



## Optimierung der Aero- und Hydrodynamik von Segelyachten

### *Optimization of sailing yachts by numerical simulation and full scale validation*

**Prof. Dr.-Ing. Günther Clauss**, Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr, Clauss@ISM.TU-Berlin.de

**Dr.-Ing. Karsten Hochkirch**, FRIENDSHIP-Systems, Hochkirch@FRIENDSHIP-Systems.com

**Dipl.-Ing. Bernhard Krüger**, Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr, BKrueger@ISM.TU-Berlin.de



## Summary

Bei der Optimierung von Segelyachten ist eine Vielzahl miteinander wechselwirkender aerodynamischer und hydromechanischer Parameter zu berücksichtigen, die Einfluss auf die Segelleistung nehmen. Im Rahmen dieser Präsentation werden zwei von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderte Forschungsvorhaben der TU Berlin vorgestellt: Optimierung von Kielen mit reduziertem Tiefgang und Modellierung der aerodynamischen Kräfte des Riggs durch Segelformanalyse. Von besonderer Bedeutung sind dabei Großausführungsversuche mit dem Segeldynamometer *Dyna*, einer 10 m langen Forschungssegelyacht. Dieses an der TU Berlin

entwickelte, weltweit einzigartige Messgerät erlaubt die Bestimmung der aero- und hydrodynamischen Kräfte und Momente sowie die Erfassung der relevanten Segelzustandsgrößen während des Segelns unter realen Bedingungen im Originalmaßstab. Parallel hierzu werden zu den gleichen Problemstellungen Modellversuche und numerische Strömungsberechnungen durchgeführt. Ein systematischer Vergleich der Großausführungsergebnisse mit denen der anderen Untersuchungsmethoden bildet die Grundlage für ein modulares Geschwindigkeitsprognoseverfahren (VPP). Die Erkenntnisse aus den komplementären Untersuchungen münden in die Entwicklung verbesserter Entwurfswerkzeuge für Segelyachten und ihrer Komponenten.

The optimization of a sailing yacht is a complex task as a number of interacting aerodynamic and hydromechanical parameters are contributing to her performance. This paper presents TU Berlin's most recent projects in the field of yacht research. The development and optimization of shallow water keels and the analysis of rig aerodynamics with special focus on the flying shape of the sails are targeted within two DFG funded research projects. Of vital importance is the Berlin sailforce dynamometer *Dyna*, a 10 m research sailing yacht. This worldwide unique measurement device allows acquisition of aero- and hydrodynamic forces and moments as well as the collection of relevant sail parameters while sailing in natural environmental conditions without scaling effects. In addition model tests and numerical flow computations are contributing to a modular velocity prediction program (VPP) to judge the effects of the yachts components on overall performance. Results will improve contemporary design tools for sailing yachts and their components.

## Symbole

$A_{LAT}$	Lateralfläche
$A_{WS}$	benetzte Oberfläche
$AR$	Streckungsverhältnis
$AS$	Segelfläche
$C_D$	Widerstandsbeiwert
$C_L$	Auftriebsbeiwert
$D$	Widerstand (aerodynamisch)
$e$	Oswald-Gütefaktor
$F_N$	Froude-Zahl
$L$	Auftrieb
$R_N$	Reynoldszahl
$R$	Widerstand (hydrodynamisch)
$V_S$	Schiffsgeschwindigkeit
$V_{WA}$	scheinbare Windgeschwindigkeit
$VMG$	Velocity Made Good
$\beta_A$	scheinbarer Windeinfallswinkel
$\lambda$	Abdriftwinkel
$\rho_L$	Dichte Luft
$\rho_{H_2O}$	Dichte Wasser
$\varphi$	Krängungswinkel
$V$	Verdrängung

## 1 Einführung

Der Vortrieb eines Segelschiffs ist das Ergebnis eines komplexen Zusammenwirkens aus aero- und hydrodynamischen Kräften und Momenten. Rigg

und Segel sind vom Fluid Luft umgeben, während der Rumpf und seine Anhänge sich im Fluid Wasser befinden. Die Segel generieren aus dem Wind aerodynamische Kräfte, die den Vortrieb liefern, aber auch Querkräfte verursachen. Die hydrodynamischen Kräfte des Rumpfes und seiner Unterwasseranhänge Kiel und Ruder müssen diese ausgleichen können. Die Bewegung der Yacht ist im allgemeinen weder nach Betrag noch Richtung gleichförmig. Zur Beschreibung und zum Verständnis der Funktionsweise einer Segelyacht sind Kenntnisse über die Aufgaben und Wirkungsweisen der einzelnen Komponenten der Yacht notwendig, um deren Einfluss auf das Gesamtsystem Segelyacht beurteilen zu können.

### 1.1 Komponenten einer Segelyacht

Für die Bestandteile einer Segelyacht lässt sich eine grobe Unterteilung in Komponenten mit aerodynamischen und solche mit hydrodynamischen und hydrostatischen Aufgaben vornehmen.

Auf der Seite der Aerodynamik fällt dabei dem Rigg und den Segeln die größte Bedeutung zu. Sie erzeugen den Vortrieb und haben damit einen entscheidenden Anteil an der Segelleistung einer Yacht. Diese beiden Bestandteile können nur im Zusammenhang betrachtet werden, da sie untrennbar miteinander verbunden sind und sich vielfältig gegenseitig beeinflussen: Das Führen von Segeln ist ohne ein Rigg nicht möglich und bereits das Vorhandensein des Riggs wirkt sich auf die Strömung an den Segeln aus. Dabei ist die Rigggeometrie – Profilform des Mastes, Anzahl und Form der Salinge, Durchmesser und Anzahl der Wanten und Stage – für die Aerodynamik von Bedeutung. Eine veränderte Riggkonfiguration – beispielsweise ein höherer Mast oder die Aufteilung der Segelfläche auf mehrere Masten – bedingt stets eine veränderte Segelgeometrie.

Andererseits ist bei einem vorgegebenen Rigg nur eine begrenzte Variationsmöglichkeit im Segeldesign vorhanden, und zwar durch Veränderung der Segelprofile sowie bei der Wahl der Segelumrissform. Dennoch besteht bei einer gegebenen Riggkonfiguration zumeist die Wahl unterschiedlich großer Segel und/oder die Möglichkeit zum Reffen, um die Segelfläche an die Windstärke anzupassen. Selbst mit nur einer einzigen Segelkom-

ination ist durch Trimmen eine große Variation in der Segelgeometrie möglich.

Wie bereits anhand dieser Aufzählung zu sehen ist, ergeben sich durch Auslegung und Trimm von Rigg und Segeln beinahe beliebig viele unterschiedliche Möglichkeiten für die Segelgeometrie und damit für die Segelaerodynamik. Die Aerodynamik einer Segelyacht schließt die Form des Rumpfes im Überwasserbereich und des Decksaufbaus mit ein, sowie ggf. vorhandene Anbauten wie z.B. ein Seezaun, da auch der Windwiderstand dieser Details die Segelleistung einer Yacht beeinflusst.

Die hydrodynamischen Eigenschaften werden vor allem durch Rumpf, Kiel und Ruder geprägt. Die Verdrängung muss ausreichen, um das Gewicht von Schiff und Mannschaft zu tragen, die hydrostatische Stabilität groß genug sein, um das Krängungsmoment des Riggs auszugleichen. Die Hydrodynamik der verschiedenen Komponenten des Unterwasserschiffs ist sehr komplex und Wechselwirkungen haben maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtsegelleistung. Für eine optimale Geschwindigkeit muss der Gesamtwiderstand des Unterwasserschiffs minimal sein. Aus diesen grundlegenden Aufgaben lassen sich folgende wesentliche Anforderungen an die einzelnen Komponenten ableiten:

Der Rumpf trägt durch seine große Verdrängung maßgeblich zum hydrostatischen Auftrieb bei. Bei den heute üblichen flachen Bootsrümpfen ist sein Anteil an der hydrodynamischen Seitenkraft, bedingt durch seine kleine Lateralfäche eher gering. Dadurch bietet der Rumpf kaum Widerstand gegen seitliches Abtreiben. Diese Aufgabe muss von Kiel und Ruder übernommen werden. Die Formgebung des Rumpfes hat großen Einfluss auf die Stabilität und den Widerstand der gesamten Yacht. Ein breiter Rumpf gewährleistet hohe Formstabilität und damit kleinere Krängungswinkel, induziert jedoch auch einen höheren Wellenwiderstand. Ein schlanker Rumpf hingegen besitzt nur eine geringe Formstabilität, lässt jedoch einen geringeren Wellenwiderstand erwarten. Gleiten wiederum ist eher mit einem breiten, flachen Rumpf möglich.

Auch der Kiel muss mehreren Anforderungen gerecht werden. Als Tragflügel erzeugt er unter schräger Anströmung hydrodynamischen Auftrieb und damit den größten Anteil der beim Segeln auf Am-Wind-Kursen notwendigen Querkraft. Dabei

ist seine Formgebung – Profilform, Umrissform und insbesondere das Streckungsverhältnis – von entscheidender Bedeutung für seine Effektivität.

Als Ballasträger fällt dem Kiel ein wesentlicher Anteil an der Gewichtsstabilität der Yacht zu. Einflussgrößen sind hierbei das Ballastgewicht und die Wahl des Tiefgangs. Um eine tief liegende Ballastposition zu erhalten, wird häufig unten am Kiel eine Ballastbombe angebracht oder eine dickere Profilform gewählt. In diesem Zusammenhang wird auch häufig die Frage diskutiert, ob durch Winglets eine signifikante Verbesserung der hydrodynamischen Eigenschaften erzielt werden kann.

