

# **Erfassung der hydrodynamischen Kräfte**

**Hartmut Brandt, Karsten Hochkirch**

Institut für Schiffs- und Meerestechnik, Technische Universität Berlin

## **Inhalt**

### **1. Einleitung und Übersicht**

### **2. Konstruktion und Meßprinzip des Segeldynamometers**

- 2.1 Meßprinzip zur Bestimmung der aero- und hydrodynamischen Gesamtkraft
- 2.2 Der Riggträger
- 2.3 Die Kielwaage
- 2.4 Die Ruderkräfte

### **3. Meßverfahren**

- 3.1 Kraftmessungen
- 3.2 Lagereferenz-System
- 3.3 Schiffsgeschwindigkeit und Abdrift
- 3.4 Windgeschwindigkeit
- 3.5 Windrichtung und Masttorsion
- 3.6 Sonstige Meßsysteme und Einrichtungen

### **4. Datenerfassung**

### **5. Kalibrierung**

### **6. Versuchs-, Rechen- und Meßergebnisse**

- 6.1 Modellversuche
- 6.2 Kielversuche
- 6.3 Berechnung der viskosen Strömung am Rumpf, Kiel und Ruder
- 6.4 Erste Ergebnisse von Meßfahrten mit dem Segeldynamometer

### **7. Ausblick**

### **8. Anhang**

- 8.1 Öffentliche Förderung
- 8.2 Industriepartner
- 8.3 Förderer aus Industrie und Institutionen
- 8.4 Literatur und Quellenangaben

## 1. Einleitung und Übersicht

Das Segeldynamometer des Instituts für Schiffs- und Meerestechnik (ISM) der Technischen Universität Berlin (TUB), welches 1998 im Rahmen der Hanseboot auf dem Stand der „Yacht“ erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wird, ist das Ergebnis einer bereits dreijährigen Entwicklungsarbeit für die Konstruktion, den Bau und die Ausrüstung des „Meßgerätes“, denn als solches möchten wir das Forschungsschiff verstanden wissen [1-3].

Das Vorhaben konnte realisiert werden, nachdem eine Analyse der Bootswirtschaft verdeutlichte, daß in Deutschland gegenüber dem westlichen Ausland ein erheblicher Nachholbedarf an technischem know how besteht. Wie die Vergangenheit immer wieder gelehrt hat, sind wirtschaftliche Gewinne in der Branche unmittelbar gekoppelt mit erfolgreichen Yachten. Die Entwicklungsarbeit für den erforderlichen technischen Vorsprung ist jedoch heute ohne wissenschaftliche Begleitung und finanzielle Förderung nur schwer vorstellbar.

Diese Tatsachen sind vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und einer großen Anzahl von Industriepartnern (siehe Abschnitt: 8.1) sowie fördernden Firmen und Institutionen (s.A.: 8.2) erkannt worden und ermöglichten die Entwicklung und den Bau des Segeldynamometers.

In der Fachwelt ist bekannt, daß Geosim- und Großversuche mit Schiffen für die Korrelation von Daten, die aus Modellversuchen oder theoretischen Berechnungsmethoden stammen, unentbehrlich sind. Es sei an dieser Stelle nur an die Meßfahrten mit dem Forschungsschiff „Meteor“ oder anderen sogenannten „Standardschiffskörpern“ erinnert. Ergebnisse, die mit Hilfe neuer Rechenmethoden erarbeitet wurden, stützen sich vergleichend auf derartige reale Daten ab.

Leider existieren entsprechende Meßergebnisse von Segelyachten bis heute nicht oder beschränken sich nur auf wenige Komponenten, ohne daß das komplexe System der aero- und hydrodynamischen Kräfte berücksichtigt werden konnte. Es ist demnach erforderlich, daß die Kraftanteile einer segelnden Yacht aus Wind und Wasser einzeln bestimmt werden, und das geht nur mit einer speziellen Schiffskonstruktion, bei welcher der Rumpf vom Rigg einschließlich des stehenden und laufenden Guts entkoppelt werden.

Diese Lücke soll nun mit dem Segeldynamometer des ISM der TUB geschlossen werden. Ähnliche Forschungsyachten sind in den USA bereits vor Jahren [4] und neuerdings auch in Japan [5] gebaut und zur Optimierung von Segeln eingesetzt worden. Leider werden aber verwertbare Daten nicht veröffentlicht und verbleiben im Ursprungsland. Da sich die Analysen bei diesen Yachten auf die Aerodynamik konzentrierten und vor allem zur Optimierung der Segel dienten, wurde die hydrodynamische Kraft als eine unteilbare Einheit bestimmt.

In unserem Vorhaben dagegen werden auch die Einzelkräfte am Kiel, Ruder und Rumpf meßtechnisch ermittelt, da die Güte der Hydrodynamik einer modernen Segelyacht ganz besonders von diesen Komponenten bestimmt wird. Insbesondere die Kielforschung hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, ist aber nicht annähernd abgeschlossen, und das gilt ganz besonders für Yachten mit geringem Tiefgang. Aus diesen Gründen stellt die Analyse der Hydrodynamik im vorliegenden Forschungsvorhaben einen besonderen Schwerpunkt dar. Selbstverständlich werden auf unserer Meßyacht auch die aerodynamischen Kraftanteile an vielen

Einzelkomponenten des Riggs sowie des stehenden und laufenden Guts und die aerodynamische Gesamtkraft und deren Kraftangriffspunkt ermittelt.

Mit Hilfe des Segeldynamometers kann somit eine Datenbank erstellt werden, deren Werte unter natürlichen Bedingungen in Abhängigkeit von

Schiffsgeschwindigkeit und Abdrift,  
Windgeschwindigkeit und Anströmrichtung  
Trimm und Krängung,  
Seegangsbewegungen des Schiffes,  
Ruderstellung,  
Segelstellung

bestimmt und analysiert werden können. Nur auf diese Weise ist es möglich, die Wechselwirkungseffekte zwischen Wind, Wasser und Schiff zu ermitteln und deren Daten in die Velocity Prediction Programme (VPP) einfließen zu lassen. Neben der Korrelation der Daten aus Modellversuchsergebnissen muß es das Fernziel aller Bemühungen sein, die theoretischen Rechenmethoden so weit zu verbessern, daß sie der Realität nahe kommen und eine Optimierung aller Einzelkomponenten einer Yacht ermöglicht wird.

## **2. Konstruktion und Meßprinzip des Segeldynamometers**

Die Baupläne für das Meßgerät des Segeldynamometers - einer Yacht von 10 m Länge - wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Konstruktionsbüro Judel/Vrolijk und Co. erarbeitet. Bei der Rumpfschale (ohne Deck und Einbauten) handelt es sich um eine bei der Firma Dehler in Serie gebauten 33-Fuß-Yacht. Abb. 1 zeigt den Generalplan, Abb. 2 den Segelplan und Tabelle 1 die wichtigsten Hauptabmessungen des Segeldynamometers.

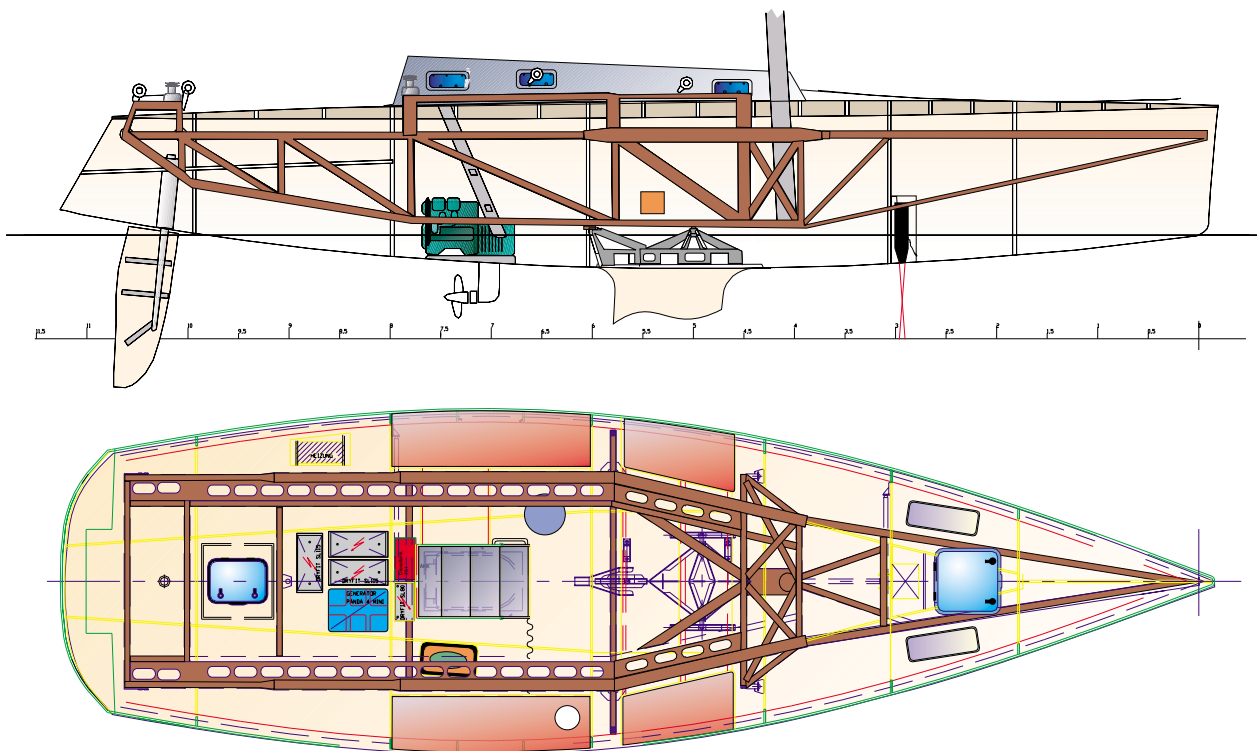
### **2.1 Meßprinzip zur Bestimmung der aero- und hydrodynamischen Gesamtkraft**

