

# Grundlagen der hydrodynamischen Optimierung von Segelyachten

## *On the Principles of Hydrodynamic Optimization of Sailing Yachts*

Karsten Hochkirch\* und Hartmut Brandt\*

### Abstract

*Performance prediction of sailing yachts is based on mathematical models of the hydrodynamic and aerodynamic forces. These models are derived either from experiments with scaled models or from calculations with various numerical techniques. While scale effects influence the experimental results the numerical methods are nowadays not sufficient exact to produce quantitative correct results. Full scale measurements will therefore be employed to address these problems.*

## 1 EINLEITUNG

Bei der Entwicklung von erfolgreichen Segelyachten hat die Prognose der hydrodynamischen Eigenschaften des Bootsrumpfes eine hervorragende Bedeutung. Dabei werden Programme verwendet, welche die hydrodynamischen Eigenschaften des Rumpfes und die aerodynamischen Eigenschaften des Riggs mathematisch modellieren. Es werden für verschiedene Kurse zum Wind und Windgeschwindigkeiten die entsprechenden Kräfte und Momente am Unterwasserschiff und den Segeln berechnet und ein Gleichgewichtszustand bestimmt.

In dem folgenden Beitrag sollen die Verfahren zur Modellierung der hydrodynamischen Kräfte näher betrachtet werden. Dabei werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren diskutiert und ein laufendes Forschungsvorhaben vorgestellt, in dem die heute eingesetzten Verfahren verifiziert werden sollen.

## 2 VP-PROGRAMME

Die sogenannten VP-Programme (Velocity Prediction Program) enthalten verschiedene mathematischen Modelle für die einzelnen, an einer Segelyacht wirkenden Kraftkomponenten. Die

---

\*Institut für Schiffs- und Meerestechnik, Technische Universität Berlin, Sekr. SG-6, Salzufer 17-19, D-10587 Berlin, <http://www.ism.tu-berlin.de>

folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verschiedenen Methoden:

	Kraftkomponente	abhängig von	Methoden		
			experimentell	potentialtheoretisch	RANSE
<b>RIGG</b>	Vortrieb	Windstärke	z.B. Hazen (1980)	z.B. Milgram (1971)	z.B. Caponnetto et. al. (1999)
	Querkraft	Anströmwinkel			
	krägendes Moment	Krängung			
	gierendes Moment	Schiffsbewegung			
	trimmendes Moment				
<b>RUMPF</b>	Widerstand	Bootsgeschwindigkeit	z.B. Keuning und Sonnenberg (1999)		z.B. Fröhlich (1997)
	Querkraft	Krängungswinkel			
	aufrechtendes Moment	Abdriftwinkel			
	Giermoment	Ruderwinkel			
	Trimmmoment	Trimmwinkel			
<b>SEEGANG</b>	Zusatzwiderstand	Wellenhöhe	z.B. Gerritsma (1993)	z.B. Gerritsma und Beukelman (1972)	
		Seegangsspektrum			
		kurs zur See			

Einsatz in VP-Programmen:	fast immer	selten	sehr selten	unbekannt
---------------------------	------------	--------	-------------	-----------

Die unterschiedliche Schattierung der einzelnen Felder stellt dabei die Bedeutung dieser Methoden für den heutigen Yachtentwurf dar. Die weißen Felder bilden die Grundlage für nahezu alle heutigen VP-Programme, während die hell schattierten Felder nur in einzelnen Programmen berücksichtigt werden.

Als besonders problematisch ist dabei die Berücksichtigung des Zusatzwiderstands durch See-gang anzusehen. Wenn er überhaupt berücksichtigt wird, dann nur als ein vollausgebildeter Seegang in der gleichen Richtung wie die Windrichtung und mit einem Standardspektrum – diese Annahmen gelten nur in sehr wenigen Ausnahmefällen.

Mit einer Optimierungsstrategie werden für bestimmte Segelzustände die korrespondierenden Kräfte und Momente ins Gleichgewicht gebracht und Trimm- sowie Reffparameter in Hinsicht auf maximale Geschwindigkeit bestimmt.

