

Systematische Untersuchung der Hydrodynamik historischer Großsegler

Systematic Analysis of the Hydrodynamics of Historical Sailing Vessels

Stefan Harries,* Dirk Böndel,** Konrad Geistert,* Karsten Hochkirch***

*ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin

** Deutsches Technikmuseum Berlin

*** Institut für Schiffs- und Meerestechnik der Technischen Universität Berlin

Summary

The paper presents an experimental analysis of the hydrodynamics of traditional square-riggers. Several historical sailing vessels –two frigates from the 18th century, the *Cutty Sark* and the Hanse ship of Lübeck from the 15th century– were towed at the Berlin Model Basin (ZE VWS) of the Technical University of Berlin. Realistic heel and yaw angles were systematically taken into account, utilizing a special roll-yaw device which allows free trim and sinkage. Two historical square-rigged vessels will be focused on in the paper: the French frigate *Hébé* dating back to 1782 and the frigate *Bellona* designed in 1778 by the Swedish naval architect Fredrik Henrik af Chapman.

Resistance and hydrodynamic lift are analyzed for speeds from $F_n=0.10$ to 0.34 in dependence of heel and yaw. The hydrodynamic characteristics of both vessels will be compared.

The two ships and the times in which they were built will be discussed, giving special attention toward emerging differences in design methodology. The two sailing vessels serve to illustrate the commencement of the shift from workmanship to engineering in the field of naval architecture.

Kurzfassung

Der Beitrag faßt experimentelle Untersuchungen zur Hydrodynamik von Großseglern zusammen. Mehrere historische Segler –zwei Fregatten aus dem 18. Jahrhundert, der Teeklipper *Cutty Sark* und das Lübecker Hanseschiff aus dem 15. Jahrhundert– wurden in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin systematisch unter Berücksichtigung realistischer Krängungs- und Driftwinkel geschleppt. Hierzu wurde ein spezielles Roll-Gier-Gerät eingesetzt, das freien Trimm und freie Tauchung bei realistischen Krängungs- und Driftwinkeln erlaubt. Zwei Großsegler werden im speziellen vorgestellt, einerseits die französische Fregatte *Hébé* aus dem Jahr 1782 und andererseits die Fregatte *Bellona* nach einem Entwurf des schwedischen Konstrukteurs Fredrik Henrik af Chapman von 1778.

Widerstand und hydrodynamischer Querkraft wurden für einen Froude-Bereich von $F_n=0,10$ bis 0,34 in Abhängigkeit verschiedener Krängungs- und Driftwinkel analysiert. Die hydrodynamischen Eigenschaften beider Großsegler werden miteinander verglichen.

Die beiden Schiffe werden in ihre Zeit eingeordnet, wobei insbesondere auf Unterschiede in den Entwurfsverfahren eingegangen wird. Anhand der beiden Großsegler wird der Anfang des Wechsels vom Handwerk zur Ingenieurwissenschaft im Schiffbau aufgezeigt.

1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit historischer Schiffe zu bestimmen, ist eine interdisziplinäre Aufgabe, der sich Historiker und Ingenieure zunehmend gemeinsam stellen. Von besonderem Interesse sind dabei die großen Segelschiffe vergangener Jahrhunderte, die einerseits durch ihre zeitlose Schönheit bestechen und andererseits wesentlich die militärische und wirtschaftliche Entwicklung Europas und der neuen Welt bis zum Ende des 19. Jahrhunderts mitbestimmt haben.

Von den vielen Facetten der Technikgeschichte soll in diesem Beitrag nur ein kleiner Ausschnitt betrachtet werden: die Hydrodynamik historischer Großsegler in glattem Wasser. Dabei wird spezielles Augenmerk auf zwei Fregatten des 18. Jahrhundert gerichtet, die stellvertretend für zwei unterschiedliche Entwurfsverfahren stehen:

- Die französische Fregatte *Hébé*, deren Linien nach dem Vorbild ähnlicher Schiffe weitgehend nach guter handwerklicher und schiffbaulicher Tradition gebildet wurden.
- Die schwedische Fregatte *Bellona*, deren Form erstmals nach aus heutiger Sicht modernen Entwurfsverfahren von af Chapman entwickelt wurde.

Nach einer historischen Einordnung, Kapitel 2, werden diese beiden Schiffe ausführlich vorgestellt, Kapitel 3. Die Experimente werden in Kapitel 4 kurz beschrieben. Ausgewählte Ergebnisse werden in Kapitel 5 präsentiert. Eine Zusammenfassung und eine Besprechung zukünftiger Arbeiten schließen den Beitrag ab.

2 Historische Einordnung und ausgewählte Schiffe

2.1 Geschichtlicher Überblick

Bei den beiden untersuchten Fregatten handelt es sich um Schiffe, die während des Amerikanischen Unabhängigkeitskrieges entworfen wurden und die als Vertreter der Standardvariante des Kreuzers für die Zeit der Revolutionskriege und der Napoleonischen Kriege betrachtet werden müssen. Diese Epoche ist durch entscheidende historische Ereignisse wie die Amerikanische Unabhängigkeitserklärung, die Französische Revolution, die Neuordnung Europas während des Wiener Kongresses und den Beginn der industriellen Revolution geprägt. In den vierzig Jahren von 1775 bis 1815 befanden sich Europa und die überseeischen Besitzungen der europäischen Kolonialmächte fast durchgehend im Kriegszustand, der lediglich von 1783 bis 1792 und 1802 bis 1803 durch kurze Friedensperioden unterbrochen wurde. Als maßgebliche Kontrahenten standen sich hierbei die Landmacht Frankreich und die Seemacht Großbritannien gegenüber.

2.2 Französische Fregatte *Hébé*

Die 1782 in St. Malo in Dienst gestellte *Hébé* gehört zu der 1780 von Jacques-Noël Sané entworfenen *Vénus*-Klasse. Hierbei handelte es sich um sogenannte Achtzehnpfänder-Fregatten, was bedeutet, daß sie als Hauptbewaffnung 26 bis 30 Langrohrgeschütze trugen, deren Vollkugeln eine Masse von etwa 18 Pfund aufwiesen. Die *Vénus*-Klasse muß als die erfolgreichste Klasse dieser Fregattenvariante betrachtet werden, da nicht nur mehr als die Hälfte aller französischen Achtzehnpfänder-Fregatten ihr angehörten, sondern sie auch von den Briten kopiert wurde. Nach den Linien der von der Royal Navy gekaperten *Hébé* entstanden auf britischen Werften die Fregatten der *Leda*-Klasse, die mit fast 25% die anzahlstärkste britische Klasse von Achtzehnpfänder-Fregatten darstellt.

Das Quellenmaterial für eine zeichnerische Rekonstruktion dieser Klasse ist als sehr gut zu bewerten, was angesichts ihrer Verbreitung nicht verwundert. In der Admiralty Collection des National Maritime Museums (in Greenwich, London) existieren Risse (Seitenansicht, Wasserlinien- und Spantenriß) sowohl der *Hébé* als auch anderer genommener Schiffe der *Vénus*-Klasse und beim Service Historique (bei Paris) sind außer Plänen auch Angaben über die Dimensionierung des Balkenwerks, die Ausrüstung und die Takelage zu finden. Darüber hinaus ist die *Vénus* in einer Monografie (Boudriot und Berti, 1979) ausführlich beschrieben. Der für Modellversuche rekonstruierte Riß der *Hébé* ist in Abb. 1 dargestellt.

2.3 Schwedische Fregatte *Bellona*

Die *Bellona* wurde 1778 von Fredrik Henrik af Chapman, dem führenden Schiffbauingenieur seiner Zeit, entworfen und als namensgebendes Schiff einer Klasse von 10 Fregatten 1782 in Karlskrona in Dienst gestellt. Sie war als Achtzehnpfänder-Fregatte konzipiert, doch entschloß sich die schwedische Admiralität 1788 beim Ausbruch des Krieges mit Rußland, sie mit 26 Vierundzwanzigpfündern auf dem Großdeck auszurüsten. Damit kann sie als erste Vierundzwanzigpfänder-Fregatte angesehen werden. 1809 wurde die *Bellona* außer Dienst gestellt. Zwei Schiffe der *Bellona*-Klasse –die *Galathea* und die *Eurydice* – waren bis 1854 bzw. 1858 im Einsatz, was die Bedeutung dieser Klasse für die schwedische Marine unterstreicht.

Ähnlich wie bei der *Hébé* ist auch bei der *Bellona* die Quellenlage ausgezeichnet. Im Sjöhistoriska Museum in Stockholm befinden sich außer Seitenansicht, Wasserlinienriß und Spantenriß auch ein Segelplan der *Bellona*

und im Rigsarkivet in Kopenhagen sind Pläne eines Schwesterschiffes, der schwedischen *Venus*, archiviert, die von 1789 stammen und das fertiggestellte und ausgerüstete Schiff zeigen. Abb. 2 gibt den für die Modellversuche erstellten Riß der *Bellona* wieder.

