

Der Segelgütegrad und seine Bedeutung

Eine Darstellung der Zusammenhänge am Schiff mit Zusatzbesegelung
von Knut-Michael Buchalle

1. Vorwort

Besondere politische und wirtschaftliche Entwicklungen haben auch nach dem Wegfall der reinen Frachtsegelschiffe in den letzten hundert Jahren immer wieder zu neuen Ansätzen für eine besegelte Schifffahrt geführt. Die Entwicklung der Rohstoffpreise oder die Vorgabe zur Reduzierung von Emissionen sind Initiatoren von teilweise staatlich geförderten Aktivitäten. Die Ansätze sind dabei vielfältig, kreativ und international.

In Deutschland gab es neue Lösungen wie den Flettner Rotor, der in Frankreich als Turbosail weiterentwickelt wurde, das Dyna Rigg, das Indo Sail Projekt oder die jüngsten Entwicklungen wie z.B. von Sky Sail.

Damit das Segel wieder in der Frachtschifffahrt Verwendung finden kann, muss es sich den wirtschaftlichen Zwängen unterwerfen. Es darf keine nennenswerte Investition bei der Anschaffung darstellen, keinen zusätzlichen Personalbedarf bei der Handhabung erfordern, keinen erhöhten Wartungsbedarf zur Folge haben, die Nutzung des Frachtschiffes in seiner eigentlichen Aufgabe zum Transport der Frachten nicht behindern. Neben diesen absoluten Bedingungen muss das Konzept eine möglichst effiziente Energieausnutzung des Windes aufweisen um am Ende zu einem wirtschaftlichen Vorteil für den Nutzer zu werden.

Bei nüchterner Betrachtung ist im Entwurfstadium bereits eine Bewertung von technischen Lösungen erforderlich. Also die Vorhersage von Dingen, die man nicht weiß. Der berühmte Blick in die Zukunft. Auch ein Gewerbe, das schon sehr alt ist und stets mit unterschiedlicher Seriosität ausgeübt wurde.

Es gibt eine ganze Menge von aktuellen Computerprogrammen, die im Segelyachtbau während des Entwurfs bereits Geschwindigkeitsprognosen berechnen. Der Einfluss von geänderten Entwurfparametern kann hier schnell mit einem neuen Berechnungslauf überprüft werden. Die Ausgabe der Daten erfolgt dabei immer in Form von absoluten Werten. Es werden in Polardiagrammen Geschwindigkeitsprognosen in Abhängigkeit zur Windrichtung und Windstärke dargestellt. Für den Endnutzer sicherlich eine sehr schnell erfassbare Darstellungsform, doch mit welchen Algorithmen die Ergebnisse berechnet wurden ist oft unklar. Verwunderlich ist auch die meistens geringe Anzahl von individuellen Eingabeparametern mit denen diese Programme zu Ergebnissen kommen.

Der Segelgütegrad, um den es nun hier gehen soll, ist eine Definition zur neutralen, dimensionslosen Bewertung eines segelnden Schiffs. Unabhängig von der Schiffsform, dem Schiffstyp oder der Art des Segelantriebs erlaubt der Segelgütegrad eine Aussage zur Qualität des Systems „Schiff mit Besegelung“. Dabei ist es zunächst unerheblich ob das Segel als Ersatz des Hauptantriebs oder als Zusatzbesegelung eines unter Maschine laufenden Fahrzeugs eingesetzt wird.

Die grundlegende Definition des Segelgütegrads ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht am segelnden Schiff. Die Wirkung der Segelvortriebskraft (S_x) wird durch einen zusätzlichen Widerstand (ΔR) reduziert. Damit ist der Segelgütegrad:

$$S_{x_n} = S_x - \Delta R$$
$$\text{Segelgütegrad} = S_{x_n} / S_x$$

Die Zusammensetzung der Teilgrößen dieser Gleichung ergibt sich aus einer näheren Betrachtung des Kräftegleichgewichts am segelnden Schiff.

