

Wolfgang Püschl

Physik des Segelns

Wie Segeln wirklich funktioniert



SACHbuch



Wolfgang Püschl

Physik des Segelns

Für Elisabeth

Wolfgang Püschl

Physik des Segelns

Wie Segeln wirklich funktioniert



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor

Prof. Dr. Wolfgang Püschl

Universität Wien
Fakultät für Physik
Strudlhofgasse 4
1090 Wien
Österreich

1. Auflage 2012

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2012 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA,
Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Satz Reemers Publishing Services GmbH,
Krefeld

Druck und Bindung Ebner & Spiegel GmbH,
Ulm

Umschlaggestaltung Simone Benjamin,
McLeese Lake, Canada

Printed in the Federal Republic of Germany
Printed on acid-free paper

Print ISBN: 978-3-527-41106-1

ePDF ISBN: 978-3-527-64851-1

ePub ISBN: 978-3-527-64850-4

mobi ISBN: 978-3-527-64849-8

oBook ISBN: 978-3-527-64848-1

Vorwort

“After all, the art of handling ships is finer, perhaps, than the art of handling men.”

Joseph Conrad, *The Mirror of the Sea*.

Segeln bezaubert durch seine wunderbare Ästhetik: Ein schlankes Boot gleitet, von einem Windhauch vielleicht nur angetrieben, der seine ausgebreiteten Schwingen sanft umströmt, über die glatte Wasseroberfläche und zeichnet darauf sein vollendetes, ewig gleiches Linienmuster. Eine kraftvolle Hochseeyacht erkämpft sich durch grün schimmernde Wellenberge ihren Weg nach Luv und wirft nonchalant Gischtfahnen beiseite. Die Kunst des Segelns – und es handelt sich um eine hohe Kunst – ist in Jahrhunderten gewachsen und überliefert und kann in Regeln gelehrt und gelernt werden, so wie die Kunst alten Handwerks vom Meister auf den Schüler übertragen wird. Warum also Physik und höhere Mathematik? Dazu muss man sich zunächst vor Augen halten, dass ein gelernter Physiker gar nicht anders kann, als die naturwissenschaftliche Methode als das schärfste Messer der Analyse anzuwenden, wenn es ihm wirklich darum zu tun ist, ein Phänomen zu verstehen. Er gleicht darin einem Kind, das lesen gelernt hat. Es muss fortan einen Sinn herauslesen, wann immer eine Buchstabenkette auftaucht. Ebenso erging es dem Autor, der den Segelsport schon als Kind geliebt hat. Die Obsession, das Segeln vom Standpunkt des Physikers aus zu verstehen, gesellte sich nach einschlägigem Hochschulstudium ganz von selbst hinzu. Also nur intellektuelle Spielerei, in geheimnisvollen Zeichen notiert und nur einem kleinen Kreis von Eingeweihten zugänglich? Dieser Standpunkt wird eindrucksvoll widerlegt durch die breite Anwendung physikalisch-mathematischer Methoden auf das Problem des Segelns und die daraus gewonnene unerhörte Steigerung der Effizienz, durch die sich die moderne Segelyacht von ihrem Vorgänger, dem Lastensegler früherer Tage, unterscheidet. Man mag dies als Ironie der Geschichte sehen oder aber auch unter dem Aspekt großer wirtschaftlicher Bedeutung, die der Sektor Freizeitsegeln heute tatsächlich hat.

Dieses Buch wendet sich an den Physiker oder Physikstudenten, der selbst segelt oder sich zumindest für dieses Phänomen interessiert, auch deswegen, weil es eine Fülle von Anwendungen von Prinzipien der klassischen Physik enthält. Aber auch der naturwissenschaftlich interessierte Segler sollte von dem vorliegenden Werk profitieren können. Abschnitte mit etwas aufwendigerem mathematischem Formalismus kann er gefahrlos überblättern. Die wirklich wichtigen Grundaussagen sind am Ende jedes Kapitels zusammengefasst und genügen in diesem Fall. Ich habe mich bemüht, dem Buch eine sichtbare logische Grundstruktur zu geben, indem zuerst elementare Grundprinzipien eingeführt werden und dann in immer komplexeren Zusammenhängen erscheinen, zum Beispiel vom Zweidimensionalen zum Dreidimensionalen, vom gleichförmigen zum zeitlich veränderlichen Ablauf, vom Einfachen zum Zusammengesetzten, von der einzelnen Eigenschaft zum Gesamtverhalten des Systems „Segelyacht“. Das Buch ist also, mit einem modernen Ausdruck, strikt „bottom-up“ organisiert.

Wenn zwischen den Diagrammen und Formeln auch die Faszination hervorblitzt, die mich all die Jahre beseelt hat, betrachte ich meine Mission als erfüllt. Dem ambitionierten, kritischen Leser wünsche ich herzlich „Mast- und Schotbruch“.

Mondsee, August 2011

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Liste der verwendeten Symbole XI

1	Historische und gegenwärtige Bedeutung, Leistungsvergleiche	1
1.1	Höchstgeschwindigkeit	8
1.2	Etmale auf See	10
1.3	Reisezeit auf Langstrecken	10
1.4	Luvgeschwindigkeit	11
1.5	Segler des Tierreiches	12
2	Die Segelyacht im gleichförmigen Fahrtzustand	15
2.1	Kräftegleichgewicht	15
2.2	Momentengleichgewicht	21
2.2.1	Achse 1	21
2.2.2	Achse 2	25
2.2.3	Achse 3	30
3	Grundlagen der Strömungslehre	35
3.1	Dynamik einer idealen (reibungsfreien) Flüssigkeit	37
3.2	Die Eigenschaften von Wirbeln	40
3.3	Bernoulli-Theorem	44
3.4	Die ebene Potenzialströmung	45
3.5	Dynamik von Fluiden mit innerer Reibung	48
3.6	Dissipation von Wirbeln	50
3.7	Ableitung der Reynoldszahl	50
3.8	Der Strömungswiderstand von Körpern	52
4	Die Theorie des Tragflügels (Profileigenschaften)	63
4.1	Irrlehren der Auftriebsentstehung	63

