

Wolfgang Püschl

Physik des Segelns

Wie Segeln wirklich funktioniert

ΔL_{dynam}

C_s

C_L

SACHbuch



Inhaltsverzeichnis

[Vorwort](#)

[Liste der verwendeten Symbole](#)

[1 Historische und gegenwärtige Bedeutung, Leistungsvergleiche](#)

[1.1 Höchstgeschwindigkeit](#)

[1.2 Etmale auf See](#)

[1.3 Reisezeit auf Langstrecken](#)

[1.4 Luvgeschwindigkeit](#)

[1.5 Segler des Tierreiches](#)

[2 Die Segelyacht im gleichförmigen Fahrtzustand](#)

[2.1 Kräftegleichgewicht](#)

[2.2 Momentengleichgewicht](#)

[3 Grundlagen der Strömungslehre](#)

[3.1 Dynamik einer idealen \(reibungsfreien\) Flüssigkeit](#)

[3.2 Die Eigenschaften von Wirbeln](#)

[3.3 Bernoulli-Theorem](#)

[3.4 Die ebene Potenzialströmung](#)

[3.5 Dynamik von Fluiden mit innerer Reibung](#)

[3.6 Dissipation von Wirbeln](#)

[3.7 Ableitung der Reynoldszahl](#)

3.8 Der Strömungswiderstand von Körpern

4 Die Theorie des Tragflügels (Profileigenschaften)

4.1 Irrlehren der Auftriebsentstehung

4.2 Wie entsteht der Auftrieb wirklich?

4.3 Druckverteilung am Tragflügel

4.4 Ablösungsverhalten und Wirbelbildung an
Tragflügelprofilen

4.5 Gewölbte Platte verglichen mit dickem
Flügelprofil

4.6 Die gegenseitige Beeinflussung von Profilen

5 Der dreidimensionale Tragflügel

5.1 Randwirbel und induzierter Widerstand

5.2 Elliptische Auftriebsverteilung

5.3 Wechselwirkung mit der Wasseroberfläche

5.4 Verwindung (Twist)

5.5 Flügelform

5.6 Pfeilung

5.7 Auftriebsverhalten von Tragflügeln mit
niedrigem Seitenverhältnis

6 Der Bootskörper: Wellenerzeugung und Widerstandskomponenten, Skalierung

6.1 Wasserwellen (Schwerewellen)

6.2 Tiefenabhängigkeit der Wellenamplituden

6.3 Ableitung der Dispersionsrelation⁸

6.4 Tiefwasserwellen

6.5 Seichtwasserwellen

6.6 Das Wellensystem eines fahrenden Schiffes

6.7 Wie viel PS hat eine Segelyacht?

6.8 Skalierungsgesetze

6.9 Kenngrößen für das
Wellenwiderstandsverhalten

7 Optimale Geschwindigkeit auf verschiedenen Kursen

7.1 Segel- und Rumpf-Polardiagramme

7.2 Rechnerische Bestimmung der
Fahrtgeschwindigkeit

7.3 Geschwindigkeits-Polardiagramm und Wahl
des Kurses

7.4 Segeln in einem variablen Windfeld

8 Zeitabhängiges Verhalten

8.1 Schwingungsbewegungen des Bootskörpers

8.2 Auftrieb-Hysterese

8.3 Reiten auf der Welle (surfen)

8.4 Gefährdung durch Brecher

9 Mechanische Belastung und Materialien

9.1 Kräfte in der Takelage - Dimensionierung von
Stehendem Gut und Mast

9.2 Kräfte auf den Rumpf

9.3 Baumaterialien des Rumpfes

9.4 Materialien für Segel

[Anhang A1 Glossar der Seemannssprache](#)

[Anhang A2 Beaufort-Skala](#)

[Anhang A3 Metazentrum eines Baumstammes](#)

[Anhang A4 Dimensionsanalyse](#)

[Anhang A5 Ableitung der Kutta-Joukowski-Gleichung](#)

[Anhang A6 Verfahren nach Prohaska](#)

[Anhang A7 Impulsübertrag, Kraft, Leistung, Kinetische Energie](#)

[Anhang A8 Elliptische Auftriebsverteilung und Berechnung des induzierten Widerstandes](#)

[Anhang A9 Linienriss einer Rennjolle](#)

[Literatur](#)

[Stichwortverzeichnis](#)

Wolfgang Püschl

Physik des Segelns

Wie Segeln wirklich funktioniert



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Für Elisabeth

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.

