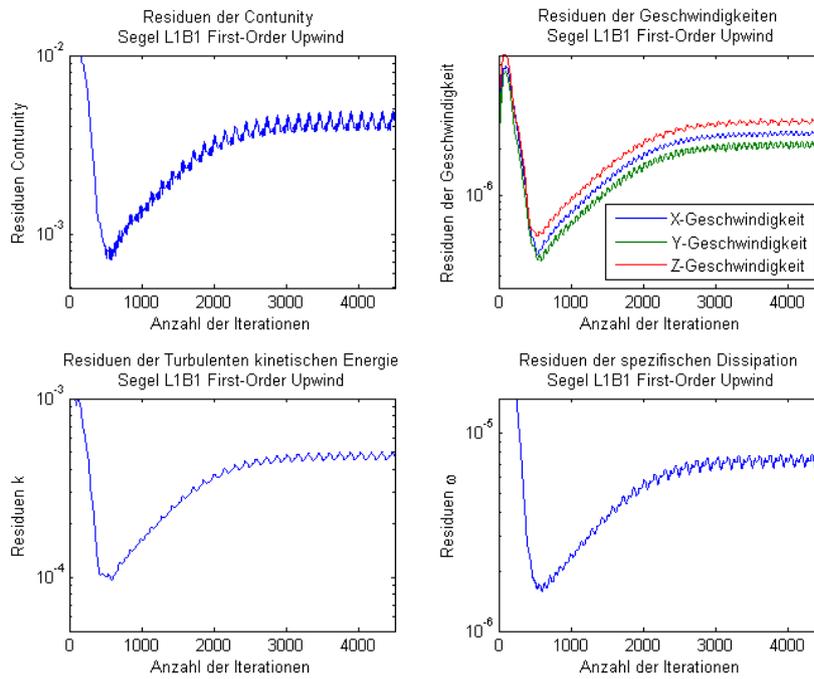


Abbildung A.3.: Residuen der Simulation mit First-Order Upwind

A.2. Darstellung der Kurse 180° bis 170°

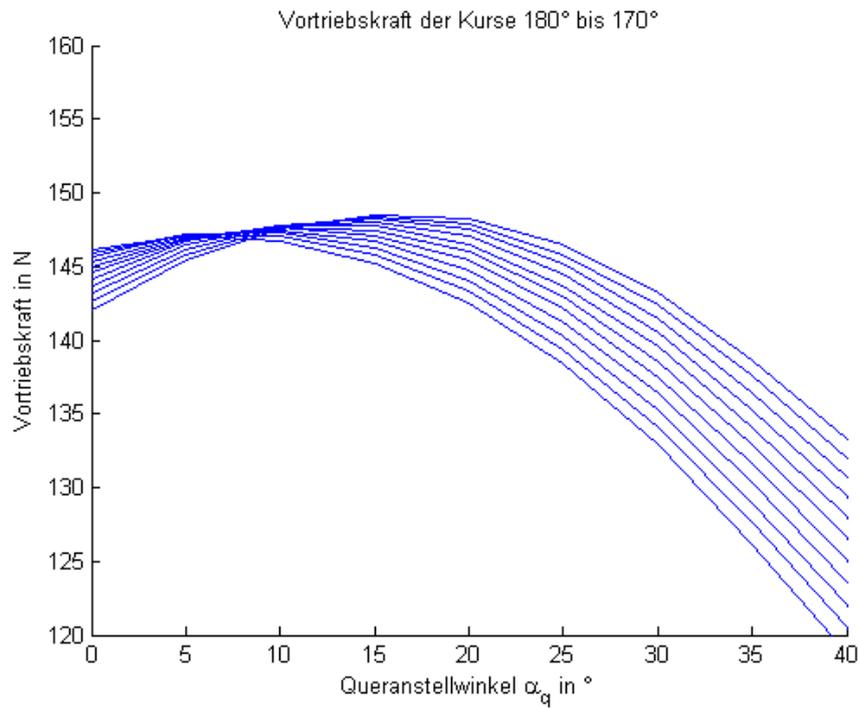


Abbildung A.4.: Vergleich der Vortriebskräfte des Segels L1B1mM auf den Kursen 180° bis 170°