### 3 PROJEKT SEGELDYNAMOMETER

Am Institut für Schiffs- und Meerestechnik der Technischen Universität Berlin ist im Rahmen des vom BMBF und verschiedenen Partnern aus der Industrie geförderten Forschungsprojekts „Entwicklung eines Segeldynamometers zur Erfassung der aero- und hydrodynamischen Kräfte“ ein sogenanntes „Segeldynamometer“ gebaut worden. Dieses spezielle Meßgerät ermöglicht die Messung der resultierenden aero- und hydrodynamischen Kräfte unter natürlichen Bedingungen. Das Ziel dieses Projekts ist es, durch konsequente Anwendung der verschiedenen

Analysemethoden zusammen mit einem systematischen Vergleich mit den Ergebnissen der Großausführungsmessungen die Qualität dieser Verfahren zu beurteilen und einen Weg für neue Prognoseverfahren zu bereiten.

### 3.1 Modellversuche

Die Grundlage für die Berechnung der hydrodynamischen Kräfte sind in fast allen Fällen Modellversuche, meist durch Extrapolation der Ergebnisse aus systematischen Serienversuche. Für wenige Yachtentwicklungen steht das finanzielle Budget zur Verfügung, speziell auf die Konstruktion abgestimmte Versuche durchzuführen. In allen anderen Fällen ist man damit auf die Extrapolation der Serien angewiesen, deren Widerstandsprognose nur dann erfolgreich ist, sofern die untersuchten Rumpfe geometrisch ähnlich sind.



Bild 1: Modellversuch mit dem Segeldynamometer

Ein generelles Problem der Modellversuchstechnik in der Schiffstechnik sind die Maßstabs- effekte. Während die Übertragbarkeit der Modellversuchsergebnisse für maschinengetriebene, konventionelle Schiffe aufgrund des großen Erfahrungsschatzes als weitgehend gesichert angesehen werden kann, fehlt dieser bei der Übertragung der Ergebnisse für Segelyachten.

Im Gegensatz zu maschinengetriebenen Fahrzeugen, segeln Yachten am Wind mit Abdrift und zumeist mit größeren Krängungswinkeln. Neben dem Wellen- und Reibungswiderstand sind damit auch die Querkräfte des Rumpfes einschließlich der Anhänge (Kiel und Ruder) und der damit verbundene induzierte Widerstand zu berücksichtigen.

In dem laufenden Forschungsvorhaben sind deshalb auch Modellversuche mit dem Segeldynamometer im Maßstab 1:2 in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH durchgeführt worden. Neben verschiedenen Geschwindigkeiten, Krängungs- und Abdriftwinkeln sind auch 3 verschiedene Kielformen untersucht worden. Detaillierte Informationen sind bei Brandt et al. (1997) und Fröhlich (1997) zu finden.

### 3.2 Numerische Verfahren

Neben den Modellversuchen gibt es verschiedene mathematische Verfahren, um die Strömungsphänomene zu beschreiben: Für viele Anwendungen kann unter der Annahme idealer Flüssigkeit –also reibungsfrei– die Strömung mittels der Potentialtheorie berechnet werden. Insbesondere zur Ermittlung des Wellenwiderstandes werden solche Verfahren gern eingesetzt, da die freie Flüssigkeitsoberfläche mitberücksichtigt werden kann.

Sollen auch zähigkeitsbedingte Effekte erfaßt werden, so werden zur Zeit die sogenannten RANS-Gleichungen (Reynolds Averaged Navier Stokes) benutzt. Dabei können verschiedene Turbulenzmodelle eingesetzt werden, um die viskosen Einfüsse zu beschreiben.

Während die potentialtheoretischen Verfahren auf modernen Rechnern mit einem noch erträglichen Zeitaufwand ausgeführt werden können, benötigen die RANS-Berechnungen auf den größten heute verfügbaren Computern Stunden oder Tage an Rechenzeit.

Mit den numerischen Verfahren können heute schon qualitativ gute Ergebnisse erzielt werden; absolute Angaben für die einzelnen Strömungsgrößen sind allerdings mit einiger Vorsicht zu betrachten und benötigen noch eine geeignete Kalibrierung.

