

Ermittlung von Stabilitätshebelarmkurven aus 3D-Punktwolken

Otto Heunecke

Zusammenfassung

Die Stabilität eines Schwimmkörpers, im Speziellen eines Schiffes, bezeichnet seine Eigenschaft, sich als Reaktion auf ein krängendes Moment eigenständig wieder in seine Ursprungslage aufzurichten. Für die Bewertung sowohl der statischen als auch der dynamischen Stabilität müssen die aufrichtenden und die krängenden Hebelarme bekannt sein. Beides hängt maßgeblich von der Kenntnis der Geometrie des Rumpfes und der Aufbauten bzw. der Größe und Anordnung der Segel bei Segelschiffen ab, so dass eine diesbezügliche Vermessung eines Schiffes mittels terrestrischem Laserscanning die Zuverlässigkeit und damit die Aussagekraft von Stabilitätsberechnungen verbessert. Am Beispiel einer größeren Segelyacht wird dies gezeigt.

Summary

The stability of a floating body, in particular a vessel, is referred by the property to independently rise back to its initial position as response to a heeling moment. To evaluate static as well as dynamic stability the righting and the heeling levers must be known. Both largely depend on the knowledge of the geometry of the hull and superstructure and the sail area at tall ships respectively, so that a relevant survey of the vessel using terrestrial laser scanning improves reliability and significance of stability calculations. Using the example of a larger sailing vessel this is shown.

Schlüsselwörter: Hydrostatik, Laserscanning, metazentrische Evolute, Pantokarene, Stabilität

1 Einleitung

Die Laserscanneraufnahme eines Schiffes ermöglicht es, geometrische Kenngrößen abzuleiten, wie diese für eine Stabilitätsberechnung erforderlich sind. Eine solche Vermessung ist insbesondere sinnvoll, wenn an einem Schiff bauliche Veränderungen durchgeführt wurden und/oder keine Konstruktionsunterlagen verfügbar sind und in der Folge Zweifel an den Stabilitätseigenschaften bestehen bzw. diese nachzuweisen sind. Die Stabilität eines Schwimmkörpers ist seine Fähigkeit, sich aus einer geneigten Lage wieder selbstständig aufzurichten (Middendorf 2010, Krüger 2013).

Zur Bewertung der statischen und dynamischen Stabilität benötigt man Hebelarmkurven, an denen orientiert die International Maritime Organization (IMO) u. a. mit der Richtlinie A.749(18) »Code on intact stability for all types of ships« Kriterien entwickelt hat, die an die Seetüchtigkeit von Schiffen zu stellen sind. Flaggenstaaten

wie Deutschland haben diese Vorgaben übernommen und überwachen sie auf Einhaltung und Klassifikationsgesellschaften wie DNV GL, seit 2013 ein Zusammenschluss von Det Norske Veritas und Germanischer Lloyd, oder die französische Klassifikationsgesellschaft Bureau Veritas (BV) zertifizieren basierend auf solchen Richtlinien den Zustand von Schiffen nach Bauart und Unterhaltung. Das erteilte Klassezeugnis ist maßgeblich für den Eigner, wie er sein Schiff betreiben und das damit verbundene Risiko versichern kann.

Von der Stabilität zu unterscheiden ist die Festigkeit eines Schiffes, den einwirkenden Beanspruchungen, z. B. durch Seeschlag bei den Aufbauten oder Winddruck auf das Rigg, zu genügen. Hierzu wird beispielsweise die geforderte Mindeststärke der Beplattung bei Stahlrümpfen durch die Klassifikationsgesellschaften mittels Ultraschall geprüft und es gibt Vorgaben zu Material und Minstdurchmesser der Bestandteile des Riggs (GL 1997). Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Berufsgenossenschaft Verkehr (BG Verkehr) als Trägerin der gesetzlichen Unfallversicherung nutzen die Klassezeugnisse zudem für die Erfüllung ihrer Aufgaben gemäß Schiffssicherheitsverordnung (SchSV vom 18.9.1998).