4.2	Wie entsteht der Auftrieb wirklich?	65
4.3	Druckverteilung am Tragflügel	73
4.4	Ablösungsverhalten und Wirbelbildung an Tragflügelprofilen	75
4.5	Gewölbte Platte verglichen mit dickem Flügelprofil	80
4.6	Die gegenseitige Beeinflussung von Profilen	81
5	Der dreidimensionale Tragflügel	89
5.1	Randwirbel und induzierter Widerstand	89
5.2	Elliptische Auftriebsverteilung	96
5.3	Wechselwirkung mit der Wasseroberfläche	100
5.4	Verwindung (<i>Twist</i>)	102
5.5	Flügelform	104
5.6	Pfeilung	105
5.7	Auftriebsverhalten von Tragflügeln mit niedrigem Seiten- verhältnis	107
6	Der Bootskörper: Wellenerzeugung und Widerstands- komponenten, Skalierung	113
6.1	Wasserwellen (Schwerewellen)	113
6.2	Tiefenabhängigkeit der Wellenamplituden	114
6.3	Ableitung der Dispersionsrelation	117
6.4	Tiefwasserwellen	119
6.5	Seichtwasserwellen	121
6.6	Das Wellensystem eines fahrenden Schiffes	122
6.7	Wie viel PS hat eine Segelyacht?	129
6.8	Skalierungsgesetze	131
6.8.1	Hochrechnung von Modellversuchen auf wirkliche Größe	131
6.8.2	Segeltragvermögen und Skalierung der Segelfläche	134
6.9	Kenngrößen für das Wellenwiderstandsverhalten	138
6.9.1	Breite / Tiefgang-Verhältnis	138
6.9.2	Volumetrischer Koeffizient	138
6.9.3	Prismatischer Koeffizient (Schärfegrad)	142
6.9.4	Die Wellenformtheorie	142
6.10	Der Gleitzustand	143
7	Optimale Geschwindigkeit auf verschiedenen Kursen	149
7.1	Segel- und Rumpf-Polardiagramme	149
7.2	Rechnerische Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeit	155
7.3	Geschwindigkeits-Polardiagramm und Wahl des Kurses	157
7.4	Segeln in einem variablen Windfeld	162

8	Zeitabhängiges Verhalten	169
8.1	Schwingungsbewegungen des Bootskörpers	172
8.1.1	Vertikale Tauchschwingungen	173
8.1.2	Drehschwingungen: Stampfen, Rollen	176
8.1.3	Rollen vor dem Wind (engl. <i>downwind rolling</i>)	180
8.1.4	Gier-Instabilität	185
8.2	Auftriebs-Hysterese	186
8.3	Reiten auf der Welle (surfen)	189
8.4	Gefährdung durch Brecher	193
9	Mechanische Belastung und Materialien	199
9.1	Kräfte in der Takelage – Dimensionierung von Stehendem Gut und Mast	199
9.2	Kräfte auf den Rumpf	209
9.3	Baumaterialien des Rumpfes	212
9.4	Materialien für Segel	216
A1	Glossar der Seemannssprache	221
A2	Beaufort-Skala	229
A3	Metazentrum eines Baumstammes	233
A4	Dimensionsanalyse	237
A5	Ableitung der Kutta-Joukowski-Gleichung	239
A6	Verfahren nach Prohaska	243
A7	Impulsübertrag, Kraft, Leistung, Kinetische Energie	245
A8	Elliptische Auftriebsverteilung und Berechnung des induzierten Widerstandes	249
A9	Linienriss einer Rennjolle	253
	Literatur	257
	Stichwortverzeichnis	259

Liste der verwendeten Symbole

Alle fettgedruckten Symbole sind Vektoren, kursiv gedruckte Symbole bezeichnen skalare Variable. Die Geschwindigkeiten mit „ v “ werden aufrecht geschrieben, um Verwechslung mit der kinematischen Zähigkeit ν zu vermeiden. Aufrecht gedruckte Großbuchstaben bezeichnen Punkte (Orte). Nur vorübergehend verwendete Rechenhilfsvariable sind nicht erklärt.

A	Referenzfläche (für Widerstand und Auftrieb); Wellenamplitude
α	Anstellwinkel des Segels
α_{eff}	Effektiver Anstellwinkel
α_i	Induzierter Anstellwinkel
A_W	Fläche der Schwimmwasserlinie
B	Auftriebsschwerpunkt
b	Schiffsbreite; allg. Exponent; Spannweite (eines Doppelflügels)
β	Abdriftwinkel (= Anstellwinkel des Unterwasserschiffs); reduzierte Dämpfungskonstante
B_0	Auftriebsschwerpunkt in aufrechter Schwimmlage
B_{ft}	Windstärke nach Beaufort
c	Sehnenlänge des Profils
C_1, C_2, C_3	Druckkräfte im Rigg
c_D	Widerstandsbeiwert (Profil)
C_D	Widerstandsbeiwert (Flügel)
C_{Di}	Beiwert des Induzierten Widerstandes (Flügel)
C_{DW}	Beiwert des Wellenwiderstandes
C_F	Koeffizient des Reibungswiderstandes eines Schiffes
C_L	Lateralschwerpunkt
c_L	Auftriebsbeiwert (Profil)
C_L	Auftriebsbeiwert (Flügel)
C_P	Prismatischer Koeffizient
C_{Res}	Koeffizient des Restwiderstandes eines Schiffes
C_S	Segelschwerpunkt
C_S	Proportionalitätsfaktor für Segelflächenskalierung

