



Motto: Rechnen statt Kentern! ➔➔

**Leseprobe aus dem Buch
RC-Segelmodelle, ABC für Scale-Modellsegler
Kapitel 19: Berechnungen**

Nachfolgende Zeilen und Bilder stammen aus dem vth-Fachbuch "RC-Segelmodelle, ABC für Scale-Modellsegler", das ich zusammen mit Bernhard Reimann geschrieben habe. Mit freundlicher Genehmigung des Redakteurs unseres Buches, Herrn Oliver Bothmann, habe ich in Zusammenarbeit mit dem Webmaster der mini-sail e.V, Peter Schuster das Kapitel 19 einer Veröffentlichung im Web angepasst. Somit wird allmählich der Entschluß umgesetzt, daß Beschreibungen grundsätzlicher Themen des Segelschiffsmodellbaus für eventuelle Interessenten auch kostenfrei zur Verfügung stehen sollten.



Februar 2007
Borek Dvořák

Legende

- 19.1 Grundbegriffe
- 19.2 Flächen und ihre Schwerpunkte, Kursstabilität
- 19.3 Verdrängung
- 19.4 Verdrängungsschwerpunkt
- 19.5 Ballast und Ballast-Schwerpunkt
- 19.6 Krängungsstabilität
- 19.6.1 Metazentrum
- 19.6.2 Berechnung der Krängungsstabilität
- 19.6.3 Konsequenzen für die Modellkonstruktion
- 19.7 Abweichungen bei Berechnung von Rumpfschalen Rumpfschalen

Lange haben wir überlegt, ob es überhaupt sinnvoll ist, dieses Thema in ein Einsteigerbuch zu integrieren. Doch zum Schluß überwog die Überzeugung, daß gerade ein Einsteiger, dem noch jegliche Erfahrungen fehlen, auf diese Vorgehensweise angewiesen ist. Die rechnerisch ermittelten Werte führen auch zu einem exakteren Ergebnis als es jede auf Erfahrung basierte Schätzung überhaupt kann. Die Berechnung eines Modellsegelbootes bedeutet im Vergleich zum Bau einen vernachlässigbaren Aufwand, der allerdings einiges an Ärger und Enttäuschung sparen kann. Es ist eben sinnvoller, vorteilhafter und ressourcensparender, ein Modell ggf. auf dem Papier durchzukentern und zu versenken als auf dem Wasser.

Berechnungen und Versuche sind nicht nur für eigene Modellkonstruktionen unbedingt zu empfehlen, sondern auch dann, wenn ein gekaufter Bausatz oder Bauplan vorliegen. Manchmal lassen sich dadurch spätere böse Überraschungen bzw. komplizierte und aufwendige Änderungen vermeiden.

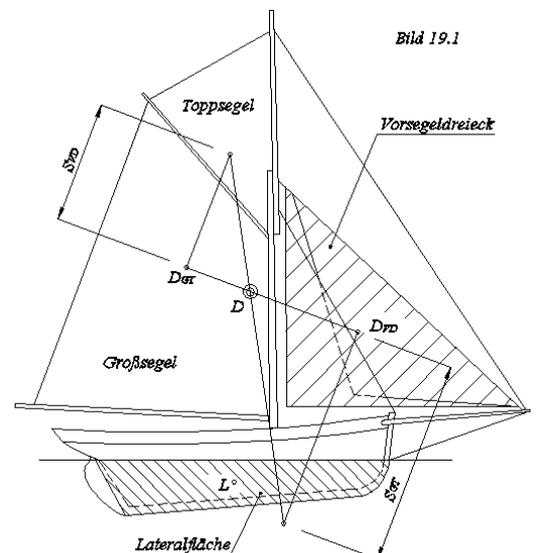
19.1 Grundbegriffe

Zum besseren Verständnis seien eingangs folgende Grundbegriffe definiert (**Bild 19.1**):

Bild 19.1:

Schematische Darstellung der Basisdaten eines Modellsegelbootes. ➔➔

- D_{VD} – Flächenschwerpunkt des Vorsegeldreiecks
- D_{GT} – Flächenschwerpunkt des Groß- und des Toppsegels
- S_{VD} – Strecke proportional zur Fläche des Vorsegeldreiecks
- S_{GT} – Strecke proportional zur Fläche des Groß- und des Toppsegels
- D – Segeldruckpunkt
- L – Lateralschwerpunkt

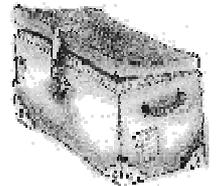


Lateralfäche =	Fläche, die in der Seitenansicht des Schiffsrisses von der Silhouette des Unterwasserschiffes und der Konstruktionswasserlinie begrenzt ist. Die Ruderfläche wird in die Lateralfäche nicht eingerechnet.
Lateralschwerpunkt L =	Schwerpunkt dieser Fläche.
Segelfläche S =	Addition der Flächen der einzelnen Segel. Die Fläche der Vorsegel wird zur Vereinfachung durch die Fläche des Vorsegeldreiecks ersetzt. Die Fläche eines Segels (oder ein Teil dieser Fläche), das ein anderes Segel überlappt, wird in die Segelfläche nicht eingerechnet.
Segeldruckpunkt D =	Schwerpunkt dieser Fläche.
Verdrängung V =	Volumen des Unterwasserschiffes in dm^3 . Da ein Kubikdezimeter Wasser 1 kg wiegt, entspricht nach dem Gesetz des Archimedes die Verdrängung eines Schiffes seinem Gesamtgewicht.
Verdrängungsschwerpunkt Vs =	Volumenschwerpunkt des Unterwasserschiffes.
Metazentrum M =	eine Art Nullpunkt des gesamten Schiffes.
Kursstabilität =	Fähigkeit eines Schiffes, bei gegebener Windrichtung und entsprechender Segeleinstellung seinen Kurs ohne jegliche Korrektur mit dem Ruder zu halten.
Luvgerigkeit =	Tendenz eines Segelbootes, ohne Ruderkorrektur in den Wind zu drehen.
Leeggerigkeit =	Tendenz eines Segelbootes, ohne Ruderkorrektur vom Wind abzufallen.
Krängungsstabilität K =	Fähigkeit eines Schiffes, das Kippmoment vom Winddruck im Rigg mit einem aufrichtenden Moment auszugleichen und somit dem Kentern zu widerstehen.

Bei der Berechnung eines Modellsegelbootes geht es vorrangig um die Kursstabilität und um die Krängungsstabilität. Diese beiden substantiellen Werte ergeben sich als ein Produkt der Segelfläche, des Segeldruckpunkts, des Lateral-, Verdrängungs- und Ballastschwerpunkts und der Position dieser Punkte zueinander. Man muß also vorerst die Basisdaten eines Modells durch die Berechnung der Flächen und Volumina und das Ermitteln ihrer Schwerpunkte in Erfahrung bringen, um anschließend mit der Stabilitätsberechnung das Ausmaß der unabdingbaren Korrekturen zu erfahren.

Bei den Berechnungen, die man üblicher Weise für die Windstärke von 4 Bft und eine zulässige Krängung von 30° ausführt, geht man von der Sturmbesegelung aus. Bei einem Kutter beispielsweise untersucht man die Kurs- und Krängungsstabilität für die Besegelung mit ungerafftem Klüver, Fock und Großsegel, den Flieger und das Toppsegel betrachtet man als Leichtwindsegel und läßt sie in die Berechnung nicht einfließen. Gerade im kritischen Bereich der Windstärke um 4 Bft und darüber hinaus ist es wichtig, daß das Boot weder übermäßig krängt noch ausgesprochen luv- oder leeggerig ist. Eine eventuelle Verschiebung des Segeldruckpunkts und die damit verbundene leichte Luv- oder Leeggerigkeit beim Einsatz von Leichtwindsegeln nimmt man bei geringeren Windstärken in Kauf und korrigiert sie mit dem Ruder.