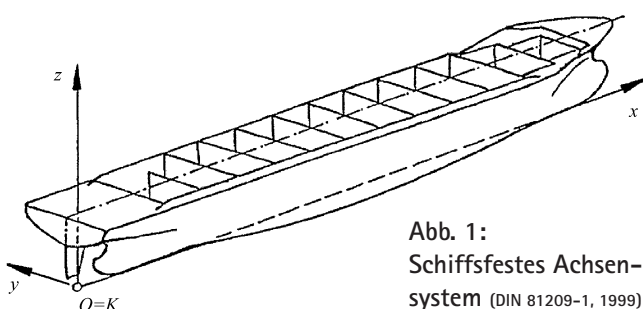
Mangelnde Anfangsstabilität und/oder der Verlust der Stabilität durch verrutschte Ladung sowie eindringendes Wasser sind ursächlich für eine Reihe von Unglücken speziell bei Segelschiffen. Prominente Beispiele sind der Untergang der Segelschiffe Niobe 1932 im Fehmarnbelt und Albatross 1961 in der Karibik durch eine plötzlich einfallende, sogenannte weiße Bö (engl. white squall), oder der Untergang der Pamir 1957 durch verrutschte Ladung im Orkan (Perrot 2003). Fragen zur Stabilität sind in jüngster Zeit im Zusammenhang mit Traditionsschiffen aufgekommen, bei denen das Rigg und/oder die Aufbauten durch die Eigner gegenüber dem ursprünglichen Zustand verändert wurden (BSU 2002, 2005 – www.bsu-bund.de). Siehe hierzu auch das »Merkblatt zur Sicherstellung der Stabilität von Traditionsschiffen« der Gemeinsamen Kommission für Historische Wasserfahrzeuge (GSHW 2004 – www.gshw.de).

Bei dem hier betrachteten Beispielschiff handelt es sich um einen 1974 in den Niederlanden gebauten Schoner, also ein zweimastiges Segelschiff. Die Länge über alles beträgt 38 m und die größte Breite 8 m. Der Großmast hat eine Höhe von 32,1 m über der Wasserlinie bei mittlerer Zuladung. Leer, d. h. ohne Zuladung, hat das Schiff einen Tiefgang von 3,45 m. Mit Zuladung (Brennstoff, Frischwasser, Proviant, ...) geht das Schiff ca. 3,65 m tief. Das Schiff wurde im Frühjahr 2016 auf dem Slip liegend

gescannt. Alle nachfolgenden Betrachtungen sind allein methodisch motiviert, um aufzeigen zu können, welchen Nutzen eine Laserscanneraufnahme haben kann.

2 Stabilität von Schwimmkörpern

Die entscheidenden beiden Größen zur Kennzeichnung der Stabilität eines Schwimmkörpers sind der Gewichtsschwerpunkt $G = G(x, y, z)$ und der Form- bzw. Auftriebsschwerpunkt $B = B(x, y, z)$. Bei aufrechter Schwimmelage liegen beide Schwerpunkte lotrecht übereinander unterhalb des Metazentrums $M = M(x, y, z)$. Befindet sich bei aufrechter Lage G unterhalb von B , handelt es sich um einen gewichtsstabilen Körper, im umgekehrten Fall um



einen formstabilen Körper. Mit Ausnahme von Kielyachten und z.B. Seenotrettungskreuzern sowie U-Booten (sog. »Selbstaufrichter«), sind Schiffe im Allgemeinen formstabil. Das Metazentrum M ist der Schnittpunkt der Auftriebsvektoren, die zwei benachbarten Drehlagen zuzuordnen sind. Man unterscheidet das Breitenmetazentrum (Drehung um die Längsachse x ; Krängung φ) und das Längenmetazentrum (Drehung um die Querachse y ; Trimmung ϑ). Für die Stabilität ist vor allem das Breitenmetazentrum von Bedeutung, welches bei aufrechter Schwimmelage in Längsrichtung, d.h. der Mittschiffsebene CL , über G liegt (Anfangsmetazentrum M_0) und sich bei wachsender Krängung davon entfernt (wahres Metazentrum $M(\varphi)$; metazentrische Evolute). Wird dieser Effekt des seitlichen Auswanderns vernachlässigt und der Drehpunkt als Schnitt der Mittschiffsebene mit der Wirklinie des Auftriebs durch B angesehen, spricht man vom scheinbaren Metazentrum $N = N(\varphi)$. Siehe hierzu die Abb. 9.