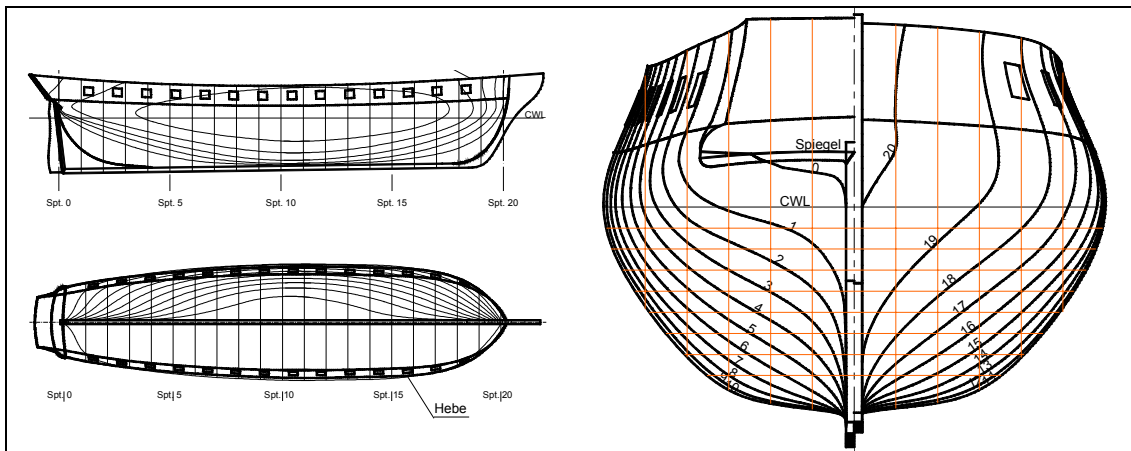


Abb. 1. Linien der französischen Fregatte *Hébé*
(Lines of French frigate *Hébé*)

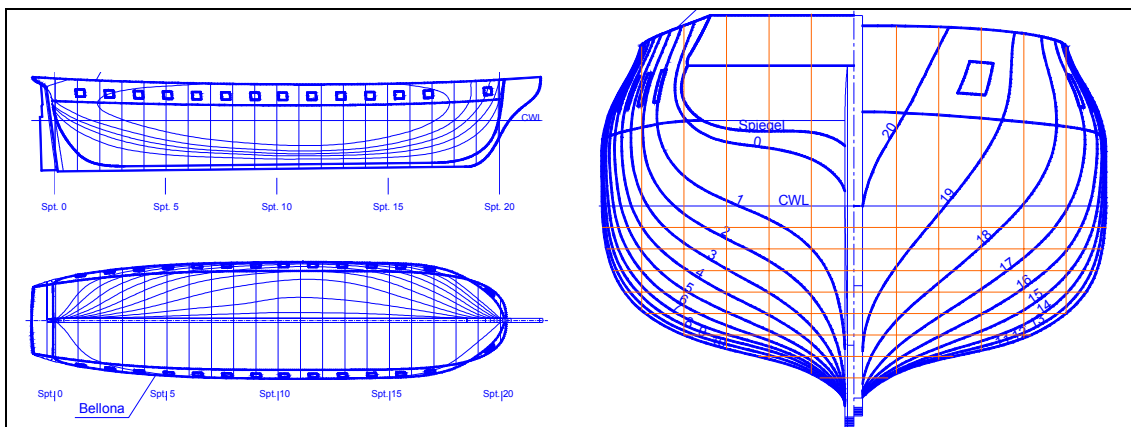


Abb. 2. Linien der schwedischen Fregatte *Bellona*
(Lines of Swedish frigate *Bellona*)

2.4 Der Übergang vom Handwerk zur Ingenieurwissenschaft

Ein Vergleich dieser beiden Fregatten ist sowohl technikgeschichtlich als auch ingenieurwissenschaftlich interessant, da sie in Bezug auf ihre Hauptabmessungen sehr nahe beieinander lagen (siehe Tab. 1) und ihre Aufgabenbereiche sich zu einem großen Teil überschneiden, sie aber nach unterschiedlichen Methoden entworfen wurden. Beruht die Entwurfsmethode der *Hébé* noch auf Verfahren, deren Wurzeln im 16. Jahrhundert liegen, so sind die Schiffe der *Bellona*-Klasse nach einer von Chapman in den 70er Jahren des 18. Jahrhunderts neu entwickelten Methode konzipiert worden. Dieses Verfahren –das von Chapman *Parabelmethode* genannt wurde und im folgenden erläutert werden soll– gestattet im Unterschied zu allen bis dahin gebräuchlichen Vorgehensweisen, die Berechnung bestimmter Parameter bereits *vor* der Anfertigung der Risse bzw. der Fertigstellung des Rumpfes. Gleichzeitig fußt es auf systematisch erhobenen empirischen Daten.

Definiert man die Etablierung einer Disziplin als Natur- bzw. Ingenieurwissenschaft mit dem systematischen Einsatz empirischer und mathematischer Verfahrensweisen, die das Ziel haben, fundierte und überprüfbare Prognosen zu gewährleisten, muß man Chapmans Parabelmethode als den für den Schiffbau entscheidenden Schritt vom Handwerk zur Ingenieurwissenschaft betrachten.

2.5 Entwurfsverfahren im 18. Jahrhundert

Im 18. Jahrhundert wurde beim Entwurf eines Kriegsschiffes zunächst vom Auftraggeber –also der Admiralität– festgelegt, wie viele durchgehende Geschützdecks das Fahrzeug besitzen sollte, welche Kaliber die Geschütze auf den Batteriedecks aufweisen und wie viele Kanonen dort stehen sollten.

Nach diesen Grundsatzentscheidungen wurden vom Konstrukteur die Hauptabmessungen festgelegt. Besonders die Länge hing hierbei maßgeblich von der Anzahl und dem Kaliber der Hauptbewaffnung ab. Die Abmessungen der Stückpforten wurde durch das Kaliber der Geschütze vorgegeben und auch der lichte Abstand zwischen den Stückpforten konnte in nur geringem Maße variiert werden, da für die Mannschaft genügend Raum für die Bedienung der Kanonen zur Verfügung stehen mußte. Deshalb war die Mindestlänge des Schiffes durch die Bewaffnung bestimmt und die Gesamtlänge konnte vom Konstrukteur im wesentlichen nur dadurch beeinflusst werden, daß er die Abstände der vordersten Pforte zum vorderen Lot und der achterlichsten Pforte zum hinteren Lot festsetzte. Auch die größte Breite des Schiffes mußte einen bestimmten Mindestwert aufweisen, damit genügend Raum für den Rücklauf der Kanonen vorhanden war. Schließlich mußten die unteren Trempel der Stückpforten einen bestimmten Mindestabstand zur Konstruktionswasserlinie besitzen, damit das Fahrzeug auch bei schwerem Wetter und entsprechender Krängung gefechtsbereit war. Diese Bemerkungen machen deutlich, in welchem Maße Anordnung, Anzahl und Kaliber der Geschütze den Entwurf von Kriegsschiffen in jener Zeit bestimmten.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte wurde mit der Zeichnung der Risse begonnen, wobei hier nur auf die Anfertigung des Spantenrisses bzw. die Konstruktion des Hauptspants eingegangen werden soll, da alle anderen Spantstationen aus dem Hauptspant geometrisch abgeleitet wurden. Die Skizze in Abb. 3 gibt die in Großbritannien während der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts gebräuchliche Methode zur Hauptspantkonstruktion wieder. Es wird deutlich, daß bei diesem Verfahren lediglich Segmente von Kreisbögen um die Mittelpunkte L, J, H, F und E sowie das Geradenstück GI (das Seitenflach) und das Kurvenstück ON, das für die Ausprägung der Aufkimmung maßgeblich war, zur Spantumrißlinie zusammengesetzt wurden. Die Einflußmöglichkeiten des Konstrukteurs beschränkten sich im wesentlichen auf die Wahl der Kreismittelpunkte, Höhe und Breite der Aufkimmung sowie die Länge des Seitenflachs. Existierten zu dem hier gezeigten Verfahren auch mehrere Varianten und nationale Unterschiede, so kann man doch festhalten, daß der Entwurf von Schiffen in jener Zeit generell auf nur zwei geometrischen Elementen, Gerade und Kreis, beruhte. Mit diesen konnte zwar ein strakender Verlauf gewährleistet werden, hydrodynamische Überlegungen sowie vorausgehende Berechnungen bestimmter Parameter (wie z.B. der Verdrängung) flossen jedoch nicht in den Entwurfsprozeß ein.