Trickkiste 33
Fläche und Flächenschwerpunkt
eines Gaffelsegels: →



19.2 Flächen und ihre Schwerpunkte, Kursstabilität

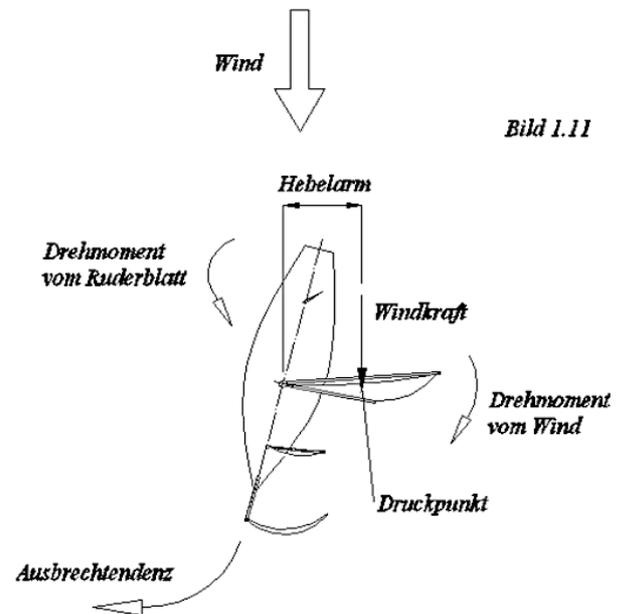
Die Segelfläche **S** ergibt sich durch einfaches Addieren der Flächen der einzelnen Segel. Den Segeldruckpunkt **D** erhält man durch eine graphische Superposition der Schwerpunkte der einzelnen Segel. Die Vorgehensweise ist in **Bild 19.1** dargestellt bzw. in der Trickkiste 33 erklärt.

Zum annähernd gleichen Ziel kommt man, indem man das Rigg in einem beliebigen Maßstab auf ein Stück Karton oder Sperrholz aufzeichnet und ausschneidet. Anschließend wird das ausgeschnittene Rigg auf einem spitzen Gegenstand (Nadel, Bleistiftspitze o.ä.) so ausbalanciert, daß es in beiden Horizontalachsen absolut waagrecht liegt. Der Punkt, auf dem der "Karton-Dummy" jetzt aufliegt, ist der gesuchte Segeldruckpunkt ("Balance-Methode" frei nach dem Artikel "Segelschiffe RC-gesteuert" von G. Neumann in mbh 10/91).

Beide Vorgehensweisen kann man auch bei der Ermittlung des Lateralschwerpunktes **L** anwenden. Bei der graphischen Methode wird die gewölbte Linie des Unterwasserschiffes mit ausreichender Annäherung durch mehrere Geraden ersetzt, wobei die Größe der Lateralfäche für die vorliegenden Untersuchungen ohne Bedeutung ist. Die (aufwendigere) graphische Methode liefert selbstverständlich genauere Ergebnisse.

Die Punkte **L** und **D** (**Bild 19.1**) bzw. ihre Position zueinander sind von grundsätzlicher Bedeutung für die Kursstabilität eines Schiffes und teilweise auch für seine Steuerbarkeit und Geschwindigkeit. Theoretisch müßten sich beide Punkte bei einem kursstabilen (das heißt bei einem neutral getrimmten) Boot genau übereinander auf einer Senkrechten befinden. Da aber der Angriffspunkt der Windkraft stets außerhalb der Schiffssachse liegt (siehe **Bild 1.11**), entsteht in der Praxis stets ein Drehmoment um die senkrechte Achse des Schiffes.

Bild 1.11
Das aufgefierte Großsegel eines gaffelgetakelten Einmasters erzeugt bei starkem Wind, bedingt durch den weit außermittig liegenden Segeldruckpunkt ein starkes Drehmoment, welches eine deutliche Ausbrechtendenz nach Luv (in den Wind hinein) bewirkt. Diese Unart kann man mit dem Ruder nur in eingeschränktem Ausmaß ausgleichen.



Ein theoretisch neutral getrimmtes Boot wäre also beim praktischen Segeln stets luvgerig. Um dies auszugleichen, muß bei Modellsegelbooten der Lateralschwerpunkt stets (in Bewegungsrichtung gesehen) hinter dem Segeldruckpunkt liegen.

Die Literaturangaben zur richtigen Entfernung der beiden Punkte differieren erheblich. Während eine Quelle als Richtwert 3 bis 5% der maximalen Rumpfbreite vor dem Lateralschwerpunkt nennt, wird nach einer anderen 7 bis 12% der Konstruktions-Wasserlinienlänge (CWL) empfohlen. Auf jeden Fall ist für Modellsegelboote eine leichte Tendenz zur Luvgerigkeit bei erhöhter Krängung vorteilhaft, da ein leicht luvgerig getrimmtes Modell bei einer Bö in den Wind hineindreht, den Wind aus den Segeln verliert und sich aufrichtet. Ein leegieriges Modell fällt dagegen ab und bietet automatisch von achtern dem Wind mehr Angriffsfläche, was unter Umständen fatale Folgen haben kann. Trotz dieser Gefahr tendiere ich aus Erfahrung zu der letzteren Angabe, die eine größere Entfernung des Lateralschwerpunktes vom Segeldruckpunkt liefert. Die meisten von mir berechneten Modelle segelten bei einer Entfernung $L - D$ von etwa 8 bis 9 % der Wasserlinienlänge kursstabil, die Extreme markierten ein Gaffelkutter mit 7,5 % und eine Bermudasloop mit 11,9 %. Die Problematik der Kursstabilität ist umfangreich und beschäftigt auch die Konstrukteure der Vorbilder unserer Modelle.

Sollte nach der Ermittlung der beiden Punkte bzw. ihrer Entfernung festgestellt werden, daß diese dem Richtwert nicht entspricht, so müssen entweder Veränderungen am Rigg vorgenommen werden (z.B. der Mast versetzt oder die Verteilung der Segelfläche verändert werden), und/oder die Lateralfäche muß angepaßt werden (meistens ist es notwendig, sie achtern zu vergrößern). Am einfachsten ist es, einen Zusatzkiel vorzusehen, womit gleichzeitig das Problem der Krängungsstabilität gelöst werden kann. Von vielen Segelschiffsmodellbauern wird ein demontierbarer Zusatzkiel auch aus dem Grunde bevorzugt, daß er eine vorbildgetreue Gestaltung des Unterwasserschiffes möglich macht, und das Modell kann nach seiner Demontage (z.B. bei einer Ausstellung) eine bessere optische Wirkung erzielen. Eine Modifizierung des Lateralplans bietet dagegen mehr Festigkeit und vor allem mehr Steifigkeit im Kielbereich, was die Segel-eigenschaften verbessert. Dies ist auch u.a. der Grund, warum ich dieser Möglichkeit immer vor einem Zusatzkiel den Vorzug gebe.

19.3 Verdrängung

Die Verdrängung entspricht dem Volumen des eingetauchten Teils des Schiffsrumpfes und gleichzeitig auch dem Gesamtgewicht des Schiffes. Doch Vorsicht: Während das Gewicht die nach unten gerichtete Kraft darstellt (die Aktion), repräsentiert die Verdrängung den Auftrieb, d.h. die dem Gewicht entgegengesetzt wirkende gleich große Reaktion. Bei aufrechter Schwimmlage des Schiffes heben sich diese Kräfte gegenseitig auf, weil die Punkte, an denen sie wirken, auf einer Vertikale liegen. Liegt der Gewichtsschwerpunkt dabei unterhalb des Verdrängungsschwerpunkts, schwimmt das Boot stabil. Schon bei der geringsten Krängung verlagert sich jedoch der Verdrängungsschwerpunkt, das Gewicht und der Auftrieb bilden ein Kräftepaar und es entsteht ein aufrichtendes Moment.

Die Verdrängung ist für uns Segelschiffsmodellbauer also von großer Wichtigkeit. Einerseits gibt sie uns Auskunft darüber, wie viel das Modell überhaupt wiegen darf, auf der anderen Seite hat sie, bedingt durch die Entstehung des aufrichtenden Moments, einen positiven Einfluß auf die Segelfähigkeit des Modells. Im Kapitel 19.6 kommen wir noch einmal ausführlicher darauf zu sprechen.