2. Das Kräftegleichgewicht des segelnden Schiffs

Um die beiden wichtigen Einflußgrößen des Segelgütegrads, die Segelvortriebskraft und den Zusatzwiderstand infolge des segelnden Schiffs näher beschreiben zu können, schauen wir uns das Kräftegleichgewicht des segelnden Schiffs an.

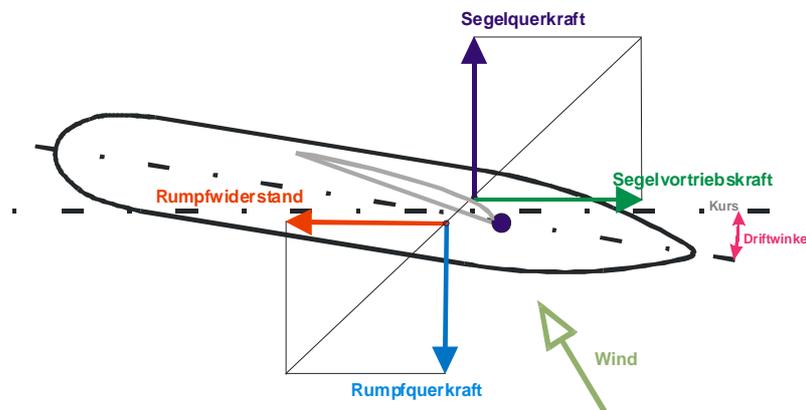


Abb. 1: Prinzipskizze der Kräfte am segelnden Schiff

Die nützliche Vortriebskraft des Segels S_x ist mit einer quer zum Schiff gerichteten Segelquerkraft S_y verbunden. Infolge der Gleichgewichtsbedingungen muß der Rumpf eine gleichgroße, entgegengesetzte Querkraft aufbringen. Diese Querkraft entsteht wenn der symmetrische Rumpf schräg angeströmt wird. Das Schiff fährt also mit dem Driftwinkel α . Die Querkraftproduktion ist mit einem zusätzlichen Widerstand (ΔR) verbunden.

Soweit die Darstellung der Grundlagen die für alle Schiffe, unabhängig von deren Rumpfform oder Art der Besegelung gelten. Die Sonderformen Flettner Rotor oder Segeldrachen unterliegen ebenfalls den hier geschilderten Grundlagen.

Die Vortriebs- und Querkräfte sowie der Widerstand setzen sich aus vielen Einzelgrößen zusammen. Eine vollständige Berechnung des Systems segelndes Schiff erfordert eine Vielzahl von Gleichungssystemen. Das Ergebnis der Gleichungen ist der Segelgütegrad für einen individuellen Anwendungsfall.

3. Der Momentenausgleich durch Ruderwinkel

Der Widerstand eines segelnden Schiffs entspricht im wesentlichen dem Widerstand eines Schiffs ohne Besegelung. Das betrifft die Wellenbildung und die Widerstände infolge Reibung. Das segelnde Schiff weist die zusätzlichen Komponenten Drift und Krängung auf. Diese Komponenten vergrößern den induzierten Widerstand des Schiffskörpers. Wenn der Schiffskörper aber wie beim Schiff ohne Besegelung keine zusätzlichen Anhänge aufweist, so ist der Unterschied auch für diese Einflußgrößen nur gering.

Es bleibt ein besonderer, signifikanter Unterschied des segelnden Schiffs. Es ist die Fahrt mit einem Driftwinkel durch das Wasser die den permanenten Einsatz eines Ruderwinkels erfordert um weiterhin gerade aus zu fahren.