Chapman war sich dieses gravierenden Nachteils bewußt und setzte empirische Betrachtungen an den Anfang seiner Bemühungen, zu einer besseren Entwurfsmethode zu gelangen. Anhand einer großer Anzahl von ihm zur Verfügung stehenden bzw. von ihm angefertigten Rissen versuchte er, ein gemeinsames Merkmal jener Schiffe zu bestimmen, deren Verhalten auf See allgemein als gut bewertet wurde. Dabei kam er zu dem Ergebnis, daß sich die Spantarealkurven dieser Fahrzeuge durch Parabeln beschreiben ließen. Chapman leitete daraus die Forderung ab, daß künftig beim Entwurf eines Schiffes nach Festlegung der Länge in der KWL und der größten Breite jedoch *vor* Anfertigung des Spantenrisses die Spantarealkurve gezeichnet werden müßte, welche eine Parabelform aufweisen sollte und damit mathematisch beschreibbar wurde. Nachdem der Scheitelpunkt der Parabeln entsprechend der gewünschten Position des Spants maximaler Fläche verschoben worden war, konnten die Spanten aus der Spantarealkurve entwickelt werden. Hierbei sollten die Spanten nicht mehr aus Kreisbogensegmenten, sondern aus Parabelstücken zusammengesetzt werden. In Abb. 4 ist zu erkennen, daß im Bereich des Lebenden Werks (unterhalb der KWL) die Umrißlinie des Hauptspants aus zwei Parabelsegmenten zusammengesetzt ist, an die sich für das Seitenflach ein Geradenstück anschließt.

Chapman erachtete seine Arbeiten auf diesem Gebiet für so bedeutend, daß er sie –lediglich andeutungsweise– erst kurz vor seinem Tod (in Chapman, 1804) niederschrieb und dabei wesentliche Fragen, wie die nach den Methoden zur Ermittlung der Parabeln sowohl für die Spantarealkurve und als auch für die Spantkonstruktion, unbeantwortet ließ.

Zumindest theoretisch ist seine Methode der älteren eindeutig vorzuziehen: Die Parabelmethode gestattete erstmalig die Berechnung und damit Festlegung mehrerer Parameter (wie der Verdrängung und des Verdrängungsschwerpunktes) vor Anfertigung der Schiffsrisse, gewährleistete eine harmonische Verdrängungsverteilung über die Länge und vermeidete die Unstetigkeiten (im Krümmungsverlauf), die bei der Spantkonstruktion aus Kreisbogensegmenten auftraten. Ein Vergleich der hydrodynamischen Eigenschaften der beiden Fregatten zeigt nun, ob sich diese theoretische Überlegenheit auch praktisch niedergeschlagen hat.

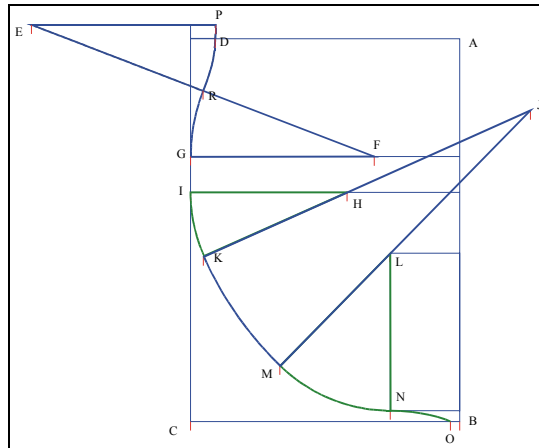


Abb. 3. Hauptspantkonstruktion aus Kreisbogensegmenten
(Design of maximum section from circular arcs)

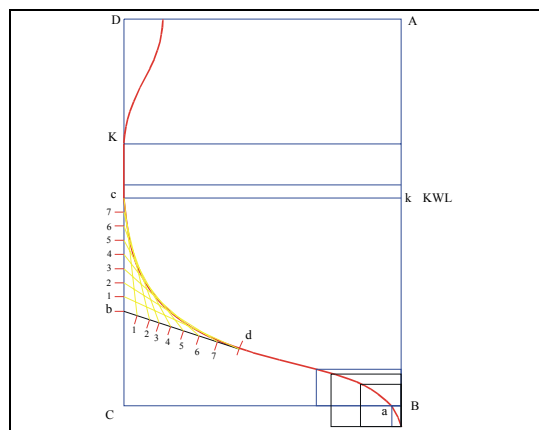


Abb. 4. Hauptspantkonstruktion aus Parabelsegmenten
(Design of maximum section from parabolas)

3 Schiffe im Vergleich

3.1 Hauptabmessungen

Vier historische Großsegler wurden in den vergangenen Jahren an der ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin untersucht: die französische Fregatte *Hébé* und die schwedische Fregatte *Bellona* aus dem 18. Jahrhundert, der Klipper *Cutty Sark* aus dem 19. Jahrhundert sowie das Lübecker Hanseschiff aus dem 15. Jahrhundert. Zur Einordnung sind die Hauptabmessungen dieser vier Schiffe in Tab. 1 gegenübergestellt. Alle Daten beziehen sich, wenn nicht anders gekennzeichnet, auf die Großausführung.

Die französische Hebe war auf Konstruktionstiefgang mit einer Verdrängung von 1350 m^3 (auf $T_{\max} = 5,69 \text{ m}$) geringfügig größer als die schwedische *Bellona* mit 1178 m^3 (auf $T_{\max} = 5,17 \text{ m}$). Bezüglich ihrer Konstruktionswasserlinie mit einer Länge um 46 m und einer maximalen Breite von etwa 12 m waren beide Schiffe sehr ähnlich.

3.2 Spantenrisse und Spantarealkurven im Vergleich

Für einen Formvergleich wurden die Spantenrisse der beiden Großsegler in Abb. 5 mit der Konstruktionswasserlinie als Bezugsebene überlagert (*Hébé*: durchgezogene dicke Linien; *Bellona*: gestrichelte dünne Linien).

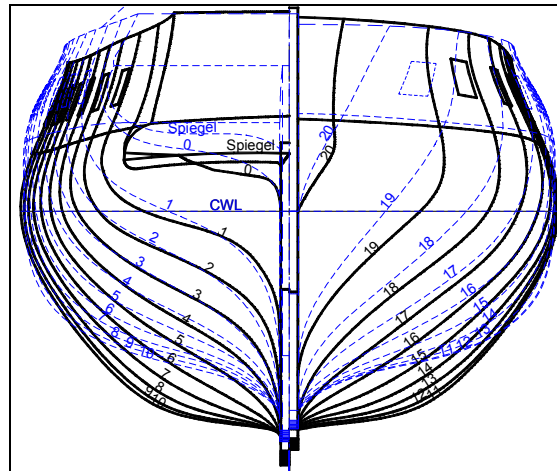


Abb. 5. Spantenrisse für *Hébé* und *Bellona*
(Body plans of *Hébé* and *Bellona*)

Die französische *Hébé* weist einen größeren Eintrittswinkel der KWL am vorderen Lot auf und ist im Bugbereich entsprechend völliger als die schwedische *Bellona*. Insgesamt besitzt die *Hébé* eine etwas größere Wasserlinienfläche bei weiter vorlich liegendem Wasserlinienschwerpunkt, Details siehe Tab. 1. Aufgrund der verschiedenen Entwurfsphilosophien unterscheiden sich die Spantcharakteristika beider Schiffe deutlich voneinander. So ist beispielsweise das Seitenflach der *Bellona* im Mittschiffsbereich ausgeprägt, während die *Hébé* kein Seitenflach um die Schwimmwasserlinie, also rundere Formen, erkennen läßt. Die geringere Verdrängung der *Bellona* rührt in erster Linie vom kleineren Tiefgang. Entsprechend unterschiedlich sind die Spantverläufe im unteren Bereich der Rumpfe.

Abb. 6 dokumentiert die Spantarealkurven beider Schiffe auf Konstruktionstiefgang T_1 sowie für einen kleineren Tiefgang T_2 (Verdrängungen siehe Tab. 1 bzw. Tab. 3). (Die Spantarealkurve der *Bellona* auf KWL läßt sich dabei sehr gut durch zwei quadratische Polynome annähern, deren Scheitelpunkte am Spant mit der maximalen Fläche liegen und jeweils das Vor- bzw. Hinterschiff bis kurz vor die Lote sauber beschreiben. Allerdings ist technikgeschichtlich bislang ungeklärt, ob Chapman mit zwei Parabelstücken im Sinne eines Splines oder mittels einer einzigen Parabel seine Spantarealkurven entworfen hatte. Bei Verwendung einer einzelnen Parabel für das ganze Schiff mußte er diese jedoch systematisch verzerrt haben, um zum vorliegenden Verlauf zu kommen.)