C_T	Koeffizient des Gesamtwiderstandes eines Schiffes
C_V	Volumetrischer Koeffizient
D	Richtmoment (Direktionsmoment); Widerstand (skalar)
Δ	Laplace-Operator ($\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$); Wasserverdrängung (in N)
∂A	Berandung einer Fläche A
δ	Segel-Einstellwinkel
δ_{ik}	Kronecker-Delta (= 1, wenn $i = k$ und 0 sonst)
D_1, D_2, D_3	Zugkräfte im Stehenden Gut
D_A	Aerodynamischer Widerstand
Δx_B	Verlagerung des Auftriebsschwerpunktes
df	Flächenelement
D_H	Hydrodynamischer Widerstand
D_W	Wellenwiderstand (skalar)
ϵ_A	Aerodynamischer Gleitwinkel
ϵ_H	Hydrodynamischer Gleitwinkel
E	Elastizitätsmodul
η	Dynamische Zähigkeit; normierte Flügelspannweite
F	Allgemein: Kraft
f	Analytische Funktion; Frequenz
F	Kraft (auch im Komplexen)
F_K	Knickkraft
F_A	Aerodynamische Vortriebskraft
F_B	Auftriebskraft
F_G	Gewicht
$F_{G,W}$	Gewicht der mitgeschleppten Wassermenge
f_R	Reduzierte Frequenz
Fr	Froude-Zahl
g, g	Gravitationsbeschleunigung
γ	Winkel zwischen Scheinbarem Wind und Kurs des Schiffes; Dämpfungskonstante; Korrekturfaktor für Reibungswiderstand
γ_W	Winkel zwischen Wahren Wind und Kurs des Schiffes
G	Gewichtsschwerpunkt
\overline{GM}	Metazentrische Höhe
\overline{GM}_L	Longitudinale Metazentrische Höhe
Γ	Zirkulation
i	Imaginäre Einheit, $i = \sqrt{-1}$
I, I_x, I_y	Flächenträgheitsmomente
k	Federkonstante (harmon. Oszillator); Wellenvektor (Betrag)
kn	Knoten (1,852 km/h)
L	Charakteristische Länge; Wasserlinienlänge; Auftrieb (Skalar)
l	Länge (allgemein)

L_A	Aerodynamischer Auftrieb
Λ	Seitenverhältnis eines Flügels
λ	Wellenlänge
L_H	Hydrodynamischer Auftrieb
L_H^*	Gesamter hydrodynamischer Auftrieb (L_H ist die Horizontal- komponente davon).
$L_{H,R}$	Hydrodynamischer Auftrieb, Anteil des Ruderblatts
$L_{H,S}$	Hydrodynamischer Auftrieb, Anteil des Schwertes
M	Metazentrum
m	Masse
M	Biegemoment
M_a	Aufrichtendes Drehmoment
m_W	Mitgeschleppte Wassermasse
∇	Nabla-Operator (Gradient, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$; Verdrängtes Volumen
ν	Kinematische Zähigkeit
Ω	Kreisfrequenz der Störfunktion
Ω	Wirbelstärke
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenfrequenz (Kreisfrequenz) eines (harmonischen) Oszillators
p	Druck
ϕ	Krängungswinkel; Realteil einer analytischen Funktion
$\dot{\phi}$	Dimensionslose Geschwindigkeit
ψ	Imaginärteil einer analytischen Funktion
ψ_x, ψ_z	Auslenkungen der Wasserteilchen aus der Ruhelage (Orbitalbe- wegung von Wellen)
R	Radius (geometrisch)
R_A	Aerodynamische Gesamtkraft
Re	Reynoldszahl
R_G	Trägheitsradius
R_{GW}	Trägheitsradius der mitgeschleppten Wassermenge
R_H	Hydrodynamische Gesamtkraft
ρ	Dichte; lokaler Krümmungsradius
S	Segelfläche
s	Spannweite (eines Flügels); Knicklänge
S_A	Aerodynamische Seitenkraft
S_A^*	Aerodynamische Seitenkraft normal zum Mast (S_A ist die Hori- zontalkomponente davon).
S_H	Hauptspanfläche (eingetaucht)
σ_{ik}	Spannungstensor
St	Strouhal-Zahl
STZ	Segeltragezahl

t	Profiltiefe; Zeit
T	Tiefgang
Θ	Trägheitsmoment (eines Schiffes)
T_R	Tiefgang des Rumpfes
u	Geschwindigkeit (Strömung)
u_0	Geschwindigkeit (einer Anströmung)
v	Geschwindigkeit des Scheinbaren Windes; Strömungsgeschwindigkeit
v_0	Geschwindigkeit (einer Anströmung)
v_G	Gruppengeschwindigkeit
v_H	Horizontale Geschwindigkeit (Flugzeug)
VMG	<i>Velocity Made Good</i> = Zielgeschwindigkeit, im engeren Sinn Luvgeschwindigkeit
v_P	Phasengeschwindigkeit
v_R	Rumpfgeschwindigkeit
v_S	Schiffs-(Boots-)Geschwindigkeit
v_{Si}	Sinkgeschwindigkeit (Flugzeug)
v_W	Geschwindigkeit des Wahren Windes
w	Abwind
\mathbf{x}	Ortsvektor
W	Widerstandsmoment
$\vec{\zeta}$	Dimensionslose Raumkoordinate
x_a	Aufrichtender Hebelarm
z	Komplexe Zahl; Ortskoordinate
ζ	Integrationsvariable

1

Historische und gegenwärtige Bedeutung, Leistungsvergleiche

Die Verwendung von Windkraft zum Antrieb von Wasserfahrzeugen geht bis weit in prähistorische Zeiten zurück¹⁾. Wir wissen nicht, wann zum ersten Mal ein früher Mensch eine geflochtene Matte oder eine Tierhaut auf seinem Floß gesetzt hat, um es von einer günstigen Brise antreiben zu lassen. Die älteste bekannte Darstellung eines Segels findet sich jedenfalls auf einer Totenurne aus Luxor (Ägypten), die aus dem 5. Jahrtausend v. Chr. stammt. Gesichert sind weiters Hilfsbesegelungen in Ägypten seit etwa 4000/3000 v. Chr. Seegehende Segelschiffe besaßen die Phönizier etwa ab dem 2. Jahrtausend v. Chr. Sie sollen angeblich unter Pharaon Necho II etwa 600 v. Chr. damit bereits Afrika umsegelt haben. Bekannt sind die Leistungen der Wikinger, die um etwa 1000 n. Chr. Nordamerika erreicht haben, das sie wegen des dort vorkommenden wilden Weins „Vinland“ nannten.