Ist die Verdrängung des Vorbilds bekannt, kann man die Verdrängung des Modells schnell und einfach nach folgender Formel bestimmen:

$$V_M = \frac{V_F}{M^3}$$

VM - Verdrängung des Modells [kg]

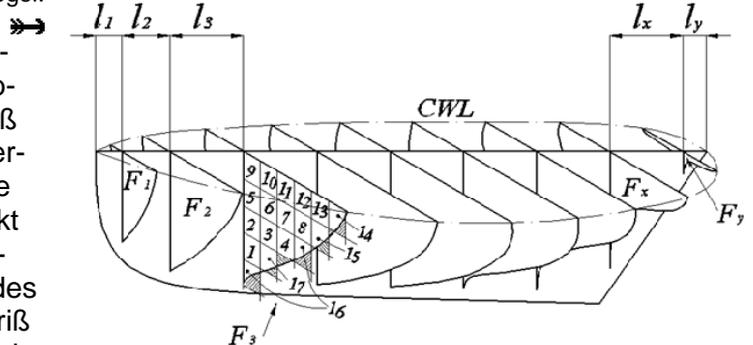
VV - Verdrängung des Vorbilds [kg]

M - gewählter Maßstab

Bei älteren Schiffen bzw. bei Arbeitsschiffen stehen aber selten Angaben zur Verdrängung zur Verfügung oder es ist nicht klar, ob sich die angegebene Verdrängung auf ein leeres oder auf ein voll beladenes Schiff bezieht. In solchen Fällen kommt man an der sogenannten Trapezregel (Bild 19.2):

Bild 19.2
Ermittlung der Spantflächen und
Berechnung der Verdrängung nach der Trapezregel.

Bild 19.2



nicht vorbei. Zuerst müssen die Größen der Spantflächen unterhalb der Wasserlinie und die Spantabstände bestimmt werden. Dazu wird der Spantenriß auf kariertes Papier kopiert, und die Quadrate innerhalb des jeweiligen Spants werden ausgezählt. Die Größe der Spanten muß dem Modellmaßstab exakt entsprechen und sämtliche Änderungen am Unterwasserschiff (Tiefgangvergrößerung, Verdickung des Kiels oder des Totholzes) müssen in den Spantenriß eingetragen sein. Da die Spanten symmetrisch sind, kann man zur Vereinfachung nur die Quadrate einer Spanthälfte auszählen und anschließend mit dem Faktor 2 multiplizieren. Die gesuchte Spantfläche ergibt sich aus der Multiplikation der Fläche eines Quadrats mit der Anzahl der ausgezählten Quadrate. Die Spantabstände werden direkt dem Bauplan bzw. dem Linienriß entnommen. Für die Modellverdrängung (VM) gilt dann:

$$V_M = \frac{l_1 * F_1}{2} + \frac{l_2 * (F_1 + F_2)}{2} + \frac{l_3 * (F_2 + F_3)}{2} + \dots + \frac{l_x * (F_x + F_y)}{2} + \frac{l_y * F_y}{2}$$

F_n - Spantflächen [dm²]

l_n - Spantabstände [dm]

Praktische Erfahrungen mit vorbildähnlichen Modellsegelbooten haben gezeigt, daß eine zufriedenstellende Krängungsstabilität meistens dann erreicht wird, wenn der Ballastanteil mindestens ca. 60% der Modellverdrängung beträgt. Mit diesem Hintergrundwissen sollte auf der Basis der errechneten Verdrängung (=des Gesamtgewichts) nun eine Gewichtsanalyse des Modells durchgeführt werden. Als Beispiel einer solchen Analyse seien hier die Daten meines Modells der Fahrtenyacht-Gaffelketch "Marie" von 1924 (Maßstab etwa 1:11, Rumpflänge 1270 mm, Rumpfbreite 300 mm, Tiefgang 200 mm, Masthöhe 1300 mm, Segelfläche ca. 0,7 bis 0,8 m², Verdrängung 9,6 kg) aufgeführt (**Bild 19.3**):

Bild 19.3

Das Vorbild der „Marie“ hieß „Karin“ und wurde 1924 nach einem Entwurf von Max Oertz bei den Deutschen Werken in Kiel in einer Serie von vier Stück gebaut.



Rumpf einschl. Deck, Aufbauten und Ruder	2,3 kg
RC-Ausrüstung einschl. Windengerüst und Akkus	1,0 kg
Ballast	5,8 kg
Rigg	0,5 kg



Die 5,8 kg Blei entsprechen dem Richtwert für einen sechzigprozentigen Ballastanteil gerade so. Sicherlich hätte ich beim Rumpf und bei der RC-Ausrüstung etwa 500 Gramm sparen und mit diesem Gewicht den Ballastanteil auf ca. 65 % erhöhen können. Diese Maßnahme würde die Segeleigenschaften des Modells gewiß verbessern. Bei einem bereits festgelegten Maßstab, der von der praktikablen Handhabung des Modells abhängt, steht also konsequenter Leichtbau zusammen mit ausreichender Rumpffestigkeit im Pflichtenheft an erster Stelle.

19.4 Verdrängungsschwerpunkt

Der Verdrängungsschwerpunkt liegt an der Stelle des Schiffsrumpfes, an der dessen Gesamtauftrieb wirkt. Um diesen Punkt zu erhalten, wird auf ein Blatt Papier zuerst eine waagerechte Linie gezeichnet, die die CWL (die Konstruktionswasserlinie) des Modells darstellt. Anschließend wird an all den Stellen, an denen beim untersuchten Modell Spanten unterhalb der CWL vorhanden sind, das Lot gefällt und es werden, von der CWL ausgehend, Strecken markiert. Deren Längen müssen proportional zu den Spantflächen sein, und die Abstände der Strecken im beliebigen Maßstab den Spantabständen des Modells exakt entsprechen. Die Endpunkte der Strecken werden mit der sogenannten Verdrängungskurve miteinander verbunden, die die CWL an denselben Punkten berührt, an denen sie der Vor- und der Achtersteven schneidet (**Bild 19.4**).

Bild 19.4
Ermittlung des Verdrängungsschwerpunkts.

Der gesuchte Verdrängungsschwerpunkt V_s ist identisch mit dem Schwerpunkt der Fläche zwischen der Verdrängungskurve und der CWL. Dieser Schwerpunkt kann nun sowohl graphisch als auch mit der "Balancemethode" ermittelt werden.

Die Ermittlung des Verdrängungsschwerpunktes ist eine wichtige Voraussetzung für das Festlegen der Position des Ballasts und anderer gewichtiger Elemente des Modells schon während seiner Planung. Generell gilt, daß sich der Ballastsschwerpunkt möglichst genau unterhalb des Verdrängungsschwerpunktes befinden soll. Weiterhin sollte man der Wendigkeit zuliebe anstreben, daß der Ballastklotz eine möglichst kompakte Form hat, also längsschiffs so kurz wie möglich gestaltet wird.

19.5 Ballast und Ballast-Schwerpunkt

Aus den vorigen Kapiteln geht hervor, daß das Ballastgewicht durch eine Multiplikation mit dem Faktor 0,6 von der nun bekannten Verdrängung abgeleitet werden kann und somit auch schon zu den bekannten Werten zählt. Nun steht die Forderung an, möglichst viel Gewicht auf kleinstem Raum so tief wie möglich unter der Wasserlinie unterzubringen. Diese Forderung wird am besten von einem aus Blei (spezifische Dichte $11,34 \text{ kg/dm}^3$) gegossenen Ballast erfüllt. Von Bleikugeln, die leider ein Bestandteil der meisten Bausätze sind, ist aufgrund der durch die entstandenen Hohlräume bedingten niedrigeren spezifischen Dichte dringend abzuraten.