Große Bedeutung hat der Kiel auch für die Manövrierfähigkeit der Segelyacht. Wichtige Einflussgrößen hierfür sind die Größe seiner Lateralfäche – Widerstand gegen seitliches Abtreiben – sowie die Profillehnenlänge. Ein Kiel mit kurzen Profillängen (Kurzkiel) bewirkt im Allgemeinen ein sehr agiles Manövrierverhalten, während ein Kiel mit längerer Profillehne (Langkiel) weniger wendig ist, dafür aber eine gute Kursstabilität hervorruft.

Aufgrund der hohen Massenkonzentration ist der Einfluss des Kiels auf das Seeverhalten der Yacht, d.h. Roll- und Stampfbewegungen und den daraus resultierenden zusätzlichen Widerstand, erheblich.

Schließlich soll noch die Bedeutung des Entwurfsparameters Tiefgang erläutert werden. Soll das Fahrtgebiet nicht zu stark eingeschränkt werden, ist ein geringer Tiefgang erforderlich, um zahlreiche Reviere überhaupt befahren und Häfen ansteuern zu können. Ein Kiel mit kleinem Tiefgang weist jedoch zum einen nur ein geringes Streckungsverhältnis auf, was für seine hydrodynamische Effizienz ungünstig ist. Zum anderen kann der Ballast nicht so tief angebracht werden, so dass sich nur eine kleinere Gewichtsstabilität erzielen lässt. Hier ist im Entwurf ein Kompromiss zwischen Alltagstauglichkeit und Segelleistung zu erarbeiten.

In Bezug auf Formgebung und Anordnung relativ zum Kiel hat das Ruder großen Einfluss auf die Manövrierfähigkeit der Yacht. Mit wachsendem Abstand vom Kiel lässt sich das Schiff zunehmend sensibel steuern. Bei modernen Segelyachten trägt das Ruder erheblich zur hydrodynamischen Querkraft der Yacht bei und entlastet damit den Kiel. Der Kiel beeinflusst wiederum das Ruder, da dieses sich meist in dessen Nachstromfeld befindet.

Dieser Überblick verdeutlicht, wie viele Möglichkeiten sich durch unterschiedliche Gestaltung der einzelnen Komponenten für den Segelyachtentwurf ergeben. Für eine Optimierung dürfen die Komponenten nicht einzeln betrachtet werden – vielmehr muss das Gesamtsystem untersucht werden.

## 1.2 Interaktion der Komponenten

Die übergreifenden Interaktionen der aero- und hydrodynamischen Komponenten einer Segelyacht sind erheblich, wie im folgenden anhand zweier Beispiele illustriert werden soll:

Im ersten Beispiel wird die Wechselwirkung zwischen zwei hydrodynamischen Komponenten – Kiel und Ruder – betrachtet. Als schräg angeströmte Tragflächen tragen beide zur Kompensation der Querkraft bei. Dynamischer Auftrieb hat jedoch bei Tragflächen endlicher Spannweite einen induzierten Widerstand zur Folge, da durch Druckausgleich von der Überdruck- zur Unterdruckseite des Profils ein Randwirbel entsteht. Dieser Widerstandsanteil wächst quadratisch mit dem von der Tragfläche erzeugten Auftrieb (ABBOTT UND VON DOENHOFF, 1958) und kann einen wesentlichen Anteil des Gesamtwiderstandes einnehmen. Eine Reduzierung des gesamten induzierten Widerstands lässt sich durch geschickte Abstimmung der Auftriebsbeiträge von Kiel und Ruder erzielen. Da sich das Ruder im Nachstromfeld des Kieles befindet, kann es bei ungünstiger Anordnung der Komponenten jedoch auch zu negativen Auswirkungen kommen. Wird das Ruder z.B. vom Randwirbel der Kielunterkante erfasst, führt dies zu einer ungleichmäßigen Anströmung, verbunden mit einer starken Widerstandserhöhung.

In einem zweiten Beispiel werden die Wechselwirkungen zwischen aero- und hydrodynamischen Komponenten illustriert: Der Antrieb der Yacht resultiert aus den von Rigg und Segeln erzeugten aerodynamischen Kräften. Diesen Kräften wirken die hydrodynamischen Kräfte des Rumpfes und der Anhänge entgegen. Für einen stationären Zustand müssen Kräfte und Momente im Gleichgewicht sein. So ist der Vortriebskraft immer eine Widerstandskraft, der aerodynamischen Seitenkraft die hydrodynamische Querkraft und dem krängenden Moment stets ein aufrichtendes Moment gleicher Größe entgegengerichtet.

Eine Möglichkeit, die Segelleistung der Yacht zu steigern, besteht in der Verlängerung des Mastes verbunden mit einer Vergrößerung der Segelfläche. Dadurch nimmt die aerodynamische Gesamtkraft sowie – durch das Hochwandern des Kraftangriffspunkts – auch das krängende Moment zu. Diese sind durch Rumpf und Kiel zu kompensieren, z.B. durch Vergrößerung des Tiefgangs, und damit die Verlagerung des Gewichtsschwerpunkts nach unten (unter Beibehaltung des Ballastes). Sofern der Tiefgang jedoch begrenzt ist – um das Fahrtgebiet für die Yacht nicht zu stark einzuschränken, oder durch eine Vermessungsbestimmung – kann ein größeres aufrichtendes Moment nur durch eine Vergrößerung des Ballastes erzielt werden. Daraus ergeben sich auf das Gesamtsystem der Yacht vielfältige Auswirkungen:

- Erhöhung des Volumens und der benetzten Oberfläche der Kielflosse → Erhöhung des Reibungswiderstandes des Kiels
- Erhöhung der Gesamtverdrängung des Schiffes → Tiefertauchung des Schiffes → Vergrößerung der benetzten Oberfläche des Rumpfes → Erhöhung des Reibungswiderstandes des Rumpfs
- Erhöhung der Gesamtverdrängung des Schiffes → Tiefertauchung und Verbreiterung der Wasserlinienbreite des Schiffes → Erhöhung des Wellenwiderstandes
- Erhöhung des Ballastes und Verlagerung des Gewichtsschwerpunktes nach unten → Veränderung des Roll- und Stampfverhaltens der Yacht
- Erhöhung der Seitenkraft durch vergrößerte Segelfläche bei nicht vergrößerter Lateralfläche des Kiels → Die Yacht wird am Wind mit mehr Abdrift segeln
- ...

Diese Aufzählung dokumentiert, wie eng die Verflechtungen der einzelnen Komponenten untereinander sind. Um Segelyachten gezielt zu optimieren, ist also ein zuverlässiges Analysewerkzeug nötig, das die Einflüsse einzelner Änderungen erfasst und deren Auswirkung auf das Gesamtsystem ermitteln kann.

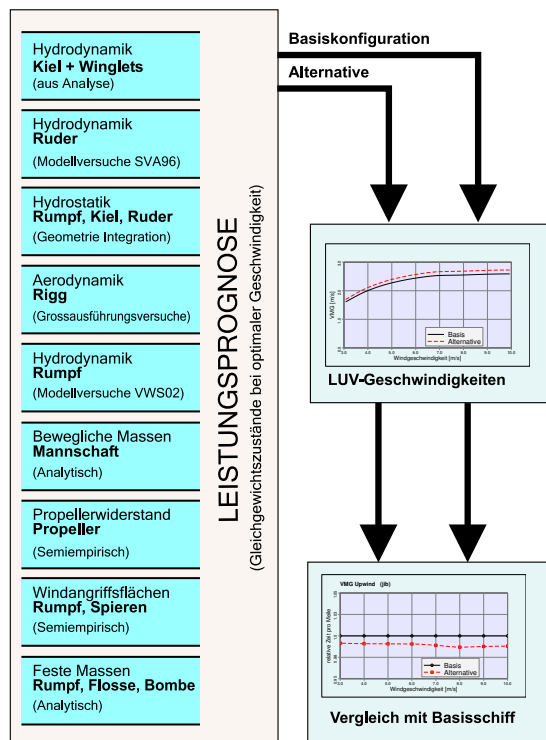


Bild 1: Verfahren zur Beurteilung der Leistung verschiedener Varianten  
 Procedure to estimate the performance of different configurations

## 2 Analyse

Für die Analyse einer Yachtkonfiguration aus Rigg, Rumpf, Kiel und Ruder sind Gleichgewichtszustände der generalisierten Kräfte und Momente zu ermitteln. Diese Aufgabe löst ein modulares Geschwindigkeitsprognoseprogramm (VPP: Velocity Prediction Program), das am Institut für Land- und Seeverkehr in Zusammenarbeit mit FRIENDSHIP-Systems entwickelt wurde (HOCHKIRCH, 2000). Ziel der Geschwindigkeitsprognose ist es, für vorgegebene Windstärken und Kurse zum Wind Segelzustände (d.h. Geschwindigkeit, Krängungswinkel, Abdrift, etc.) zu finden, bei denen die Kraftanteile im Gleichgewicht sind. Für diese stationären Segelzustände werden ebenfalls optimale Werte für die Trimmparameter bestimmt.

Zur Beurteilung der Güte von Entwurfsalternativen werden aus den prognostizierten Geschwindigkeiten für die jeweilige Konfiguration die Zeiten berechnet, die für eine Seemeile erforderlich sind.

Diese Zeiten werden relativ zu einer Basis betrachtet, wobei Werte unter 1 eine höhere Geschwindigkeit, Werte über 1 eine geringere Geschwindigkeit bedeuten. Für den Vergleich der Konfigurationen werden z.B. die Geschwindigkeiten gegen Luv und Lee (VMG: Velocity Made Good) sowie die Bootsgeschwindigkeit auf einem Raumwindkurs ( $135^\circ$ ) betrachtet und über der wahren Windgeschwindigkeit aufgetragen.