Während ihre Drachenboote (Langschiffe, Abb. 1.1) und die etwas runder gebauten Handelsschiffe (Knarr) mit rechteckigen Rahsegeln ausgerüstet waren, verfügt die Dau (oder Dhau) des arabischen Kulturkreises

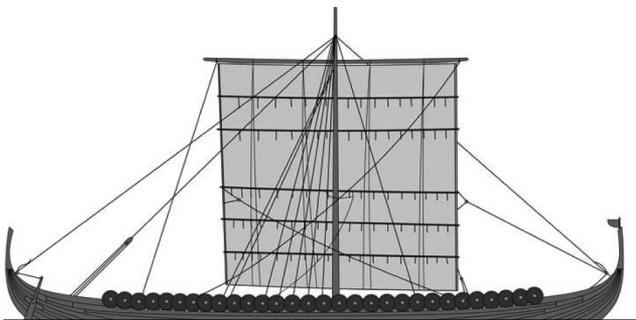


Abb. 1.1 Langschiff der Wikinger (Wikimedia Commons, Ningyou).

1) Zur Geschichte des Schiffs mit naturgemäß starkem Bezug auf das Segelschiff siehe z. B. *History of the Ship* (Woodman, 2002).

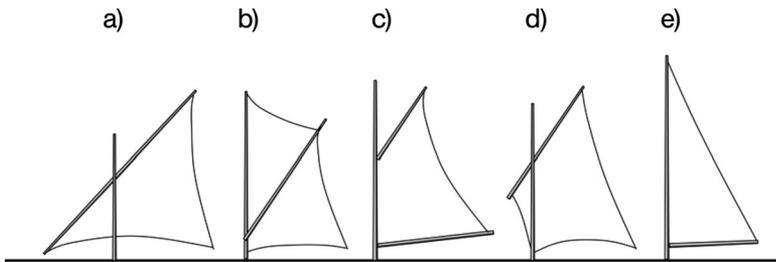


Abb. 1.2 Verschiedene Arten von Schratsegeln (*fore-and-aft sails*): a) Lateinersegel, b) Sprietsegel, c) Gaffelsegel, d) Luggersegel, e) Bermudasegel (Hochtakelung).

über ein dreieckiges Lateinersegel²⁾, das schließlich für den Mittelmeerraum charakteristisch wurde und daher seinen Namen hat. Mit diesen Schiffen wurde bereits um die Zeitenwende unter Ausnutzung des Monsun-Windsystems der Indische Ozean befahren. Somit entwickelten sich schon früh zwei grundsätzlich verschiedene Typen von Segeln, die quer zum Schiff stehenden *Rahsegel* (engl. *square sail*), die größere Vortriebskraft vor dem Wind brachten, und die mehr in Längsrichtung orientierten *Schratsegel* (engl. *fore-and-aft sail*) wie *Lateiner-*, *Spriet-*, *Gaffel-* und *Luggersegel*, mit denen ein Aufkreuzen gegen den Wind vorteilhafter war (Abb. 1.2). Zu dieser Kategorie gehört auch die bei modernen Segelyachten übliche *Hochtakelung* (sog. *Bermudasegel*).

Unabhängig davon entstand in China ab etwa 700 n. Chr. der Typ der *Dschunke* (Abb. 1.3), der über eine hervorragend bedienbare *Amwindbesege-lung* (Schratsegel!) verfügt, die den Lattensegeln moderner Yachten nicht unähnlich ist. Diese Fahrzeuge erreichten beträchtliche Größe und trugen mehrere Masten, lange bevor dies in Europa der Fall war. Die Seemachtambitionen Chinas, verkörpert durch den Admiral und Eunuchen Zheng He unter der Ming-Dynastie mit Reisen hunderter Schiffe (1405–1433) bis ins Rote Meer, fanden später durch politische Selbstbeschränkung ein jähes Ende.

Nicht zu vergessen sind auch die Leistungen der seefahrenden Völker, die in einem über Jahrtausende erstreckten Prozess die gesamte Inselwelt des Pazifiks besiedelten (Austronesische Wanderung, ausgehend von Südchina 3500 v. Chr. bis etwa 1000 n. Chr. – Besiedelung Neuseelands). Sie bedienten sich Auslegerkanus mit hervorragenden Segeleigenschaften, wie sie heute noch von den Einwohnern Polynesiens benützt werden.

2) Oft in der Variante des Dau- oder Settee-Segels, bei dem ein Stück des vorderen Ecks abgeschnitten ist.