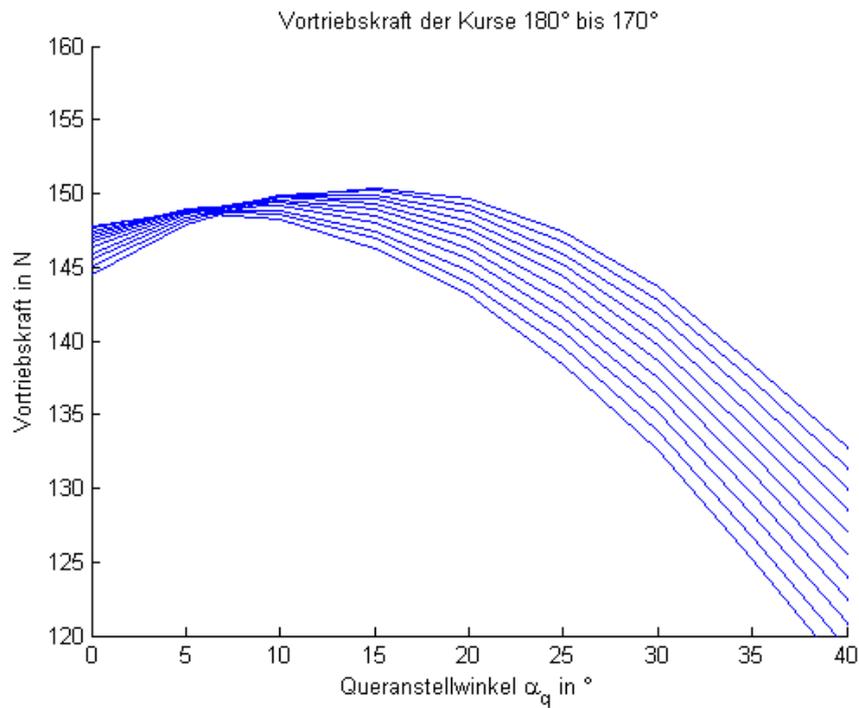


Abbildung A.5.: Vergleich der Vortriebskräfte des Segels L2B2oM auf den Kursen 180° bis 170°

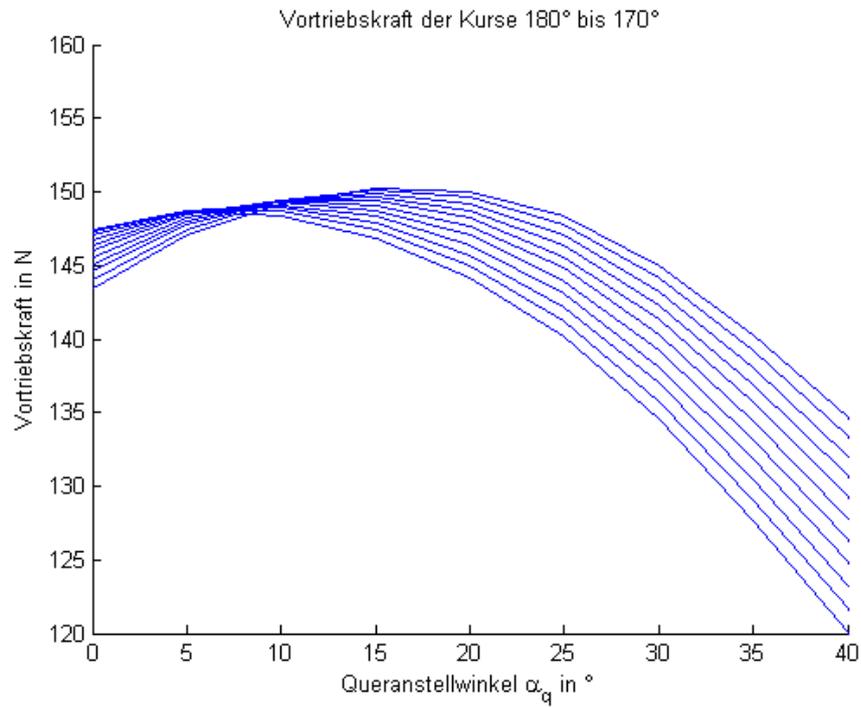


Abbildung A.6.: Vergleich der Vortriebskräfte des Segels L2B2mM auf den Kursen 180° bis 170°