Das wichtigste Kennzeichen des Segeldynamometers ist der 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 Stagen sowie sämtliche Schotholepunkte und Winschen angeordnet. Überall dort, wo der Träger oder Teile des Riggs und Stagen durch das Deck geführt werden müssen, ist es freigeschnitten, wobei Manschetten die Dichtigkeit gewährleisten. An den Riggträger, der aus Aluminium gefertigt ist, werden hohe Anforderungen gestellt, denn bei gleichzeitiger Gewichtsminimierung soll die Gitterkonstruktion unter Belastung möglichst geringe Dehnungen aufweisen (Abb. 3). Aus diesem Grund war eine aufwendige Festigkeitsanalyse erforderlich.

Neben der in Sandwichbauweise erstellten Rumpfschale ist das Segeldynamometer mit einem System von Spanten und Stringern ausgesteift worden, um auch die Verformung des Schiffskörpers zu minimieren. Diese Anforderungen sind weniger kritisch, da der Riggträger nur

an 6 definierten Knotenpunkten (Kreuzungstellen von Spanten oder Bodenwrangen und Stringern) im Schiff gelagert wird. Die Kräfte des Riggs greifen also nicht direkt, wie sonst üblich, am Rumpf an.

An den Knotenpunkten befinden sich kalibrierte Kraftmeßzellen und ergeben zusammen eine Sechs-Komponenten-Waage, mit der es möglich ist, die Kräfte und Momente aller sechs Freiheitsgrade zu messen. Um bei verbliebener geringer Elastizität des Rumpfes oder Riggträgers die Fehler möglichst klein zu halten, sind die Kraftsensoren nicht direkt zwischen Rumpf und Träger angeordnet worden, sondern die Verbindung erfolgt über lange Stäbe. Einfräsungen an beiden Enden der Stäbe ermöglichen eine elastische Bewegung in zwei Raumrichtungen. Kraftnebenflüsse werden damit deterministisch und können durch eine Kalibrierung des Gesamtsystems korrigiert werden (Abb. 4).



**Abb. 1: Generalplan**

LOA	=	10	m
LWL	=	8.75	m
B	=	2.98	m
T	=	1.99	m
V	=	3.516	m <sup>3</sup>
Ballast	=	1.15	t
Segelfläche am Wind	=	56.16	m <sup>2</sup>

**Tabelle 1: Hauptabmessungen des Segeldynamometers**





## 2.2 Der Riggträger

Für die Festigkeitsberechnung der sehr komplizierten Struktur des Riggträgers wurde die Methode der Finiten Elemente (FEM) eingesetzt. Ein erheblicher Vorteil von FEM-Programmen ist, daß relativ leicht Berechnungen für unterschiedliche Gestaltvariationen bei gleichzeitiger Gewichtsminimierung durchgeführt werden konnten [6 u. 8].

Verwendet wurden Rechteck-Rohrprofile mit unterschiedlichen Querschnitten aus ALMgSi0,5 F22 mit einer Streckgrenze für Schweißkonstruktionen von 80 N/mm<sup>2</sup>. Die Wahl fiel auf dieses Material, da verschiedene Profilgrößen verfügbar waren, es gut schweißbar ist und im Vergleich zu AlMg eine größere Dehnung zuläßt. Insbesondere bei den hier auftretenden dynamischen Belastungen ist dies eine wichtige Eigenschaft.

Eine Diskretisierung der einzelnen Balken ist notwendig, da entgegen eines idealen Gitterrohrrahmens hier ebenso Biege- und Torsionsspannungen in die Miseshypothese eingehen. Zur Berechnung bieten sich Balkenelemente an. Die Diskretisierung erfolgt automatisch und wurde mit Hilfe des Netzgenerierers ISAGEN [9] durchgeführt. Die 6 Lagerpunkte des Riggträgers im Schiffsrumpf wurden als starr vorausgesetzt und infolgedessen mit keiner Steifigkeit beaufschlagt.

Die den Rechnungen zugrunde gelegten Lastannahmen für den statischen und dynamischen Fall lieferte die Firma APPLIED ENGINEERING SERVICE (AES) [10], welche die Riggauslegung vorgenommen hat. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Belastungen für 30° Krängung zeigt Tabelle 2.

	Stat. Lasten infolge der Riggvorspg.		Dyn. Lasten im Betriebszustand	
	Lasten in Stangen [N]	Anteil an Mastkompression [N]	Lasten in Stagen [N]	Anteil an Mastkompression [N]
V1	14450	-	14449	-
V2	10604	-	9638	-
D1	4728	9270	9539	9350
D2	2629	5111	4860	4724
D3	10604	20836	9638	9467
Vorstag	3257	3120	11018	10547
Achterstag	lose	-	3639	599
Backstag	lose	-	4042	3638
Eigengew. Rigg	-	1216	-	1216
Mastkomp. ges.	-	39553	-	39541
Großschot				2829
Genuaschot				2481
Spinnakerschot				1091

**Tabelle 2: Statische und dynamische Lasten bei 30 Grad Krängung**

Die maximalen Radialkräfte für die FEM-Berechnungen wurden so variiert, daß die numerisch ermittelten Lagerreaktionskräfte mit den analytischen Werten aus der Krängungs- und Widerstandskraft korrespondieren. Bei einer Froude-Zahl von 0,45 und einem Sicherheitsfaktor von 1,3 ergab sich ein Maximalwert für die Widerstandskraft von 4000 N. Im übrigen wurden weitgehende Übereinstimmungen der auf verschiedenen Weisen berechneten Lagerkräfte erreicht (Abweichungen  $\leq 10\%$ ).

Für die Festigkeitsberechnung wurde ein Sicherheitsfaktor von 4 veranschlagt, der sich wie folgt zusammensetzt:

- Allgemeine Werkstofftoleranz: Faktor 1,3
- unvorhergesehene Überhöhung der angenommenen Arbeitslast: Faktor 1,5 (empfohlen von AES; entspricht einer Krängung des Schiffes von  $50^\circ$ )
- Korrektur für schwellende Last im statischen Berechnungsfall: Faktor 2,0

Mit Hilfe des FEM-Programms ISAFEM [9] ist schließlich eine vertretbare Stabanordnung ermittelt worden. Die ungünstigsten Lastfälle treten am Vorstag und Backstag auf. Am Steven der Trägerkonstruktion muß maximal mit Verschiebungen von 10 mm und seitlich achtern von 4 mm gerechnet werden. Aus Tabelle 3 sind die wichtigsten Merkmale des Riggträgers ersichtlich.