Die Stabilität wird hinsichtlich B beeinflusst durch die Form des Schiffsrumpfes und hinsichtlich G durch die Massenverteilung im Schiffskörper. Ein krängendes Moment entsteht insbesondere durch Winddruck, durch Änderung der Massenverteilung, durch Trossenzug oder durch Kursänderung bei hoher Geschwindigkeit. Zur weiteren Behandlung ist es erforderlich ein Koordinatensystem gemäß DIN 81209-1 (1999) einzuführen, siehe die Abb. 1. Der Ursprung des Koordinatensystems wird im Folgenden als Kielpunkt K bezeichnet. Das Heck kann über den Kielpunkt hinausragen, so dass negative x -Werte auftreten, das positive y zeigt nach Backbord. Bei der

Projektion des Schiffskörpers anhand der Konstruktionszeichnungen entsteht in der y, z -Ebene ein Spantenriss, in der x, z -Ebene ein Längsriss und in der x, y -Ebene ein Wasserlinienriss. Ein Linienriss ist die traditionelle kombinierte Darstellung aller drei Projektionen in geeigneter Scharung, um zu einem Eindruck des Schiffskörpers zu gelangen. Im Kielpunkt K ist zudem das globale, an der Lotrichtung orientierte kartesische Rechtssystem ψ, η, ζ gelagert. Bei aufrechter Schwimmelage koinzidieren die Achsen mit dem Schiffskoordinatensystem (siehe Abb. 4a).

3 Extrahierte Daten einer Laserscanneraufnahme

Liegt ein Schiff geslippt oder gedockt, kann der freilegende Rumpf mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) erfasst werden. Ebenso können die Aufbauten und Masten gescannt werden, so dass eine 3D-Punktwolke entsteht, die die Geometrie des Schiffes detailliert wiedergibt. Das hier betrachtete Beispielschiff wurde im Frühjahr 2016 auf dem Slip liegend mit einer Leica Scanstation P20 gescannt. Zur Aufnahme des Rumpfes, der Aufbauten und der Masten waren insgesamt 27 Standpunkte erforderlich. Im Bedarfsfall muss neben einer Erfassung von außen auch mit geeigneten Messmitteln im Schiffsinnen gearbeitet werden, wenn dies zur Bestimmung des Gewichtsschwerpunktes erforderlich ist, z.B. die Erfassung der Lage der Tanks, sofern die Konstruktionsunterlagen eine solche Aussage nicht ermöglichen. Ggf. ist ein Krängungsversuch durchzuführen, siehe Abschnitt 4.2. In die 3D-Punktwolke lässt sich gemäß Abb. 1 ein Koordinatensystem legen. Ein Spantenriss bzw. allgemeiner ein Querprofil der äußeren Hülle ergibt sich als Konturlinie der 3D-Punktwolke an jeder Stelle j der x -Achse. Entsprechend dem Tiefgang des Schiffes teilt die sogenannte Konstruktionswasserlinie CWL diese Konturlinie in einen Über- und Unterwasserbereich (siehe die Abb. 2).

Letztlich wird der Unterwasserbereich, in der Hydrostatik zumeist als Spantfläche bezeichnet, durch ein Ringpolygon eng benachbarter Punkte aus der Laserscanneraufnahme repräsentiert. Die Fläche A eines Ringpolygons in der y, z -Ebene mit n Punkten berechnet sich nach Gauß zu

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i \cdot z_{i+1} - y_{i+1} \cdot z_i), \quad (1)$$

der Schwerpunkt dieser Fläche ist

$$y_B = \frac{1}{6 \cdot A} \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i+1})(y_i \cdot z_{i+1} - y_{i+1} \cdot z_i), \quad (2)$$

$$z_B = \frac{1}{6 \cdot A} \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i+1})(y_i \cdot z_{i+1} - y_{i+1} \cdot z_i).$$

Damit ist die Bestimmung des Auftriebsschwerpunktes B_j eines jeden Querprofils j ; $j = 1, \dots, p$ bei jeder simulierten Krängung φ ermöglicht, wobei A die jeweilige Unterwasserfläche ist. L.F. Middendorf, technischer Direktor des