Um das zuvor bestimmte Ballastgewicht in den Kiel des Modells integrieren zu können, muß zuerst sein Volumen in Erfahrung gebracht werden. Dieses erhält man, wenn man das Bleigewicht durch die spezifische Dichte von Blei dividiert. Da das Volumen eines Körpers mit konstanter Höhe als Multiplikation seiner Grundfläche mit seiner Höhe definiert wird, bietet sich diese Vorgehensweise auch für die Bestimmung der Ballastform an. Die seitliche Silhouette des Ballastklotzes wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 19.4 erwähnten Forderungen gewählt (Ballastsschwerpunkt unterhalb des Verdrängungsschwerpunktes, kompakte Form), und ihre Fläche (= Grundfläche) wird entweder graphisch oder mit der Balancemethode bestimmt. Die Division des Bleivolumens durch diese Fläche ergibt die gesuchte Dicke (= Höhe) des Bleiklotzes (**Bild 19.5**). Der für die Berechnung der Krängungsstabilität sehr wichtige Ballastsschwerpunkt ist mit dem Flächenschwerpunkt der seitlichen Silhouette des Ballasts identisch. Die Schwerpunktbestimmung kann man sowohl graphisch als auch mit der Balancemethode vornehmen.

Bild 19.5
Beispiel eines Ballasts für das Modell eines französischen Lotsenkutters.
Der abgebildete Bleiklotz wiegt 6100 Gramm.

Es ist allerdings in den seltensten Fällen so, daß der Ballastklotz eine durchgehend konstante Dicke aufweist und sein Querschnitt eckig ist. Daher sollte man bei der Bestimmung der Form des Ballasts zuerst die tatsächliche Form aufzeichnen und dann versuchen, diese Form zu einer eckigen, rechnerisch günstigeren umzugestalten. Zur Verdeutlichung siehe **Bild 19.6**.

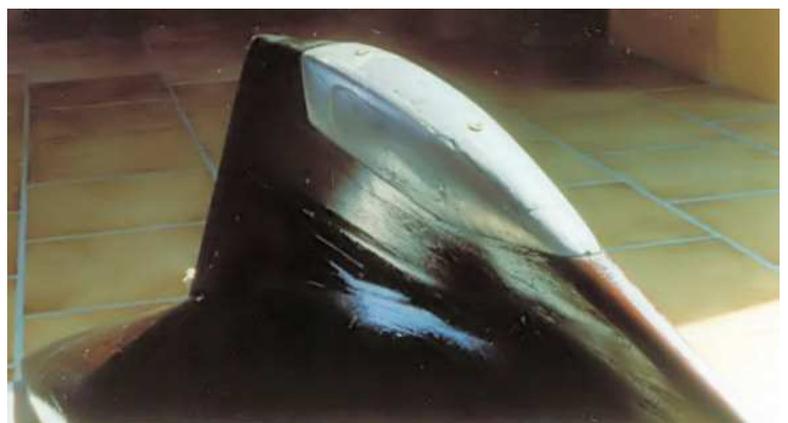
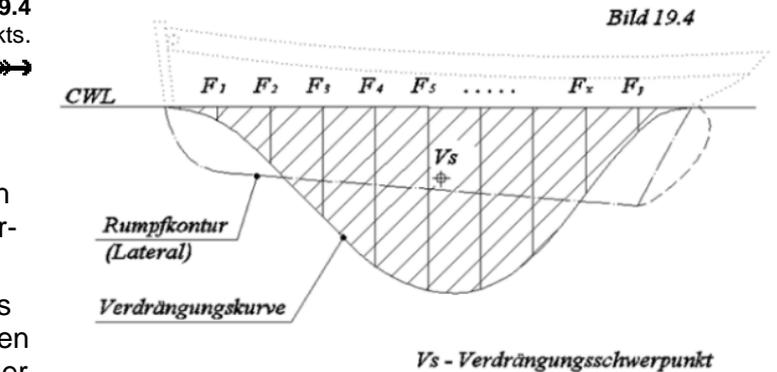
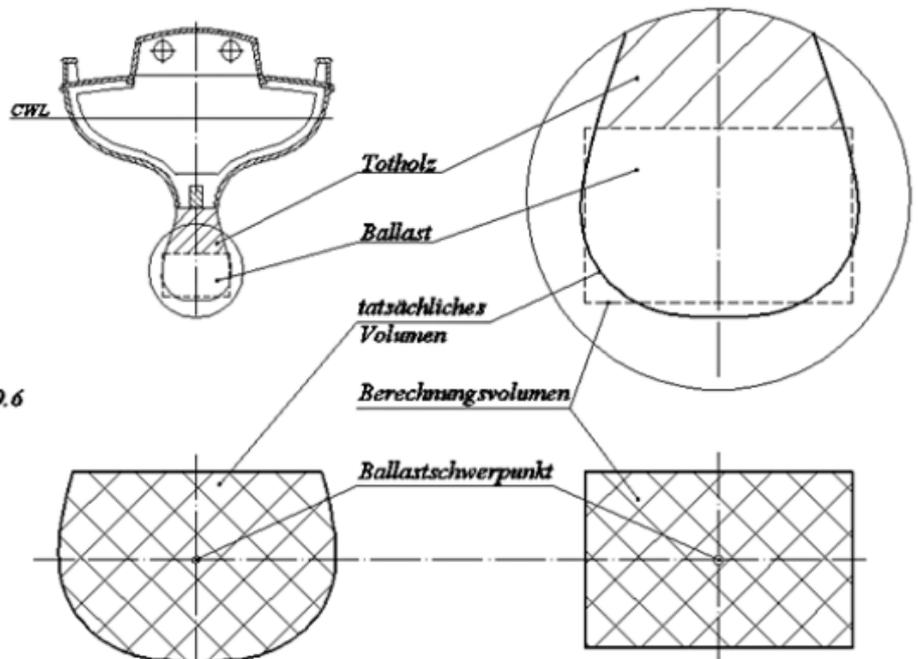


Bild 19.6

Durch gekonnte Anpassung wird eine allgemeine Fläche bzw. ein allgemeiner Körper vereinfacht und dadurch mit einfachen Mitteln mathematisch faßbar gemacht. Beim Wegschneiden und Hinzufügen sollte man stets darauf achten, daß sich dadurch weder der Flächeninhalt noch die Schwerpunktlage verändern.



Bild 19.6



19.6 Krängungsstabilität

Die Krängungsstabilität ist der entscheidende Hauptfaktor, der die Segelfähigkeit eines Modells bestimmt. Die im Segeldruckpunkt wirkende Wind-Druckkraft erzeugt ein krängendes Moment, das durch das aufrichtende Moment vom Ballastgewicht und vom Auftrieb des Unterwasserschiffes ausgeglichen wird. Es entsteht ein Momentgleichgewicht, und das Modell segelt stabil unter einem bestimmten Krängungswinkel.

Um dieses Momentgleichgewicht rechnerisch erfassen zu können, muß man sowohl das Kippmoment als auch das aufrichtende Moment berechnen bzw. diese beiden Momente einander gegenüberstellen. Die auf das Modell wirkenden Kräfte und ihre Angriffspunkte haben wir bei der Ermittlung der Basisdaten des Modells bereits in Erfahrung gebracht, es fehlen also nur noch die Hebelarme dieser Kräfte bzw. der Punkt, zu dem das Momentgleichgewicht berechnet wird. Dieser Punkt heißt Metazentrum.

19.6.1 Metazentrum

Das Metazentrum kann man als einen Nullpunkt des gesamten Segelschiffs verstehen. Es liegt genau oberhalb des Verdrängungsschwerpunkts und gleichzeitig mittschiffs. Man kann also das Metazentrum als einen Schnittpunkt zweier Geraden suchen, und genau das ist der Weg, den wir gehen werden.

Bild 19.7

Prinzipdarstellung der Ermittlung des Metazentrums bzw. der Formstabilität eines Schiffsrumpfes.