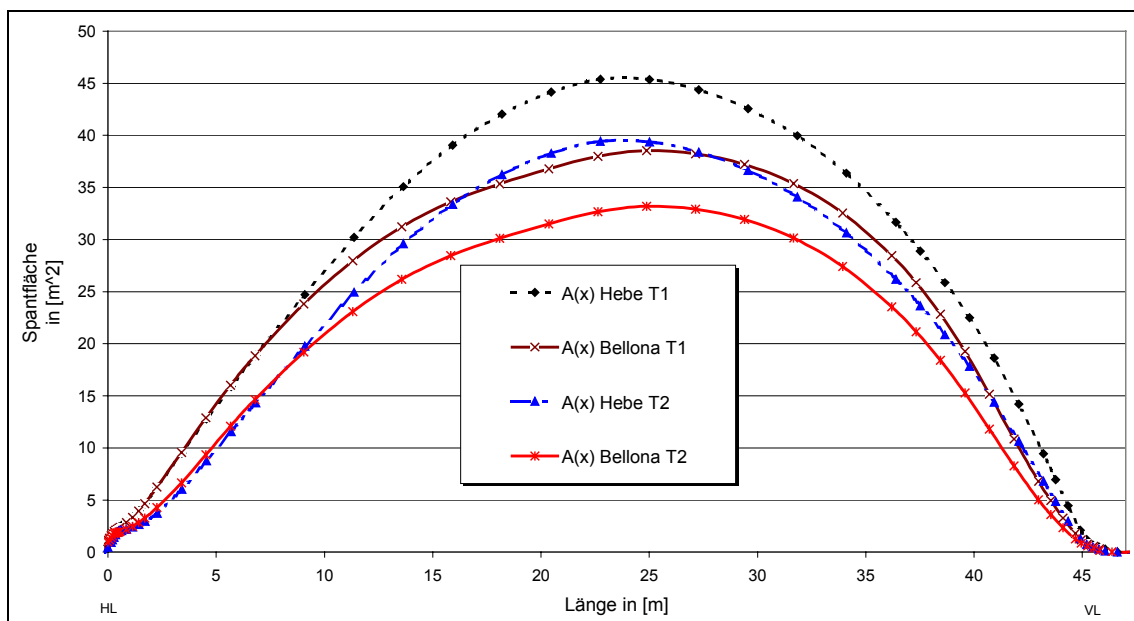


Abb. 6. Spantarealkurven für *Hébé* und *Bellona*
(Sectional area curves for *Hébé* and *Bellona*)

Tab. 1. Hauptabmessungen von vier Großseglern auf Konstruktionstiefgang
(Principal form parameters of four historical sailing vessels at design draft)

Symbol	Einheit	Hébé	Bellona	Cutty Sark	Hanseschiff	Name
L_{OA}	m	52,60	53,25	70,52	29,60	Länge über alles
L_{PP}	m	45,48	45,24	62,87	24,00	Länge zw. den Loten
B_{OA}	m	12,00	11,88	11,09	8,28	Breite über alles
L_{WL}	m	45,94	46,78	63,82	24,56	Länge der Wasserlinie
B_{WL}	m	12,00	11,88	10,97	7,73	Breite der Wasserlinie
T_{FD}	m	5,11 (Spant 4)	4,65 (Spant 20)	5,96	2,39	Tiefgang T_1 am VL (mit Balkenkiel)
T_{AD}	m	5,69 (Spant 21)	5,17 (Spant 0)	5,96	2,78	Tiefgang T_1 am HL (mit Balkenkiel)
d_{KL}	°	0,8	0,7	0	0,9	Fall der Kiellinie
$T_{FDw/oK}$	m	4,66	4,20	5,60	2,14	Tiefgang am VL (ohne Balkenkiel)
$T_{ADw/oK}$	m	5,24	4,72	5,60	2,53	Tiefgang am HL (ohne Balkenkiel)
T_{Hb} $T_{Mw/oK}$	m	4,95	4,46	5,60	2,33	Mittlerer Tiefgang (ohne Balkenkiel)
V	m ³	1350	1178	2028	194	Verdrängung
Δ	t	1385	1210	2082	199	Displacement
x_{CB}	m	23,63 51,9 % L_{PP}	23,21 51,3 % L_{PP}	31,18 49,6 % L_{PP}	12,48 52,0 % L_{PP}	Verdrängungsschwerpunkt vom HL
x_{CB}	m	21,85 48,1 % L_{PP}	22,03 48,7 % L_{PP}	31,69 50,4 % L_{PP}	11,52 48,0 % L_{PP}	Verdrängungsschwerpunkt vom VL
z_{CB}	m	-1,86	-1,58	-2,22	-0,89	Verdrängungsschwerpunkt unter KWL
S	m ²	736	697	1017	203	Benetzte Oberfläche (mit Ruder)
A_X	m ²	45,4	38,5	50,4	13,7	Maximale Spantfläche
x_{AX}	m	23,88 52,5 % L_{PP}	24,88 54,9 % L_{PP}	31,44 50,0 % L_{PP}	12,00 50,0 % L_{PP}	Position des maximalen Spants vom HL
A_{WP}	m ²	453,8	443,5	515,7	137,6	Wasserlinienfläche
x_{CF}	m	23,01 50,6 % L_{PP}	22,63 50,0 % L_{PP}	30,42 48,4 % L_{PP}	12,63 52,6 % L_{PP}	Wasserlinienschwerpunkt vom HL
i_E	°	56	41	28	77	Eintrittswinkel der KWL
A_{HL}	m ²	247,54	227,6	379,0	63,41	Lateralplanfläche (mit Balkenkiel und Ruder)
x_{CCPC}	m	21,58 47,4 % L_{PP}	21,29 47,1 % L_{PP}	30,63 48,7 % L_{PP}	11,20 46,7 % L_{PP}	Schwerpunkt der Lateralplanfläche vom HL
L_{WL}/B_{WL}	–	3,898	3,938	5,761	3,177	Längen-Breiten-Verhältnis
$B_{WL}/T_{Mw/oK}$	–	2,424	2,664	1,979	3,318	Breiten-Tiefgang-Verhältnis (ohne Kiel)
C_B	–	0,486	0,475	0,512	0,439	Blockkoeffizient $C_B = V/(L_{WL} B_{WL} T_{Mw/oK})$
C_P	–	0,636	0,653	0,631	0,577	Schärfegrad
C_M	–	0,764	0,727	0,812	0,761	Hauptspantvölligkeit
C_V	10 ⁻³	13,9	11,5	7,8	13,1	Volumenkoeffizient $C_V = V/L_{WL}^3$
λ	–	10	15	15	10	Modellmaßstab
–	–	2614	2623	2622	2625	Modellnummer ZE VWS

3.3 Hebelarmkurven

Zur Bestimmung realistischer Hebelarmkurven wurde für beide Großsegler ein $GM_0 = 0,95$ m angenommen. Der Gewichtsschwerpunkt lag hierfür bei der *Héb * 0,48 m bzw. bei der *Bellona* 1,15 m über der Konstruktionswasserlinie. Die so ermittelten Kurven der Hebelarme und der aufrichtenden Momente sind in Abb. 7 gezeigt. Im Bereich des Segelns bis ca. 15° Krängung ist das aufrichtende Moment der *H b * geringfügig größer als das der *Bellona*. (Für scharfe Schiffe wie die *Cutty Sark* werden i.a. ca. 25% des Tiefgangs unterhalb der KWL für die Höhe des Gewichtsschwerpunkts angenommen, während für Fregatten des ausgehenden achtzehnten Jahrhunderts eigentlich die Konstruktionswasserlinie eine erste Schätzung für die Gewichtsposition im segelfertigen Zustand unter Berücksichtigung auch der Takelage darstellen sollte (Chapman, 1768). Dabei fallen die Anfangsmetazentren jedoch unrealistisch hoch aus: $GM_0 = 1,4$ m für *H b * und $GM_0 = 2,1$ m für *Bellona*.)

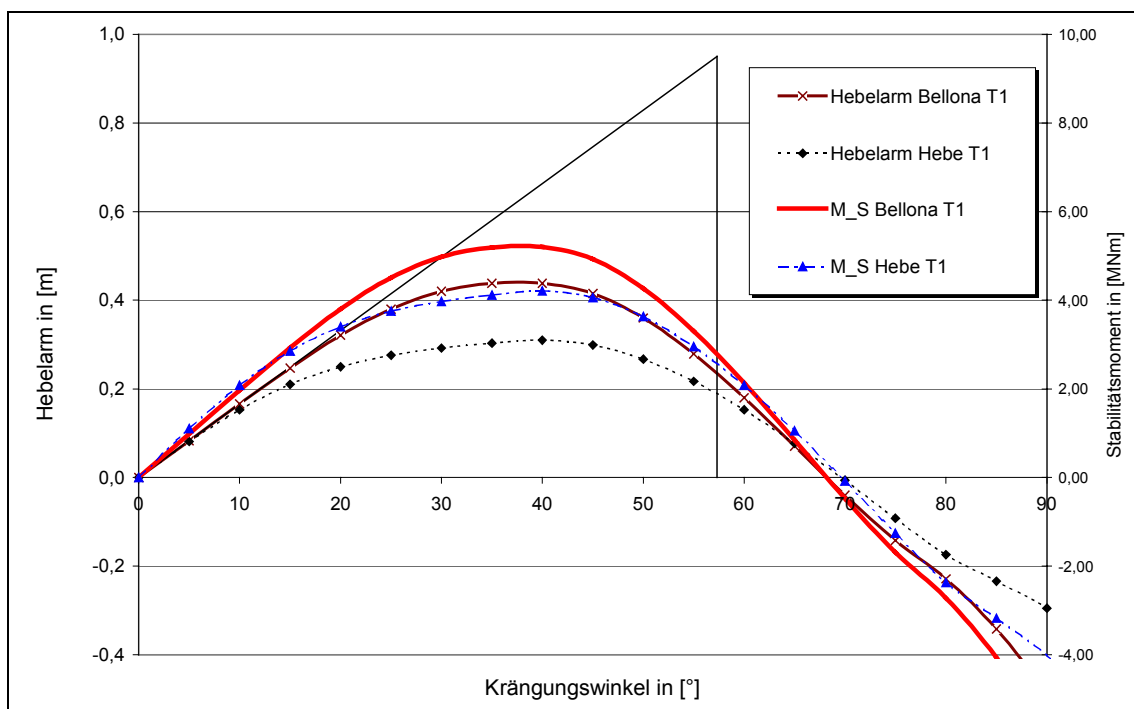


Abb. 7. Hebelarmkurven und Stabilitatsmomente für *H b * und *Bellona*
(Righting arms and moments of stability for *H b * and *Bellona*)