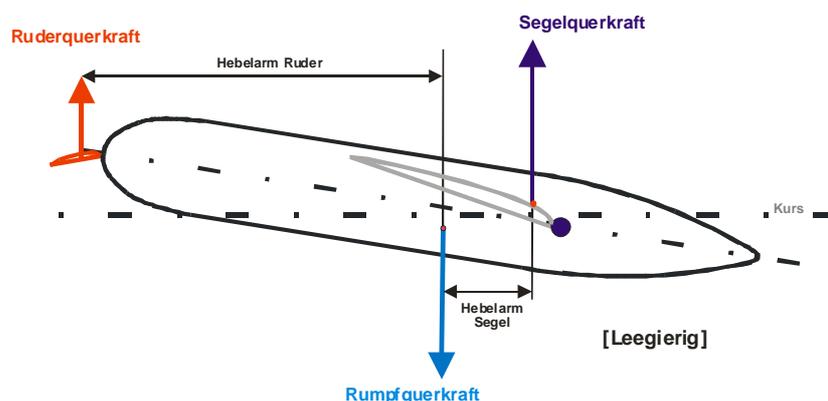


Abb. 2: Einsatz des Ruderwinkels zum Momentenausgleich

Der erforderliche Momentenausgleich durch das Ruder kann klein gehalten werden wenn die Anordnung der Segelfläche bzw. des Segeldruckpunkts geschickt gewählt wird. Den Begriff geschickt will ich in diesem Zusammenhang wie folgt definieren.

Das vom Ruderwinkel auszugleichende Moment wird durch ein Giermoment (Iuvgerig oder leegierig) resultierend aus den Positionen des Segel- und Lateraldruckpunktes heraus erzeugt. Die richtige Anordnung des Segeldruckpunkts, im klassischen Sinne also die Mastposition, kann damit den Ruderwinkel reduzieren.

Die Position des Segeldruckpunkts ist aber keine Konstante. Sie verändert sich mit den verschiedenen Segelzuständen. Das Giermoment entsteht dabei aus einem Hebel zwischen Segel- und Lateraldruckpunkt bezogen auf die Längs- und die Querachse.

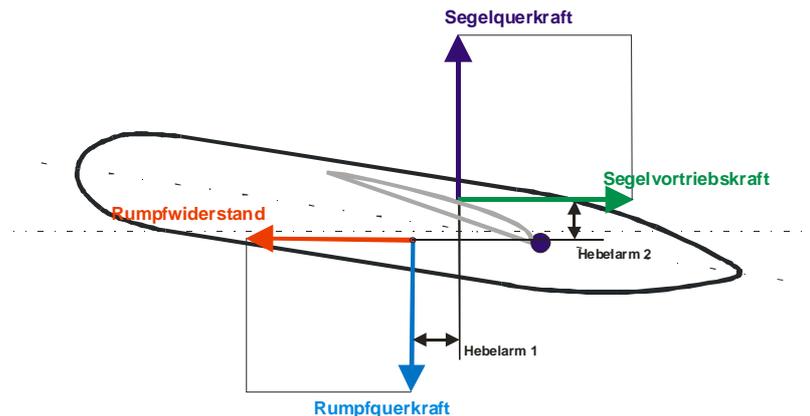


Abb. 3: Giermoment aus Lateral- und Segeldruckpunkt auf zwei Achsen bezogen

Während das Giermoment bezogen auf die Längsachse im Wesentlichen von Windstärke und – Einfallswinkel abhängig ist, ergibt sich das Giermoment bezogen auf die Querachse aus dem Krängungswinkel und den mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit steigendem Rumpfwiderstand.

Das durch einen Ruderwinkel ausgeglichene Giermoment beschreibt am Ende einen dreidimensionalen Gleichgewichtszustand des segelnden Schiffs.

Der erforderliche Ruderwinkel führt dabei zu einem zusätzlichen Widerstandsanteil gegenüber dem Schiff ohne Besegelung und ist eine der wichtigen Einflussgrößen für den Segelgütegrad.

4. Die Segel- und Rumpfpolare

Die nützliche Vortriebskraft einer gewählten Segelform(im erweiterten Sinne) ist mit einer Widerstandskraft verbunden. Die Wechselwirkung dieser beiden Größen kann in Form einer Segelpolare dargestellt werden. Es handelt sich dann dabei um Querkraft- und Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit zum Windeinfallswinkel.