Bild 1 zeigt schematisch den Ablauf der Bewertung, die anhand vergleichender Analysen vorgenommen wird, d.h. auf die Betrachtung der absoluten Zahlenwerte wird verzichtet. Das Basisschiff wird mit der gleichen Analysetechnik untersucht wie die zu bewertenden Konfigurationen und das Ergebnis ist ein Ranking aller Alternativen in Abhängigkeit von der Windstärke. Der Einsatz eines VPP's gewährleistet die Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen von Aerodynamik und Hydrodynamik, sodass ausschließlich realistische Segelzustände verglichen werden.

Die unterschiedlichen Module des VPP beinhalten mathematische Modelle zur Beschreibung der generalisierten Kräfte der betreffenden Komponenten, u.a. Modelle zur Beschreibung der Hydrodynamik für Rumpf und Anhänge bzw. der Aerodynamik des Riggs. Diese Modelle können aus den unterschiedlichsten Untersuchungsverfahren abgeleitet werden. Im folgenden werden verschiedene Untersuchungsmethoden vorgestellt, wobei den im Rahmen der beiden Forschungsvorhaben eingesetzten Verfahren besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird.

### 2.1 Untersuchungsverfahren

#### 2.1.1 Analytische Verfahren

Mit Hilfe von profiltheoretischen Annahmen und empirischen Grundlagen kann die Wirkung der auftriebserzeugenden Profile – Kiel und ggf. Winglets, Ruder und Segel – als Tragflächen abgeschätzt werden. Damit sind erste Hinweise auf deren Effektivität möglich. Allerdings bleiben Wechselwirkungseffekte zwischen Rumpf, Kiel, Ruder und freier Oberfläche oder zwischen den Segeln und Rigg bzw. den Segeln untereinander hierbei unberücksichtigt.

### 2.1.2 Modellversuche

Im Rahmen des Projekts zur Optimierung von Flachkielen wurden Modellversuche mit der Segelyacht *Dyna* – dem Segeldynamometer der TU Berlin – und zwei Kielvarianten im Maßstab 1:2,5 in der ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der TU Berlin durchgeführt. Am Flachkiel konnten optional Winglets an drei verschiedenen Längspositionen befestigt werden. Wegen des Maßstabeffektes war die Verwendung von Turbulenzgeneratoren notwendig, deren Einfluss bei der Auswertung berücksichtigt wurde. Ergebnisse des Messprogramms mit unterschiedlichen Krängungen und Abdriftwinkeln werden in Abschnitt 3 vorgestellt.

Für aerodynamische Untersuchungen besteht eine Kooperation zwischen der TU Berlin und der University of Auckland, Neuseeland. Für Modellversuche im dortigen Twisted Flow Wind Tunnel (TFWT) wurde ein 15 % Windkanal-Modell der Segelyacht und der verschiedenen Segel des Berliner Segeldynamometers hergestellt. Untersuchungen zur Messung der aerodynamischen Kräfte können in diesem Windkanal unter Berücksichtigung eines Windgradienten durchgeführt werden. Erste Daten aus Modellversuchen wurden von HANSEN ET AL. (2002) mit den Messungen aus der Großausführung des Segeldynamometers verglichen.

### 2.1.3 Numerische Strömungsanalyse

Mit Hilfe numerischer Verfahren können Strömungsanalysen für alle Komponenten der Segelyacht vorgenommen werden. In der Regel werden diese Komponenten einzeln betrachtet, denn je komplexer die Geometrie ist, desto aufwendiger wird der Modellieraufwand für das Berechnungsgitter und die benötigte Rechenzeit steigt drastisch an. Es stehen zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren zur Verfügung:

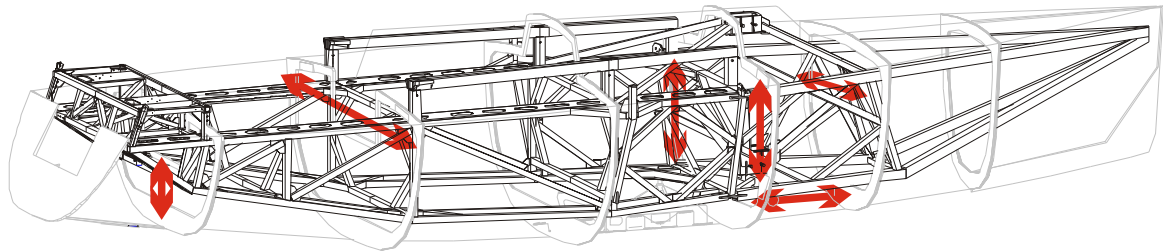
**Potentialtheoretische Verfahren** Für aerodynamische und hydrodynamische Analysen finden potentialtheoretische Verfahren ein breites Einsatzspektrum. Die Rechenzeiten sind relativ kurz, so dass eine große Anzahl von Variationen analysiert werden kann. Zur Diskretisierung des Rechengebiets muss die zu untersuchende Geometrie lediglich mit Oberflächenpanels belegt werden. Bei potentialtheoretischen Verfahren ist das

Fluid reibungsfrei, d.h. viskose Effekte – und damit auch Ablösung – lassen sich nicht erfassen. Potentialtheoretische Verfahren sind besonders gut geeignet für die Untersuchung von Anhängen wie Kiel und Ruder. Zur Untersuchung der Hydrodynamik an Kielen wurden umfangreiche Berechnungen für verschiedene Kielkonfigurationen unter Verwendung des Panelcodes SHIPFLOW (JANSON, 1997) durchgeführt. Die Analyse der Aerodynamik von Rigg und Segeln ist mit potentialtheoretischen Verfahren nur für Am-Wind-Fälle möglich, da hierbei keine oder nur geringe Strömungsablösung zu erwarten ist. Für Downwind-Fälle – bei massiver Strömungsablösung – sind derartige Verfahren ungeeignet.

**RANSE-Verfahren** Mit RANSE (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) Verfahren sind Strömungsberechnungen unter Berücksichtigung der Viskosität möglich. Dazu werden die zeitlich gemittelten Navier Stokes Gleichungen gelöst. Für die Berechnung ist eine Diskretisierung des gesamten Strömungsgebiets in Kontrollvolumina nötig. Aufgrund der für derartige Verfahren erforderlichen immensen Rechenzeiten ist deren Einsatz lediglich wenigen Anwendungen vorbehalten. So benötigen GRAF UND WOLF (2002) für die 3-D Berechnung einer komplexen Rigg-Segelkonfiguration 3,8 Mio Gitterzellen und COWLES ET AL. (2003) geben für die Untersuchung einer kompletten Unterwasserkonfiguration (Rumpf, Flügelkiel und Ruder) für die im Americas Cup siegreiche Yacht Alinghi die Verwendung von ca. 5 Mio Gitterzellen an. Für die genannten Berechnungen wurden auf modernsten Mehrprozessor-Rechnerclustern (16 bis 22 Prozessoren) über 10 h Rechenzeit benötigt. Es ist allerdings zu erwarten, dass diese Verfahren in den kommenden Jahren mit ansteigender Rechnerleistung schnell an Bedeutung und Verbreitung gewinnen werden.

### 2.1.4 Großausführungsversuche

Die Durchführung von Großausführungsversuchen hat einen besonderen Stellenwert bei den an der TU Berlin durchgeführten Untersuchungen. Dafür wird die Forschungssegelyacht *Dyna* eingesetzt, die im Rahmen eines vierjährigen BMBF (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie) Projektes an der TU Berlin entwickelt

Bild 2: Funktionsprinzip der Riggwaage *Working principle of the rig balance*

Länge über Alles	$LOA$	9.99 m
Länge Wasserlinie	$LWL$	9.50 m
Maximale Breite	$B_{Max}$	2.99 m
Breite Wasserlinie	$B_{WL}$	2.35 m
Tiefgang Rumpf	$T_{Rumpf}$	0.36 m
Tiefgang Standardkiel	$T_{Stdkiel}$	2.07 m
Tiefgang Flachkiel	$T_{Flachkiel}$	1.58 m
Verdrängung segelfertig	$\nabla$	4.56 m <sup>3</sup>

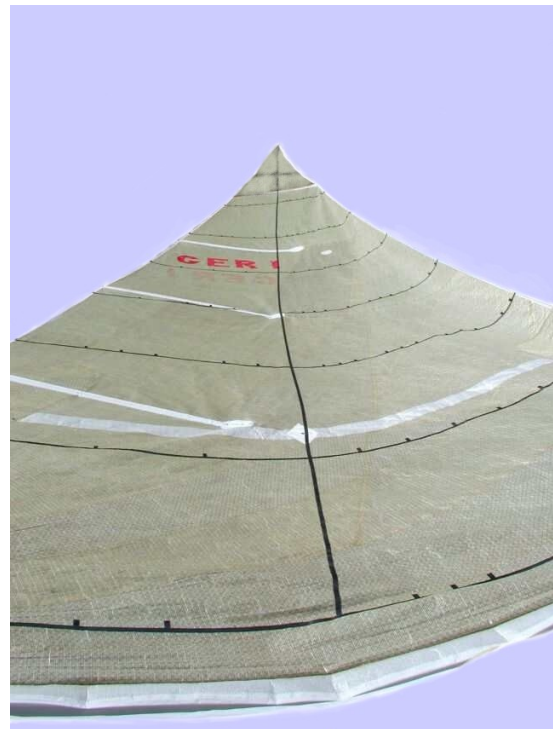
Tabelle 1: Hauptabmessungen der Forschungsyacht *Dyna* der TU Berlin

*Main dimensions of TU Berlin's sail force dynamometer Dyna*

wurde, BRANDT ET AL. (1997). Tabelle 1 fasst die Hauptabmessungen des Schiffes zusammen.