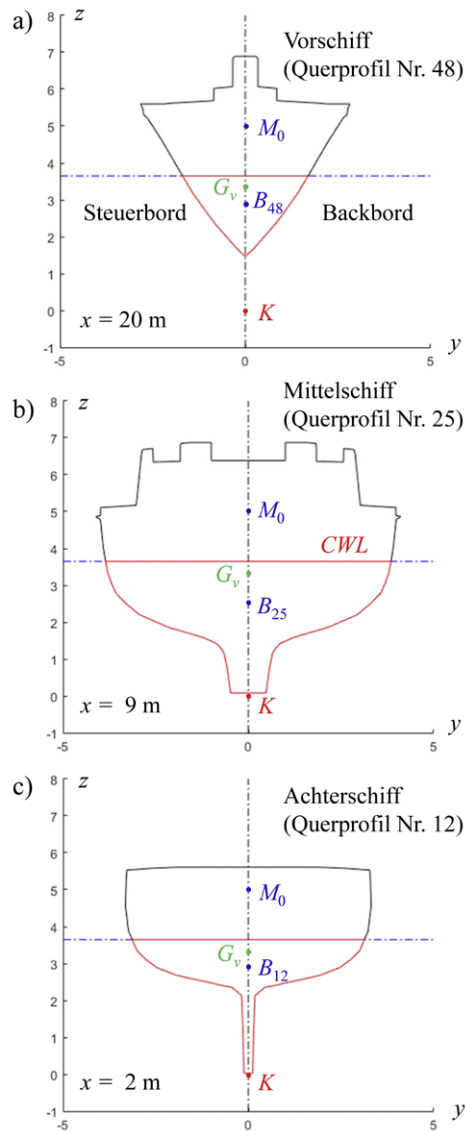


Abb. 2: Ausgewählte Querprofile des untersuchten Schiffes

GL von 1890 bis 1903, hatte die Planimetermethode, also quasi das grafische Pendant zu (1) und (2), hierzu vorgeschlagen. Die Abb. 2 zeigt für das betrachtete Schiff je ein Querprofil für den Bereich des Vor-, Mittel- und Achterschiffes. Für den Tiefgang $T = 3,65$ m ist die entsprechende Konstruktionswasserlinie eingetragen. Anhand des Kielpunktes K ist der Kielfall zu erkennen. Das Freibord beträgt 1,40 m (Abb. 2b).

Bei einer Äquidistanz von $\Delta x = 0,5$ m der Querprofile, wie sie für die vorliegende Studie gewählt wurde, führt dies auf insgesamt $p = 58$ Querprofile entsprechend der Länge des Rumpfes. Gegebenenfalls bietet es sich an, in Bereichen wo der Rumpf stärkere Oberflächenkrümmungen hat (Vorschiff, Heck), die Querprofile enger zu wählen als in Bereichen, wo der Rumpf weitgehend gleichbleibend ist. Man ist nicht an die Positionen der Spanten, für die im Allgemeinen Konstruktionszeichnungen vorliegen, gebunden. In die mit der Abb. 2 exemplarisch dargestellten Querprofile Nr. 12 ($x = 2$ m), Nr. 25 ($x = 9$ m) und Nr. 48 ($x = 20$ m) sind mit Blick vom Bug in Richtung Heck neben den Auftriebsschwerpunkten B_j der Kiel-

punkt K , der Gewichtsschwerpunkt G_v und das Anfangsmetazentrum $M_0 \approx M_{0,v} \approx M_{0,l}$ eingetragen. K , G_v und M_0 gelten an jeder Stelle der x -Achse, wobei der Index v ein sogenanntes volles Schiff und der Index l ein leeres Schiff kennzeichnen. Untersuchungen zur Bestimmung von Hebelarmkurven erfolgen gewöhnlich mindestens in den beiden extremen Zuständen »leer« (ohne Zuladung mit leeren Tanks) und »voll« (mit Zuladung, Tanks gefüllt). Gibt es bei Krängung kein Trimmmoment ($\vartheta = 0^\circ = \text{const.}$) gilt $M = M(\varphi) \forall \varphi$, wobei die Trimmlage Null durch G bestimmt ist.