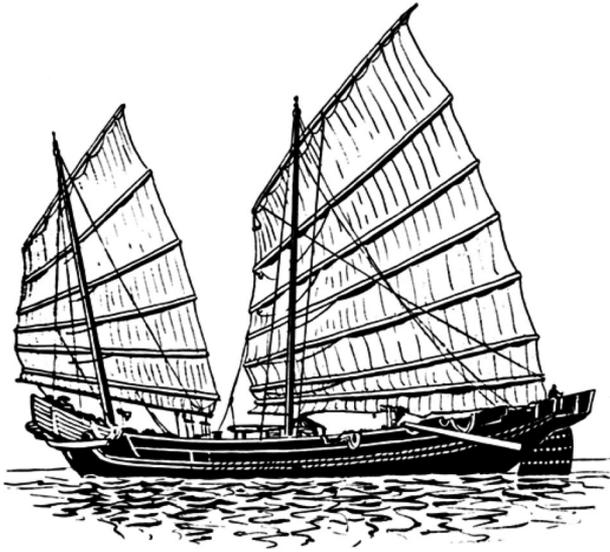


Abb. 1.3 Das Dschunkenrigg – eine effektive Amwindbesegelung. (Wikimedia Commons, Pearson Scott Forsman).

Im europäischen Raum tritt die Bedeutung des Hochseesegelschiffes mit den Koggen der Hanse (13. bis 15. Jahrhundert) in den Vordergrund, wobei das in der Mittschiffsebene angebrachte und um eine feste Achse drehbar gelagerte Steuerruder eine bedeutende Verbesserung der Manövrierfähigkeit darstellte. Ältere Schiffstypen wurden nämlich mit einem oder mehreren seitlich angebrachten Rudern gesteuert³⁾. Mit dem Zeitalter der Entdeckungsreisen, das mit dem 15./16. Jahrhundert einsetzte, und an dessen Anfang noch vergleichsweise kleine Schiffe standen, wie etwa die Karavelen der Portugiesen, mit denen Kolumbus nach Amerika segelte und Vasco da Gama den Seeweg nach Indien entdeckte, kamen allmählich größere Schiffe auf, die immer kompliziertere Takelagen mit einer wachsenden Anzahl von Rahsegeln übereinander (*Mars, Bram, Royal* etc.) an mehreren Masten trugen. Allen Schiffsfreunden wohlvertraut sind Begriffe wie *Galeone, Karacke, Fleute*, schließlich die *Ostindienfahrer* (Abb. 1.4), Postschiffe („*packets*“) und *Klipper* des 18. und 19. Jahrhunderts, die den ausgereiften Typ des großen, seegehenden Schiffes mit drei rahgetakelten Masten (*Voll-*

3) Bei den Schiffen der Wikinger war dieses stets an der in Fahrtrichtung gesehen rechten Schiffseite angebracht. Der Steuermann ging seiner Tätigkeit zum Ruder gewandt nach und zeigte

mit seinem Rücken zur linken Schiffseite. Darum heißt bis heute die rechte Schiffseite Steuerbord und die linke Backbord.



Abb. 1.4 Ostindienfahrer, Nachbau der „Batavia“ (holländisch, 17. Jahrhundert) (Wikimedia Commons, ADZee).

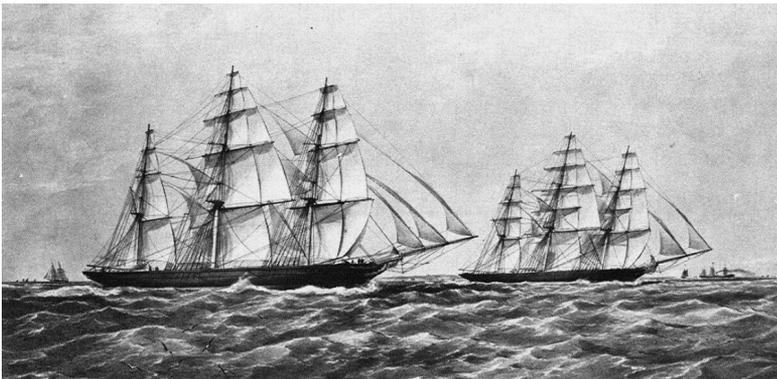


Abb. 1.5 Teeklipper „Ariel“ und „Taeping“ bei ihrem berühmten Wettrennen im Ärmelkanal.. (Shewan, 1927).

schiff, engl. *ship* schlechthin, Abb. 1.5) darstellten⁴⁾. Triebfedern für die Entwicklung besonders schneller Segelschiffe waren illegaler Handel und

4) Zu verschiedenen Segelschiffstypen siehe *The story of sail* (Veres und Woodman, 1999) mit einer großen Fülle von Abbildungen.

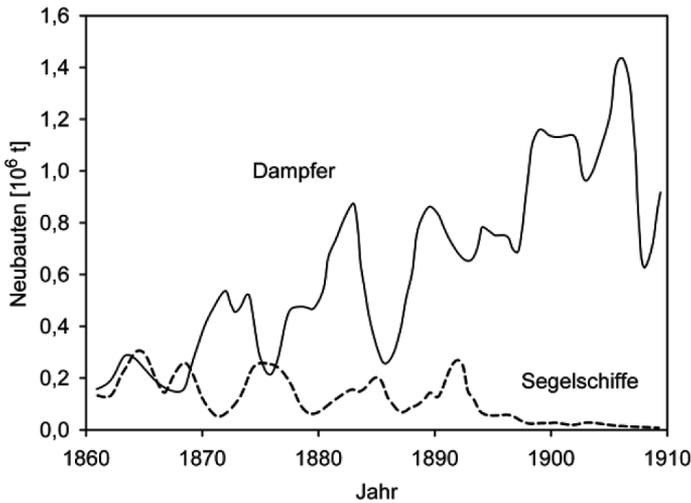


Abb. 1.6 In Großbritannien neu gebaute Schiffe. Tonnage in Einheiten von 1 Million Tonnen (Daten: Encyclopaedia Britannica, 1926).

seine Bekämpfung (Opium- und Sklavenfahrt), der Transport leicht verderblicher Luxusgüter (Tee) und der Goldrausch in Kalifornien 1848.