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Systematische Untersuchungen in der Schlepprinne

Die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Hydrodynamik wurden in der Tiefwasserrinne der ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau (250 m · 8,1 m · 4,5 m) mit dem schnellen Schleppwagen (max. $V_{Wagen} = 12,5$ m/s) durchgeführt (Abb. 9). Die Modelle wurden aus Holz gefertigt. Zur Turbulenzerregung wurde jeweils eine Reihe von Ms-Stiften eingesetzt, die in einem Abstand von ca. $L_{pp}/20$ parallel zur Stevenkontur verliefen.

Die Versuche wurden bei hecklastiger Ausgangstrimmelage durchgeführt. Während der Fahrt konnten sich Trimm und Tauchung frei einstellen, wobei die Änderungen der Schwimmlagen mittels Linearpotentiometern am hinteren und vorderen Lot aufgezeichnet wurden. Für den aufrechten Fall ohne Schräganströmung wurden Schleppversuche auf verschiedenen Tiefgangen mit einer großen Anzahl von Geschwindigkeiten durchgeführt. Details siehe (Geistert, 1997) und (Geistert, 2000).

Das Programm der Versuche mit Krängung und Abdrift umfaßte die in Tab. 2 angegebenen Kombinationen von Krängungs- und Driftwinkeln. Beide Schiffe wurden jeweils auf Konstruktionstiefgang T_1 für drei charakteristische Geschwindigkeiten geschleppt. Als spezielles Meßgerät zur Vorgabe realistischer Krängungs-

und Driftwinkel wurde ein von der VWS entwickeltes Roll-Gier-Gerät eingesetzt (siehe Abb. 9). Mit dem Gerät können Krängungswinkel von -5° bis 25° (Stb.) sowie Driftwinkel von -5° bis 10° (Bb.) eingestellt werden. Es erlaubt freien Trimm bis $\pm 6^\circ$ und freie Tauchung. Kräfte und Momente werden über Biegestäbe mit Dehnungsmeßstreifen in Vollbrückenschaltung erfaßt.

4.2 Farbanstriche und Wellenbilder

Für beide Großsegler wurde je ein Farbanstrichversuch für einen typischen Segelzustand mit einem Krängungswinkel von $\phi = 7,5^\circ$ und einem Gierwinkel von $\beta = 5^\circ$ bei $F_n = V/\sqrt{g \cdot L_{WL}} \approx 0,22$ durchgeführt (*Hébé*: 9,08°kn; *Bellona*: 9 kn). Wellenbilder wurden fotografisch aufgezeichnet, siehe Abb. 8 und Abb. 9.

Tab. 2. Programm der Versuche mit Krängung und Abdrift für *Hébé* und *Bellona*
(Program of tests with heel and yaw for *Hébé* and *Bellona*)

Hébé	V_S	6 kn	7,5 kn	9 kn	—
	F_n	0,145	0,182	0,218	—
Bellona	V_S	6 kn	—	9 kn	12 kn
	F_n	0,144	—	0,216	0,288
Krängung / Abdrift	$\phi = 0,0^\circ$	$\phi = 2,5^\circ$	$\phi = 5,0^\circ$	$\phi = 7,5^\circ$	$\phi = 10,0^\circ$
$\beta = 0,0^\circ$	Hébé, —	Hébé, —	Hébé, —	Hébé, —	Hébé, —
$\beta = 2,5^\circ$	Hébé, —	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona
$\beta = 5,0^\circ$	Hébé, —	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona
$\beta = 7,5^\circ$	Hébé, —	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona	Hébé, Bellona	—, Bellona
$\beta = 10,0^\circ$	Hébé, —	Hébé, Bellona	—, Bellona	—, Bellona	—, Bellona



Abb. 8. Wellenbild für *Bellona*
(Wave pattern of *Bellona*)



Abb. 9. Versuche mit Krängung und Abdrift für *Bellona*
(Tests with heel and yaw for *Bellona*)

5 Ausgewählte Ergebnisse

5.1 Widerstand ohne Krängung und Abdrift

Für den idealisierten Segelzustand ohne Krängung und Abdrift, der dem Fall des Segelns „Vor dem Wind“ entspricht, wurden die Ergebnisse der Modellversuche nach der Formfaktor-Methode auf die Großausführung übertragen. Hierzu wurden die Formfaktoren k aus einer Extrapolation nach Prohaska (ITTC, 1999) für niedrige Froude-Zahlen bestimmt, siehe Tab. 3. Den Gesamtwiderstand R_{TS} der Rümpfe erhält man mit

$$R_{TS} = (1 + k) \cdot R_F + R_R + R_A, \quad (1)$$

wobei der Reibungswiderstand R_F nach der 1957 ITTC-Linie

$$C_F = \frac{R_F}{\rho \frac{V^2}{2} S} = \frac{0,075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (2)$$

und der Restwiderstand R_R aus den Modellversuchsdaten ermittelt wurden. Der Rauheitszuschlag wurde mit

$$C_A = \frac{R_A}{\rho \frac{V^2}{2} S} = 0,3 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

angenommen. Abb. 10 zeigt die Widerstandskurven über der Schiffsgeschwindigkeit. Bei ähnlicher Verdrängung –*Héb e* auf Tiefgang T_2 und *Bellona* auf Tiefgang T_1 , vgl. Tab. 3– zeigen sich bei höheren Geschwindigkeiten leichte Vorteile für die französische *Hébé* (ab etwa 9 kn). Auf Konstruktionstiefgang T_1 sind die Widerstände der beiden Schiffe ähnlich, obgleich die schwedische *Bellona* ca. 13 % weniger Verdrängung aufweist. Dies wird durch eine Darstellung des mit dem Volumen normierten Widerstandskoeffizienten

$$C_{TSv} = \frac{R_{TS}}{\rho \frac{V^2}{2} \nabla^{2/3}} \quad (4)$$

über der volumenbezogenen Froude-Zahl

$$F_{nv} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}}} \quad (5)$$

noch verdeutlicht, siehe Abb. 11.

Tab. 3. Formfaktoren für *Hébé* und *Bellona*
(Form factors of *Hébé* and *Bellona*)

Schiff	Tiefgang		k
Hébé	T_1 $\nabla = 1350 \text{ m}^3$	$T_{FP} = 5,11 \text{ m}$ $T_{AP} = 5,69 \text{ m}$	0,449
Hébé	T_2 $\nabla = 1129 \text{ m}^3$	$T_{FP} = 4,61 \text{ m}$ $T_{AP} = 5,19 \text{ m}$	0,429
Bellona	T_1 $\nabla = 1178 \text{ m}^3$	$T_{FP} = 4,65 \text{ m}$ $T_{AP} = 5,17 \text{ m}$	0,394
Bellona	T_2 $\nabla = 987 \text{ m}^3$	$T_{FP} = 4,20 \text{ m}$ $T_{AP} = 4,72 \text{ m}$	0,377