Das wichtigste Kennzeichen des Segeldynamometers ist ein gitterförmiger Riggträger, der sich über die gesamte Länge und Breite des Innenschiffs erstreckt und nur am Heck und im Bereich der Fockschotschienen oberhalb des Decks sichtbar wird. Auf dem Träger sind Mast, Wanten und Stage sowie sämtliche Schotholepunkte und Winschen angeordnet, so dass die von Rigg und Segeln aufbrachten Kräfte vollständig in diesen Rahmen eingeleitet werden. Der Rahmen ist an sechs Stellen statisch bestimmt mit dem Rumpf verbunden. An den Verbindungsstellen sind kalibrierte Kraftmesszellen installiert, so dass der Riggträger eine Sechs-Komponentenwaage bildet. Damit lassen sich die aerodynamischen Kräfte und Momente in allen sechs Freiheitsgraden aufnehmen. Die Struktur des Riggträgers weist eine hohe Steifigkeit auf, sodass die gleichen Riggspannungen wie bei üblichen Schiffen gefahren werden können. Bild 2 zeigt die Funktionsweise des im Schiffsinnern installierten Riggträgers.

Zur Beurteilung der Segelleistung ist neben den Kräften und Momenten auch die Erfassung

Bild 3: *Dyna*-Großsegel mit Messmarkierungen  
*Main sail with measurement grid*

relevanter Größen zur Beschreibung des Segelzustandes notwendig. Dies sind vor allem Schiffsgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Windfallwinkel, ferner die – mit einem fiberoptischen Lagereferenzsystem gemessenen – Lagewinkel des Schiffes, Krängung und Trimmwinkel. Eine Beschreibung des Messsystems Segeldynamometer findet sich in HOCHKIRCH UND BRANDT (1999).

Zur Untersuchung der Segelgeometrien wird zur Zeit ein optisches Vermessungssystem entwickelt. Dabei werden die Segel mit an Bord installierten Digitalkameras während der Messfahrten auf allen gesegelten Kursen fotografiert. Zur Erken-

nung der Segelform sind die Segel mit einem Raster von Messpunkten versehen. Eine dafür entwickelte Software liest die Messpunkte automatisiert aus den Bilddateien aus. Hierfür sind im Segel horizontale, mit unterschiedlichen Kennungen versehene Profilstreifen, eingeklebt (siehe Bild 3). Mit dem Auslesen der Bilddateien und einer Transformation werden die 3-D Koordinaten der Messpunkte gewonnen, aus denen sich eine vollständige 3-D Geometrie der Segel aufbauen lässt. Das so gewonnene Flying Shape der Segel steht zusammen mit den Messwerten der aerodynamischen Kräfte für weitere Analysen zur Verfügung.

Auch für die Untersuchung der o.g. Kielkonfigurationen wurden Großausführungsmessfahrten mit der *Dyna* durchgeführt. Mit diesen Untersuchungen lässt sich die Segelleistung für das Gesamtsystem in Abhängigkeit von Krängung, Trimm, Wind und Umwelteinflüssen, wie Seegang, erfassen und analysieren.

## 2.2 Modelle für die Geschwindigkeitsprognose

Zur Bestimmung der Gleichgewichtszustände werden für die einzelnen Komponenten geeignete mathematische Modelle verwendet, um die Kräfte für den jeweiligen Betriebszustand (Geschwindigkeit, Krängung, Abdrift, etc.) zu ermitteln. Im folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Modelle gegeben. Eine detailliertere Diskussion kann HOCHKIRCH (2000) entnommen werden.

### 2.2.1 Hydrodynamisches Modell

**Rumpf** Die hydrodynamischen Kräfte können aus dem hydrodynamischen Widerstand des Rumpfes ohne Anhänge

$$R_H = R_F(V_S, \varphi) + R_\varphi(F_N, \varphi) + R_R(F_N) \quad (1)$$

berechnet werden. Dabei lässt sich der Reibungswiderstand nach ITTC mit

$$R_F(V_S, \varphi) = (1+k) C_F \frac{\rho_{H_2O}}{2} V_S^2 A_{WS_{Rumpf}}(\varphi) \quad (2)$$

bestimmen. Den Formfaktor  $k$  erhält man nach der Methode von PROHASKA (1966) aus Modellversuchen, die benetzte Oberfläche  $A_{WS_{Rumpf}}$  – abhängig von der Schiffslage – durch Integration der Aussenhaut.

Da moderne Segelyachtrümpfe keinen wesentlichen Beitrag zur Produktion des Auftriebs leisten (wohl aber die Effektivität von Kiel und Ruder beeinflussen), wird für den Rumpf kein induzierter Widerstand berücksichtigt und in dem Modell für den Kiel der induzierte Widerstand des Gesamtsystems ermittelt.

Ein Zusatzwiderstand durch Krängung wird mit

$$R_\varphi(F_N, \varphi) = a_0 \cdot \forall F_N^2 \varphi + R_{Reeling} \quad (3)$$

ermittelt, wobei der Parameter  $a_0$  von HOCHKIRCH (2000) aus einer Regression von Grossausführungsmessungen übernommen wird. Der Term  $R_{Reeling}$  wird analog zu KERVIN (1978) eingeführt, um den zusätzlichen Widerstand einer durchs Wasser gezogenen Reeling zu simulieren. Dieser beträgt für Krängungswinkel über  $30^\circ$ :

$$R_{Reeling} = (R_R + R_F) \cdot 0.0008 \cdot (\varphi - 30)^\circ \quad (4)$$

Die Einführung des Terms  $R_{Reeling}$  dient hierbei weniger der Erfassung des wirklichen Zusatzwiderstandes der Reeling. Vielmehr soll durch Berücksichtigung dieser Kraft bei der Bestimmung des Gleichgewichtes verhindert werden, dass Krängungswinkel über  $30^\circ$  auftreten. Durch die quadratische Formulierung dieses Ausdrucks bleibt der funktionale Zusammenhang für den Zusatzwiderstand differenzierbar und Optimierungsstrategien höherer Ordnung können verwendet werden.

Der Restwiderstand wird mit

$$R_R(F_N) = \forall^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\rho_{H_2O}}{2} v_s^2 \sum_{i=0}^{i < m} v_i \cdot N_{i,k}(t(F_N)) \quad (5)$$

bestimmt, wobei die Koeffizienten  $v_i$  für die B-Spline-Polynome  $N_{i,k}(t(F_N))$  aus den Großausführungsversuchen aus HOCHKIRCH (2000) übernommen werden.

Da der Widerstand gegen die Strömungsrichtung definiert ist, ist eine Koordinatentransformation bezüglich des Abdriftwinkels  $\lambda$  notwendig.

Hydrostatische Kräfte werden durch Integration der Rumpfgeometrie für die jeweilige Schwimmlage ermittelt. Dabei werden die Offsetpunkte der Geometrie mit Hilfe der Trapezregel integriert und der Verdrängungsschwerpunkt  $\bar{CB}$  (im schiffsfesten Koordinatensystem) bestimmt. Damit erhält man

die folgenden generalisierten Kräfte aus der Hydrostatik:

$$\vec{F} = (0, 0, -\rho_{H_2O} \cdot g \mathcal{V}) \quad (6)$$

$$\vec{M} = \mathbb{T}_{BA} \vec{C}B \times \vec{F} \quad (7)$$

Kräfte und Momente durch einzelne Massen  $m_i$  mit einem Schwerpunkt  $\vec{C}G_i$  (im schiffsfesten Koordinatensystem) werden mit

$$\vec{F} = (0, 0, -g m_i) \quad (8)$$

$$\vec{M} = \mathbb{T}_{BA} \vec{C}G_i \times \vec{F} \quad (9)$$

bestimmt.  $\mathbb{T}_{BA}$  ist hierbei die Transformationsmatrix von dem schiffsfesten in das absolute Koordinatensystem. Weiterhin ist zu beachten, dass für das Gewicht der Mannschaft eine Verschiebung in der Querachse berücksichtigt wird, um das *Ausreiten* zu simulieren. Die Querkomponente der Crewposition wird abhängig vom Krängungswinkel mit

$$CG_{Y_{Crew}} = 0.45 \cdot \begin{cases} +B_{max} & \text{für } \varphi \geq 6^\circ \\ -B_{max} & \text{für } \varphi \leq -6^\circ \end{cases} \quad (10)$$

angenommen. Für Winkel zwischen  $6^\circ$  und  $-6^\circ$  wird eine differenzierbare Übergangsfunktion verwendet.

**Kiel** Durch den Kiel wird ein Widerstand

$$R_{Kiel} = R_F + R_I \quad (11)$$

verursacht, der sich als Summe von Reibung ( $R_F$ ) und dem vom produzierten Auftrieb  $L$  abhängigen induzierten Widerstand  $R_I$  ergibt.