Zwei benachbarte Querprofile bilden ein Kompartiment. Ein solches finites Volumenelement entspricht dem, was bei Middendorf (2010, S. 28) als Parallelkörper bezeichnet ist. Das Volumen eines Kompartiments j unterhalb der Wasserlinie lässt sich mit der aus der Stereometrie bekannten Pyramidenstumpfformel

$$\Delta V_j = \frac{x_{j+1} - x_j}{3} (A_{j+1} + \sqrt{A_{j+1} \cdot A_j} + A_j); \quad j = 1, \dots, p-1 \quad (3)$$

ermitteln, wie diese etwa auch zur Ermittlung von Erdmengen aus Höhenlinien bei Halden, Deponien und Stauräumen angewendet wird. Über alle $p-1$ Kompartimente am Heck beginnend summiert, ergibt sich die Verdrängung V_O [m³] des Schiffes:

$$V_O = \int dV_O \approx \sum_{j=1}^{p-1} \Delta V_{Oj}. \quad (4)$$

Die Abb. 3 zeigt ein solches Kompartiment einschließlich der Wasserlinie. Mit einer Annahme zur Dichte des Mediums, bei Salzwasser im Mittel $\rho_W = 1,023 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, gelangt man zum Gewicht des Schiffes (Displacement $D = \int dD [t]$). Krängt das Schiff um einen Winkel φ , muss das in der geneigten Situation eingenommene Volumen V_K identisch V_O aus (4) sein. Es gilt somit

$$V_O = V_K = \sum_{j=1}^{p-1} \Delta V_{Kj} \quad \forall \varphi. \quad (5)$$

In der Folge ändert sich je nach Rumpfform die Eintauchtiefe gegenüber dem Tiefgang bei aufrechter Lage und auch der jeweilige Anteil des verdrängten Volumens ΔV_K eines Kompartiments j . Anhand des Vergleichs der Volumenanteile ΔV_{Oj} und ΔV_{Kj} bei unterschiedlichen Krän-

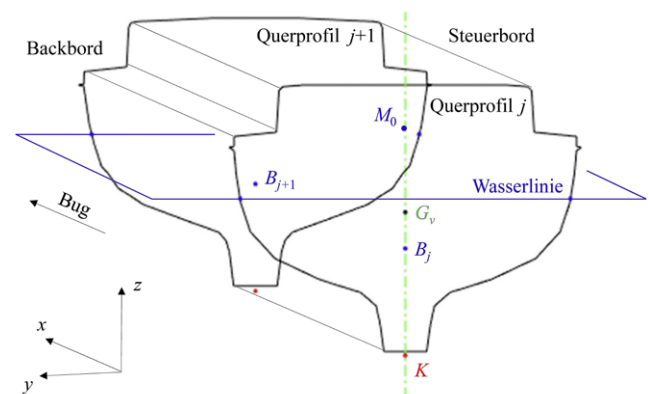


Abb. 3: Kompartiment zwischen zwei Querprofilen

Tab. 1: Kumulierte Volumenanteile der Kompartimente bei Krängung

φ [°]	Volumenanteil [%] bis zum Kompartiment Nr.		
	# 20	# 28	# 36
0	26,3	52,6	77,2
15	26,5	52,6	77,2
30	27,2	52,8	77,1
45	28,5	53,4	77,1
60	29,6	54,4	77,6
75	31,4	55,6	77,9

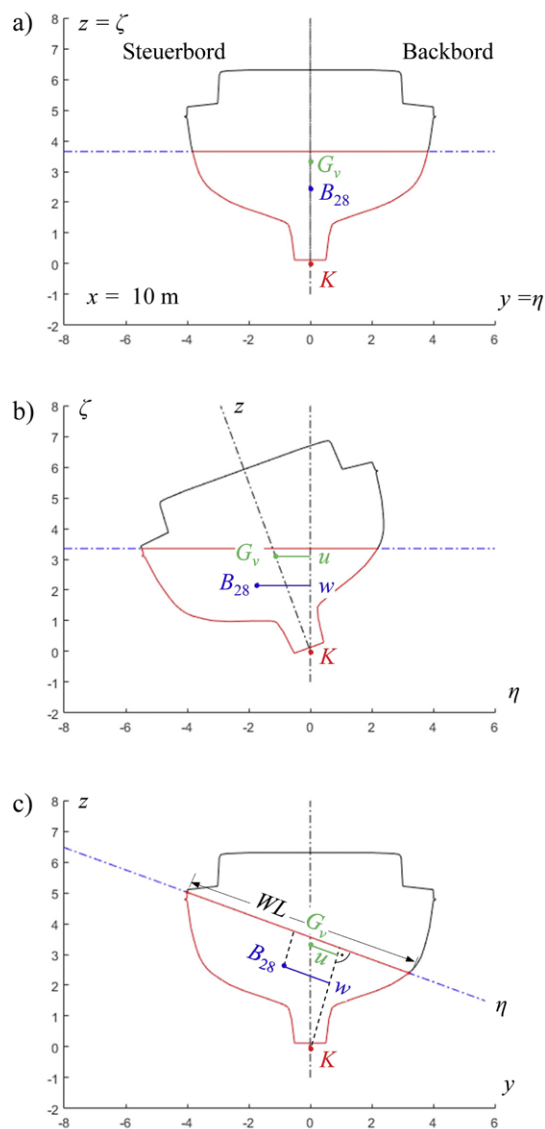
gungen kann eine Aussage zum Trimmmoment gemacht werden. Die Tab. 1 gibt dies komprimiert für ein volles Schiff wieder. Bei zunehmender Krängung taucht das Heck ein, es existiert somit ein negatives Trimmmoment. Der Effekt ist allerdings gering, so dass für das Schiff von $\vartheta \approx \text{const.}$ ausgegangen werden kann. Angegeben sind die Querprofile, bei denen das verdrängte Volumen ca. 25 %, 50 % und 75 % erreicht.