In **Bild 19.7A** ist der Querschnitt eines aufrecht schwimmenden und in **Bild 19.7B** eines um den Winkel α gekrängten Segelbootes dargestellt. Der Schnitt ist genau an der Stelle des Rumpfes positioniert, an der sich auch der Verdrängungsschwerpunkt befindet. Den Rumpf habe ich zum besseren Verständnis als eckigen Kasten gezeichnet. Da sich durch die Krängung an der Verdrängung (dem Gesamtgewicht des Bootes) nichts ändert, muß auch der Flächeninhalt der eingetauchten Spantfläche unabhängig vom Krängungswinkel konstant bleiben. Sehr wohl ändert sich aber die Form der Fläche und die Position ihres Schwerpunktes. In unserem Beispiel ändert sich durch die Krängung um den Winkel α die eingetauchte Spantfläche von einem Viereck zu einem Dreieck, und der Verdrängungsschwerpunkt "wandert" von Vs nach $Vs1$. Fällt man jetzt das Lot rechtwinklig zur Konstruktionswasserlinie durch $Vs1$, schneidet es die Mitschiffslinie im Punkt M , dem Metazentrum des untersuchten Bootes.

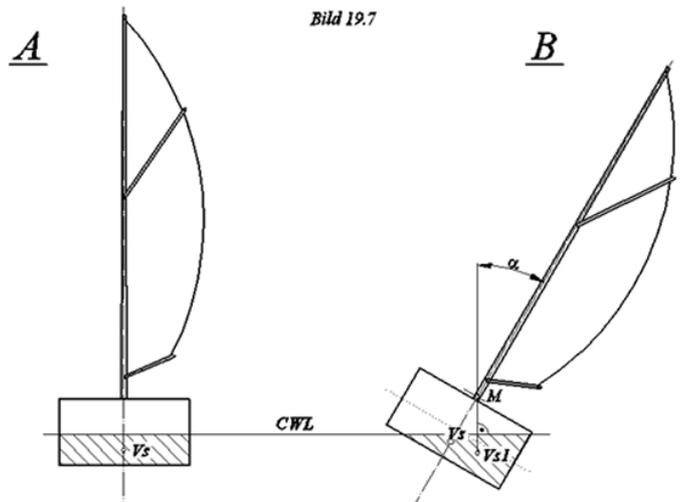
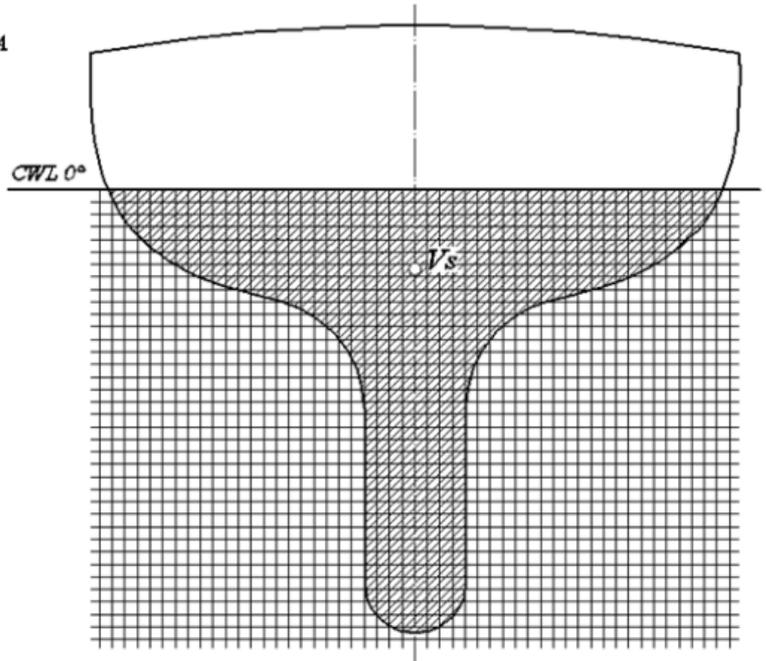


Bild 19.8A

Typischer Hauptspant eines Langkielers bei aufrechter Schwimmelage. Durch Auszählen der Quadrate (vergleiche Bild 19.2) kann man auch solche allgemeinen Flächeninhalte bestimmen.

Bild 19.8A

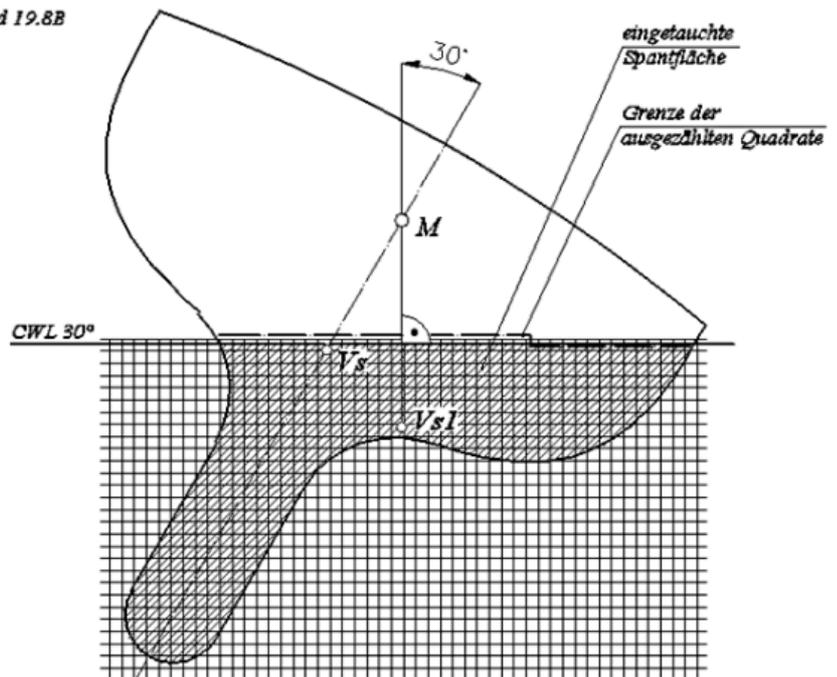


➡
Allerdings bildet der Querschnitt eines konkreten Bootes so gut wie nie ein scharfkantiges Viereck. Eine realistische, für Langkieler typische Spantform zeigt das **Bild 19.8A**. Um keinen neuen Spant an der Stelle des Verdrängungsschwerpunkts konstruieren zu müssen, wählt man aus dem Spantenriß denjenigen Spant aus, dessen Entfernung zum Verdrängungsschwerpunkt am geringsten ist. Die eingetauchte Spantfläche bzw. die Anzahl der ausgezählten Quadrate ist von Verdrängungsberechnung bereits bekannt. Als nächstes neigt man den Spant um den gewählten Krängungswinkel (**Bild 19.8B**).

Bild 19.8B

Derselbe Hauptspant bei einer Krängung von 30°. Der Verdrängungsschwerpunkt V_s verlagert sich nach V_{s1} .

Bild 19.8B



➡
Bei Modellbooten beträgt dieser Winkel typischer Weise 30°. Jetzt werden vom Kiel oder vom Totholz aus beginnend so lange Quadrate ausgezählt, bis man auf die gleiche Anzahl kommt, wie bereits im aufrechten Zustand für diesen Spant ermittelt wurde. Sollte die oberste Quadratreihe unvollständig sein, ermittelt man, wie viel Prozent von dieser Reihe die ausgezählten Quadrate ausmachen, und reduziert die Höhe dieser Reihe im gleichen Verhältnis. Hat man z.B. in der letzten Reihe von 100 Quadraten nur 60 Stück stehen und beträgt die Seitenlänge eines Quadrats 5 mm, reduziert man die Höhe dieser Reihe von 5 mm auf 3 mm. Entlang der Oberkante der obersten Reihe zeichnet man eine Linie, die die Konstruktionswasserlinie bei Krängung um 30° darstellt. Die Bestimmung des Flächenschwerpunkts der "geneigten" Spantfläche und das Fällen des Lots auf die Mittschiffslinie sind die abschließenden Arbeiten, die uns in Kenntnis des Metazentrums bringen.

19.6.2 Berechnung der Krängungsstabilität

Alle erforderlichen Werte sind nun bekannt, man kann sich also der Stabilitätsberechnung als krönendem Abschluß aller bisherigen Bemühungen in dieser Richtung widmen. Wie am Anfang des Kapitels schon gesagt, berechnen wir die Krängungsstabilität aus dem Momentgleichgewicht zum Metazentrum.

Bild 19.9
 Skizze für die Berechnung der
 Krängungsstabilität.