Zur Bestimmung des Auftriebs wird der Gradient des Auftriebsbeiwerts benötigt. Diesen erhält man nach WHICKER UND FEHLNER (1958) mit

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = 2\pi \frac{AR_E}{2 + \sqrt{AR_E + 4}}. \quad (12)$$

Das darin enthaltene effektive Streckungsverhältnis  $AR_E$  unterscheidet sich vom geometrischen Streckungsverhältnis des Kiels, das sich aus der Lateralfäche  $A_{LAT}$  und der mittleren Sehnenlänge  $c$  als

$$AR = \frac{A_{LAT}}{c^2}, \quad (13)$$

ergibt, durch Effekte aus Spiegelung, Krängung und Umrisssgeometrie. Mit Gl. (12) folgt für den Auftrieb

$$L = \frac{\rho_{H_2O}}{2} V_S^2 \cdot A_{LAT} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \lambda \cos \varphi. \quad (14)$$

Mit dem Oswald-Gütefaktor  $e$ , der für eine optimale – d.h. elliptische – Zirkulationsverteilung bei einem Tragflügel mit hohem Streckungsverhältnis den Wert 1 hat (VAN OOSSANEN, 1987) und sonst kleinere Werte annimmt, erhält man schließlich den induzierten Widerstand

$$R_I = \frac{\rho_{H_2O}}{2} V_S^2 \cdot A_{LAT} \frac{C_L^2}{e \pi AR_E}. \quad (15)$$

Der Reibungswiderstand ergibt sich zu

$$R_F = (1 + k) \frac{\rho_{H_2O}}{2} V_S^2 \cdot A_{WS_{Kiel}} C_F. \quad (16)$$

Der Formfaktor  $k$  wird nach HOERNER (1965) in Abhängigkeit vom Dickenverhältnis  $t/c$  mit

$$k = 2.0 \frac{t}{c} + 60.0 \left( \frac{t}{c} \right)^4 \quad (17)$$

und der Reibungsbeiwert  $C_F$  nach ITTC mit

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_N - 2)^2} \quad (18)$$

berechnet.  $A_{WS_{Kiel}}$  bezeichnet die benetzte Oberfläche des Kiels.

Auch hier muss eine Koordinatentransformation bezüglich des Abdriftwinkels berücksichtigt werden, um die Kräfte im schiffsfesten Koordinatensystem vergleichen zu können.

Die durch die hydrodynamischen Kräfte verursachten Momente werden mit

$$\vec{M} = \mathbb{T}_{BA} \vec{C}E_{Kiel} \times \vec{F} \quad (19)$$

berechnet. Dabei wird der resultierende Druckpunkt  $\vec{C}E_{Kiel}$  vereinfachend im Schnittpunkt der Höhe des Flächenschwerpunktes mit der Viertel-Linie des Kielprofils angenommen.

**Ruder** Die Berechnung der Kräfte für das Ruder verläuft analog und wird von HOCHKIRCH (2000) detailliert beschrieben.

## 2.2.2 Aerodynamisches Modell

Auftriebskraft  $L$  und Widerstandskraft  $D$  können mit dem scheinbaren Windeinfallswinkel  $\beta_A$  aus den Messungen der Großausführung für die Vortriebskraftkomponente  $F_X$  und die Querkraftkomponente  $F_Y$  bestimmt werden.

$$L = F_X \sin \beta_A + F_Y \cos \beta_A \quad (20)$$

$$D = F_X \cos \beta_A - F_Y \sin \beta_A \quad (21)$$

Daraus lassen sich der Auftriebsbeiwert

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho_L}{2} V_{WA}^2 AS} \quad (22)$$

und der Widerstandsbeiwert

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho_L}{2} V_{WA}^2 AS} \quad (23)$$

ableiten, wobei  $\rho_L$  die Dichte der Luft,  $V_{WA}$  die scheinbare Windgeschwindigkeit auf Höhe des Segelschwerpunktes und  $AS$  die Segelfläche ist. Für eine geeignete Modellierung der Kraftbeiwerte werden deren Bestandteile näher betrachtet. Die Auftriebs- und der Widerstandsbeiwerte hängen vom scheinbaren Windeinfallswinkel ab. Der Widerstandsbeiwert folgt aus einem Widerstandsterm, der durch viskose Effekte hervorgerufen wird ( $C_D^{(vis)}(\beta_A)$ ), dem Widerstand des Mastes und des stehenden Gutes ( $C_{DP}(\beta_A)$ ) sowie dem induzierten Widerstand, der vom Auftrieb abhängig ist ( $C_{DI}(C_L)$ ). Um die Effekte des Segeltrimms wiederzugeben, führte KERVIN (1978) einen Trimmfaktor  $\tau$  und einen Refffaktor  $\sigma$  ein, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen können. Bei optimalem Segeltrimm und ungeriffter Segelfläche haben beide den Wert 1. Mit ihnen lassen sich die aerodynamischen Kraftbeiwerte formulieren:

$$C_L = C_L^{(opt)} \tau \sigma^2 \quad (24)$$

$$C_D = C_D^{(vis)} \sigma^2 + C_{DI} + C_{DP} \quad (25)$$

Zur genaueren Beschreibung des induzierten Widerstandes führt JACKSON (2001) einen Twistparameter  $t$  ein. Dieser Parameter, der ebenfalls Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, gibt den durch Verwölbung des Segels – das sogenannte Öffnen –

entstehenden Effekt wieder, dass der Segeldruckpunkt weiter nach unten wandert (siehe Gl. (28)) und durch die so entstehende ungünstigere Umrissform des Segels der induzierte Widerstand ansteigt. Dies kommt in der Formulierung

$$C_{DI} = \kappa_0 C_L^2 (1 + kt^2) \quad (26)$$

zum Ausdruck. Die darin enthaltenen Größen  $\kappa_0$  und  $k$  sind Konstanten und hängen von der Umrissform des Segels ab. Der Widerstandsanteil des Riggs kann mit den projizierten Flächen von Mast und stehendem Gut in Schiffslängsrichtung ( $AP_X$ ) und von der Seite ( $AP_Y$ ) sowie den zugehörigen Widerstandsbeiwerten ( $C_{WPX}$ ) und ( $C_{WPY}$ ) als

$$C_{DP} = \frac{C_{WPX} AP_X |\cos \beta_A| + C_{WPY} AP_Y |\sin \beta_A|}{AS} \quad (27)$$

ausgedrückt werden. Die Güte des mathematischen Ansatzes zur Modellierung der aerodynamischen Kräfte kann aus der Qualität der Übereinstimmung der Beiwerte nach Gl. (24) und (25) mit denen aus Gl. (22) und (23) abgelesen werden. Ein weiteres Kriterium ist ein Vergleich der Lage des Kraftangriffspunktes, dessen vertikale Position unter Verwendung des Twistparameters nach JACKSON (2001) als

$$ZCE_{(eff)} = HB + (ZCE - HB)(1 - t) \quad (28)$$

modelliert wird, und somit mit der aus Messungen ermittelten Position verglichen werden kann. Dazu sind in Abschnitt 3 vergleichende Ergebnisse von Modell- und Großausführungsversuch vorgestellt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vergleiche verschiedener Kielvarianten

Auf Basis von Modellversuchen in der Tiefwasserrenne der ZE VWS der TU Berlin zeigt Bild 4 den Vergleich der Segelleistung einer Flachkielvariation für die *Dyna* mit einem um 25 % reduzierten Tiefgang gegenüber der Standardkonfiguration. Während bei leichtem Wind der flache Kiel aufgrund der geringeren benetzten Oberfläche sowohl auf der Kreuz als auch vor dem Wind Vorteile bietet, ist bei

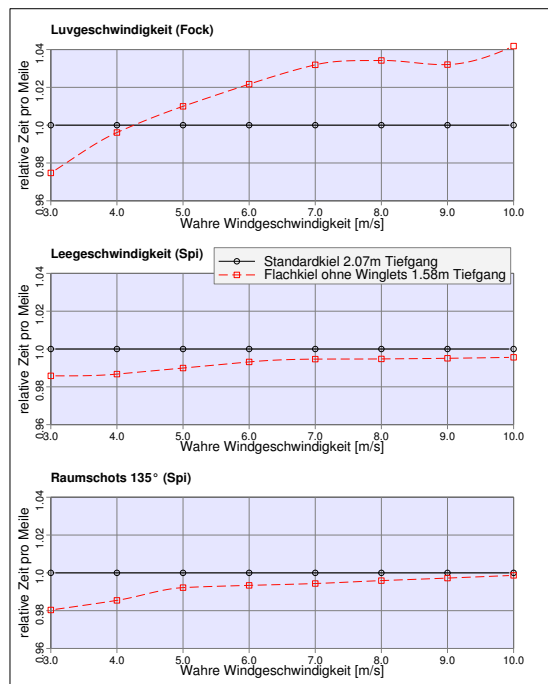


Bild 4: Vergleich der Geschwindigkeitsprognose für eine Flachkielvariation ( $T=1.58\text{ m}$ ) und den Standardkiel ( $T=2.07\text{ m}$ ) nach den Ergebnissen der Modellversuche

*Comparison of predicted velocities for shallow draft and standard keel using the tank-test results*

höheren Windgeschwindigkeiten mit starken Leistungseinbußen gegenüber der Standardkielvariante zu rechnen.

In einer Studie mit dem Panelcode SHIPFLOW wurden verschiedene Flachkielvarianten (siehe Bild 5) untersucht, wobei kurze Winglets berücksichtigt wurden, die an drei Positionen angebracht werden konnten. Beim Entwurf der Winglets wurde Wert darauf gelegt, dass diese praxistauglich für einen Dauereinsatz bei Serienyachten sind, d.h. es wurde kein extrem langes Streckungsverhältnis gewählt.

Bild 6 zeigt die aus den CFD-Rechnungen ermittelten Werte für das effektive Streckungsverhältnis und den Kehrwert des Oswald-Gütefaktors in Abhängigkeit des Krängungswinkels. Hierbei wurde für alle Kielkonfigurationen die gleiche Referenzfläche verwendet ( $A = 1.842\text{ m}^2$ , entsprechend  $c \cdot T_{max}$  für den Standardkiel), sodass die Zahlenwerte direkt miteinander vergleichbar sind.