Konstruktion	Viergurtträger mit Füllstäben und Schublechen
Halbzeug	Fünf verschiedene, den Lasten angepaßte stranggepresste Vierkant-Hohlprofile
Werkstoff	Die Aluminiumlegierung AlMgSi0,5
Fertigungsverfahren	Metall Inertgas (MIG) Pulsschweißen
Abmaße	Länge 9500 mm; Breite 1800 mm; maximale Höhe 1400 mm
Gewicht	Etwa 300 kg
Gewichtsschwerpunkt	$x = 5290$ mm; $y = 0$ mm, $z = 660$ mm
Massenträgheitsmoment	$x = 71$ kg/m <sup>2</sup> ; $y = 740$ kg/m <sup>2</sup> ; $z = 780$ kg/m <sup>2</sup>
Max. Verschiebung infolge Biegung (global)	Am Vorstag $\approx 10$ mm
Max. Verschiebung infolge Torsion (global)	Am Backstag $\approx 4$ mm
Effekt. Vergleichsspannung nach Mises	$\approx 16 - 20$ N/mm <sup>2</sup>
Max. Vergleichsspannung nach Mises	$\approx 24$ N/mm <sup>2</sup>

**Tabelle 3: Hauptmerkmale des Riggträgers**

### 2.3 Die Kielwaage

Ein vergleichbares Verfahren wie für das Rigg wird für den Kiel eingesetzt. Auch die Kielflosse ist vom Schiffsrumpf freigeschnitten und nur eine elastische Manschette sorgt für die Dichtigkeit des Schiffskörpers. Außerdem soll diese Verbindung am Boden natürlich möglichst wenig stören und flächig abschließen, Forderungen, die nicht ganz unproblematisch sind. Befestigt ist der Kiel im Innern des Schiffes an einer steifen Schweißkonstruktion (Abb. 5).

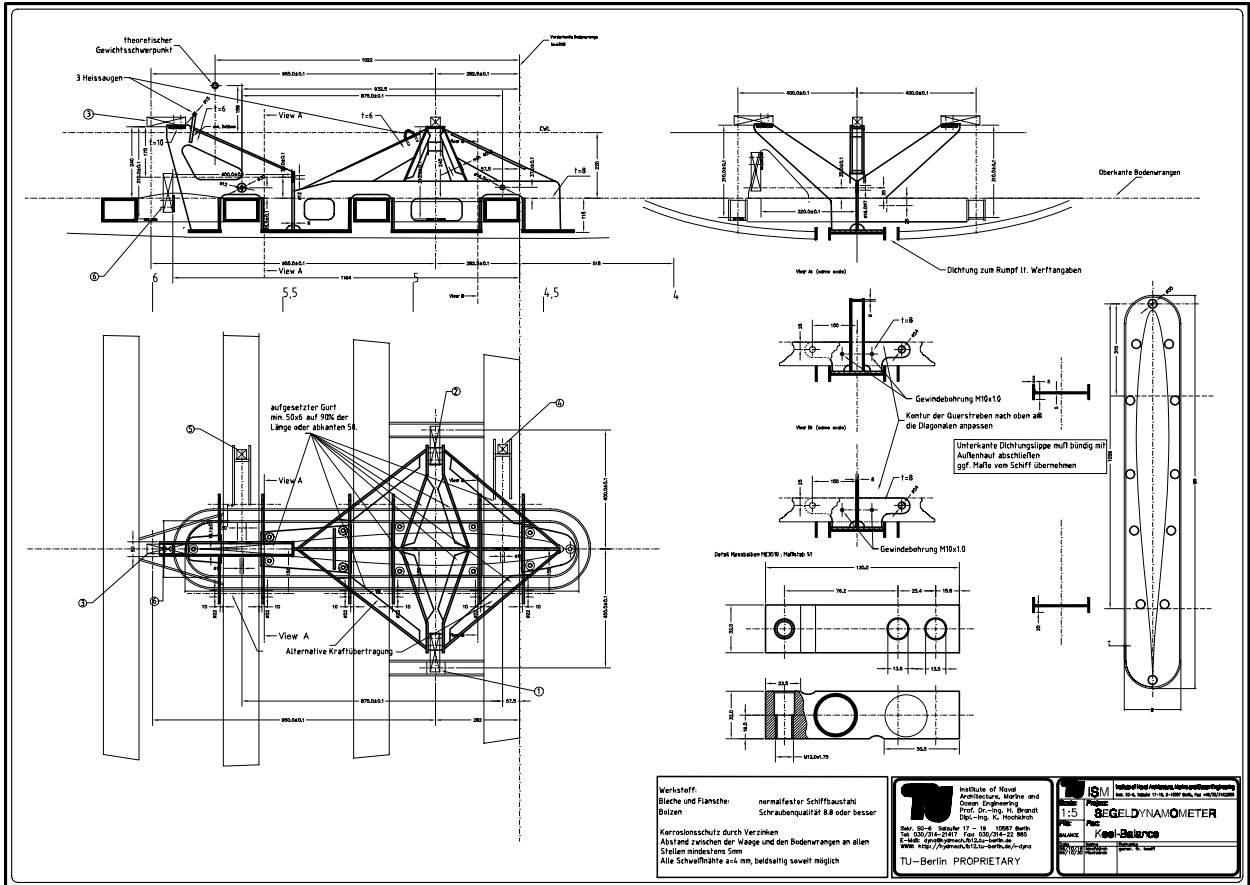


Abb. 5: 6-Komponentenwaage für den Kiel

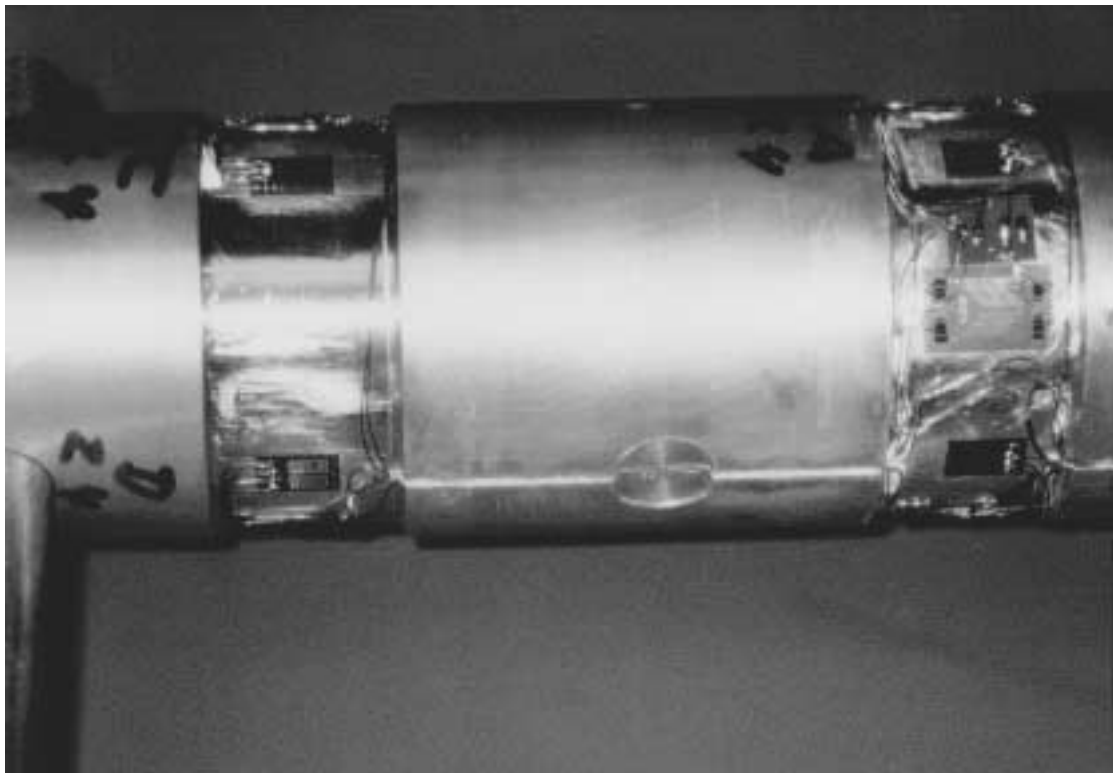


Abb. 6: DMS-Applikation an der Ruderwelle

Die einzige kräfteübertragende Verbindung zu den Bodenwrangen und damit zum Schiffskörper besteht aus 6 langen Stäben, deren Druck- und Zugkräfte mit Hilfe von Scherstabsensoren gemessen werden (Abb. 4). Mit diesem Meßsystem sind die Kräfte, Momente und damit auch die Kraftangriffspunkte für alle drei Freiheitsgrade bestimmbar. Erwähnt werden sollte in diesem Zusammenhang, daß auch die Modellversuche in der Schlepprinne der Schiffbauversuchsanstalt Potsdam in gleicher Weise durchgeführt wurden (Modellmaßstab 1:2). Auch hier befand sich Kiel und Ruder freigeschnitten vom Rumpf an einer 6-Komponenten-Waage. Die zu erwartenden Kräfte können also bereits als annähernd bekannt vorausgesetzt werden.

Die Dimensionierung der Kielwaage erfolgte nach den Richtlinien des ABS. Der Fall der Grundberührung wurde nicht berücksichtigt, da hierbei die Meßglieder überdimensioniert ausgelegt werden müssen und bei kleinen Kräften nicht mehr ansprechen. Um jedoch jedes Risiko auszuschließen, kann die Kielwaage durch 6 Kielbolzen verblockt werden. Übrigens wurde ein ähnliches Verfahren auch für den Riggträger vorgesehen. In Ufernähe, beim Kranen und an Land sind diese Maßnahmen zum Schutz der 6-K-Waagen unentbehrlich.