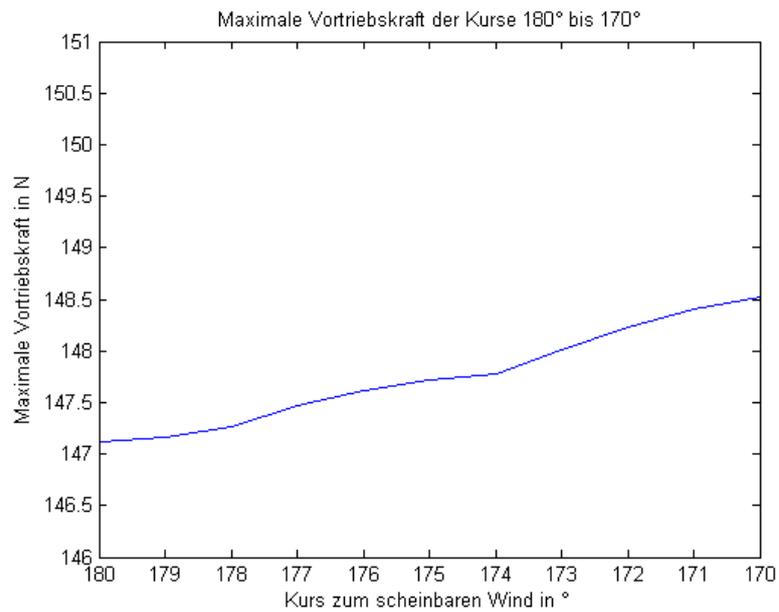


Abbildung A.7.: Vergleich der maximalen Vortriebskräfte des Segels L1B1mM auf den Kursen 180° bis 170°

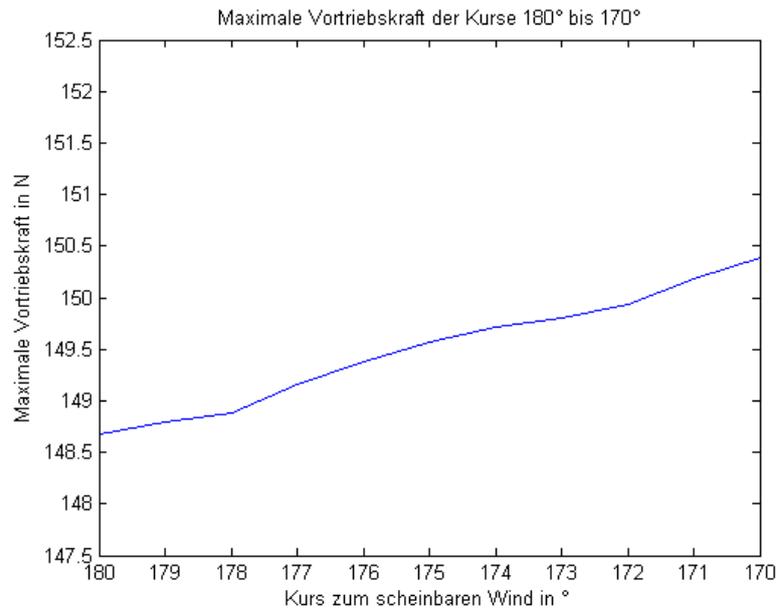


Abbildung A.8.: Vergleich der maximalen Vortriebskräfte des Segels L2B2oM auf den Kursen 180° bis 170°