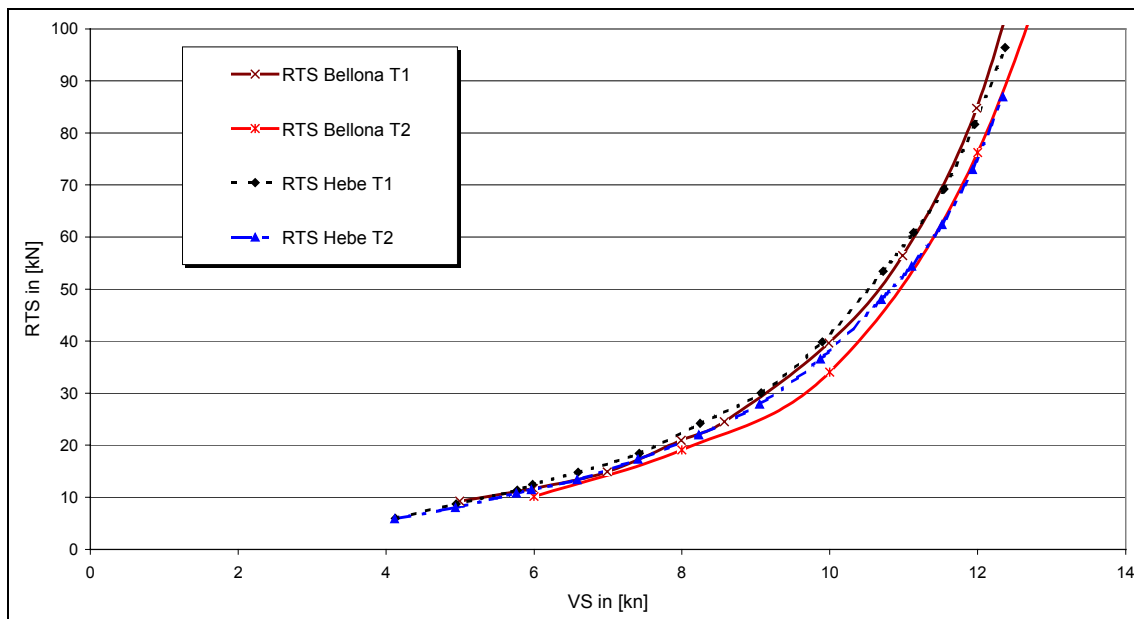


Abb. 10. Widerstand über Geschwindigkeit für Großausführung
(Resistance vs. speed at full-scale)

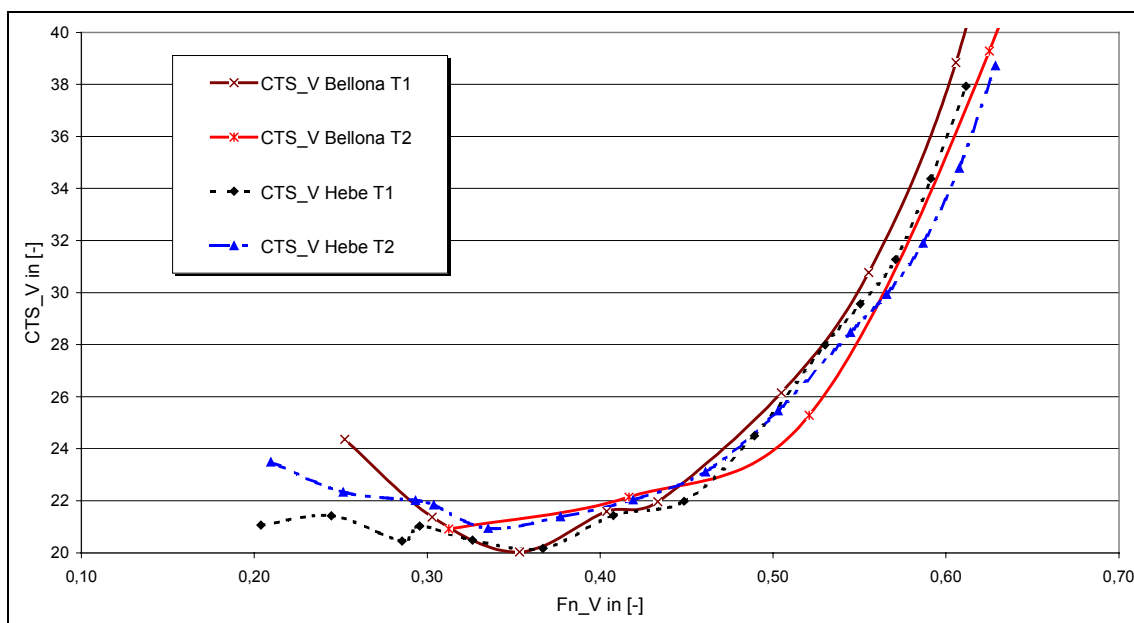


Abb. 11. Widerstandsbeiwert über Froude-Zahl
(Resistance coefficient vs. Froude number)

5.2 Widerstand und Querkraft mit Krängung und Abdrift

Für den Normalfall des Segelns mit Krängung und Abdrift wurden die Versuchsdaten aus den Roll-Gier-Versuchen systematisch nach folgendem Modell ausgewertet:

$$R_I(F_n, \beta, \phi) = C_{Di} \rho \frac{V_S^2}{2} A_{HL} , \quad (6)$$

$$L_S(F_n, \beta, \phi) = C_L \rho \frac{V_S^2}{2} A_{HL} . \quad (7)$$

R_I bezeichnet hierbei den induzierten Widerstand in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Abdrift (Anströmwinkel) und Krängung. L_S stellt den Auftrieb (horizontale Querkraft) des Rumpfs senkrecht zur Geschwindigkeit durch das Wasser (und zum induzierten Widerstand) dar. A_{HL} ist die Lateralplanfläche des Rumpfs. Für den Auftriebsbeiwert C_L gilt für kleine Anströmwinkel β näherungsweise der Zusammenhang

$$C_L = \left(\frac{\partial C_L}{\partial (\beta \cdot \cos \phi)} \right) \beta \cdot \cos \phi, \quad (8)$$

wobei die Gradienten des Auftriebsbeiwerts in Abhängigkeit vom Krängungswinkel ϕ aus den Daten der Modellversuche mittels einer linearen Regression bestimmt werden konnten. Der induzierte Widerstandsbeiwert C_{Di} wurde proportional zum Quadrat des Querkraftbeiwerts modelliert

$$C_{Di} = \frac{1}{e\pi AR_E} C_L^2 \quad (9)$$

und ebenfalls als Funktion des Krängungswinkels ϕ mit einer Regressionsanalyse aus den experimentellen Daten ermittelt. Gleichungen (8) und (9) basieren auf profiltheoretischen Überlegungen, siehe z.B. (Abbott und von Doenhoff, 1958). Obgleich bei historischen Großseglern kein ausgeprägter Querkrafterzeuger mit Profilquerschnitt und hoher Streckung wie bei modernen Segelyachten vorliegt, beschreiben die gewählten Ansätze das Verhalten des Auftriebs bzw. des mit diesem verbundenen induzierten Widerstands sehr gut.

In Analogie zur Analyse von Segelyachten, vgl. (Hochkirch, 2000), wurde das effektive Streckungsverhältnis AR_E und der Oswald Gütegrad e zur Charakterisierung der Hydrodynamik bei Krängung und Abdrift nach (Whicker und Fehlner, 1958) bestimmt:

$$AR_E(\phi) = \frac{8\pi \left(\frac{\partial C_L}{\partial (\beta \cdot \cos \phi)} \right)}{4\pi^2 - \left(\frac{\partial C_L}{\partial (\beta \cdot \cos \phi)} \right)^2}, \quad (10)$$

$$e(\phi) = \frac{\frac{\partial C_L^2}{\partial C_{Di}}}{\pi AR_E}. \quad (11)$$

AR_E und $1/e$ wurden jeweils als quadratische Funktionen des Krängungswinkel ϕ modelliert, siehe Abb. 12 und Tab. 4. Während die *Bellona* ein geringfügig besseres effektives Streckungsverhältnisse aufweist, ist der Kehrwert des Oswald Gütefaktors für die *Hébé* deutlich günstiger. Mit anderen Worten: Der Rumpf der schwedischen Fregatte *Bellona* erzeugt bei kleineren Driftwinkeln die gleiche Querkraft wie der Rumpf der französischen *Hébé*, dabei –also bei gleichen Querkraftwerten– erfährt die *Bellona* allerdings größere induzierte Widerstände. Das Verhältnis aus Widerstand und Auftrieb

$$\frac{C_{Di}}{C_L^2} = \frac{1}{e\pi AR_E} \quad (12)$$

ist für die *Hébé* bis etwa 8° Krängung günstiger als das der *Bellona*. (Ein Kapitän der *Hébé* tat also gut daran, sein Schiff möglichst aufrecht zu segeln.)