Damit wird deutlich, dass die Flachkielvarian-

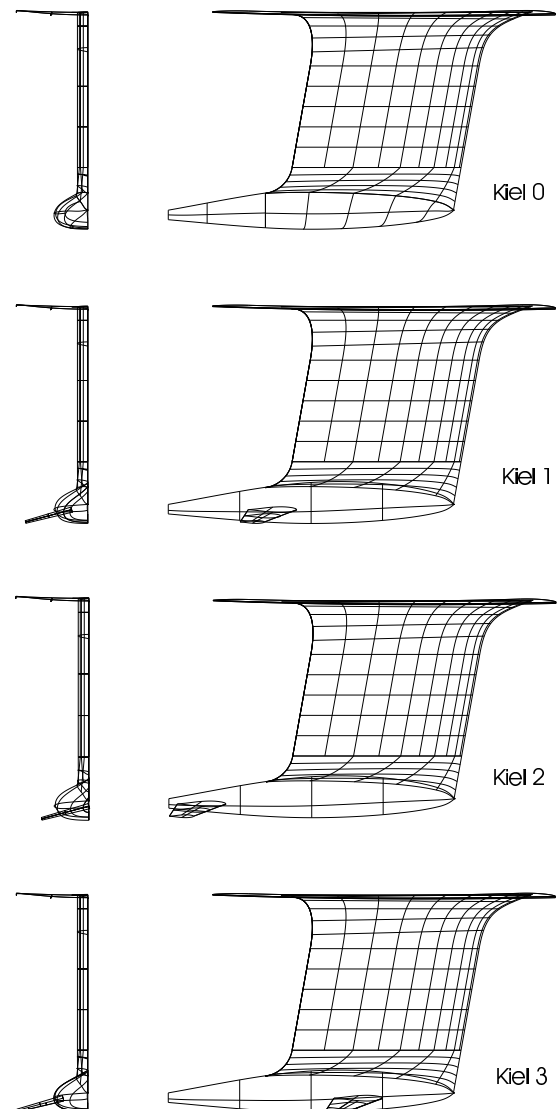


Bild 5: Die Flachkielvariante ohne Flügel sowie mit drei verschiedenen optionalen Flügelpositionen

*Shallow draft keel with optional winglets at three different longitudinal positions*

ten sowohl ein geringeres Streckungsverhältnis als auch einen ungünstigeren Oswald-Gütefaktor und damit einen höheren induzierten Widerstand als der tiefe Standardkiel haben.

Winglets am Flachkiel verbessern in allen Fällen das effektive Streckungsverhältnis. Allerdings entscheidet die Position der Winglets – und damit die Wechselwirkung mit der Umströmung der Kiel-flosse – ob dadurch die Zirkulationsverteilung und

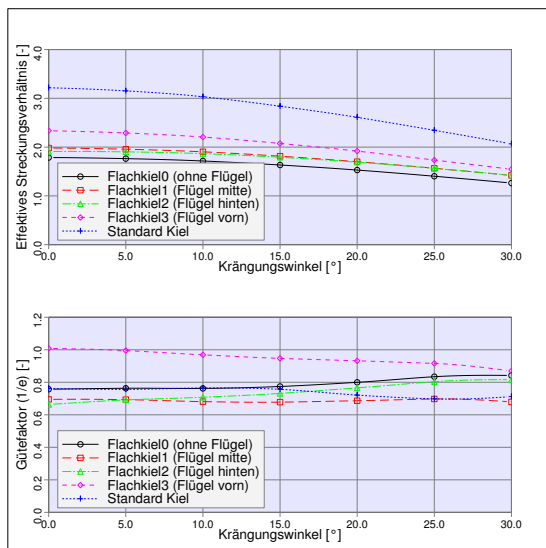


Bild 6: Vergleich der hydrodynamischen Eigenschaften aller Kielkonfigurationen aus den Ergebnissen der Strömungssimulation mit SHIPFLOW  
*Comparison of hydrodynamic characteristics of all keel configurations as calculated by SHIPFLOW*

somit der induzierte Widerstand günstig beeinflusst wird. Obwohl die Position weit vorne ein sehr günstiges Streckungsverhältnis bringt, kostet der zusätzliche Auftrieb unangemessen viel Widerstand.

Da alleine aus der Betrachtung des effektiven Streckungsverhältnisses und des Oswald-Güterfaktors keine Bewertung der Gesamtkonfiguration möglich ist, wurden für die unterschiedlichen Varianten wieder Geschwindigkeitsprognosen durchgeführt. In Bild 7 erkennt man, dass auf Kursen vor dem Wind und mit raumem Wind die Flügel durch die zusätzliche benetzte Oberfläche einen Nachteil bedingen. Auf der Kreuz kann mit richtig positionierten Winglets jedoch ein größerer Geschwindigkeitsvorteil erzielt werden. Dabei ist die mittlere Position der Winglets (Kiel 1) am günstigsten.

### 3.2 VPP Berechnung mit unterschiedlichen Hull-Modulen

In Bild 8 ist ein Vergleich der Leistungsprognoserechnung mit unterschiedlichen Modulen für die Berechnung des Rumpfwiderstandes dargestellt. Es wurde das vollständige Kursspektrum für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten mit Großsegel

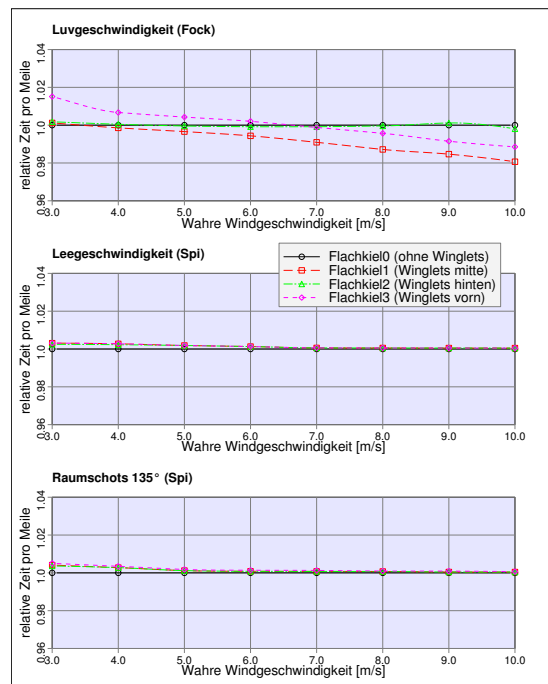


Bild 7: Vergleich der Geschwindigkeitsprognose der verschiedenen Flachkielkonfigurationen unter Verwendung der mit SHIPFLOW prognostizierten hydrodynamischen Eigenschaften  
*Comparison of predicted velocities for the different shallow draft keel configurations using the hydrodynamic characteristics as calculated by SHIPFLOW*

und GIII (100 % Genua) gerechnet. Die durchgezogenen Linien zeigen jeweils die Ergebnisse unter Verwendung des Rumpf-Moduls, in dem der Rumpfwiderstand nach dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Verfahren ermittelt wird. Die gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse für die gleichen Segelzustände, für die die Berechnung des Rumpfwiderstandes aus der systematischen Delfter Modellrumpfsreihe nach KEUNING UND SONNENBERG (1999) bestimmt wurde. Die nicht zu vernachlässigenden Unterschiede zeigen noch einmal deutlich, dass die Absolutwerte einer Leistungsprognose stark von den verwendeten Verfahren abhängen. Für einen Vergleich unterschiedlicher Yachtkonfigurationen muss auf jeden Fall immer das selbe Analyseverfahren verwendet werden. Nur dies gewährleistet eine zuverlässige Aussage über die qualitative Rangfolge der verglichenen Konfigurationen.

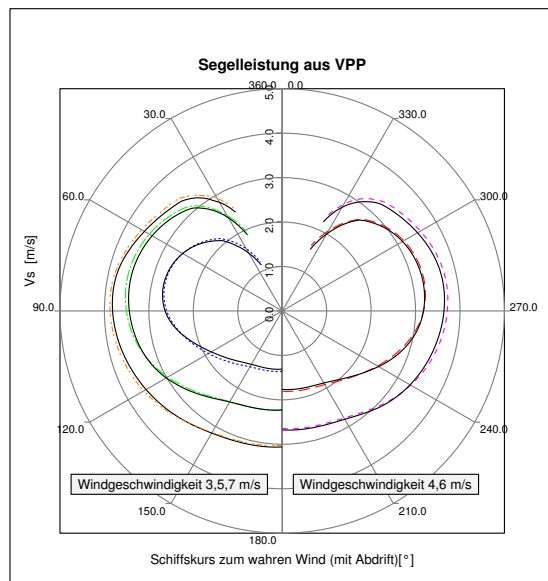


Bild 8: Vergleich VPP-Rechnung mit unterschiedlichen Rumpf-Modulen  
*Comparison of VPP-calculation using different hull force modules*