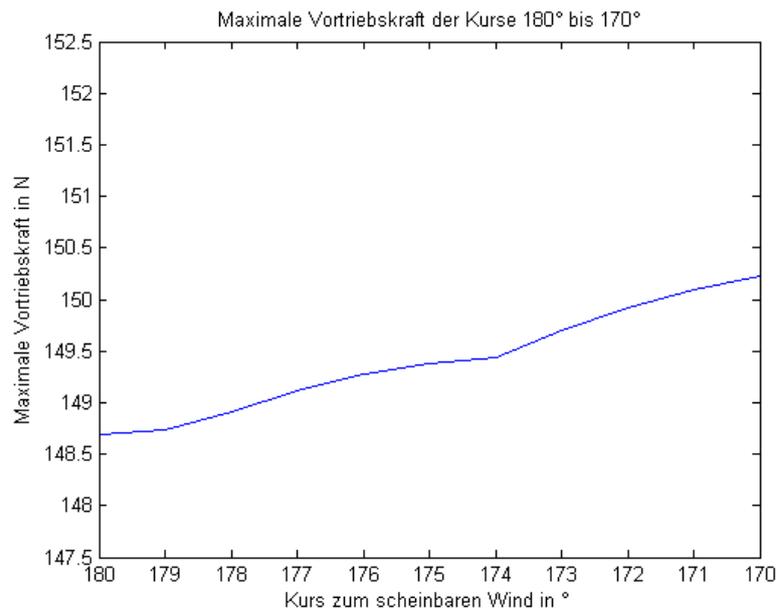


Abbildung A.9.: Vergleich der maximalen Vortriebskräfte des Segels L2B2mM auf den Kursen 180° bis 170°

A.3. Auswertung L1B1 mit Mast

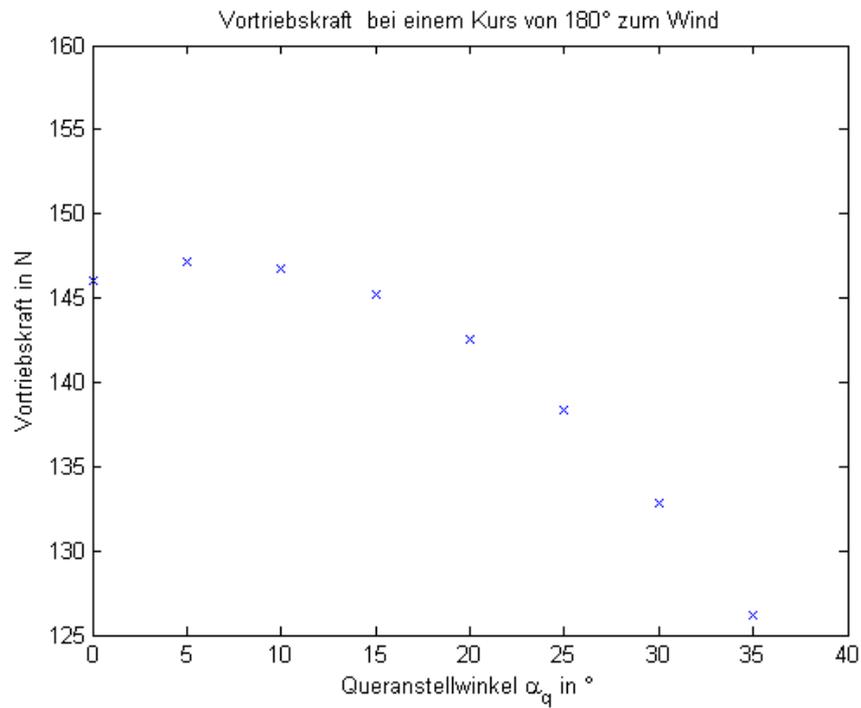


Abbildung A.10.: Vortriebskraft des Segels L1B1mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind

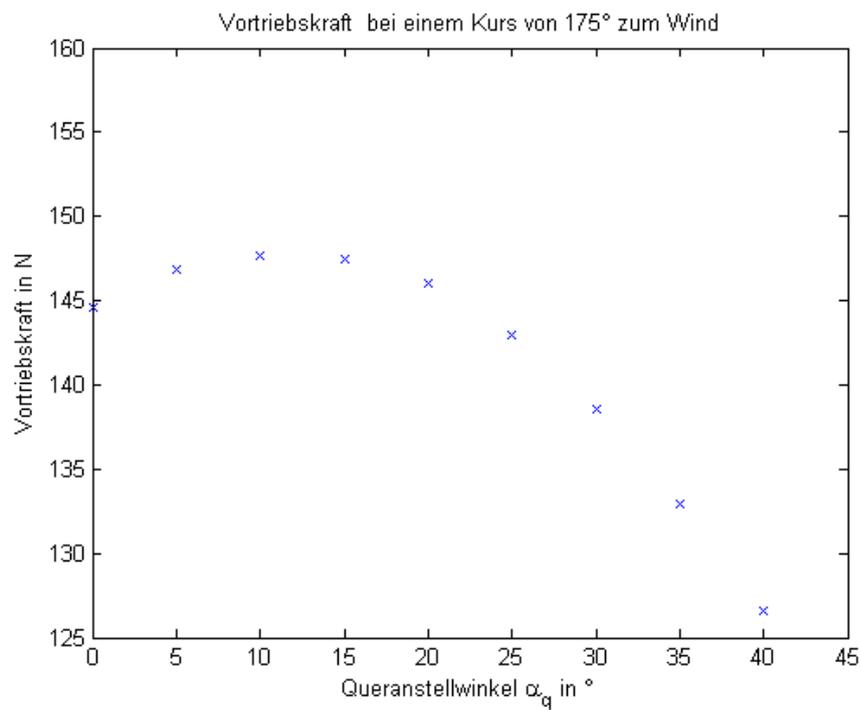


Abbildung A.11.: Vortriebskraft des Segels L1B1mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind

A.4. Auswertung L2B2 mit Mast

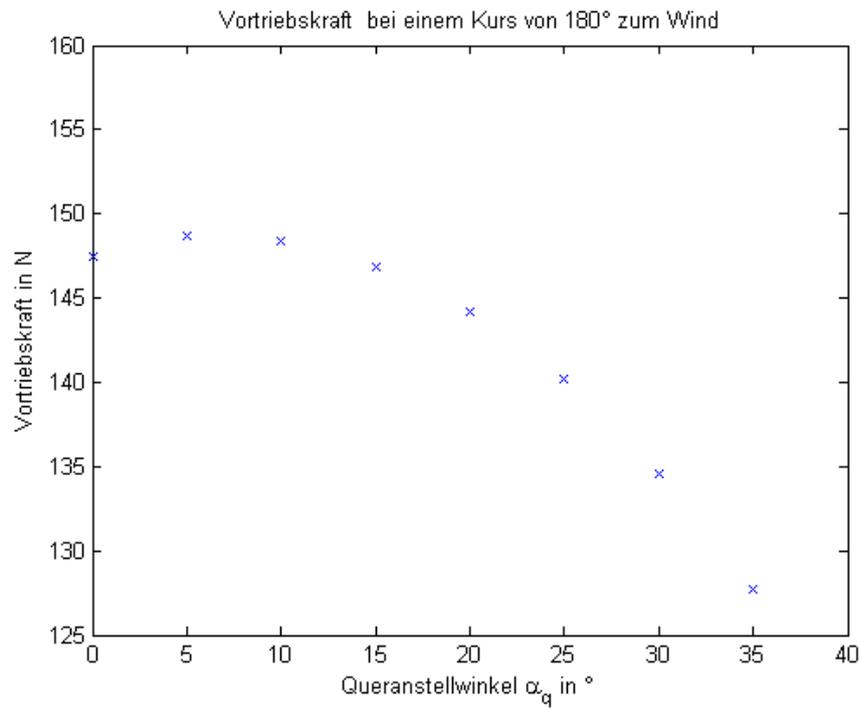


Abbildung A.12.: Vortriebskraft des Segels L2B2mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 180° zum scheinbaren Wind