Als erstes wird das krängende Moment mathematisch definiert (Bild 19.9). Die Druckkraft vom Wind F trifft auf die unter dem Winkel α schräg stehende Segelfläche im Segeldruckpunkt D und erzeugt das krängende Moment auf dem Hebelarm a . Bedingt durch die Schrägstellung des Bootes zerlegt sich die Druckkraft in die die Krängung verursachende radiale Komponente und die für uns bedeutungslose axiale Komponente $F \cdot \sin \alpha$. Das krängende Moment M_K errechnet sich dann wie folgt:

$$M_K = F \cdot \cos \alpha \cdot a$$

bzw.

$$M_K = K \cdot S \cdot \cos \alpha \cdot a$$

wenn man für die Druckkraft F die Multiplikation des Winddrucks K mit der Gesamtsegelfläche S einsetzt.

Diese Formel beschreibt allerdings eine unrealistische Situation, in der man die Segel eines bei halbem Wind segelnden Bootes mittschiffs dichtholt. Tatsächlich segelt man aber auf diesem Kurs mit um den Winkel β gefierten Segeln. Dies wird wie folgt berücksichtigt:

$$M_K = K \cdot S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot a$$

Das aufrichtende Moment errechnet man ähnlich.

Das Ballastgewicht G greift im Ballastschwerpunkt B_s und erzeugt auf dem Hebelarm b das aufrichtende Moment M_A . Auch hier muß die Kraft (in diesem Fall das Ballastgewicht) mit Hilfe von Winkelfunktionen zerlegt werden, und in die Berechnung fließt nur die radiale Komponente $G \cdot \sin \alpha$ ein:

$$M_A = G \cdot \sin \alpha \cdot b$$

Für ein Momentgleichgewicht gilt, daß es dann eintritt, wenn die Summe aller auf das untersuchte System wirkenden Momente zu einem gewählten Punkt gleich Null ist. In unserem Fall haben wir es mit nur zwei Momenten zu tun, und wir können daher das Momentgleichgewicht mit folgender Formel ausdrücken:

$$M_K = M_A$$

$$K \cdot S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot a = G \cdot \sin \alpha \cdot b$$

Aus dieser Formel kann die Krängungsstabilität als derjenige Winddruck errechnet werden, bei dem das Momentgleichgewicht bei der gewählten zulässigen Krängung eintritt:

$$K = \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot b}{S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot a}$$

K - Krängungsstabilität bzw. Winddruck [kg/m²]

G - Ballastgewicht [kg]

S - Gesamtsegelfläche [m²]

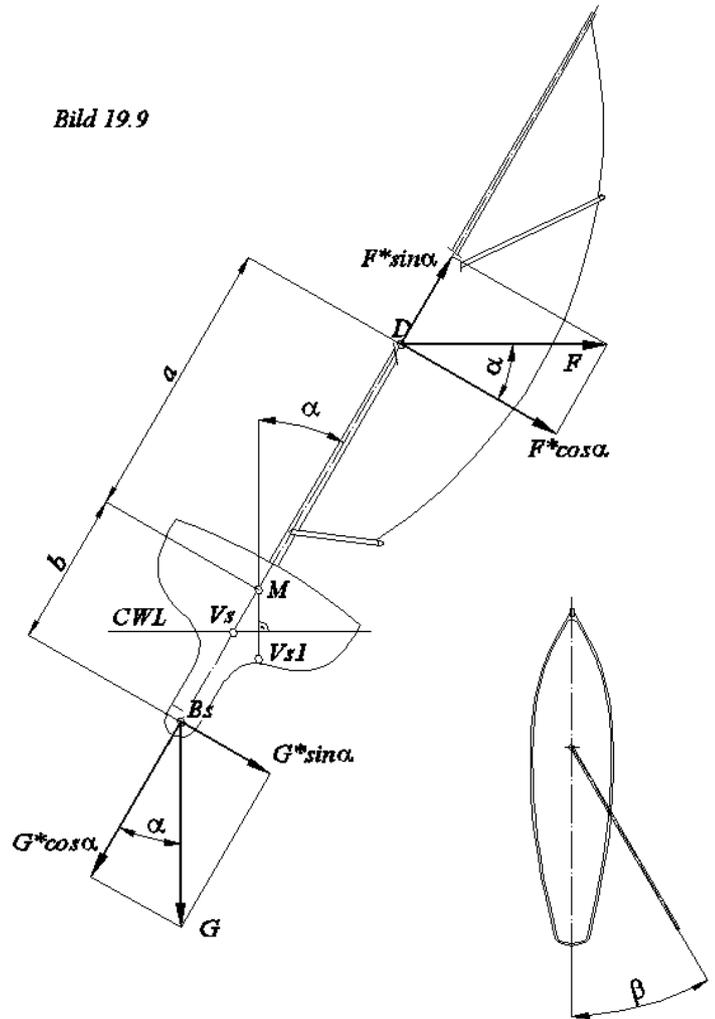
a - Entfernung des Segeldruckpunkts vom Metazentrum [m]

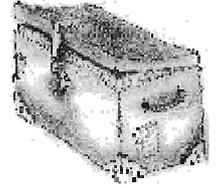
b - Entfernung des Ballastschwerpunkts vom Metazentrum [m]

α - Krängungswinkel [°]

β - Öffnungswinkel der Segel bei halbem Wind [°]

Bild 19.9





Bei vorbildähnlichen Modellsegelbooten geht man aufgrund ihres halbwegs vorbildähnlichen optischen Eindrucks beim Segeln von einer maximalen Krängung von 30° ($\alpha = 30^\circ$) aus. Da die Segel eines bei halbem Wind segelnden Schiffes im Winkel von ca. 30° zur Schiffsachse stehen, kann man auch für β den Wert von 30° in die vorhergehende Formel einsetzen. Alle anderen Werte in obiger Formel sind bereits ermittelt worden und somit bekannt. Der Winddruck K , der in unserem Anwendungsfall eine Art von Krängungsstabilitätskoeffizient darstellt, kann also errechnet werden.

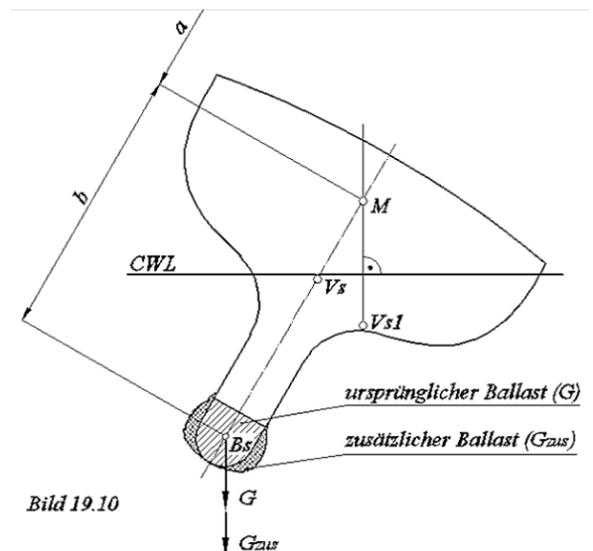
19.6.3 Konsequenzen für die Modellkonstruktion

Ein vorbildähnliches Modellsegelboot sollte bis zu einer Windstärke von 4 Beaufort segelfähig sein. Dieser Windstärke entspricht der Winddruck $K_{4Bft} = 2,5 \text{ kp/m}^2$. Theoretisch sollte also die errechnete Krängungsstabilität K mindestens diesen Wert erreichen. Dies ist ein Grenzwert, der bei der Auslegung des Modells erreicht oder besser leicht überschritten werden soll. Auf der anderen Seite sollte das Streben nach einem möglichst hohen Stabilitätskoeffizienten nicht ins Uferlose ausarten. Die Konsequenz davon wäre ein unterbesegelt schiffes Dickschiff, das sich erst ab einer Windstärke von vielleicht 2,5 Bft überhaupt in Bewegung setzt.