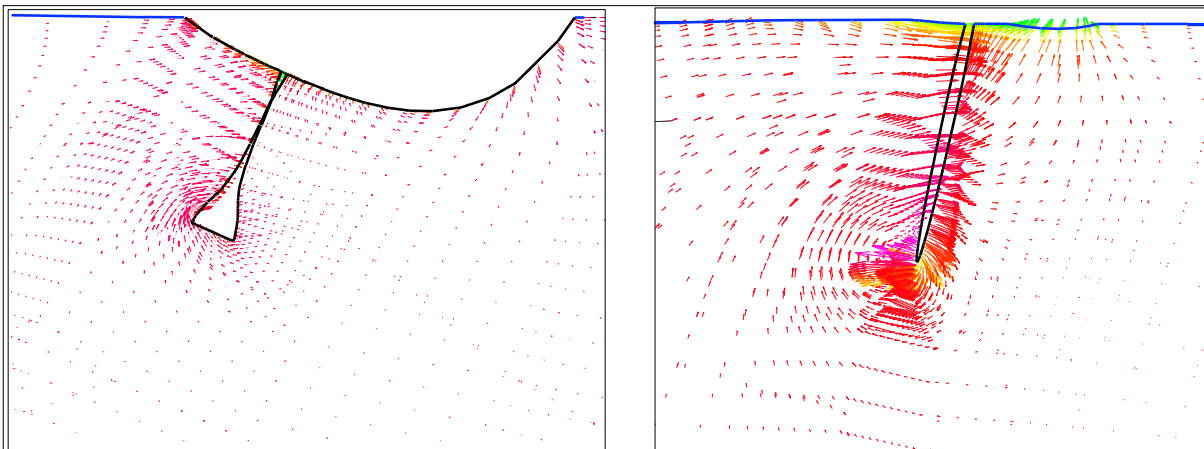


Bild 2: Quergeschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante von Kiel und Ruder

Der Vorteil dieser Methoden liegt darin, daß neben den integralen Größen wie Widerstand und Querkraft vor allem auch einzelne Details der Strömung untersucht werden können. Bild 2 zeigt für das Segeldynamometer mit einer Flachkielvariante die Quergeschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante des Kiels und dem Ruder. Es ist deutlich zu sehen, wie der durch die Umströmung der Profilunterkante des Kiels erzeugte Wirbel die Umströmung des Ruders beeinflusst und somit die Wirkung des Ruders negativ beeinträchtigt.

### 3.3 Das „Segeldynamometer“

Das „Segeldynamometer“ ist ein Meßgerät in Form einer modernen 10m Segelyacht. Wesentlicher Bestandteil dieses Bootes ist die sogenannte Riggwaage. Es handelt sich dabei um einen steifen Aluminiumrahmen, der sich innerhalb des Rumpfes befindet. Das gesamte Rigg und alle dazugehörigen Bedienungselemente sind auf diesem Rahmen befestigt. Der Rahmen selbst ist im Bootsrumph mit sechs Kraftmeßstäben statisch bestimmt gelagert.

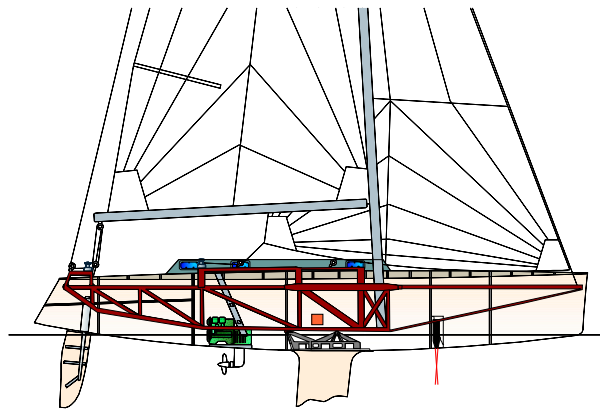


Bild 3: Das „Segeldynamometer“ der TU-Berlin

Diese Anordnung bildet damit eine Sechs-Komponenten-Waage, mit der die resultierenden Kräfte zwischen Rigg und Rumpf gemessen werden können.

Eine ähnliche Konstruktion ist auch für den Kiel entwickelt worden; weiterhin ist der Ruderschaft mit Dehnmeßstreifen versehen worden, so daß auch Kräfte zwischen Kiel und Rumpf sowie Ruder und Rumpf separat bestimmt werden können.