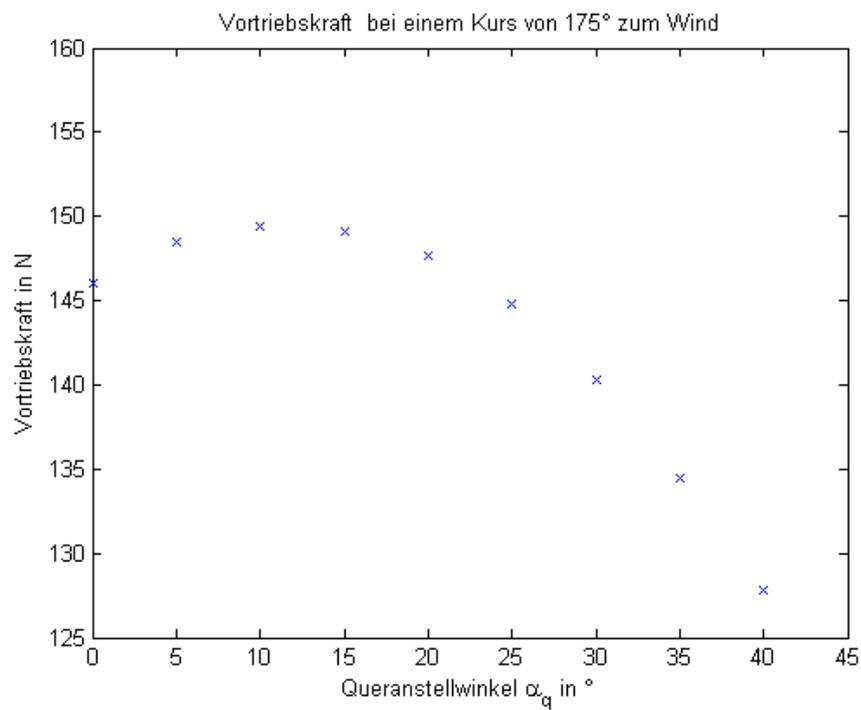


Abbildung A.13.: Vortriebskraft des Segels L2B2mM bei verschiedenen Queranstellwinkeln α_q bei einem Kurs von 175° zum scheinbaren Wind

Glossar

α	Anstellwinkel
α_q	Queranstellwinkel
β	Winkel zwischen \vec{V}_b und \vec{V}_s
δ	Dicke der Grenzschicht
η	dynamische Viskosität des Fluids
Re	Reynoldszahl
\bar{p}	Reynoldsmittelwert des Druckfelds
$\bar{S}_{ij}, \underline{\underline{S}}$	Tensor der mittleren Deformationsgeschwindigkeiten
ρ	Dichte des Fluids
τ_w	Schubspannung an der umströmten Wand
\bar{u}	Reynoldsmittelwert des Strömungsfelds
\underline{g}	Vektor der Erdbeschleunigung
\underline{u}'	turbulente Fluktuation des Strömungsfelds
\underline{u}	Strömungsfeld
\vec{F}_a	Vektor der Auftriebskraft
\vec{F}_s	Vektor der Seitenkraft
\vec{F}_v	Vektor der Vortriebskraft
\vec{F}_w	Vektor der Widerstandskraft
\vec{V}_b	Vektor der Bootsgeschwindigkeit

\vec{V}_s	Vektor der Geschwindigkeit des scheinbaren Windes
\vec{V}_t	Vektor der Geschwindigkeit des wahren Windes
A	angeströmte Fläche
c_a	Auftriebsbeiwert
C_f	Reibungskoeffizient der umströmten Wand
c_g	Beiwert in Fahrtrichtung, eine Kombination der Beiwerte c_w und c_a
c_w	Widerstandsbeiwert
F_a	Betrag der Auftriebskraft
F_s	Betrag der Seitenkraft
F_v	Betrag der Vortriebskraft
F_w	Betrag der Widerstandskraft
L	Länge der überströmten Fläche
p	Druckfeld
p'	turbulente Fluktuation des Druckfelds
t	Zeit
U_∞	Geschwindigkeit der Anströmung in der Strömungsmechanik
U_τ	Schubspannungsgeschwindigkeit an der umströmten Wand
V_b	Betrag der Bootsgeschwindigkeit
V_s	Betrag der Geschwindigkeit des scheinbaren Windes
V_t	Betrag der Geschwindigkeit des wahren Windes
y	Dicke der ersten Inflationsschicht
y_p^+	dimensionsloser Wandabstand der Grenzschicht

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich,

Name: Zimmermann

Vorname: Benjamin

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema:

Segeln mit Leeanströmung

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 27. März 2017

Ort, Datum

Unterschrift