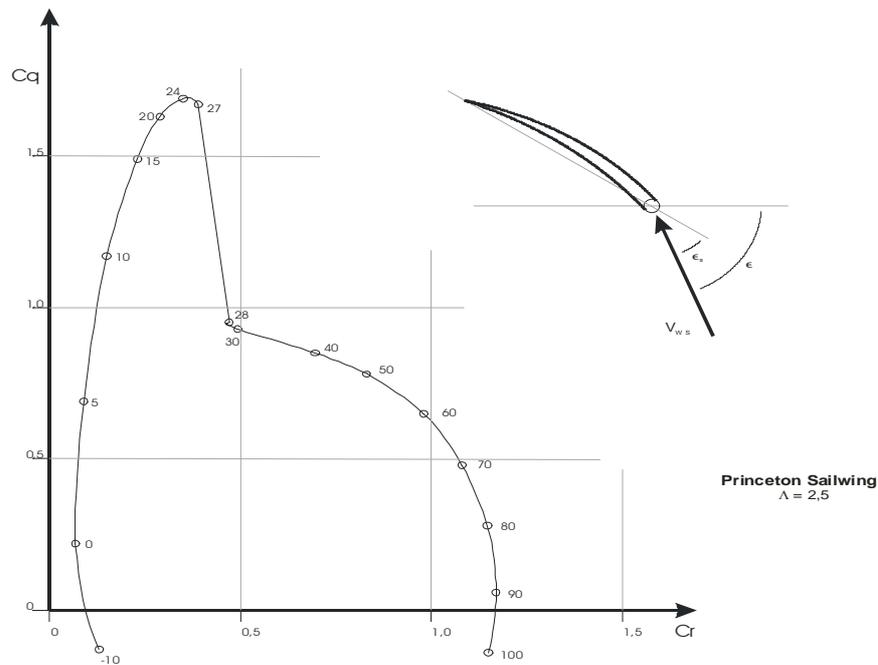


Abb. 4: Segelpolare [5]

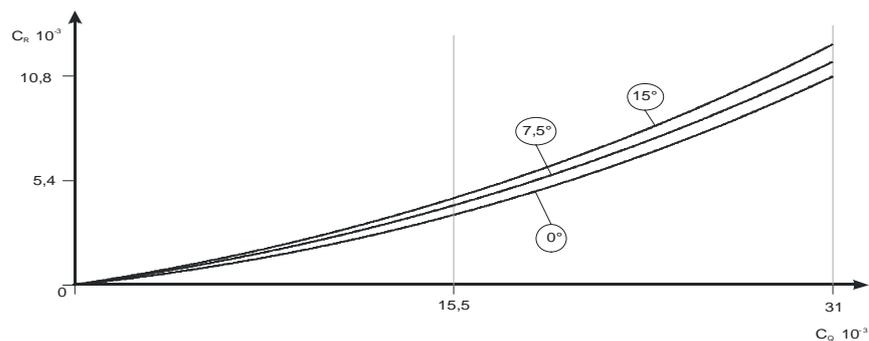


Abb. 5: Rumpfpolare für verschiedene Krängungswinkel [2]

Die Segelpolare ist die Grundlage für die sich einstellenden Kräfte oberhalb der Wasserlinie, denen für die Gleichgewichtsbedingungen eine Rumpfpolare zugeordnet werden muss. Auch die Rumpfpolare beschreibt die Quer- und Widerstandsbeiwerte, aber in Abhängigkeit zum Driftwinkel.

Die Optimierung einer Segel- oder einer Rumpfpolare stellt zunächst die Optimierung eines Einzelsystems da. Ein besonders effektives System ist zu erwarten, wenn die Einzelsysteme aufeinander abgestimmt werden. Es nützt wenig, wenn eine Segelpolare besonders große Querkraftbeiwerte ausweist, der Rumpf aber diese Querkraftbeiwerte nur mit sehr großen Widerstandsbeiwerten erzeugen kann.