In der Praxis ist es jedoch stets so, daß die erste Berechnung ein viel zu rankes Modell ergibt. Das Modell muß dann korrigiert, und unter Berücksichtigung der Korrekturen neu berechnet werden. Wie schon im Kapitel 1.3 angedeutet, kann man dem Problem einer unzureichenden Krängungsstabilität auf mehreren Ebenen begegnen:

Die erste Möglichkeit ist eine Vergrößerung des Ballastanteils durch konsequenten Leichtbau am gesamten Modell (auch unterhalb der Wasserlinie!) (Bild 19.10).

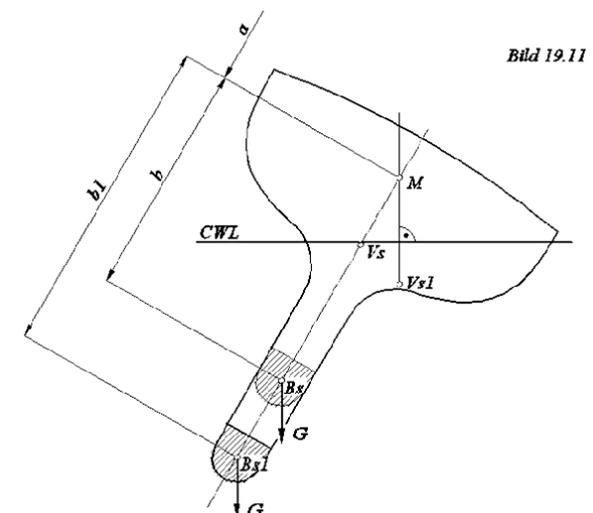
Bild 19.10
Vergrößerung des aufrichtenden Moments durch Erhöhen des Ballastanteils.
Um den Ballastschwerpunkt möglichst tief zu halten, sollte man stets versuchen, das zusätzliche Blei seitlich in Form von „Hamsterbacken“ einzuplanen und anzubringen.



Der konkrete Wert für das Ballastgewicht G in obiger Formel erhöht sich dadurch, und die Krängungsstabilität wächst.

Auch eine Verlängerung des Ballasthebelarms b erhöht die Stabilität wesentlich (Bild 19.11).

Bild 19.11
Die beliebteste Maßnahme gegen eine unzureichende Krängungsstabilität ist das Verlängern des Ballasthebelarms durch einen Zusatzkiel bzw. durch Modifizierung des Lateralplans.



Dies erreicht man in der Praxis entweder durch einen Zusatzkiel mit einer Bleibombe oder durch eine Modifizierung des Lateralplans. Die zweite Möglichkeit sollte im Interesse der höheren Festigkeit und Starrheit des Modellrumpfes stets bevorzugt werden.

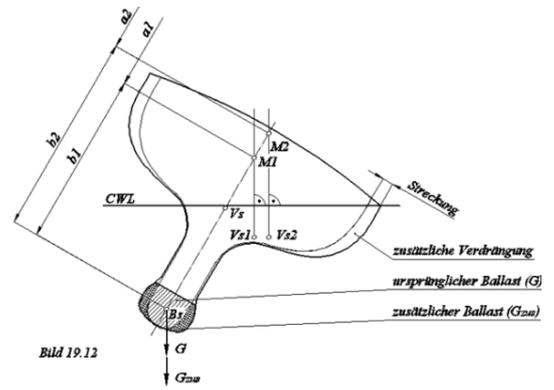
Durch das Strecken des Linienrisses querschnitts (**Bild 19.12**) verschiebt man das Metazentrum nach oben.

Bild 19.12

Am wirkungsvollsten kann man das aufrichtende Moment durch die Streckung des Rumpfes querschiffs erhöhen.



Dies bewirkt eine Verkleinerung des krängenden Moments (der Hebelarm a wird kleiner) und gleichzeitig eine Vergrößerung des aufrichtenden Moments (der Hebelarm b wird größer). Zusätzlich wird durch diese Maßnahme die Verdrängung und somit auch der Ballastanteil vergrößert. Auf einen Schlag setzt man an mehreren Stellen an, und sämtliche Ansatzpunkte bewirken eine deutliche Stabilitätsverbesserung. Eine Streckung um bis zu 10 % merkt am fertigen Modell nicht mal ein Fachmann, und sie bewirkt wahre Wunder. Dennoch ist diese Maßnahme für einen Anfänger nicht zu empfehlen, da sie einen gewissen Erfahrungsschatz und Feingefühl erfordert, die man sich erst aneignen muß. Die Puristen lehnen sie als eine Abweichung von der Vorbildtreue grundsätzlich ab und bedienen sich lieber eines häßlichen Zusatzkiels bzw. verzichten auf einen Teil der guten Segeleigenschaften, die ihr Modell hätte haben können. Das verstehe, wer will.



19.7 Abweichungen bei Berechnung von Rumpfschalen

Die bisher besprochene Vorgehensweise setzte voraus, daß die Basisdaten des Modells anhand eines vorliegenden Linienrisses und eines Segelplans in Erfahrung gebracht werden können. Beim gar nicht so seltenen Ausbau einer Rumpfschale ist es jedoch häufig so, daß man außer des Segelplans und ggf. noch eines vereinfachten Längsschnitts keine weiteren Zeichnungen hat, denen man die erforderlichen Werte entnehmen kann. Dafür ist aber die Rumpfschale vorhanden, mit der man ein bißchen experimentieren kann.

Ziel der Versuche ist die Ermittlung der Verdrängung, des Verdrängungsschwerpunkts, des Lateralschwerpunkts und des Rumpfquerschnitts (der Spantfläche) an der Stelle des Rumpfes, an welcher der Verdrängungsschwerpunkt liegt. Die Vorgehensweise ist der im Kapitel 3 beschriebenen Schwimmprobe sehr ähnlich (siehe **Bild 3.1**).

Bild 3.1

Das Einrichten der Wasserlinie am Modell erleichtert ein kleiner Handspiegel, den man neben dem Modell halb ins Wasser eingetaucht hält.

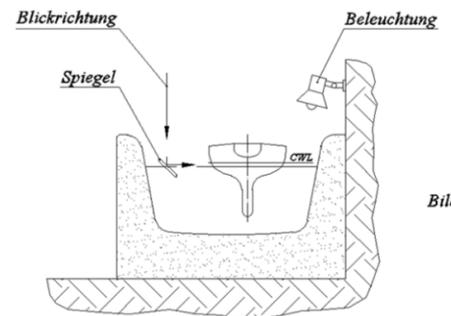


Bild 3.2

Im ersten Schritt wird die Wasserlinie des Modells parallel zur Konstruktionswasserlinie (CWL) ausgerichtet.

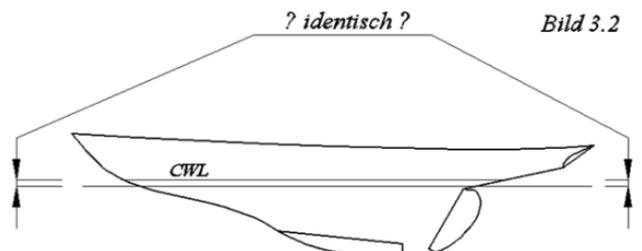
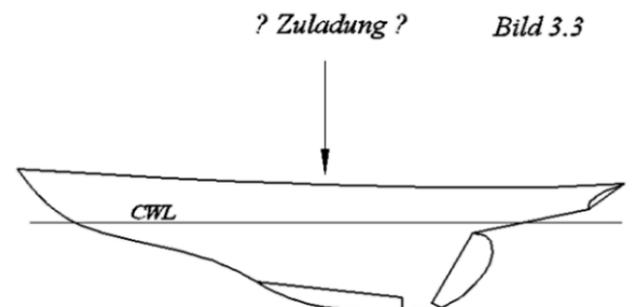


Bild 3.3

Im zweiten Schritt wird das Modell so lange schrittweise zusätzlich beschwert, bis es exakt auf seiner CWL schwimmt. Das Gewicht der Zuladung stellt die maximale Baureserve dar. und sollte beim Erstellen der noch anzufertigenden Baugruppen nicht überschritten werden.