## **2.4 Die Ruderkräfte**

Auch die Kräfte auf das Ruder können - getrennt vom Schiffsrumpf - erfaßt werden. Zu diesem Zweck ist der Ruderschaft, bevor das Laminat für das eigentliche Ruderblatt aufgebracht wurde, mit Dehnungsmeßstreifen versehen worden (Abb. 6). Auf diese Weise können die Kräfte und Momente für 5 Komponenten gemessen werden. Verzichtet wurde auf den Anteil der senkrechten Kraft, da diese am Ruderschaft selbst nicht bestimmbar ist.

Wie die Modellversuche und vor allem auch die Strömungsberechnungen gezeigt haben, ist die Wechselwirkung zwischen Kiel und Ruder ein wichtiges Thema bei der Beurteilung der Hydrodynamik [11;12]. Ungünstige Konstellationen bewirken eine erhebliche Reduzierung der Ruderkräfte, verändern das Gleichgewichtssystem und beeinflussen die Steuerfähigkeit einer Yacht. Die Bearbeitung dieses Themenkreises ist daher ein wichtiges Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens.

## **3. Meßverfahren**

### **3.1 Kraftmessungen**

Wie bereits beschrieben, werden Kraftmessungen am Riggträger, dem Kiel und Ruder sowie an sämtlichen Stagen, Wanten und Schoten vorgenommen. Die Abbildungen 7 bis 9 zeigen Beispiele für derartige Geberanordnungen. Entsprechend der zu erwartenden Kräfte wurden unterschiedliche DMS-Geber vom Typ HBM-U9B (Hottinger Baldwin Meßtechnik) und 5 Meßverstärker vom Typ Spider 8 eingesetzt. Jeder einzelne Spider kann über 4,8 kHz Trägerfrequenz-Meßverstärker simultan 8 DMS-Brücken mit 16 Bit Auflösung abtasten. Die Kommunikation zum PC erfolgt über die parallele Schnittstelle im EPP-Modus. Damit können im Einzelbetrieb bis zu 70 000 Meßwerte pro Sekunde übertragen werden. Der erforderliche Low-

Level-Treiber wurde selbst entwickelt, so daß es möglich ist, zeitgleich 40 DMS-Kanäle zu erfassen.

### **3.2 Lagereferenz-System**

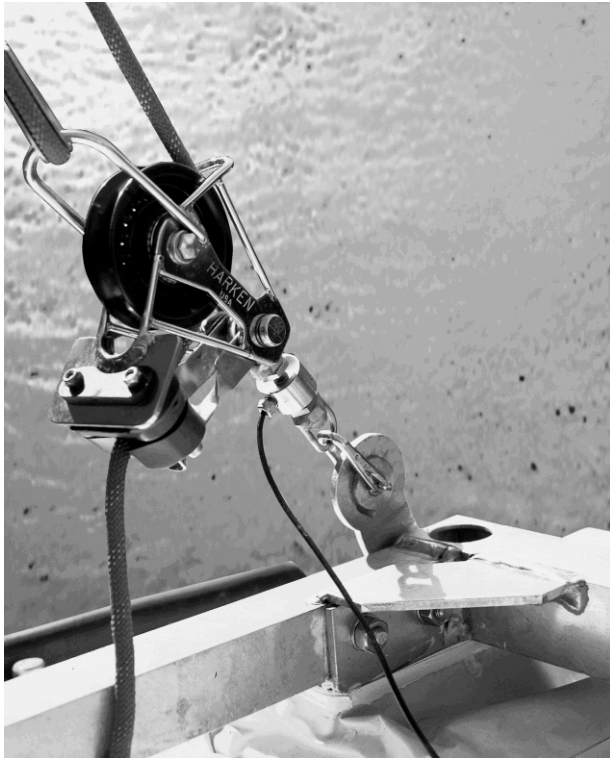
Für die Ermittlung der Schiffsbewegungen wird ein fiberoptisches Lagereferenz-System der Firma Litef GmbH vom Typ LCR 93 eingesetzt. Dieses System ermöglicht die Bestimmung der 3 Lagewinkel im Raum sowie alle rotatorischen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten. Außerdem sind drei Linearbeschleunigungsgeber installiert worden, so daß auch translatorische Beschleunigungen in den drei Freiheitsgraden erfaßt werden können.

### **3.3 Schiffsgeschwindigkeit und Abdrift**

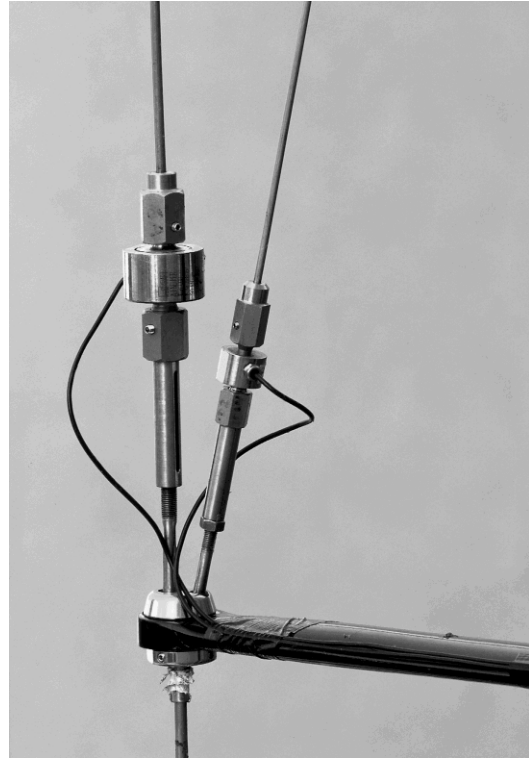
Bekanntlich stellt die exakte Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit und Abdrift auch heute noch ein nicht unerhebliches Problem dar [13] und wird gegenwärtig zumeist durch Meßsysteme bewerkstelligt, die allein die Geschwindigkeit über Grund - also einschließlich Abdrift und Strömung des jeweiligen Reviers - erfassen. Hierzu gehören alle GPS- und die genaueren DGPS-Geräte (Differential-Global-Position-System). Diese Methode ist zwar für die Navigation völlig ausreichend, nicht aber, sofern die realen Geschwindigkeitskomponenten durchs Wasser in bezug auf die Segelleistung gefordert werden. Bei herkömmlichen Logsystemen auf Yachten - nach welchem Meßprinzip sie wie auch immer arbeiten - muß entsprechend der Anströmrichtung, Krängung, des Eigenwellenfeldes sowie durch Seegang und schließlich durch den Einbauort im Schiff, mit zum Teil erheblichen Abweichungen gerechnet werden. Außerdem sind die Geräte nicht in der Lage, die Abdrift zu bestimmen. Aus diesen Gründen wird für das Segeldynamometer die LDV-Technik (Laser-Doppler-Velocimeter) eingesetzt, welche sich in den wissenschaftlichen Instituten bereits durchgesetzt hat, leider aber heute noch sehr kostenintensiv ist (Abb. 10).

Mit dem Zwei-Komponenten-LDV-Gerät können die Vorausschwindigkeit und die Quergeschwindigkeit und damit der Driftwinkel bestimmt werden. Zu diesem Zweck ist auf  $\frac{1}{4}$  der Wasserlinienlänge eine planparallele Acrylglasscheibe in den Bootsboden eingesetzt worden. Die Optik des Lasers hat eine Brennweite von 310 mm. Unter Berücksichtigung der Einbaumaße können somit in einem Abstand von etwa 170 mm die vorbeiströmenden Partikel und damit die Schiffsgeschwindigkeit gemessen werden. Das Meßgerät selbst ist in einer wasserdichten Box angeordnet worden, um Beschädigungen möglichst auszuschalten. Das Meßsystem ist masselos, benötigt also im Vergleich mit anderen Loggebern keine Störkörper, außerdem ist der Abstand zum Rumpf groß genug, womit eine Beeinflussung der Meßergebnisse durch die Schiffsumströmung weitgehend vermieden wird. Die Auswertung der LDV-Meßsignale für die Strömungsgeschwindigkeit ist äußerst aufwendig, da die Partikelanzahl im Wasser das Zeitmaß für eine Zählrate bestimmt. Deshalb werden die Daten zunächst „roh“ abgespeichert, später statistisch ausgewertet und mit den anderen Meßwerten korreliert.