Die Optimierung der Einzelsysteme muss damit nicht zwangsläufig auch zu guten Segelgütegraden führen.

5. Der Windwiderstand des Überwasserschiffs

So wie der Rumpf unter Wasser eine Rumpfpolare hat, hat er theoretisch auch über Wasser eine Polare für die Beiwerte zur Windangriffskraft. Die Querkraftbeiwerte des Überwasserschiffs werden üblicherweise gering sein. Die Widerstandsbeiwerte hingegen schon von Bedeutung, so dass man sie in einer ganzheitlichen Betrachtung nicht vernachlässigen darf.

Bei Schiffen mit großen Aufbauten kann die Überwasserfläche zudem einen prozentual großen Anteil an der gesamten Windangriffsfläche (einschließlich Segelfläche) darstellen. Der

Windwiderstand des Überwasserschiffs sollte in diesen Fällen unbedingt bei der Berechnung des Segelgütegrades berücksichtigt werden.

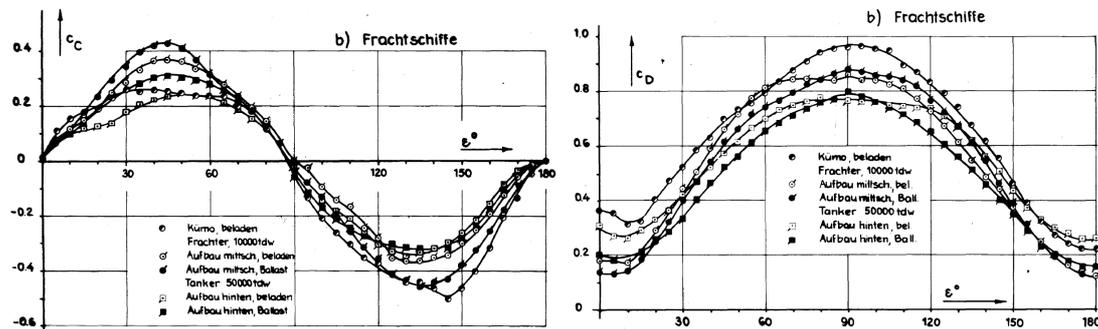


Abb. 6: Querkraft- und Widerstandsbeiwerte an Überwasserschiffen (nach [4])

6. Die Stabilität und der Einfluss der Krängung

Der Ruderwinkel muß das Giermoment ausgleichen und sorgt damit für eine Reduzierung des Segelgütegrades. Die Größe des Giermoments wird in einem erheblichen Maß durch das seitliche Auswandern des Segeldruckpunkts infolge Krängung erzeugt. Die Stabilität des Schiffs in Abhängigkeit zur Größe des krängenden Moments ist daher eine wichtige Einflußgröße für den Segelgütegrad.

Der Zustand des segelnden Schiffs hat damit auch eine weitere Gleichgewichtsbedingung zu erfüllen, die die sich einstellende Krängung als Ergebnis hat.

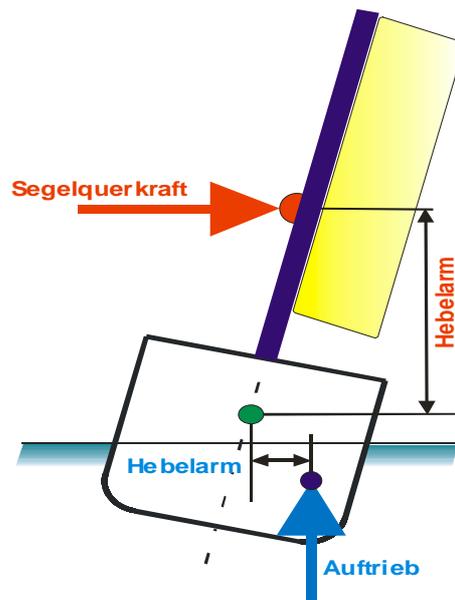


Abb. 7: Gleichgewichtsbedingung für die Krängung

7. Die Segelzustände

Die Segelpolare besteht aus Querkraft- und Widerstandsbeiwerten, aus denen man im Umkehrschluss die Segelzustände Querkraft- und Widerstandssegeln definieren kann.