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 Wasserfläche 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

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_j	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
Bft	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
$\Delta \mathbf{x}_B$	Verlagerung des Auftriebsschwerpunktes
$d\mathbf{f}$	Flächenelement
D_H	Hydrodynamischer Widerstand
D_W	Wellenwiderstand (skalar)
ϵ_A	Aerodynamischer Gleitwinkel
ϵ_H	Hydrodynamischer Gleitwinkel
E	Elastizitätsmodul
η	Dynamische Zähigkeit; normierte Flügelspannweite
\mathbf{F}	Allgemein: Kraft
f	Analytische Funktion; Frequenz
F	Kraft (auch im Komplexen)
F_K	Knickkraft
\mathbf{F}_A	Aerodynamische Vortriebskraft
\mathbf{F}_B	Auftriebskraft
\mathbf{F}_G	Gewicht
$F_{G,W}$	Gewicht der mitgeschleppten Wassermenge
f_R	Reduzierte Frequenz
Fr	Froude-Zahl
\mathbf{g}, g	Gravitationsbeschleunigung

γ	Winkel zwischen Scheinbarem Wind und Kurs des Schiffs; Dämpfungskonstante; Korrekturfaktor für Reibungswiderstand
γ_W	Winkel zwischen Wahrem Wind und Kurs des Schiffs
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 Krängungswinkel; Realteil einer analytischen Funktion

ϕ

ϕ	Dimensionslose Geschwindigkeit
ψ	Imaginärteil einer analytischen Funktion
ψ_x, ψ_z	Auslenkungen der Wasserteilchen aus der Ruhelage (Orbitalbewegung von Wellen)
R	Radius (geometrisch)
\mathbf{R}_A	Aerodynamische Gesamtkraft
Re	Reynoldszahl
R_G	Trägheitsradius
R_{GW}	Trägheitsradius der mitgeschleppten Wassermenge
\mathbf{R}_H	Hydrodynamische Gesamtkraft
ρ	Dichte; lokaler Krümmungsradius
S	Segelfläche
s	Spannweite (eines Flügels); Knicklänge
\mathbf{S}_A	Aerodynamische Seitenkraft
\mathbf{S}_A^*	Aerodynamische Seitenkraft normal zum Mast (\mathbf{S}_A ist die Horizontalkomponente davon).
S_H	Hauptspantfläche (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)
\mathbf{v}	Geschwindigkeit des Scheinbaren Windes; Strömungsgeschwindigkeit
v_0	Geschwindigkeit (einer Anströmung)
v_G	Gruppengeschwindigkeit
\mathbf{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
x	Ortsvektor
W	Widerstandsmoment
ξ	Dimensionslose Raumkoordinate
x_a	Aufrichtender Hebelarm
z	Komplexe Zahl; Ortskoordinate
ζ	Integrationsvariable

1

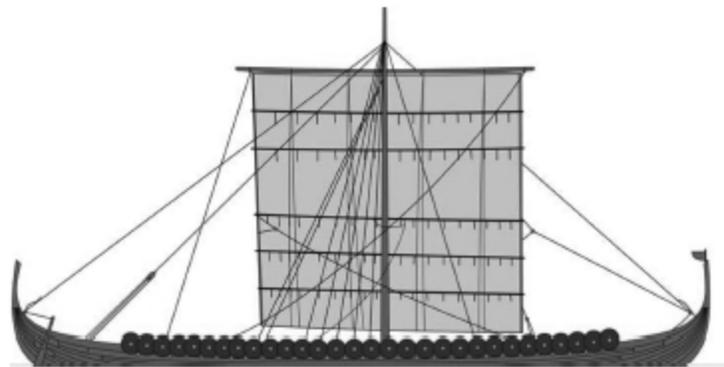
Historische und gegenwärtige Bedeutung, Leistungsvergleiche

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 Pharao 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.

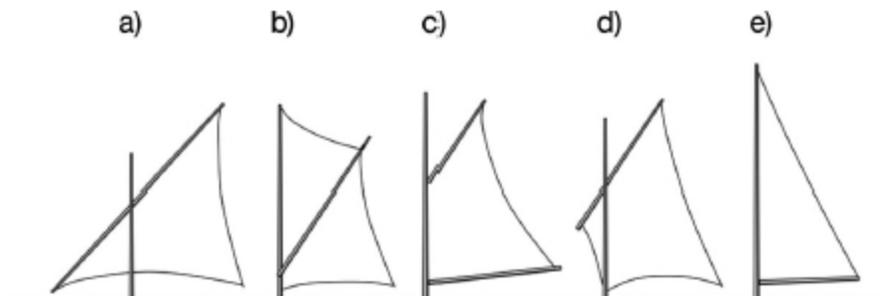
Während ihre Drachenboote (Langschiffe, [Abb. 1.1](#)) und die etwas rundlicher gebauten Handelsschiffe (Knarr) mit rechteckigen Rahsegeln ausgerüstet waren, verfügt die Dau (oder Dhau) des arabischen Kulturkreises über ein dreieckiges Lateinersegel²⁾, das schließlich für den Mittelmeerraum charakteristisch wurde und daher seinen Namen hat. Mit diesen Schiffen wurde bereits um die

Zeitenwende unter Ausnützung 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*).