### 3.3 Vergleiche von aerodynamischen Messergebnissen für Großausführungs- und Modellversuche

Bild 9 zeigt gemessene Werte für die Höhe des Kraftangriffspunkts  $ZCE$  aus Modellversuchen und aus Großausführungsmessungen in Abhängigkeit von der Kraftwirkungsrichtung. Obwohl weder die Einzelergebnisse noch der Verlauf nach beiden Messverfahren übereinstimmen, ist festzustellen, dass die weit verbreitete Annahme des Kraftangriffspunkts im Flächenschwerpunkt des Segels nicht zu vertreten ist. Insbesondere am Wind ist die starke Streuung auf systematische Trimmänderungen zurückzuführen, die geeignet modelliert werden müssen. Am Wind werden bei stärkerem Wind die Segel im oberen Bereich zunehmend geöffnet, um die Seitenkräfte zu reduzieren und den Kraftangriffspunkt nach unten zu verschieben, wodurch das krägende Moment reduziert wird. In Bild 9 finden sich die Am-Wind-Kurse bei Werten der resultierenden Kraft zwischen  $70^\circ$  und  $80^\circ$  zur Schiffslängsachse wieder. Dort wandern die in der Großausführung gemessenen Werte von  $ZCE$  nach unten. Bei den Modellversuchsmessungen ist dieser Trend nicht zu beobachten, da die Segel üblicherweise zur Maximierung der Vortriebskraft ge-

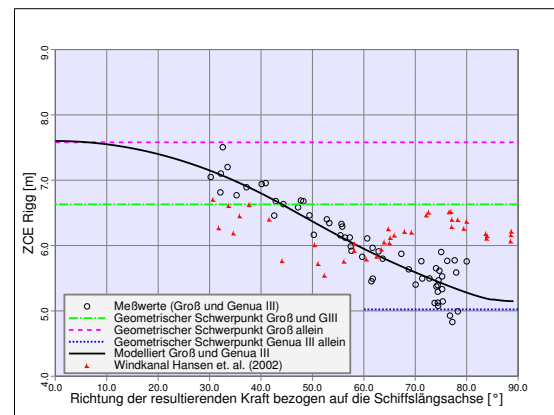


Bild 9: Höhe des aerodynamischen Kraftangriffspunkts in Abhängigkeit der Kraftwirkungsrichtung  
*Vertical position of aerodynamic centre of effort versus effective force direction*

trimmt werden, ohne zu berücksichtigen, ob dabei ein unzulässig großes Krängungsmoment auftritt. Dies lässt wiederum den Rückschluss zu, dass die Segelgeometrien im Windkanal nicht mit denen beim realen Segeln (in der Großausführung) übereinstimmen können. Eine geeignete Modellierung aerodynamischer Kräfte, die dem Verlauf der Position des Kraftangriffspunkts Rechnung trägt, kann nur aus den Ergebnissen der Großausführungsmessungen abgeleitet werden.

### 3.4 Vermessung des Flying Shape der Segel

Zur Bestimmung der tatsächlich während des Segelns auftretenden Segelgeometrien werden diese bei zukünftigen Messfahrten mittels eines fotografischen Vermessungssystems auf der *Dyna* erfasst. Dazu wird ein On-Board System installiert, d.h. die Kameras zur Erfassung der Segelgeometrien werden auf dem Schiff montiert. Die Notwendigkeit zur Vermessung der realen Segelgeometrien zeigen RANZENBACH UND KLEENE (2002), indem sie anhand von Geometrievermessungen von Modellsegeln im Windkanal das sog. Flying Shape der Segel mit dem Design Shape vergleichen und insbesondere für Offwind Segel eklatante Abweichungen in den Geometrien feststellen (siehe Bild 10). Bild 11 zeigt eine ebene Darstellung der aus dem Vermessungsnetz generierten Geometrie für die GIII der *Dyna* in der Großausführung.

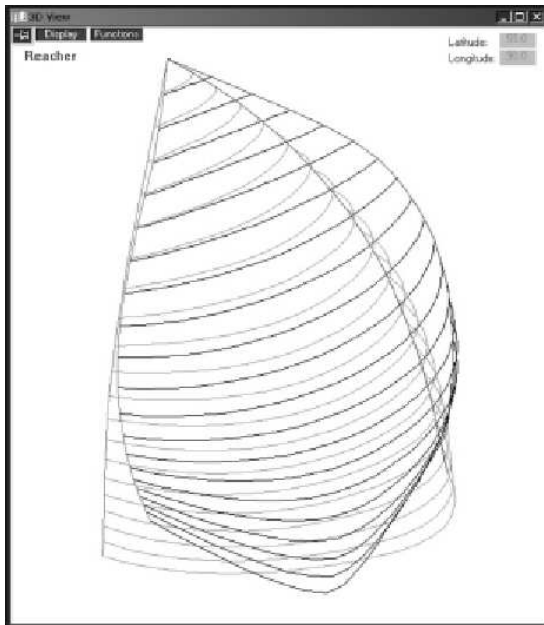


Bild 10: Vergleich von Design Shape und Flying Shape eines Offwind Segels aus RANZENBACH UND KLEENE (2002)  
*Comparison of design shape and flying shape of an offwind sail*

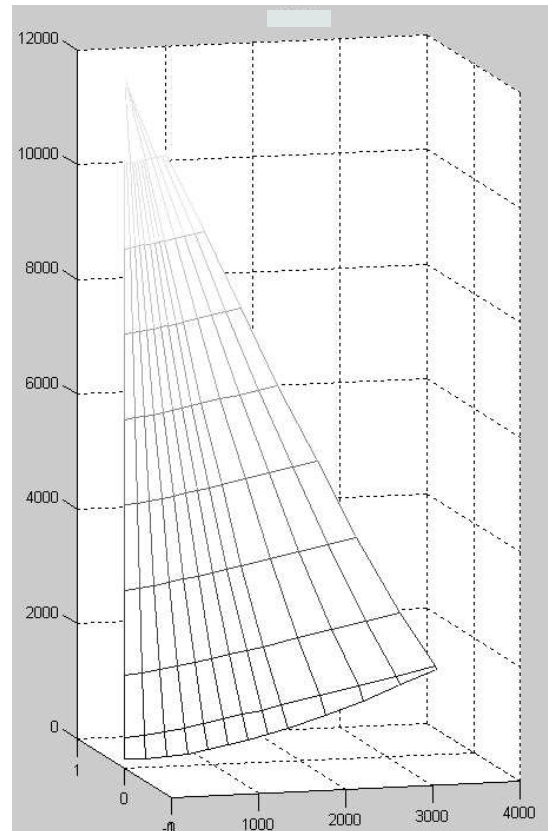


Bild 11: Vermessungsnetz der Genoa III  
*Measurement grid of the Genoa III*

## 4 Automatisierte Optimierung

Mit einer parameterischen Beschreibung der Kielgeometrie und eines numerischen Analysewerkzeugs ist es möglich, eine vollständig automatisierte Optimierung verschiedener Konfigurationen durchzuführen. Bild 12 zeigt schematisch den Ablauf eines solchen Optimierungsprozesses: Ausgehend von einer anfänglichen Wahl der Formparameter wird durch den parametrischen Modellierer eine Geometrie erzeugt, deren hydrodynamische Eigenschaften dann von einem numerischen Analysewerkzeug berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden in dem Geschwindigkeitsprognoseverfahren eingesetzt und im Vergleich zu einer Basiskonfiguration bewertet. Mit Hilfe einer Optimierungsstrategie werden daraufhin die Formparameter geändert und eine neue Analyse gestartet. Während dieses Optimierungszyklus müssen verschiedene Tests zeigen, ob die Ergebnisse der numerischen Simulation ggf. ungültige Lösungen produziert haben. Im folgenden wird ein Beispiel für eine derartige automatische Optimierung gezeigt.

### 4.1 Optimierung der Kielumrissform

Da die Kielform immer sowohl die Hydrodynamik als auch mit dem im Flossen- und Bombenvolumen enthaltenen Ballast die Stabilität beeinflusst, ist bereits eine einfache Optimierung der Flossenform eine komplexe Aufgabe. KEUNING UND SONNENBERG (1999) haben eine systematische Variation von Kielformen veröffentlicht und Regressionsformeln zur Extrapolation aus diesen Versuchen für andere Kielformen angegeben. Diese Extrapolation wird als ein optionales Modul für das Leistungsprognoseprogramm implementiert und in der folgenden Optimierung zur Bestimmung der Hydrodynamik der Kiele verwendet.

Für die Geometriedefinition wird ein parametrisches Kielmodell verwendet, mit dem zunächst eine dem Standardkiel der *Dyna* ähnliche Kielform mit zwei freien Variablen erzeugt wird: Zum einen die Streckung (BASESPAN), zum anderen die Profilhöhe (BASECHORD). Die hierfür definierten Gül-

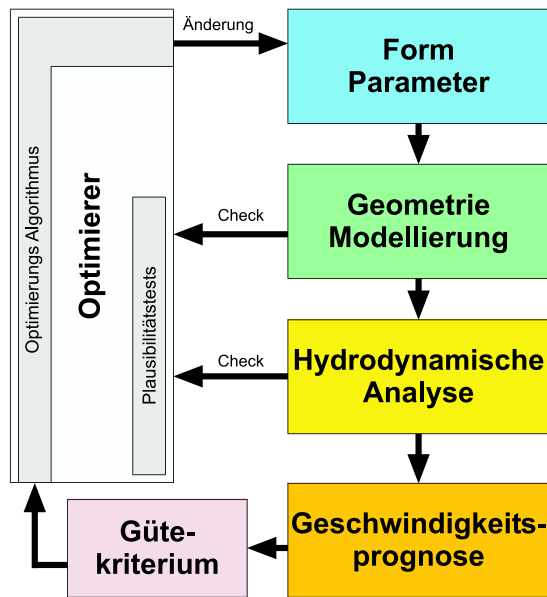


Bild 12: Schematische Ablauf der automatisierten Optimierung  
*Scheme of the automated optimization procedure*

Freie Variable	Startwert	min.	max.
BASESPAN	1.10 m	0.80 m	1.20 m
BASECHORD	0.89 m	0.60 m	1.50 m

Tabelle 2: Freie Variablen und Gültigkeitsbereiche und Anfangswerte für die Optimierung der Umrissform des Kiels  
*Free variables, feasible ranges, and initial values for the optimization of keel contour*

tigkeitsbereiche sind in Tabelle 2 aufgeführt. Gesucht wird eine Flachkielkonfiguration, die nicht mehr als 75% des Tiefgangs der Standardkielvariante hat. Der Startwert für BASECHORD wurde von dem Standardkiel übernommen. Es ist zu beachten, dass die Profilform in der Modellierung konstant gehalten wird, d.h. eine Verkleinerung der Sehnenlänge bewirkt auch eine proportionale Abnahme der Dicke der Flosse und eine quadratische Abnahme des Profilquerschnitts und damit schließlich eine ebenfalls quadratische Abnahme des möglichen Ballastvolumens.