Bei einem Windeinfallswinkel von 180° zum Schiff liegt garantiert kein Querkraftanteil mehr vor, so dass dieser Zustand als reines Widerstandssegeln bezeichnet werden kann. Unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen wird in dem Zustand des Widerstandssegelns der Segelgütegrad auch größer als eins ausfallen.

Es liegt im Fall des Widerstandssegelns kein zusätzlicher Widerstand infolge Ruderlage, Drift oder Windwiderstand von Aufbauten vor. Die Segelkraft entspricht im Fall des Widerstandssegelns

direkt der Vortriebskraft und wird durch einen sonst hinderlichen Zusatzwiderstand des Überwasserschiffs noch unterstützt.

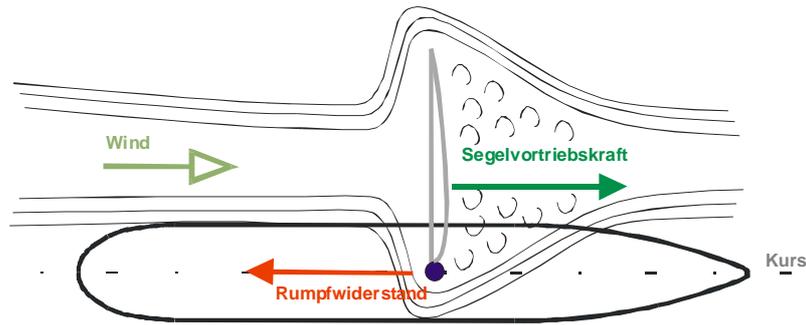


Abb. 8: Widerstandssegeln

Die mögliche Vortriebskraft beim Widerstandssegeln errechnet sich ausschließlich aus den Widerstandsbeiwerten. Beim Querkraftsegeln ist die Vortriebskraft hingegen immer eine Resultierende aus Querkraft und Widerstand. Die Vortriebskraft kann dabei beim Querkraftsegeln in Abhängigkeit von der gewählten Segelform durchaus größere Werte annehmen, als beim Widerstandssegeln. Eine Tatsache, warum auch Segler vor dem Wind anfangen zu kreuzen.

Die Querkraftbeiwerte steigen im Allgemeinen an, wenn die Windeinfallswinkel bezogen auf das Schiff vorlicher liegen. Je nach gewählter Segelkonfiguration gibt es einen Grenzwert für den kleinsten Windeinfallswinkel bezogen auf den Bug des Schiffes.

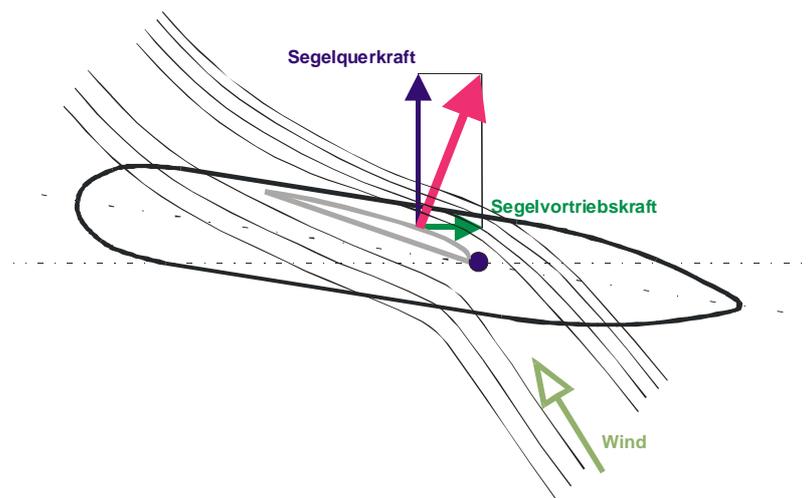


Abb. 9: Querkraftsegeln

Der Windeinfallswinkel zum Schiff entspricht dabei nicht der wahren Windrichtung. Die wahre Windrichtung wird durch die Schiffsgeschwindigkeit beeinflusst, so dass der scheinbare Wind am Schiff immer etwas vorlicher einfällt als der wahre Wind. Dieser Einfluß gewinnt an Bedeutung, wenn man Schiffe betrachtet, die den Segelantrieb als Zusatz zum hauptsächlichlichen Maschinenantrieb nutzen.