Tab. 4. Effektives Streckungsverhältnis und Oswald Gütegrad
(Effective aspect ratio and Oswald efficiency)

Schiff	AR_E	$1/e$
Hébé	$-0,000928 \phi^2$	$-0,002662 \phi^2$
T ₁	$-0,001544 \phi$	$+0,007211 \phi$
	$+0,451305$	$+2,104165$
Bellona	$-0,000255 \phi^2$	$0,001008 \phi^2$
T ₁	$-0,002234 \phi$	$-0,035451 \phi$
	$+0,479528$	$+2,551850$

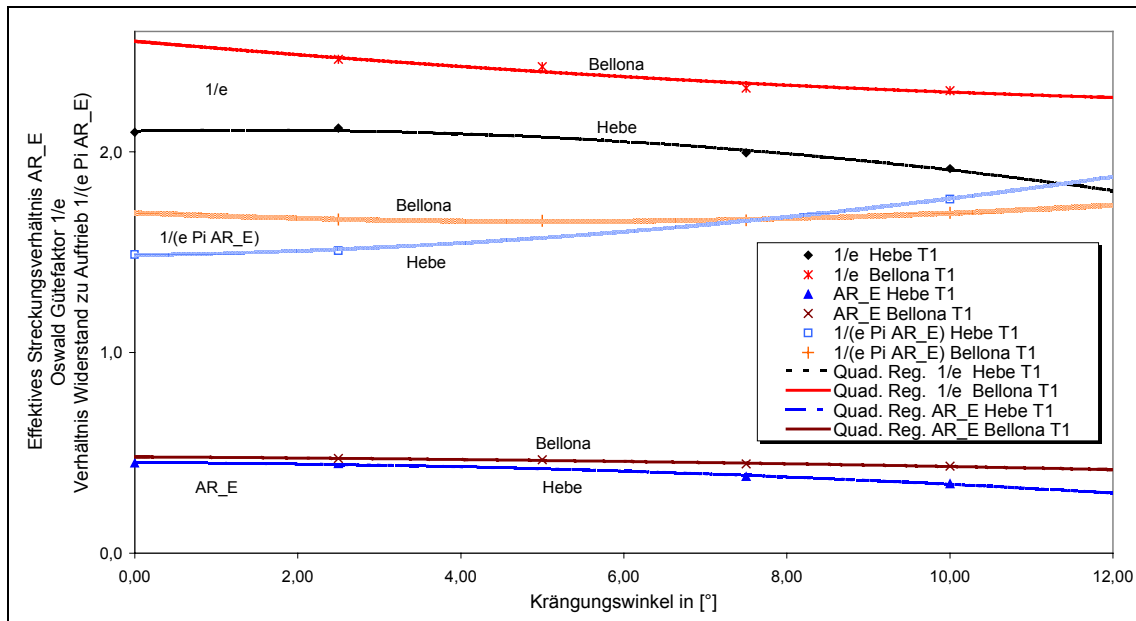


Abb. 12. Effektives Streckungsverhältnis und Oswald Gütegrad (Effective aspect ratio and Oswald efficiency)

5.3 Segelleistung

Für beide Großsegler wurde eine Geschwindigkeitsprognose mittels eines sog. Velocity-Prediction-Programms (VPP) nach (Hochkirch, 2000) durchgeführt. Dabei werden die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten mittels einer Optimierung unter Einhaltung des Gleichgewichts von hydro- und aerodynamischen Kräften und Momenten bestimmt. Für die Simulation wurden für vorgegebene Windgeschwindigkeiten und -richtungen die drei wesentlichen Freiheitsgrade des segelnden Schiffs berücksichtigt: Schiffsgeschwindigkeit, Krängung und Abdrift.

Während die hydrodynamischen Eigenschaften auf Grundlage der Modellversuche modelliert werden konnten, mußte die Aerodynamik des Riggs und der Windwiderstand des Toten Werks abgeschätzt werden. Da sich weder die Besegelung noch die Aufbauten beider Schiffe wesentlich voneinander unterschieden –und hier der hydrodynamische Vergleich im Vordergrund steht–, wurden gleiche (und vereinfachende) Annahmen für die aerodynamische Modellierung getroffen, siehe Tab. 5.

Tab. 5. Annahmen zur aerodynamischen Modellierung (Assumptions on aerodynamic modeling)

Lateralfäche des Toten Werks	ca. 200 m ²
Stirnfläche des Toten Werks von achtern	ca. 60 m ²
Fläche der drei Masten und wichtigster Spieren	ca. 90 m ²
Segelfläche	ca. 2200 m ²
Höhe des Kraftangriffspunkts der aerodynamischen Kräfte über KWL	10 m
Windwiderstandskoeffizient des Überwasserschiffs (analog zu IMS)	1,2

Für die aerodynamischen Eigenschaften des Riggs –beschrieben über Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte C_D und C_L

$$C_D = \frac{D_{Segel}}{\rho_{Luft} \frac{V_{WA}^2}{2} (A_{Segel} \cdot \sigma^2)} \quad (13)$$

$$C_L = \frac{L_{Segel}}{\rho_{Luft} \frac{V_{WA}^2}{2} (A_{Segel} \cdot \sigma^2)} \quad (14)$$

als Funktion des Einfallswinkels des scheinbaren Winds– wurden die von (Wagner, 1967) für eine Viermastbark im Windkanal ermittelten Polaren verwendet (Abb. 13) und auf die Fregatten als Dreimastvollschiffe übertragen. D_{Segel} und L_{Segel} sind hierbei Widerstand und Querkraft der Segel parallel bzw. senkrecht zur Einfallrichtung β_{AW} des scheinbaren Winds V_{WA} . Die Segelfläche A_{Segel} wurde unter Vernachlässigung der Lee- und Stagesegel (mit Ausnahme des Vorgeschirrs) geschätzt; σ stellt einen Reffparameter innerhalb des VPP dar. Da die Effektivität der von (Wagner, 1967) untersuchten Besegelung sicherlich höher lag, als die im 18. Jahrhundert erreichbare, kann die ermittelte Segelleistung nur für einen Vergleich der beiden Fregatten untereinander verwendet werden. Insbesondere „Am Wind“ sind für die Fregatten schlechtere Werte zu erwarten.

Die Schiffswiderstände unter Berücksichtigung von Krängung und Abdrift wurden für die Segelleistungsprognose nach folgendem linearem Superpositionsansatz auf die Großausführung übertragen:

$$R_{Tges}(F_n, R_n, \beta, \phi, V_{WT}, \beta_{TW}) = R_{TS}(F_n, R_n) + R_I(F_n, \beta, \phi) + R_{Wind}(F_n, V_{WT}, \beta_{TW}) \quad (15)$$

wobei R_{Tges} den Gesamtwiderstand des Unter- und Überwasserschiffs in Richtung des Kurses durch das Wasser bezeichnet. Dieser beinhaltet hierbei den Widerstand des Rumpfs im aufrechten Fall ohne Abdrift R_{TS} sowie den induzierten Widerstand R_I infolge Querkraft und einen Anteil R_{Wind} , der den Windwiderstand des Schiffs in Fahrtrichtung beschreibt. Stärke und Richtung des wahren Windes werden dabei mit V_{WT} bzw. β_{TW} bezeichnet.

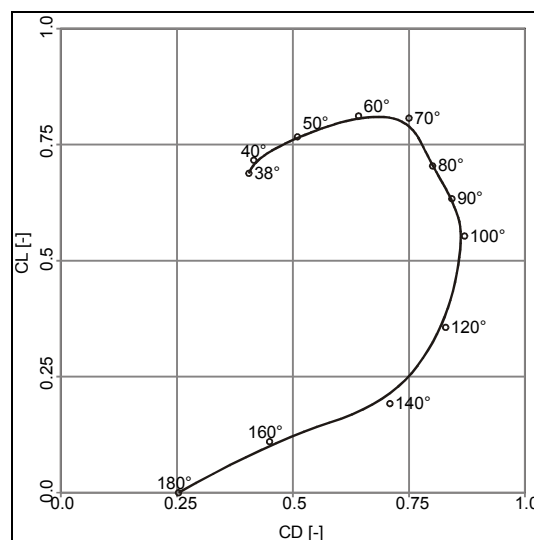


Abb. 13. Aerodynamische Polaren für das Rigg einer Viermastbark nach (Wagner, 1967) mit β_{AW} als Kurvenparameter (Polar diagram of a square-rigged vessel with four masts according to (Wagner, 1967), β_{AW} being curve parameter)

Abb. 14 zeigt die Segelleistung als Funktion der Windgeschwindigkeit und des Kurses zum wahren Wind. Die über die Leistungsprognose als erreichbar angesehenen Segelgeschwindigkeiten entsprechen dabei der Größenordnung nach bekannten Eintragungen aus Logbüchern. (Prager, 1905) gibt z.B. für hölzerne Vollschiffe des 19. Jahrhunderts bei 5 Beaufort knapp 6,9 kn „Vor dem Wind“, 7,5 kn „Backstags“, 7,7 kn „Breitseits“ und 6,1 kn „Bei dem Wind“ als Mittelwerte an, womit qualitativ ähnliche Polaren entstehen. Für Fregatten um 1800 waren Geschwindigkeiten um 6 kn leicht erreichbar, während Fahrtgeschwindigkeiten von 9 kn schon gute Segelzustände charakterisierten, die aber auch mit bis zu 12 kn übertroffen werden konnten – wie durch britische *Sailing Quality Reports* dokumentiert ist (Public Record Office, 18./19. Jahrhundert). Die hier prognostizierten Segelleistungen, die für ideale Zustände unter Vernachlässigung von Seegang und Bewuchs sowie der Annahme eines optimalen Segelzustands und –trimms gelten, erscheinen somit sehr realistisch. (Auf eine spezielle Anpassung der Aerodynamik wurde hierbei bewußt verzichtet.)