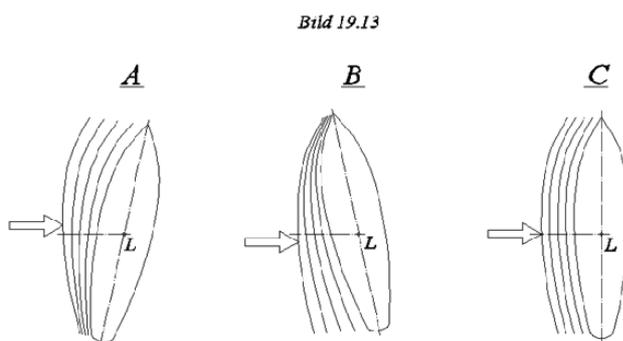


Bevor man die Badewanne volllaufen läßt, sollte die in der Regel noch etwas labberige Rumpfschale temporär versteift werden. Üblicher Weise wird je eine Leiste jeweils backbords und steuerbords von innen, entlang der späteren Deckschante, eingeklebt. Diese Leisten bilden eine Art von Balkweger. Mit mindestens zwei bis drei kürzeren Leisten, die man querschiffs orientiert unter die beiden Balkwegerleisten klemmt, wird die Schale versteift. Durch Verschieben der Querleisten entlang der Längsachse der Schale kann man zusätzlich die erforderliche bzw. erwünschte Rumpfbreite einstellen. Günstig ist, wenn man mittschiffs noch eine zusätzliche Leiste befestigt. Diese Leiste dient bei den späteren Versuchen als Markierungsträger, an dem man die Position der untersuchten Schwerpunkte anzeichnet.

Nachdem die Konstruktionswasserlinie (CWL) z.B. mit farbigen Klebebandstreifen markiert wurde, legt man die Rumpfschale ins Wasser. Unter ständiger Kontrolle der Schwimmlage beschwert man die Schale so lange, bis die CWL mit den zuvor angebrachten Markierungen exakt übereinstimmt. Das Gewicht der Zuladung plus das Eigengewicht der Rumpfschale ergibt die Verdrängung des Modells.

Bild 19.13

Ermittlung des Lateralschwerpunkts einer Rumpfschale.
Bei Versuch „A“ wurde der Druckpunkt zu weit vorn und bei Versuch „B“ zu weit hinten angesetzt.
Bei „C“ wurde der richtige Druckpunkt gefunden.

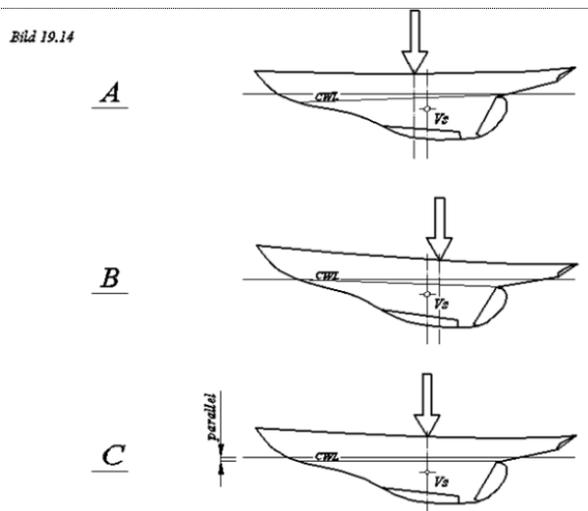


Ohne die Zuladung aus der Rumpfschale zu entfernen, werden gleich noch zwei weitere Versuche unternommen. Der erste besteht darin, daß man z.B. mit einem Bleistift den Rumpf im Wasser seitwärts schiebt (Bild 19.13). Dabei beobachtet man die Schale von oben und kontrolliert, ob sich der Rumpf wirklich nur seitwärts bewegt und nicht etwa zusätzlich noch verdreht. Ist dieser Zustand erreicht, markiert man diejenige Stelle am Rumpf, an der die Bleistiftspitze drückte. Dieser Punkt definiert die Position des Lateralschwerpunkts.

Auf einem ähnlichen Prinzip, allerdings in der senkrechten Achse, beruht die Ermittlung des Verdrängungsschwerpunktes. Man drückt mit einem Bleistift mittschiffs den Rumpf einige Millimeter tiefer ins Wasser, und kontrolliert dabei, ob der Rumpf am Bug und am Heck gleichmäßig eintaucht (Bild 19.14). Ist dies der Fall, markiert man den Druckpunkt als den Verdrängungsschwerpunkt des Modells.

Bild 19.14

Ermittlung des Verdrängungsschwerpunkts einer Rumpfschale.
Bei Versuch „A“ befindet sich der Druckpunkt vor und bei Versuch „B“ hinter dem Verdrängungsschwerpunkt.
Der untersuchte Rumpf verhält sich dabei bug- bzw. hecklastig.
Bei Versuch „C“ wurde die korrekte Position des Druckpunkts (auf einer Vertikale mit V_s) gefunden.



Um die Berechnung des Modells durchführen zu können, braucht man nur noch die Form und die Fläche des Spants in Erfahrung zu bringen, in dessen Ebene der Verdrängungsschwerpunkt liegt. An der entsprechenden Stelle des Rumpfes wird an die Rumpfwand ein Stück weicher Kupferdraht so lange angeformt, bis sein Verlauf dem der Rumpfwand entspricht (Bild 19.15). Dabei kontrolliert man nicht nur den Verlauf an sich, sondern auch die Rechtwinkligkeit zur Mittschiffslinie und zur Konstruktionswasserlinie.

Bild 19.15

Bugbereich einer Rumpfschale mit versteifenden, entlang der späteren Deckschante eingeklebten Holzleisten. Statt der im Text erwähnten Querleisten sieht man hier einen eigentlich viel zu wichtigen Decksbalken aus Sperrholz. Beachten Sie die abgenommene Spantkontur aus Kupferdraht und die Markierungen auf der Mittelleiste.



Die so gewonnene Spantkontur mit markierter Konstruktionswasserlinie und Deckschante überträgt man auf ein Blatt kariertes Papier. Es spart Arbeit und minimiert die Fehlerquote, wenn man die Kontur nur an einer Rumpfseite abnimmt, sie aufs Papier überträgt und anschließend spiegelt. Die weitere Vorgehensweise bei der Ermittlung des Metazentrums und bei der eigentlichen Stabilitätsberechnung ist mit den im Kapitel 19.6 beschriebenen Schritten identisch.



Viel Erfolg dabei wünscht Borek Dvořák

Trickkiste 33

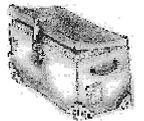
Fläche und Flächenschwerpunkt eines Gaffelsegels:

Ein viereckiges Gaffelsegel teilt man diagonal in zwei Dreiecke, deren Flächen und Schwerpunkte man wie im Text beschrieben einfach bestimmen kann. Die Fläche des Gaffelsegels ergibt sich dann aus diesen beiden Teilflächen.

Den Schwerpunkt des Gaffelsegels ermittelt man wieder graphisch.

Die Schwerpunkte der beiden Dreiecke werden durch eine Linie verbunden ("a" in Bild 7.11), zu der in jedem der Schwerpunkte das Lot auf die jeweils entgegengesetzte Seite gefällt wird.

Auf die Lotlinien wird die jeweils gegenüberliegende Fläche als Strecke im beliebigen Maßstab eingetragen, also zum Beispiel 100 mm für 0,5 m² und 40 mm für 0,2 m². Die Enden der Strecken werden durch eine Linie verbunden, die "a" im Flächenschwerpunkt des Gaffelsegels schneidet.



Trickkiste 65

Fehlerfrei rechnen:

Die meisten Fehler bei Berechnungen passieren beim Einsetzen konkreter Werte durch den sogenannten "Einheiten-Gulasch". Achten Sie daher bitte mit besonderer Sorgfalt darauf, daß Sie z.B. in der Stabilitätsformel tatsächlich das Gewicht in Kilogramm, die Segelfläche in Quadratmetern und die Hebelarme in Metern einsetzen. Die richtigen Einheiten erkennt man übrigens daran, daß sie in der Begriffserklärung stets in eckigen Klammern hinter dem jeweiligen Begriff stehen.

An dieser Konvention hält auch dieses Buch fest.