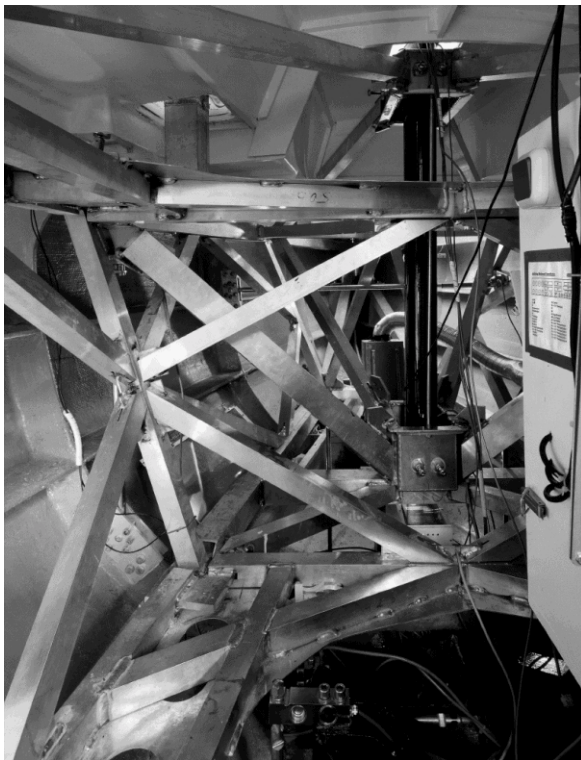
Zusätzlich wird ein „normales“ Log von VDO und ein GPS-Navigator von derselben Firma eingesetzt. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß sämtliche Navigationsgeräte und ein wesentlicher Teil der elektronischen Meßtechnik von VDO-Kienzle kostenlos zur Verfügung gestellt wurden.



**Abb. 7: Backstag mit HBM-Meßgeber**



**Abb. 8: Untere Saling mit HBM-Meßgeber**



**Abb. 9: Riggträger mit Mastdurchführung und Druckgeber**



**Abb. 10: LDV-Meßsystem im Vorschiff für Voraus- und Quergeschwindigkeit**

### **3.4 Windgeschwindigkeit**

Als Bezugsgeschwindigkeit für den Wind werden Werte ermittelt, die etwa einen Meter über dem Segelkopf liegen, um eine Beeinflussung der Meßwerte durch das Segel weitgehend auszuschließen. Es handelt sich also hier um eine Relativgeschwindigkeit, die später zur Ermittlung der real auf die Segel wirkenden Windkraft als Funktion der Höhe und der Segelflächenverteilung korrigiert werden muß. Da die Aerodynamik jedoch nicht im Vordergrund der Untersuchungen steht, haben diese Daten keine vorrangige Bedeutung.

Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit wird ein Standard-Schaufelrad-Anemometer von VDO ohne die dazugehörige Elektronik eingesetzt, wobei die Frequenz des Schalenkreuzes unmittelbar als Wert für die Windgeschwindigkeit im Rechner verarbeitet wird. Diese Methode hat den Vorteil, daß die sonst erforderlichen Funktionen für die Glättung und Dämpfung der Ausgabesignale entfallen. Zusätzlich ist ein Hitzdrahtanemometer im Masttopp installiert, mit dem die Messungen des VDO-Anemometers verifiziert werden können.

### **3.5 Windrichtung und Masttorsion**

Auch für die Bestimmung der Windrichtung wird das VDO-Standard-Anemometer mit Windfahne verwendet, zumal aus früheren Untersuchungen für dieses Gerät viele Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Krängungs- und Trimmwinkeln vorliegen. Da der Geber auf dem Masttopp montiert wird, darf die Torsion des Mastes, die durch den asymmetrischen Zug der Backstagen verursacht wird und mehrere Grad betragen kann, nicht vernachlässigt werden.

Zur Messung der Masttorsion werden zwei digitale Magnetometer vom Typ HMR2300 eingesetzt. Die Meßinstrumente messen jeweils Stärke und Richtung des Erdmagnetfeldes für alle drei Komponenten. Einer der Sensoren befindet sich auf Deck, während der andere auf dem Masttopp montiert wird. Aus der vektoriellen Differenz kann der Winkelunterschied zwischen Masttopp und Deck bestimmt werden.

### **3.6 Sonstige Meßsysteme und Einrichtungen**

Die Winkelbestimmungen am Ruderschaft und am Großbaum erfolgen durch Kunststoffschichtpotentiometer von VDO. Zur Weiterverarbeitung der Windrichtung und der Fluxgatesonde werden die analogen Signale der Standardinstrumente digitalisiert, abgespeichert und stehen somit zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Für eine spätere Analyse der Segeldaten werden in bezug auf die gegenwärtigen meteorologischen Verhältnisse außerdem Luftdruck, relative Feuchtigkeit und Luft- sowie Seetemperatur erfaßt.

Es ist vorgesehen, daß zu Beginn jeder Versuchsreihe eine optische Kontrolle der Versuchparameter mit Hilfe einer digitalen CCD-Kamera im Masttop durchgeführt wird. Damit kann auch die Stellung und Formgebung der Segel kontrolliert werden.

Sämtliche Meßgeräte und Rechner werden zum Schutz vor erhöhter Luftfeuchtigkeit und der salzhaltigen Seeluft in geschlossenen Behältern untergebracht, wobei ein entsprechendes Umluftsystem dafür sorgt, daß die herrschende Luftfeuchtigkeit und Temperatur annähernd konstant gehalten werden.

Die Batteriekapazität von 100 Ah bei einer Spannung von 24 Volt ist nicht ausreichend, um die vielen Stromquellen zu versorgen. Daher wurde von vornherein ein Generator mit einer Leistung von 2,5 kVA vorgesehen, der die Batteriekapazität annähernd konstant hält. Es läßt sich demnach nicht vermeiden, daß während der Meßfahrten der Generator in Betrieb ist.

Die Stromversorgung aller Meßgeräte und Computer erfolgt über 24 Volt Batteriestrom. Zusätzlich steht ein Umrichter für 220 Volt zur Verfügung um die auf Netzspannung ausgelegten Geräte zu versorgen. Mit Hilfe eines 2,5 kVA Gleichstromgenerators können die Batterien während der Meßfahrt nachgeladen werden.

#### 4. Datenerfassung

Den Mittelpunkt der Datenerfassung auf dem Segeldynamometer bildet ein Pentium-Industrie-PC mit einem Pentium 133 MHz Prozessor, der mit dem Public-Domain UNIX Derivat Linux als Betriebssystem arbeitet. Abbildung 11 zeigt eine Übersicht der verwendeten Meß- und Datenverarbeitungssysteme. Da sehr verschiedene Arten von Datenerfassungsgeräten miteinander kombiniert werden mußten, ist die gesamte Software für die Datenerfassung selbst entwickelt worden. Ein wichtiges Ziel ist es, daß alle Meßdaten synchron erfasst werden. Dazu wird ein Hardware-Triggersignal verwendet. Im übrigen wird auf die BMBF-Berichte verwiesen, in denen die Datenerfassung und Speicherverwaltung ausführlich beschrieben worden ist [7,8].

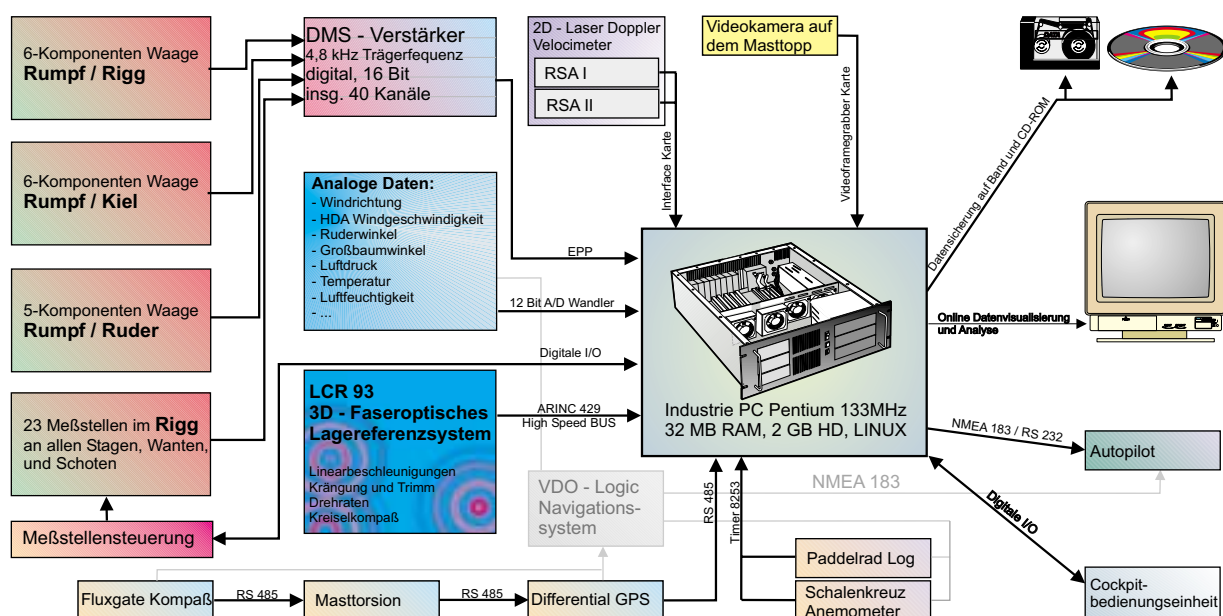


Abb. 11: Übersicht der Datenverarbeitung

## **5. Kalibrierung**

Äußerst aufwendig und zeitraubend erwiesen sich die Kalibrierarbeiten. Es sind zeitgleich etwa 100 Signale mit 40 Kraftmeßgeräten abzufragen. Jede einzelne Meßdose wurde vor dem Einbau auf ihre Funktionsweise überprüft und zur Kalibrierung mit definierten Gewichten belastet. Im Anschluß daran konnten die Geber in das Gesamtsystem eingebaut und die Meßdosen im Rigg mit vorher definierten Vorspannungen belastet werden.