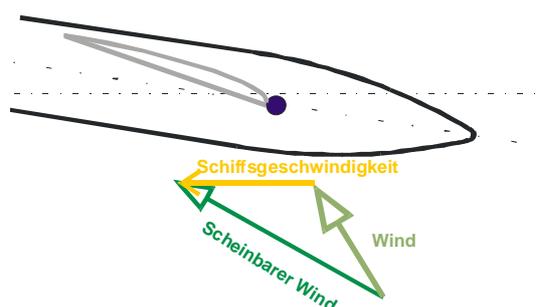


Abb. 10: Scheinbarer Wind

Der Segelgütegrad liefert keine Aussage auf welchem Kurs ein Schiff seine höchste Geschwindigkeit erzielt. Es ist vielmehr ein unabhängiger, dimensionsloser Maßstab zum Vergleich unterschiedlicher Schiffe und eine Hilfe zu deren Optimierung.

8. Die möglichen oder sinnvollen Schiffsgeschwindigkeiten

Die Betrachtung des Segelgütegrads ist keine Betrachtung der möglichen Endgeschwindigkeit eines segelnden Schiffs sondern geht darüber hinaus. Die Informationen, die eine Geschwindigkeitsprognose ausmachen, sind eine Teilinformation im ganzheitlichen Berechnungsablauf für den Segelgütegrad. Es ist daher auch möglich Rückschlüsse auf ein mögliches Geschwindigkeitsprofil für ein Schiff zu machen.

Das Geschwindigkeitsprofil im Berechnungssinn des Segelgütegrads würde für eine vorgegebene Windrichtung und -stärke einen Gleichgewichtszustand des Schiffes aus den Komponenten Querkraft, Widerstand (jeweils über und unter Wasser), Stabilität und Momentenausgleich ermitteln.

Im Zusammenhang mit einem unter Motor angetriebenen Schiff, das die Besegelung als zusätzlichen Antrieb nutzt, hat sich dabei folgendes Einsatzprofil der Segelfläche als sinnvoll erwiesen:

Je niedriger die Schiffsgeschwindigkeit, umso höher der zusätzliche Nutzen aus der Segelfläche. Dabei ergab sich in den gemachten Betrachtungen ein Grenzwert von 12 kn Reisegeschwindigkeit, bei der eine besonders hohe Effizienz zu erwarten ist. Bei zunehmender Reisegeschwindigkeit nimmt der Nutzen aus einer Zusatzbesegelung überproportional ab. Der Ansatz der Reisegeschwindigkeit ist dabei als konstante Größe gemacht worden. Diese Annahme entspricht nicht einem realen Segelschiff, das in Abhängigkeit der Wetterverhältnisse schwankende Reisegeschwindigkeiten hat. Die möglichen Höchstgeschwindigkeiten können sehr viel größer ausfallen. Die mögliche untere Geschwindigkeitsgrenze kann aber im reinen Segelzustand auch schon mal null betragen. Es ist daher sinnvoll, von einem maschinengetriebenen Schiff mit Zusatzbesegelung auszugehen und eine konstante Reisegeschwindigkeit anzusetzen, für die sich durch die Zusatzbesegelung eine Ersparnis erzielen lässt.

9. Einfluss der Propulsion auf das Schiff mit Zusatzbesegelung

Die gemachten Untersuchungen haben gezeigt, dass die mitlaufende Maschine grundsätzlich eine Verbesserung des Segelgütegrads bewirkt. Die Giermomente des Schiffs reduzieren sich. Ein Grund dafür ist die zusätzliche Anströmung des Ruders durch den Propeller.