Im Vergleich der beiden Großsegler untereinander ist festzustellen, daß die französische *Hébé* und die schwedische *Bellona* ein fast gleiches Segelleistungspotential aufwiesen. Da die *Hébé* die etwas voluminösere

Fregatte war und sich eine höhere Transportkapazität positiv auf die (militärische) Aufgabe dieses Schiffstyps auswirkte, kann sie hydrodynamisch als das etwas bessere Schiff angesehen werden.

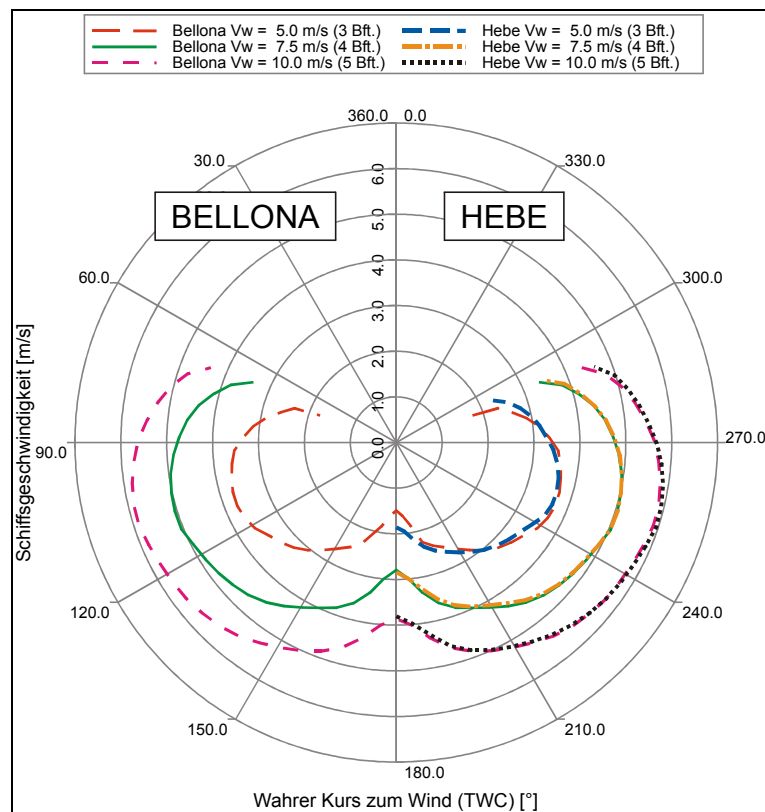


Abb. 14. Prognostizierte Segelleistung für *Hébé* und *Bellona*
(Velocity prediction for *Hébé* and *Bellona*)

6 Zusammenfassung

Der militärische Erfolg eines Schiffs des ausgehenden 18. Jahrhunderts hing entscheidend davon ab, in welchem Zustand sich seine Takelage (vollständig vs. beschädigt), die Segel (neu vs. alt) und der Rumpf (sauber vs. bewachsen) befanden, welche Beladung (Trimm und Tiefgang, Stauung) vorlag und –nicht zuletzt– wie erfahren, trainiert und diszipliniert Offiziere und Mannschaften waren. Da sich diese Kriterien während eines Einsatzes kontinuierlich änderten, kann rückblickend das hydrodynamische Potential eines Entwurfs zunächst anhand der hypothetischen Fälle stationärer Segelzustände betrachtet werden, unabhängig davon wie und wann dieses Gleichgewicht aus hydro- und aerodynamischen Kräften und Momenten tatsächlich vorlag.

Die hydrodynamische Leistungsfähigkeit der beiden untersuchten Fregatten unterscheidet sich hiernach nicht wesentlich für den untersuchten Fall der im glatten Wasser bei konstanter Geschwindigkeit und Lage segelnden Schiffe. Unter Annahme gleicher Besegelung kann somit davon ausgegangen werden, daß ein ähnliches Geschwindigkeitspotential vorlag. Als konventioneller Entwurf wurde die *Hébé* bereits in ihrer Zeit als überdurchschnittlich gute Fregatte angesehen. Da sie auf Entwurfstiefgang über etwas mehr Verdrängung als die *Bellona* verfügte, kann man die *Hébé* –eine ähnliche Strategie der Admiralität (Präsenz vs. Mission) vorausgesetzt– als den geringfügig besseren Segler ansehen.

Dies zeigt auf der einen Seite, daß der von Chapman gewählte Weg des Linienentwurfs aufbauend auf eine vorbestimmte Spantarealkurve noch keinen unmittelbaren Fortschritt in der Hydrodynamik bewirkte. Auf der anderen Seite muß es jedoch bereits als ein Erfolg des neuen Verfahrens gewertet werden, daß ohne lange Entwicklungszeit und fortlaufende Modifikation und Verbesserung, also aus dem Stand heraus, ein guter Entwurf gelungen war. Unabhängig hiervon erhält die *Bellona* ihre Bedeutung dadurch, daß Chapmans Entwurfsmethodik die Tür zur Welt der Mathematik auch für die Kunst der Schiffsformgebung öffnete.

7 Ausblick

Vergleiche historischer und moderner Segler können sinnvoll nur auf Basis eines VPP stattfinden. Hierfür sind sowohl die aerodynamischen als auch die hydrodynamischen Charakteristika detailliert zu modellieren. Eine verfeinerte Studie der Segelleistung von Großseglern des ausgehenden 18. Jahrhunderts erfordert somit einerseits die experimentelle Bestimmung der Segelpolaren dieser Dreimastvollschiffe und andererseits die experimentelle (oder numerische) Analyse weiterer hydrodynamischer Eigenschaften – wie das Verhalten im Seegang und beim Manövrieren.

8 Danksagung

Der Technischen Universität Berlin sowie dem Deutschen Technikmuseum danken die Autoren für die Unterstützung bei der Durchführung dieses interdisziplinären Projekts. Besonderer Dank gilt der Modellkonstruktion und der Schleppwagenbesatzung der ZE VWS.

9 Schrifttum

Abbott, I.H.; von Doenhoff, A.E. *Theory of Wing Sections*, Dover Publications, Inc., New York, 1958.

af Chapman, F.H. *Architectura Navalis Mercatoria*, Hinstorff Verlag Rostock, 1968 (Originalausgabe Stockholm, 1768).

af Chapman, F.H. *Försök till en Theoretisk Afhandling att gifva åt Linie-Skepp deras rätta Storlek och Form, Likaledes för Fregatter och mindre Bevärade Fartyg*, Manuskript, Karlskrona, 1804.

Böndel, D. *Entstehung, Entwicklung, Dokumentation und Vergleich der Achtzehnpfänder-Fregatten aus Großbritannien, Frankreich und den Vereinigten Staaten von Amerika*, Manuskript zur gleichnamigen Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001.

Boudriot, J.; Berti, H. *La Vénus*, Paris, 1979.

Brandt, H.; Hochkirch, K. *The sailing Properties of the Hanse Cog in Comparison with other Cargo Sailships*, Ship Technology Research (Schiffstechnik), Vol. 42, No. 1, 1995.

Geistert, K. *Modellversuche für eine historische Fregatte (der Hébé-Klasse)*, Bericht Nr. 1271/96, ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin, 1997.

Geistert, K. *Modellversuche für den Tee-Klipper Cutty Sark*, Bericht Nr. 1290/99, ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin, 1997.

Geistert, K. *Modellversuche für ein Hanseschiff*, Bericht Nr. 1291/99, ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin, 1999.

Geistert, K. *Experimentelle Analyse der Hydrodynamik einer Chapman-Fregatte (der Bellona-Klasse)*, Bericht Nr. 1296/00, ZE Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau der Technischen Universität Berlin, 2000.

Hochkirch, K. *Entwicklung einer Meßyacht zur Analyse der Segelleistung im Originalmaßstab*, Dissertation, Technische Universität Berlin, Mensch & Buch Verlag Berlin, 2000.

ITTC QS Group, *ITTC – Quality Manual*, 22nd International Towing Tank Conference (ITTC), Seoul/Shanghai, 1999.

O'Brian, P. *Men-of-War – Life in Nelson's Navy*, W. Norton & Company, New York / London, 1974.

Prager, M. *Die Fahrtgeschwindigkeit der Segelschiffe auf großen Reisen*, Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie, 1905.

Public Record Office *Sailing Quality Reports*, PRO Adm. 95/. Controller's Office Miscellanea, London, 18./19. Jahrhundert.

Wagner, B. *Fahrtgeschwindigkeitsberechnung für Segelschiffe*, STG 1967, Bd. 61, S. 14-35, 1967.

Whicker, L. F.; Fehlner, L.F. *Free-stream characteristics of a family of low-aspect ratio, all moveable control surfaces for application to ship design*, Report No. 933, David Taylor Model Basin, 1958.