Es folgte die Kalibrierung der verschiedenen 6-Komponentenwaagen im Segeldynamometer selbst. Hierzu gehören die Waage zwischen Rumpf und Riggträger, die Kielwaage und die Meßelemente am Ruderschaft. Für die Bestimmung der Trägerkräfte wurden in Höhe des Segelschwerpunktes am Rigg definierte Kräfte in unterschiedlichen Richtungen zum Schiff aufgebracht, im Rechner analysiert und entsprechende Diagramme aufgestellt. Die Arbeiten sind an Land durchgeführt worden, da nur hier Belastungen unter statischen Verhältnissen aufgebracht werden können. Auch der Kiel ist in verschiedenen Richtungen und von unterschiedlichen Angriffspunkten mit definierten Kräften belastet worden. Die Auswertung dieser Daten erforderte einen hohen Rechenaufwand. Von der Güte der Kalibrierdaten hängt später die Genauigkeit der Kraftmessungen beim Segeln ab.

## **6. Modell-, Rechen- und Meßergebnisse**

Inzwischen liegen eine Fülle von Modell- und Rechenergebnissen vor, die hier nur in aller Kürze zusammengefaßt wiedergegeben werden können. Im übrigen wird auf die Berichte und Veröffentlichungen verwiesen, in denen bereits ausführlich über die Untersuchungen und Ergebnisse berichtet worden ist [8,11,12].

Die Testfahrten auf dem Segeldynamometer selbst können erst jetzt beginnen. Unser Meßschiff wurde im Sommer dieses Jahres fertiggestellt, sofern man bei einem Versuchsschiff dieser Art überhaupt von einer Fertigstellung sprechen kann. Die ersten Probemessungen wurden auf der Havel bereits durchgeführt und ausgewertet. Die Versuchsfolgen hier in Berlin dienen dazu, die Meßsysteme auszutesten und eventuell vorhandene Schwachstellen zu beseitigen. Erst wenn alle Geräte und Kraftmeßwaagen zuverlässig arbeiten, werden auf See bei unterschiedlichen Wetter- und Seebedingungen Testfahrten durchgeführt. Die ausgewerteten Daten werden dann voraussichtlich am Ende des nächsten Jahres zur Verfügung stehen.

### **6.1 Modellversuche**

Die Schleppversuche mit einem Modell des Segeldynamometers im Maßstab 1 : 2 (Länge 5 m) sind in der Schiffbauversuchsanstalt Potsdam (SVA) durchgeführt worden. Während sich Trimm und Tauchung frei einstellen konnten, wurden Krängung und Abdrift aufgezwungen, wobei der Ruderwinkel bei allen Schleppfahrten mit Abdrift konstant 3° betrug. Wie bei dem Original des Segeldynamometers sind auch hier zum einen der Gesamtwiderstand und die Gesamtquerkraft

sowie zum anderen getrennt davon mit Hilfe weiterer 6-Komponentenwaagen die Einzelkräfte am Kiel und Ruder bestimmt worden. Es wurden insgesamt 3 x 33 Versuchsserien mit drei unterschiedlichen Kielen verschiedenen Tiefgangs und Konfiguration durchgeführt. Versuchsparemeter waren Schleppgeschwindigkeit (Froude-Zahl), Drift sowie Krängung und Trimmwinkel.



Abb. 12: Schleppversuchsmodell im Maßstab 1:2 des Segeldynamometers

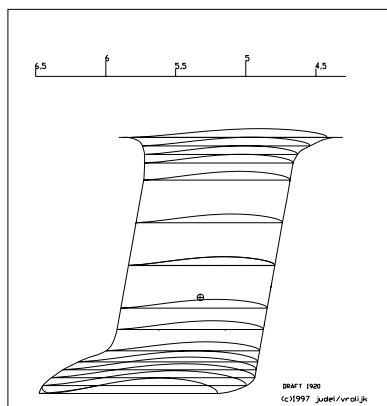


Abb. 13: Standard-Tiefkiel des Segeldynamometers (T=1.95m)

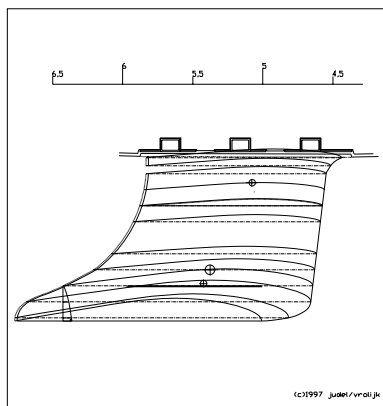


Abb. 14: Flachkiel des Segeldynamometers (T=1.45m)

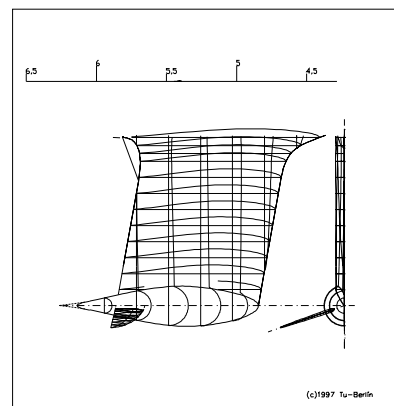
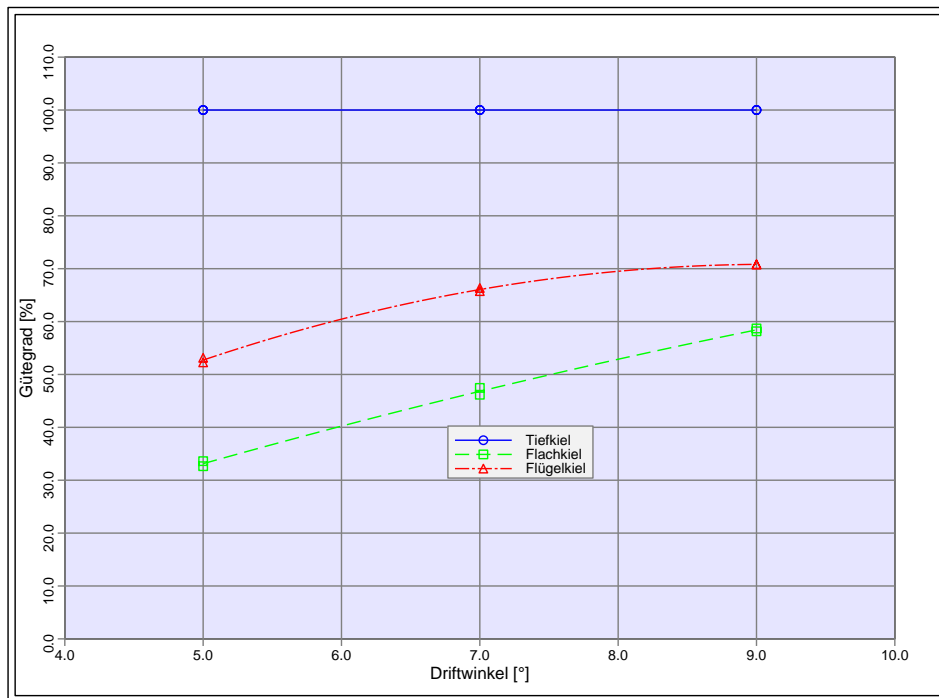


Abb. 15: Flügelkiel des Segeldynamometers (T=1.45m)

Abbildung 12 zeigt das Schleppmodell und die Abbildungen 13 bis 15 drei der untersuchten Kielkonfigurationen. Der Tiefkiel entspricht demjenigen des Segeldynamometers. Aus der Fülle der Ergebnisse wurde ein Diagramm ausgewählt, welches eine Vorstellung der sehr unterschiedlichen Qualitäten der verschiedenen Kielformen gibt (Abb. 16).