Das Segelschiff blieb durch viele Jahrhunderte das Fernreisemittel schlechthin. Die Konkurrenz zwischen Dampfschiffahrt und Segelschiffahrt währte lange Zeit. Noch 1890 hatten die Segelschiffe einen Anteil von 41 % der Welttonnage, der bis 1914 auf 7,5 % und bis 1937 allmählich auf 1,5 % sank. In einer Graphik, die den Anteil von Dampf- und Segelantrieb bei Neubauten in den Jahren 1865 bis 1890 in England zeigt, ist der Übergang zum maschinellen Antrieb deutlich zu sehen (Abb. 1.6).

In der Küstenfahrt sind vor allem in Ländern der Dritten Welt, jedoch bisweilen sogar in Europa, bis zum heutigen Tag vereinzelt Segelschiffe anzutreffen, die dem Transport und der Fischerei dienen („Arbeitssegler“).

In jüngster Zeit sind wieder ernsthafte Bemühungen im Gange, die Windkraft für die Handelsschiffahrt zumindest als Hilfsantrieb nutzbar zu machen. Die Firma Skysails (Deutschland) bietet ein System an, bei dem von einem ausfahrbaren Mast ein Flugdrachen bis in eine Höhe von mehreren 100 m steigen gelassen wird. Der Vorteil ist dabei die höhere Windstärke in diesen Luftschichten. Zusätzlich lässt man diesen Drachen sich in Achterschleifen bewegen, wodurch eine höhere scheinbare Windgeschwindigkeit und noch größerer Vortrieb erzielt werden. Bei guten Windverhältnissen lässt sich damit eine Antriebsleistung von bis zu 2000 kW erzeugen (Abb. 1.7, siehe auch www.skysails.info).



Abb. 1.7 Drachenantrieb für Handelsschiffe der Firma Skysails (Foto © Skysails, mit freundlicher Genehmigung).

Auch auf dem Gebiet des Sports spielen Drachenantriebe (Kitesurfen) eine immer größere Rolle. Den aktuellen Geschwindigkeitsrekord unter Segel hält ein Kitesurfer (siehe Abschnitt 1.1).

Rotierende Zylinder (Flettner-Rotoren) können ebenfalls die Windkraft nutzen und werden neuerdings wieder kommerziell eingesetzt (Näheres dazu in Kapitel 4).

Wenn wir heute von „segeln“ sprechen, dann meinen wir fast ausschließlich eine sportliche Betätigung, abgesehen von einigen Segelschulschiffen, die der Ausbildung in der Kriegs- und Handelsmarine dienen, und neuerdings auch großen Segel-Passagierschiffen („Sea Cloud“, „Royal Clipper“, „Star Clipper“ etc.). Das Segeln als Zeitvertreib kam im 18. Jahrhundert in den Niederlanden auf und wurde im England des 19. Jahrhunderts zum exquisiten Sport des Hochadels und der Industriemagnaten entwickelt (Abb. 1.8 Schoner „Susanne“). Der Begriff „Yacht“ kommt von „Jagd“ und bedeutet ein kleines, schnell segelndes Schiff. Damit verlagert sich der Schwerpunkt vom Lastentransport zum Segeln als sportlicher Wettbewerb und Freizeitvergnügen: Nicht großes Fassungsvermögen bei noch akzeptabler Geschwindigkeit, also insgesamt große Transportleistung, sondern allein die Erzielung größtmöglicher Geschwindigkeit steht an oberster Stelle der Forderungen des (Renn-) Yachtseglers. Diese haben wiederum je nach Größe des Bootes, dem Revier mit seinen Wind- und Wetterverhält-



Abb. 1.8 Schoner „Susanne“ 1910 (Foto: © Beken of Cowes).

nissen und der zu bewältigenden Distanzen eine Fülle von verschiedenen Segelyachttypen hervorgebracht (mehr dazu in *Die Yacht* (Sciarelli, 1973), *Die Geschichte des Yachtsports* (Charles, 2006), *Segelsport, Segeltechnik, Segelyachten* (Baader, 1962) etc.). Während man um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert Geschwindigkeit vor allem aus großen Segelflächen zu schöpfen suchte, begannen in den 1920er Jahren die Erkenntnisse der Aerodynamik und die Anfänge moderner Segeltheorie die Konstruktionen zu beeinflussen. Die Gaffeltakelage wurde von der Hochtakelung mit höherem Seitenverhältnis und besseren Kreuzeigenschaften abgelöst, und die Rümpfe wurden strömungsgünstiger und leichter. Noch immer war man hauptsächlich bemüht, die Eigenschaften des Rumpfes bei klassischer Verdrängungsfahrt zu optimieren, was zu besonders lang gestreckten Formen führte. Die damals eingeführten Klassen der *Schärenkreuzer* und *Rennjollen* (Abb. 1.9) illustrieren dieses Konzept. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts treten zuerst bei Jollen, Katamaranen und Windsurfern, schließlich aber auch bei Hochsee-Rennyachten Gleiteigenschaften in den Vordergrund.

Im Verlauf der folgenden Kapitel werden wir bei allen Erörterungen immer die moderne Segelyacht vor Augen haben. Manche Sichtweisen,

a)



b)



Abb. 1.9 Yachten aus den 1920er Jahren a) 40 m²-Schärenkreuzer (Foto: Autor), b) 20 m²-Rennjolle (Foto: Elisabeth Püschl).

die uns dabei vollkommen natürlich erscheinen, sind im Verlauf der jahrhundertelangen Entwicklung der Segelschifffahrt durchaus nicht selbstverständlich gewesen, sondern haben sich erst langsam und mühsam durchgesetzt. Dazu kommt, dass der Seefahrer stets zu einem konservativen, ja abergläubisch allem Neuen gegenüber ablehnenden Verhalten neigte, so dass die Entwicklung sehr allmählich erfolgte.