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



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

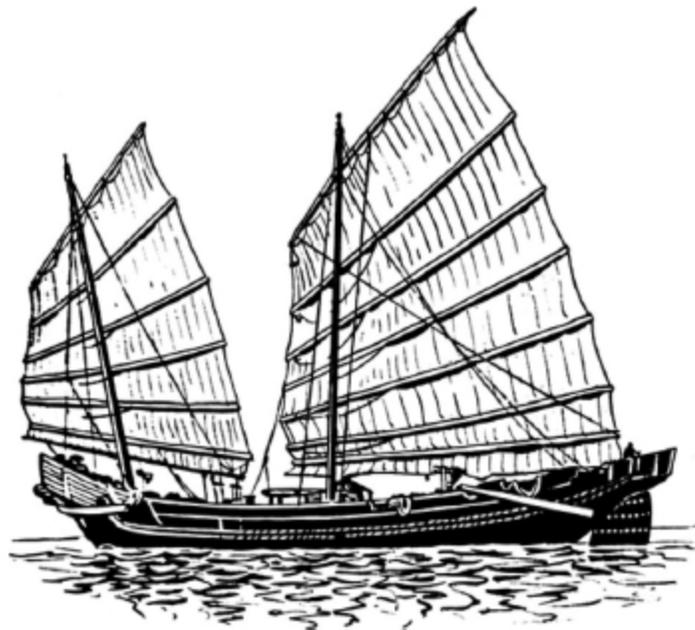


Unabhängig davon entstand in China ab etwa 700 n. Chr. der Typ der *Dschunke* ([Abb. 1.3](#)), der über eine hervorragend bedienbare *Amwindbesegelung* (Schratsegel!)

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.

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 Karavellen 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 (*Vollschiff*, engl. *ship* schlechthin, [Abb. 1.5](#)) darstellten⁴⁾. Triebfedern für die Entwicklung besonders schneller Segelschiffe waren illegaler Handel und seine Bekämpfung (Opium- und Sklavenfahrt), der Transport leicht verderblicher Luxusgüter (Tee) und der Goldrausch in Kalifornien 1848.

[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).

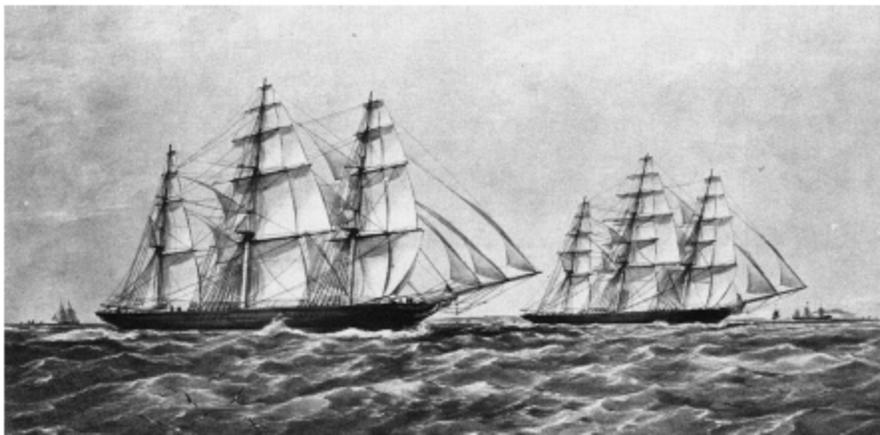
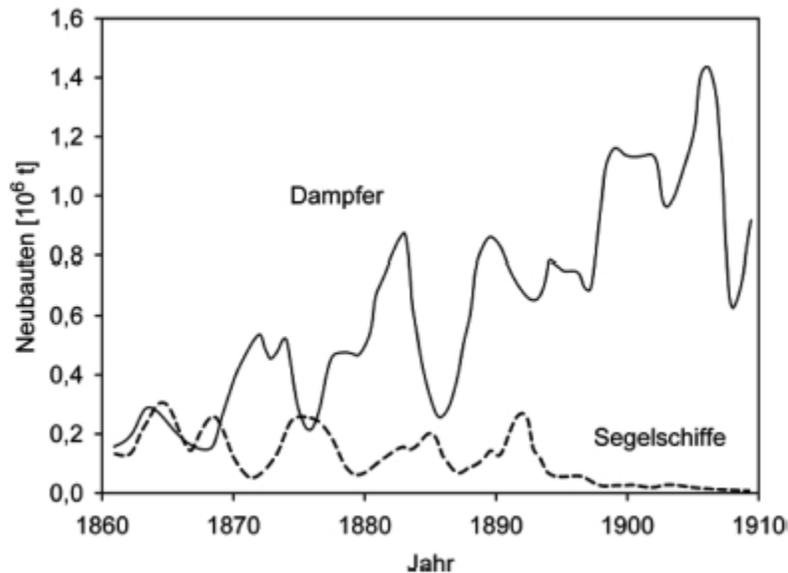


Abb. 1.6 In Großbritannien neu gebaute Schiffe. Tonnage in Einheiten von 1 Million Tonnen (Daten: Encyclopaedia Britannica, 1926).



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 Wetterverhältnissen 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.

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



Im Verlauf der folgenden Kapitel werden wir bei allen Erörterungen immer die moderne Segelyacht vor Augen haben. Manche Sichtweisen, die uns dabei vollkommen natürlich erscheinen, sind im Verlauf der jahrhundertelangen Entwicklung der Segelschiffahrt 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, sodass die Entwicklung sehr allmählich erfolgte.

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

a)



b)



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 verblassen. 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 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-Hochseejachten, 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).

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



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.

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).

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