Verglichen werden der Tiefkiel ( $T=1,95\text{m}$ ) mit einem Flachkiel ( $T=1,45\text{m}$ ) und einer weiteren Flachkielversion des gleichen Tiefgangs mit Flügeln. Das Diagramm zeigt den Gütegrad (das Verhältnis von Querkraft zu Widerstand ( $Q/D$ )) bei  $24^\circ$  Krängung, einer Froudezahl von  $0,31$  und unterschiedlichen Driftwinkeln. Die drei dargestellten Kurven demonstrieren die erheblichen Gütegradunterschiede zwischen dem Tief- und Flachkiel, während der Flügelkiel ein Teil der Verluste durch den geringeren Tiefgang wieder gutmacht.



**Abb. 16: Gütegrad des Modells mit unterschiedlichen Kielen ( $\varphi = 24^\circ$ ,  $F_N = 0.31$ )**

## 6.2 Kielversuche

Da die Modellversuche in der Schlepprinne mit unterschiedlichen Kielen sehr arbeits- und kostenaufwendig sind, wurden die gleichen Kiele nochmals in einem Modellmaßstab 1:5 ohne Rumpf, aber mit einem simulierten Schiffsboden im großen Umlauftank des ISM der TU Berlin untersucht, um eine Korrelation der Ergebnisse zwischen den beiden Versuchsmethoden zu ermöglichen. Es ist das Ziel, für Kiele mit geringem Tiefgang oder kleinerem Streckungsverhältnis bessere Gütegrade zu erreichen. Doch wurde bei allen Entwürfen streng darauf geachtet, daß das aufrichtende Moment (Krängungsstabilität) bei den Flachkielen demjenigen des Tiefkiels entsprach. In Ergänzung zu den bereits veröffentlichten Versuchsergebnissen [11] wurden außer den Tief-, Flach- und Flügelkielen weitere Kielkonfigurationen mit anderen Bulbformen sowie Tandam- und Kimmkielen mit großem Streckungsverhältnis untersucht. Diese Ergebnisse sind bisher unveröffentlicht.

Obwohl die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind, kann hier bereits festgestellt werden, daß sämtliche geteilten Kielanordnungen für geringen Tiefgang enttäuschende Ergebnisse

lieferten. Nur der **sehr sorgfältige Entwurf** eines Flügelkiels läßt etwas bessere Gütegrade für ein am Wind segelndes Schiff erwarten. Bei Schiffskursen ohne Abdrift muß jedoch mit einem vermehrten Widerstand gerechnet werden. In der SVA sollen weitere Versuche mit dem Modell des Segeldynamometers und unterschiedlichen Kielkonfigurationen durchgeführt werden, um auch den Einfluß von Tauch- und Stampfbewegungen zu analysieren.

Kiele mit beweglichen Flossenteilen sind bisher in die Untersuchungen nicht einbezogen worden. Sofern die Bedienung und Konstruktion derartiger Kiele vertretbar gelöst werden kann und die Spaltverluste klein bleiben, ist durch diese Maßnahmen eine Gütegradverbesserung denkbar. Versuche mit Gelenkkielen sollten jedoch in Verbindung mit dem Schiffsrumpf im Schlepptank durchgeführt werden, da sich gleichzeitig der Driftwinkel verringert.

Für eine hohe Segelleistung am Wind ist jedoch bisher der tiefgehende Kiel, wie er beim Segeldynamometer eingesetzt wird, nicht zu ersetzen, es sei denn, man denkt über einen Hubkiel nach.

### **6.3 Berechnung der viskosen Strömung am Rumpf, Kiel und Ruder**

Oberstes Ziel der Forschung ist, die Rechenverfahren soweit zu verbessern, daß sie den realen Gegebenheiten entsprechen. Jedoch muß bis dahin noch ein weiter Weg einkalkuliert werden. Einen Schritt in diese Richtung stellen die Berechnungsmethoden für turbulente Strömung dar, wie sie für das Segeldynamometer von Dr. Abel-Maksoud (SVA) durchgeführt wurden [12]. Es wurden die Umströmung, der Widerstand und die Querkraft des Segeldynamometers mit Ruder und verschiedenen Kielversionen mit und ohne Abdrift berechnet.

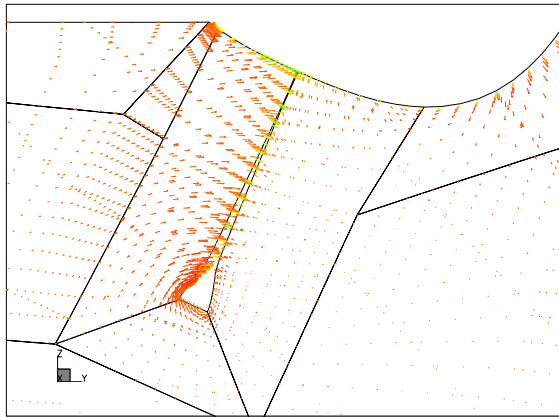
Mit dem Rechenverfahren TASCflow werden zur Erfassung der inkompressiblen turbulenten Strömung die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) und die Kontinuitätsgleichung numerisch gelöst. Als Turbulenzmodell zur Modellierung der Reynolds-Spannungen wird das  $k$ - $\epsilon$ -Zweiglieders-Turbulenzmodell eingesetzt [14]. Das Turbulenzmodell ist für vollturbulente Strömungen anwendbar. In unmittelbarer Wandnähe, wo diese Annahme nicht mehr gültig ist, wird ein logarithmisches Wandgesetz verwendet.

Ein wesentlicher Schwerpunkt bei den Rechenverfahren liegt in der Gittergenerierung. Da die Symmetrie bei einem mit Abdrift segelnden Schiff nicht ausgenutzt werden kann, muß eine sehr hohe Anzahl von Gitterpunkten (250.000 bis 400.000) gewählt werden, die je nach Kielkonfiguration an die Grenzen der Rechenkapazität führt. Trotz der hohen Anzahl von Gitterpunkten ist es nicht möglich, jede Einzelheit in der Strömung zu erfassen. Das gilt ganz besonders für sehr komplizierte Strukturen, wie sie Flügelkiele darstellen.

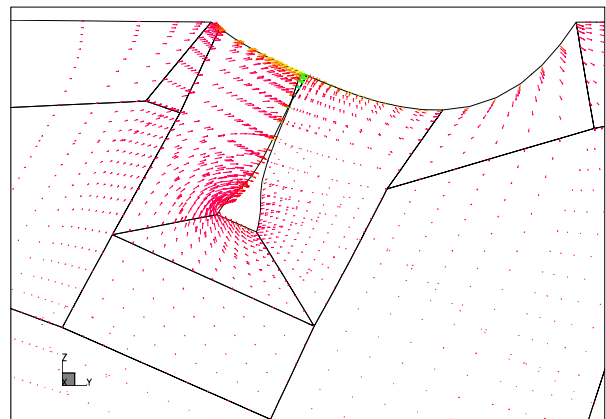
Dennoch liefern die Ergebnisse sehr aufschlußreiche Strömungsbilder, die zuvor nicht erkannte Strömungsphänomene erklären. So war aus den Modellversuchsergebnissen nicht erklärlich, weswegen der Gütegrad des Ruders in Verbindung mit dem Flachkiel erheblich reduziert wird. Diese Wechselwirkungseffekte werden in den berechneten Strömungsbildern deutlich sichtbar. An dem unteren Rand des Ruders ist die Überlagerung der Randwirbel von Ruder und Kiel zu erkennen. Abbildung 17 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren am Tiefkiel und Abbildung 18 den viel stärker ausgebildeten Randwirbel am Flachkiel. Die Wechselwirkungseffekte auf das Ruder sind aus den Abbildungen 19 und 20 ersichtlich. Die Geschwindigkeitsvektoren am Ruder in

Verbindung mit dem Flachkiel (Abb.20) sind viel stärker ausgeprägt, was eine Verminderung der Ruderquerkraft zur Folge hat.