Diese Konstruktion ermöglicht es erstmals, die resultierenden hydrodynamischen Kräfte direkt zu messen. Vergleichbare Geräte sind bisher nur in den USA von Milgram (1993) und in Japan von Masuyama und Fukasawa (1997) gebaut worden, allerdings wurde dort der Schwerpunkt auf aerodynamische Untersuchungen gelegt.

Eine genauere Beschreibung dieses Meßgerätes „Segeldynamometer“ und dessen Kalibrierung kann Brandt und Hochkirch (1998, 1999) entnommen werden.

Das „Segeldynamometer“ ist Ende 1998 fertiggestellt worden und befindet sich zur Zeit in der Erprobungsphase auf Berliner Gewässern. Danach sind Messungen zunächst bei ruhigen und später mäßigen Seegangsbedingungen auf der Ostsee geplant.

Die Meßergebnisse werden anschließend durch Systemidentifikation statistisch ausgewertet und mit den Messungen im Schlepptank und Kavitationstank systematisch verglichen. Weiterhin sollen diese Daten den Ergebnissen aus RANSE-Berechnungen gegenübergestellt werden, um so zu analysieren, inwieweit diese Methoden auch quantitativ genutzt werden können.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem „Segeldynamometer“ ist es erstmals möglich, die hydrodynamischen Kräfte auf einer Segelyacht unter realen Bedingungen –ohne Maßstabeffekte– zu erfassen. Durch statistische Analyse dieser Meßwerte wird eine neue Datenbasis geschaffen, die eine Korrelation mit den Daten aus den Modellversuchen und numerischen Berechnungen ermöglicht. Mit Hilfe dieser Datenbasis können später neue Verfahren abgeleitet werden, um die hydrodynamischen Eigenschaften anderer Entwürfe für den Einsatz in den VP-Programmen zu modellieren. Damit kann schließlich eine bessere Leistungsprognose für Segelyachten gewährleistet werden und die inländische Bootsindustrie erhält das entsprechende „Know-How“, um mit dem Ausland zu konkurrieren.

## LITERATUR

- Brandt, H. und Hochkirch, K. (1998): *Erfassung der hydrodynamischen Kräfte, 19. Symposium Yachtentwurf und Yachtbau*, Hamburg
- Brandt, H.; Hochkirch, K.; Abdel-Maksoud, M. und Fröhlich, M. (1997): *Leistungsanalysen für das Segeldynamometer, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Bd. 91, Hamburg
- Caponnetto, M.; Castelli, A.; Dupont, P.; Bonjour, B.; Mathey, P.-L.; Sanchi, S. und Sawey, M. L. (1999): *Sailing yacht design using advanced numerical flow techniques, The 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Fröhlich, M. (1997): *Optimierung von Kielen einschließlich Rumpf für Segelyachten auf der Basis eines numerischen Rechenverfahrens für viskose und instationäre Strömung*, Projekt 1022, Schiffbau Versuchsanstalt Potsdam GmbH
- Gerritsma, J. (1971): *Course keeping qualities and motions in waves of a sailing yacht, Proceedings of the third AIAA Symposium on the Aero/Hydrodynamics of Sailing*, pages 10–29
- Gerritsma, J. und Beukelman, W. (1972): *Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship, International Shipbuilding Progress*, Vol. 19(Number 217):285–293
- Gerritsma, J.; Keuning, J. A. und Versluis, A. (1993): *Sailing yacht performance in calm water and in waves, The 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Hazen, G. S. (1980): *A model of sail aerodynamics for diverse rig types, Proceedings of New England Sailing Yacht Symposium*
- Hochkirch, K. und Brandt, H. (1999): *Fullscale hydrodynamic force measurement on the Berlin Sail-Force-Dynamometer, The 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- 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 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Masuyama, Y. und Fukasawa, T. (1997): *Full scale measurement of sail force and the validation of numerical calculation method, The Thirteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Milgram, J. H. (1971): *Sail force coefficients for systematic rig variations*, Technical & Research Report R-10, Society of Naval Architects and Marine Engineers
- Milgram, J. H. (1993): *The MIT Sailing Dynamometer*, Technical Report, Massachusetts Institute of Technology