Es ist eine Ironie der Geschichte, dass gerade heute, wo der Segelantrieb seine (direkte) kommerzielle Bedeutung verloren hat, die Segeltechnik ungeheure Fortschritte gemacht hat, sodass neben den Leistungen moderner Yachten sogar die berühmten Schnellsegler von einst verblissen. Die folgenden Leistungsvergleiche sollen dies illustrieren.

1.1 Höchstgeschwindigkeit

Ein typisches Handelsschiff vergangener Jahrhunderte erzielte im Schnitt eine Geschwindigkeit von wenigen Knoten, meistens deutlich unter 10 kn (1 Knoten = 1 Seemeile pro Stunde = 1,852 km/h). Höchstgeschwindigkeiten von etwa 10 kn konnten jedoch bereits von Hansekoggen erreicht werden, wie man bei Probefahrten mit Nachbauten feststellte. Eine Höchstgeschwindigkeit von über 10 kn ist auch für die Langschiffe der Wikinger plausibel, da bei Fahrten mit Nachbauten 14 kn erreicht wurden. Die berühmtesten Schnellsegler des 19. Jahrhunderts, die Teeklipper, konnten bis etwa 22 kn laufen (Log der „Sovereign of the Seas“), Geschwindigkeiten



Abb. 1.10 „Hydroptère“ (Foto: Gilles Martin-Raget).

von an die 20 kn sind auch von den großen stählernen Frachtseglern der Laeisz-Reederei („Flying P-Line“) auf der Route nach Südamerika überliefert. Solche Geschwindigkeiten können heute jedoch von relativ kleinen Gleitjollen unter günstigsten Verhältnissen erreicht werden und von modernen Einrumpf-Hochseeeyachten, wie sie beim Volvo Ocean Race eingesetzt werden, über lange Strecken mühelos übertroffen werden. Was Geschwindigkeit unter Segeln auf dem Wasser betrifft, so ist die „50-Knoten-Schallmauer“ bereits gefallen. Der aktuelle Segel-Geschwindigkeitsrekord⁵⁾ über eine 500 m-Strecke beträgt 55,65 kn, aufgestellt 2010 mit einem Kitesurfer von Rob Douglas vor Lüderitz (Namibia). Der Rekord über eine Seemeile wird von Alain Thébault mit dem Tragflügel-Trimaran „Hydroptère“ (Abb. 1.10) mit 50,17 kn gehalten, aufgestellt im November 2009 vor Hyères (Frankreich).

Der Weltrekord im Eissegeln beträgt 229 km/h entsprechend 124 kn, aufgestellt 1938 (!) von John D. Buckstaff auf dem Lake Winnebago, USA (umstritten, deutlich über 150 km/h jedenfalls gesichert). Das Landsegelfahrzeug Ecotricity Greenbird erzielte 2009 202,9 km/h, auf dem Dry Lake Ivanpah.

5) Segel-Geschwindigkeitsrekorde werden häufig verbessert. Um auf dem Laufenden zu bleiben, empfehlen wir die

Homepage des World Sailing Speed Record Concil (WSSRC): www.sailspeed-records.com

1.2 Etmale auf See

Aussagekräftiger im Vergleich mit historischen Segelschiffen sind auf jeden Fall größere Distanzen, die auf See zurückgelegt werden. Bei den Teeklippern galt ein *Etmal* („*day's run*“ = die innerhalb von 24 Stunden zurückgelegte Distanz) von 200 sm als gute Leistung. Die „Cutty Sark“ verzeichnete als größtes Etmal 363 sm, das Fünfmast-Vollschiff „Preussen“ (Laeisz) 1903 eines von 368 sm, die „Champion of the Seas“ bereits 1854 ein Etmal von 465 sm.

Die augenblicklichen Rekorde für eine in 24 Stunden zurückgelegte Distanz sind 908,2 sm entsprechend 37,84 kn Durchschnitt, aufgestellt 2009 vom Trimaran Banque Populaire V (131 Fuß) gesteuert von Pascal Bidegorry, Frankreich. Die beste Leistung für eine Einrumpfyacht ist 596,6 sm entsprechend 24,85 kn Schnitt, aufgestellt 2008 von „Ericsson 4“, einer Yacht vom Typ Volvo 70 unter Torben Grael (Abb. 1.11). Wenngleich der Rekord der Ericsson 4 nicht so viel mehr erscheint als die 465 Seemeilen von 1854, so ist doch zu bedenken, dass er von einem Boot mit 24 m Länge aufgestellt wurde, während die „Champion of the Seas“ 84 m lang war. (Die Rumpfgeschwindigkeit beträgt bei dieser Länge 22 kn, was die berichtete Geschwindigkeit durchaus plausibel macht – vgl. Kapitel 6).

a)



b)



Abb. 1.11 a) „Banque Populaire V“ (Foto: © B.Stichelbaut/BPCE), b) „Ericsson 4“ (Foto: © Dave Kneale).

1.3 Reisezeit auf Langstrecken

Für ein Segelschiff war es im 19. Jahrhundert nicht ungewöhnlich, zur Überquerung des Atlantiks drei bis vier Wochen zu benötigen. Bei einer Transatlantik-Regatta im Jahre 1905 stellte der Dreimastschoner „Atlantic“ einen legendären Rekord von 12 Tagen, vier Stunden und einer Minute auf (10,02 kn Schnitt), der erst im Jahr 1980 unterboten wurde. Den aktuellen

Rekord hält 2009 der Trimaran Banque Populaire V unter Pascal Bidegorry mit 3 d 15 h 25 m 48 s und einer Durchschnittsgeschwindigkeit (!) von 32,94 kn. Besonders bemerkenswert ist dabei, dass der noch immer gültige Dampfer-Rekord für das „Blaue Band des Nordatlantik“, aufgestellt von der SS „United States“ (1952) 3 d 12 h 12 m beträgt, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 34,51 kn. Es handelt sich dabei um ein Schiff mit einer Länge von 301,9 m!