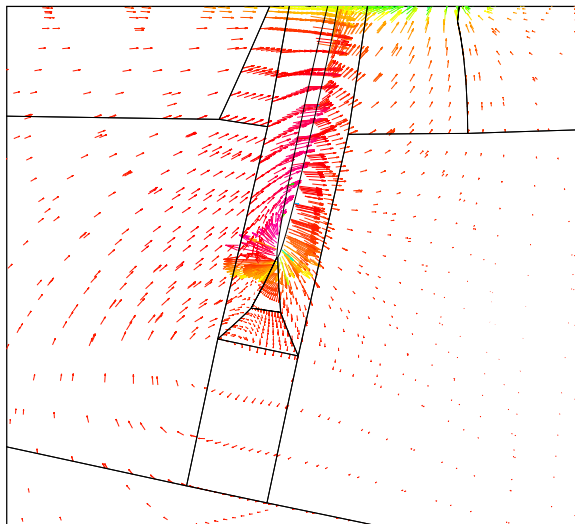
Im übrigen liefern die Rechenergebnisse für den Widerstand und die Querkraft zwar gute qualitative Daten, sind aber quantitativ für eine Leistungsanalyse noch nicht ausreichend.



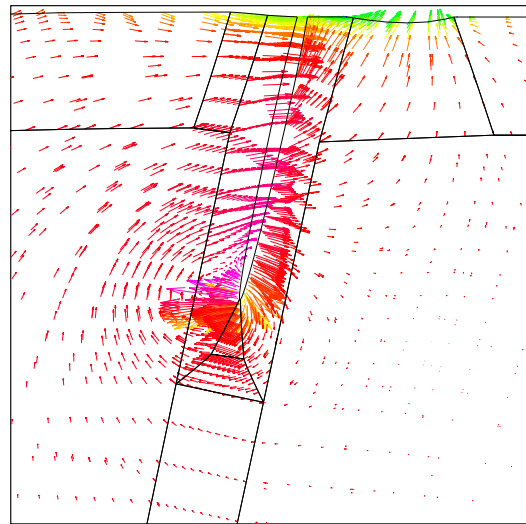
**Abb.17:** Geschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante des Tiefkiels bei  $\varphi = 24^\circ$ ,  $\lambda = 4^\circ$  und  $\delta = 3^\circ$ )



**Abb.18:** Geschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante des Flachkiels bei  $\varphi = 24^\circ$ ,  $\lambda = 4^\circ$  und  $\delta = 3^\circ$ )



**Abb. 19:** Geschwindigkeitsvektoren am Ruder (Tiefkiel) bei  $\varphi = 12^\circ$ ,  $\lambda = 4^\circ$  und  $\delta = 3^\circ$



**Abb. 20:** Geschwindigkeitsvektoren am Ruder (Flachkiel) bei  $\varphi = 12^\circ$ ,  $\lambda = 4^\circ$  und  $\delta = 3^\circ$

## **6.4 Erste Ergebnisse von Meßfahrten mit dem Segeldynamometer**

Inzwischen sind auf der Havel in Berlin erste Testfahrten mit dem Segeldynamometer durchgeführt worden. Auf den verschiedenen Kursen zum Wind wird während einer Meßperiode möglichst konstant gesegelt. Später soll hierfür eine Selbststeueranlage eingesetzt werden, die das Schiff auf gleichem Kurs zum Wind hält, um subjektive Einflüsse des jeweiligen Steuermanns auszuschalten. Die Auswertung der Meßdaten erfolgt zunächst noch nachträglich an Land. Auf See wird dann zumindest ein Teil der Daten on line an Bord verarbeitet und graphisch auf dem Bildschirm dargestellt, so daß stets eine Kontrolle der verschiedenen Meßaufgaben möglich ist.

Erste Meßprotokolle und Diagramme liegen vor und werden auf der hanseboot im Oktober 1998 präsentiert.

## **7. Ausblick**

Obwohl die Arbeiten zur Entwicklung des Segeldynamometers „DYNA“ weitgehend abgeschlossen sind und die Ergebnisse der Modellversuche und theoretischen Analysen vorliegen, steht ein wichtiger Teil des Vorhabens - die Testfahrten auf dem Segeldynamometer zur Ermittlung der realen Meßdaten für die hydrodynamischen und aerodynamischen Kräfte - noch bevor. Diese Meßreihen sollen im nächsten Jahr auf der Ostsee bei unterschiedlichen Wind- und Wetterbedingungen durchgeführt werden.

Die dann verfügbare Datenbank mit realen Vergleichsdaten unter Berücksichtigung sämtlicher Wechselwirkungseffekte wird für die Analyse der Kraftverteilung und Bewertung der Berechnungsmethoden eine unentbehrliche Hilfe sein. Es können Korrelationsrechnungen für die übrigen Ergebnisse durchgeführt und existierende VPP-Leistungsberechnungen auf ihre Gültigkeit geprüft werden. Es bleibt also noch viel Arbeit. Wir hoffen auf einen erfolgreichen Abschluß des Vorhabens und sehen den Endergebnissen und Schlußfolgerungen mit großer Erwartung entgegen.

Mit dem Bau des Segeldynamometers „DYNA“ vom ISM der TU Berlin steht ein Meßinstrument zur Verfügung, welches auch in Zukunft für Forschungs- und - Entwicklungsaufgaben eingesetzt werden kann. Wichtigstes Ziel ist, daß der deutsche Yachtbau hierdurch neue Impulse erfährt.

## **8. Anhang**

### **8.1 Öffentliche Förderung**

BMBF (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie)

### **8.2 Industriepartner**

Judel/Vrolijk & Co. Engineering GmbH, Bremerhaven  
navcon GbR, Wolgast  
VDO/Kienzle AG, Frankfurt am Main, Rüthi (Schweiz)  
Schiffbauversuchsanstalt Potsdam GmbH (SVA)

Dr.-Ing. Abdel-Maksoud (SVA) in Zusammenarbeit mit Prof. Dr.-Ing. M. Peric, IfS, Hamburg  
North Diamond Sailmakers, Kopenhagen  
Peter Frisch GmbH, München  
Pantaenius, Hamburg  
AeroSail, München

### 8.3 Förderer von Industrie und Institutionen

Hall Spars, Bristol, USA  
LITEF GmbH, Freiburg  
Roblon A/S, Dänemark  
Friedrich Marx Marine GmbH & Co, Hamburg  
Dehler Yachtbau GmbH, Meschede-Freienohl  
Redaktion der „Yacht“, Hamburg  
Hamburg Messe und Congress GmbH  
Deutscher Segler-Verband (DSV), Hamburg  
Berliner Yacht-Club, Berlin-Wannsee  
Bundesverband Wassersportwirtschaft e.V. (BWVS), Köln  
Deutscher Boots- und Schiffbauer-Verband e.V., Hamburg

### 8.4 Literatur und Quellenangaben

- [1] **H. Brandt:** *Das Forschungsprojekt eines Segeldynamometers*, 17. Symposium für Yachtbau und Yachtkonstruktion, Hamburg, 1996
- [2] **P. Hahne:** *Schiff im Schiff*, palstek, Technisches Wassersport-Journal, Hamburg, Nr. 2/1997
- [3] **M. Naujok:** *Yacht vom Computer*, „Yacht“, Hamburg, Nr10/1998
- [4] **J. H. Milgram:** *The MIT Sailing Dynamometer*, MIT, Massachusetts Institute of Technology, 1993
- [5] **Y. Masuyama; T. Fukasawa:** *Full Scale Measurement of Sail Force and the Validation of Numerical Calculation Method*, The Thirteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Jan. 1997
- [6] **R. Matzig:** *Konstruktion eines Riggträgers für ein Segeldynamometer mit Hilfe der Finite Elemente Methode*, ISM, 1997
- [7] **H. Brandt; K. Hochkirch:** *Entwicklung eines Segeldynamometers zur Erfassung der aero- und hydrodynamischen Kräfte*, ISM-Bericht 97/4, 1. Zwischenbericht zum BMBF-Projekt 616-3892-MTK 593, Berlin 1997
- [8] wie (7), jedoch: 2. Zwischenbericht, ISM-Bericht 98/3, Berlin 1998
- [9] „Dr. Krause Software“, Berlin
- [10] **C. Mitchel:** Applied Engineering Services Limited, PO Box 8445 Auckland, New Zealand
- [11] **H. Brandt, K. Hochkirch, M. Abdel-Maksoud, M. Fröhlich:** *Leistungsanalyse für das Segeldynamometer*, STG-Jahrbuch, Bd. 91, Hamburg 1997
- [12] **M. Fröhlich:** *Optimierung von Kielen einschließlich Rumpf für Segelyachten auf der Basis eines numerischen Rechenverfahrens für viskose und instationäre Strömung*, Projekt 1022, Schiffbauversuchsanstalt Potsdam GmbH, 1997
- [13] **H. Brandt:** *Schiffsgeschwindigkeits- und Windmessung an Bord, Möglichkeiten und Grenzen*, 10. Fachseminar Yachtentwurf und Yachtbau, Hamburg, 1989
- [14] **B.E. Launder und D. B. Spalding:** *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, Comp. Meth. Appl. Mech. Fluids, 1995