Volumen, benetzte Oberfläche und die für die Extrapolation benötigten Werte werden aus der digitalisierten Kielgeometrie von dem Programm zur parametrischen Formgenerierung berechnet. Vereinfachend wird angenommen, dass der Kiel immer vollständig unter Wasser ist und aus einem Material

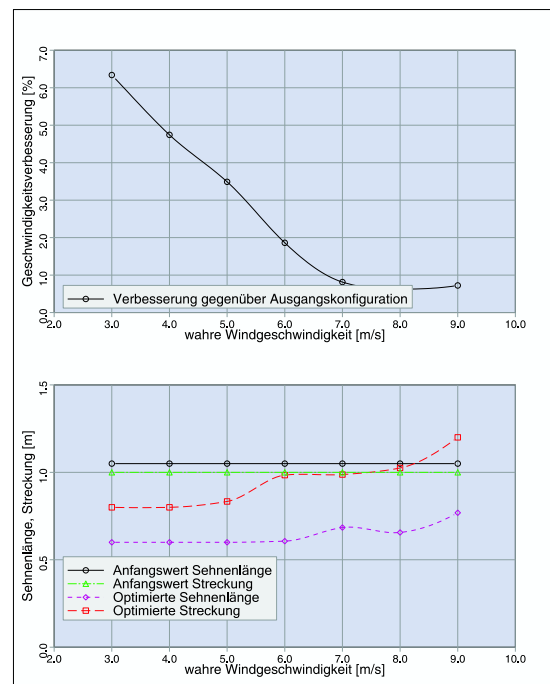


Bild 13: Ergebnisse der Optimierung der Umrissform des Kiels für die Dyna mit einer Fahrtencrew (300 kg). Bei der Optimierung wurde eine 6:4 Wichtung zwischen der Luvgeschwindigkeit und der Bootsgeschwindigkeit auf einem Raumwind-Kurs angenommen  
*Optimization results for keel contour of Dyna sailed by a 300 kg crew. Upwind and offwind speeds have been weighted 6:4 for the measure of merit, respectively*

mit einer homogenen Dichte von  $11015 \text{ kg/m}^3$  (Blei mit Stahlarmierung) besteht.

Als Gütekriterium wird eine Wichtung von 6:4 zwischen Luvgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit auf einem Raumwind-Kurs bei der jeweiligen wahren Windgeschwindigkeit angenommen. In Bild 13 sind die Ergebnisse für verschiedene wahre Windgeschwindigkeiten dargestellt. Dabei wird ein Crewgewicht von 300 kg angesetzt, was einer für dieses Schiff passenden Fahrtensegelcrew aus 4 Personen entspricht. Die obere Graphik zeigt die erzielte Geschwindigkeitsverbesserung in Abhängigkeit der Windstärke. Im unteren Teil der Graphik kann für die jeweilige Windgeschwindigkeit die optimierte Kombination aus Streckung und Sehnenlänge abgelesen werden.

Bei leichten Winden kann ein Geschwindig-

keitsvorteil von bis zu 5 % erreicht werden, wenn die in Tabelle 2 angegebenen Minimalwerte verwendet werden. Bei höheren Windgeschwindigkeiten ist vor allem eine vergrößerte Streckung des Kiels von Vorteil. Das Verlängern der Sehnenlänge ist dann erforderlich, wenn das Crewgewicht nicht mehr ausreicht, um die Krängung auszugleichen und daher mehr Volumen im Kiel untergebracht werden muss. In diesem Fall verringert sich zudem wegen der größeren Lateralfäche auch die Abdrift – ein Vorteil, der den Nachteil durch vergrößerten Reibungswiderstand ausgleichen kann.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Hochleistungssegelyacht ist ein komplexes System, dessen verschiedene Komponenten sich gegenseitig beeinflussen. Zur Optimierung einzelner aero- und hydrodynamischer Komponenten mit dem Ziel einer Verbesserung des Gesamtsystems, müssen die Interaktionen im Zusammenhang analysiert werden. Die Beurteilung der Güte unterschiedlicher Entwurfskonfigurationen wird mit Hilfe eines modularen Geschwindigkeitsprognoseprogramms vorgenommen, für das auf Grundlage numerischer Untersuchungen sowie von Modell- und Großausführungsversuchen Module zur genauen Beschreibung der unterschiedlichen Komponenten entwickelt werden.

Im Rahmen der Optimierung von Hochleistungsflachkielen werden verschiedene Kielkonfigurationen u.a. mit Winglets untersucht, wobei die Ursachen für eine vorteilhafte Konfiguration identifiziert werden konnten.

Die Analyse der aerodynamischen Kräfte aus Großausführungs- und Modellversuchen wird durch ein fotogrammetrisches Vermessungssystem zur Erfassung der realen 3-D Segelgeometrie im Großausführungsversuch ergänzt. Hieraus lassen sich Verbesserungen des aerodynamischen Modells für die Geschwindigkeitsprognose ableiten. Die Geometriedaten können als Eingangsdaten für numerische Untersuchungen verwendet werden.

Die vorgestellte automatisierte Optimierung unter Verwendung einer parametrischen Formgenerierung stellt ein effektives Entwurfswerkzeug dar, mit dem eine große Bandbreite an Varianten analysiert und eine optimierte Konfiguration gefunden werden

kann. Durch die Identifizierung der entscheidenden Parameter kann dieses Verfahren auf weitere Komponenten erweitert und für komplexere Optimierungen angewendet werden.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die durch ihre Förderung der Forschungsprojekte "Entwicklung hydrodynamischer Grundlagen für den Entwurf von Hochleistungsflachkielen" und "Aerodynamische Analyse zur Optimierung moderner Yachtriggs" diese Arbeiten an der TU Berlin ermöglicht hat. Weiterhin gilt unser Dank den Industriepartnern Peter Frisch GmbH, München, VDO Kienzle, Frankfurt/Rüthli sowie der Ancora Marina, Neustadt/Holstein, für ihre Unterstützung.

## 7 Schrifttum

- Abbott, I. H.** und **von Doenhoff, A. E.** (1958): *Theory of wing sections*, Dover Publications, Inc., New York
- Brandt, H., Hochkirch, K., Abdel-Maksoud, M.** und **Fröhlich, M.** (1997): *Leistungsanalysen für das Segeldynamometer (Performance predictions for the sail force dynamometer)*, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 91, Hamburg
- Cowles, G., Parolini, N.** und **Sawley, M. L.** (2003): *Numerical simulation using RANS-based tools for America's Cup design*, *The Sixteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Graf, K.** und **Wolf, E.** (2002): *CFD Investigations and design integrations for IACC yachts*, *High Performance Yacht Design Conference*, Auckland
- Hansen, H., Jackson, P.** und **Hochkirch, K.** (2002): *Comparison of wind tunnel and full-scale aerodynamic sail force measurements*, *High Performance Yacht Design Conference*, Auckland
- Hochkirch, K.** (2000): *Entwicklung einer Meßyacht zur Analyse der Segelleistung im Originalmaßstab (Design and construction of a*

*full scale measurement system for the analysis of sailing performance*), Mensch & Buch Verlag, Berlin, ISBN 3-89820-119-8, Dissertation, TU Berlin

**Hochkirch, K. und Brandt, H.** (1999): *Fullscale hydrodynamic force measurement on the Berlin Sail-Force-Dynamometer, The Fourteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis

**Hoerner, S. F.** (Herausgeber) (1965): *Fluid Dynamic Drag*, Selbstverlag, Brick Town, N.J.

**Jackson, P.** (2001): *An improved upwind sail model for VPP's, The Fifteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis

**Janson, C.-E.** (1997): *Potential flow panel methods for the calculation of free-surface flows with lift*, Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg

**Kervin, J. E.** (1978): *A velocity prediction program for ocean racing yachts revised to February, 1978*, Technical Report 78-11, Massachusetts Institute of Technology

**Keuning, J. A. und Sonnenberg, U. B.** (1999): *Approximation of the calm water resistance on a sailing yacht based on the "Delft Systematic Hull Series"*, *The Fourteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis

**Prohaska, C. W.** (1966): *A simple method for the evaluation of the form factor and the low speed wave resistance*, *Proceedings of the 11th International Towing Tank Conference*

**Ranzenbach, R. und Kleene, J.** (2002): *Utility of flying shapes in the development of offwind sail design databases*, *High Performance Yacht Design Conference*, Auckland

**van Oossanen, P.** (1987): *Optimizing the performance of keels for sailing yachts*, *Conference on Yachting Technology*, pp. 17–25

**Whicker, L. F. und Fehlner, L. F.** (1958): *Free-stream characteristics of a family of low-aspect ratio, all moveable control surfaces for application to ship design*, Report No. 933, David Taylor Model Basin