Abb.: Schrägschleppversuche mit Propulsion

10. Beispiel für die Berechnung der Segelleistung

Die Bewertung eines segelnden Schiffs im Sinne des Segelgütegrads wurde auf der Basis der folgenden Daten vorgenommen:

Hydrodynamische Daten

Diese wurden im Rahmen von Schrägschleppversuchen mit Propulsion ermittelt.

Die folgenden Werte wurden dabei variiert:

- Schiffsgeschwindigkeit (drei Werte)
- Driftwinkel (0 bis 16° in 2 Grad-Schritten)
- Krängungswinkel (0°, 7,5° und 15°)

Querkraft- und Widerstandsbeiwerte für das Überwasserschiff

Für diese Daten wurden Messergebnisse von Herrn Wagner aus dem Jahr 1967 verwendet.

Querkraft und Widerstandsbeiwerte der gewählten Zusatzbesegelung

Es wurden die Querkraft- und Widerstandsbeiwerte aus der zum gewählten Segel zugehörigen Segelpolare entnommen.

Hydrostatische Daten

Es wurde eine Gleichgewichtsbedingung für das krängende Moment aus dem Segel und dem bekannten Stabilitätsumfang des Schiffs formuliert.

Aus den bekannten Daten wurden Gleichungssysteme definiert, die einen stationären Zustand für eine beliebige Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit zu den untersuchten Schiffsgeschwindigkeiten aus den Modellversuchen berechnen sollten. Das Berechnungsintervall erfolgte dabei in 10° Schritten vom Kurs zum wahren Wind.

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgte in mehreren Iterationschleifen, bis eine zuvor definierte Genauigkeit der Ergebnisse erreicht war.

Das Einsparungspotential ist dabei ein Nebenprodukt des Berechnungsganges zum Segelgütegrad. Es ist der prozentuale Anteil der berechneten Segelvortriebskraft an der zu dem stationären Zustand zugehörigen Widerstandskraft des Schiffskörpers.

Die Berechnungsergebnisse für das Beispielschiff sind in der Tabelle 1 dargestellt.

11. Schlussbemerkungen

Die Segelgütegrade bilden das mögliche Einsparpotenzial der Zusatzbesegelung in einer neutralen dimensionslosen Form ab. Der Wert erlaubt einen Vergleich unterschiedlichster Kombinationen von Rumpf und Zusatzbesegelung. Es wird darüber hinaus möglich, die Auswirkung der Optimierung von Teilsystemen auf das Gesamtsystem im Entwurfsstadium zu erkennen.

Der Segelgütegrad ist für eine neutrale, standardisierte Beurteilung von Schiffen mit Zusatzbesegelung geeignet und erlaubt bei konsequenter Anwendung eine neutrale Bewertung und einen direkten Vergleich von unterschiedlichen Schiffen mit verschiedenen Konzepten für die Besegelung.

12. Quellenverzeichnis

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1] Knut-Michael Buchalle | <i>Zur Hydrodynamik maschinengetriebener Schiffe mit Zusatzbesegelung</i>
JSTG 1988 |
| [2] Knut-Michael Buchalle | <i>Zur Hydrodynamik maschinengetriebener Schiffe mit Zusatzbesegelung Teil II</i>
Diplomarbeit FH Kiel, 1988 |
| [3] Uwe Baarß | <i>Zur Hydrodynamik maschinengetriebener Schiffe mit Zusatzbesegelung Teil I</i>
Diplomarbeit FH Kiel, 1987 |
| [4] B. Wagner | <i>Windkräfte an Überwasserschiffen</i>
JSTG 1967, Bd. 61 |
| [5] P. Schenzle
R. Siegel | <i>Segelkräfte aus dem Windkanal</i>
Fachseminar Yachtentwurf,
Hamburg 1983 |