Zur ersten Weltumsegelung benötigte Magellans Flotte noch drei Jahre (mit ein paar Zwischenstopps allerdings). In der Zeit der Klipper galt eine Reise von England nach Australien mit 62 Tagen als Rekord („Thermopylae“ von London nach Melbourne 1868), ein sehr guter Wert waren auch etwa 90 Tage von China nach England. Eine berühmte Reise der „Flying Cloud“ führte 1851 von New York nach San Francisco in 89 Tagen. Dieser Wert wurde erst in den 1980er Jahren unterboten. Der augenblickliche Rekord für eine Nonstop-Weltumsegelung stammt aus dem Jahr 2012: Der Trimaran „Banque Populaire V“ bewältigte die Strecke unter Loick Peyron in 45 Tagen (19,75 kn Schnitt). Dieser Rekord wurde im Rahmen der „Jules Verne Trophy“ aufgestellt, deren ursprüngliches Motto es war, die Welt in weniger als 80 Tagen zu umsegeln.

Bei allen Rekorden aus der klassischen Segelschiffsära ist zu bedenken, dass auch sie für die damalige Zeit extreme Spitzenleistungen darstellen und der typische Frachtsegler wesentlich länger brauchte, wie denn auch der heutige Fahrtensegler hinter den Leistungen hochgezüchteter Ozean-Rennmaschinen weit zurückbleibt.

1.4 Luvgeschwindigkeit

Nicht nur Höchstgeschwindigkeit, sondern auch die Fähigkeit schnell gegen den Wind aufzukreuzen gilt als Kriterium für die Leistungsfähigkeit einer modernen Segelyacht. Hier sind die rahgetakelten Großsegler einer modernen Yacht stark unterlegen. Als Richtwert für die Kreuztüchtigkeit eines klassischen Rahschiffes wird ein gesteuerter Kurs von 6 Strich am Wahren Wind angegeben, das entspricht 67,5 Grad. Die reine *Luvgeschwindigkeit* (Zielgeschwindigkeit nach Luv, engl. oft als *velocity made good* – VMG – bezeichnet, das ist die Geschwindigkeitskomponente genau in Windrichtung) ergibt sich aus der Multiplikation der Bootsgeschwindigkeit mit dem Cosinus dieses Winkels, $\cos(67,5^\circ) \approx 0,38$. Eine moderne Rennyacht geht etwa 40° an den Wahren Wind. Der entsprechende Faktor $\cos(40^\circ) \approx 0,77$ ist etwa doppelt so groß, d. h. bei gleicher Geschwindigkeit kann ein modernes Fahrzeug ein Ziel in Windrichtung doppelt so schnell erreichen. Darüber hinaus ist aber auch noch der Abdriftwinkel einer

modernen Yacht wegen ihres strömungstechnisch ausgefeilten Kiels und Rumpfs wesentlich geringer als beim „kistenförmigen“ Großsegler, sodass sich der relative Vorteil noch vergrößert. Dazu kommt weiters, dass Großsegler nur unter günstigen Umständen zwischen den Kreuzschlägen wenden können und sehr oft gezwungen sind, zu halsen, womit viel Weg nach Luv verschenkt wird. Also kein Wunder, dass Großsegler oft Wochen brauchten, um Kap Hoorn gegen die dort vorherrschenden starken Westwinde zu umrunden und öfters aufgaben und die Westküste Südamerikas schließlich mit einer Fahrt in östlicher Richtung an Australien vorbei ansteuereten.

Einige Daten: Die 12 m-R-Yacht „Intrepid“ erreichte 1970 eine maximale Luvgeschwindigkeit von 7,5 kn bei 20 kn Wahrer Windgeschwindigkeit = 5 Bft (Marchaj, 1991). Eine 20 m²-Rennjolle erzielt bei diesen Verhältnissen etwa 5 kn Luvgeschwindigkeit, allerdings ohne Seegang (eigene Erfahrung des Autors). Während eines Trainingslaufs zum America's Cup 2010 hat der Katamaran „Alinghi 5“ bei einer Windgeschwindigkeit von 8–9 kn einen Kreuzkurs mit darauffolgender Vorwindstrecke von je 20 sm mit einer durchschnittlichen Zielgeschwindigkeit von 1,9mal der Wahren Windgeschwindigkeit absegelt. Die bemerkenswerte Tatsache ist, dass man heute, was die VMG betrifft, sowohl schneller als der Wind gegen den Wind als auch vor dem Wind kreuzen kann. Bei solchen extremen Booten kommt der Scheinbare Wind immer spitz von vorne, auch wenn der Wahre Wind von achtern kommt (dazu mehr in den Kapiteln 2 und 7).

1.5 Segler des Tierreiches

Das Prinzip des Tragflügels hat sich die Evolution schon frühzeitig zunutze gemacht, und das klassische Beispiel sind Vögel und andere Flugtiere. Manfred Curry vergleicht in seinem klassischen Buch *Die Aerodynamik des Segels und die Kunst des Regatta-Segelns* (Curry, 1925) den Vogelflügel mit einer zeitgenössischen Takelage (Abb. 1.12). Das gleiche Prinzip kommt auch im Unterwasserbereich zur Anwendung (Fische, Pinguine etc.) sowie in der Pflanzenwelt bei geflügelten Samen.

Es gibt allerdings auch Tiere, die das Gesamtkonzept einer Segelyacht verkörpern, indem sie sich an der Grenzfläche der beiden Medien bewegen, nämlich Segelqualen wie die *Portugiesische Galeere* (Abb. 1.13). Sie segeln mit Hilfe ihres Rückenkamms, der aus dem Wasser ragt und jeweils nach der Leeseite hin gewölbt werden kann, während ihre Unterwasser-Anhänge die Funktion eines Schwertes oder Kiels haben. Manfred Curry beobachtet sie im Mittelmeer und schreibt über sie „So ziehen diese