Nimmt man die 3D-Punktwolke kann das Volumen, welches der Rumpf mit einer horizontalen Referenzebene bildet, standardmäßig schnell und exakt ermittelt werden. Wird die Berechnung mit Referenzebenen bei unterschiedlich angenommen Tiefgängen variiert, resultiert eine Ladekurve, die die Tiefgangsänderung bei Änderung der Zuladung ausdrückt. Die sich unmittelbar aus der Software zur Auswertung von 3D-Punktwolken, im vorliegenden Fall wurde Leica Cyclone benutzt, ergebende Verdrängung mittels einer TIN-Vermaschung des Rumpfes und dem Schnitt mit einer Referenzebene lässt sich mit der aus (4) ermittelten Angabe als Summe der Kompartimente vergleichen. Bei der vorliegenden Untersuchung lag die Abweichung bei $0,4 \text{ ‰ } V_O$.

4 Aufrichtende Hebelarme

4.1 Auftriebsschwerpunkte und Metazentrum

Krängt ein Schiff, wandert der Auftriebsschwerpunkt B , der bei symmetrischer Gewichtsverteilung zunächst in der Mittschiffsebene liegt, zur geneigten Seite aus. Dies lässt sich sowohl berechnen, in dem man das Schiffskordinatensystem y, z dreht und das globale Koordinatensystem η, ζ beibehält (Abb. 4b) als auch, in dem man das globale Koordinatensystem dreht (Abb. 4c). Die letztere Variante ist in der Hydrostatik die übliche. Dargestellt ist mit der Abb. 4 die Situation eines vollen Schiffes, bei dem die Yacht 3,65 m Tiefgang hat und der Gewichtsschwerpunkt G_v über dem Kielpunkt K mit 3,34 m in den Konstruktionsunterlagen angegeben ist. Bei einer Krängung von $\varphi = 20^\circ$ nach Steuerbord kommt »die Seite Deck zu Wasser« (das Freibord wird Null) und der tiefste Punkt ist nicht mehr in Kielmitte. Er wandert nach außen und wird durch die Rumpfform je nach Krängung bestimmt.

Abb. 4: Gekrängtes Schiff in η, ζ und y, z -Koordinaten

Die Wasserlinie WL ist in einem Querprofil der Abstand der beiden Schnittpunkte des Rumpfes (bzw. bei größeren Neigungen der Aufbauten) mit dem ruhenden Horizont des Mediums. In jedem der p Querprofile lassen sich die Größen $B(\varphi)_j$, $WL(\varphi)_j$ für jedes φ berechnen. Durch arithmetische Mittelbildung zweier benachbarter Querprofile j und $j+1$ erhält man die für ein Kompartiment gültigen Werte. Jedes Volumenanteil ΔV_{Kj} , $j=1, \dots, p-1$ entwickelt eine Auftriebskraft entsprechend seiner jeweiligen Verdrängung, so dass sich die für das Schiff repräsentativen Größen $B(\varphi)$, $WL(\varphi)$ durch gewichtete Mittelbildung über die Kompartimente ableiten lassen. Diese gemittelten Werte entsprechen den Werten, wie sie für das Querprofil Nr. 27 erhalten werden. Dieses Querprofil, welches zugleich das Volumen des Schiffes in Längsrichtung etwa halbiert (siehe Tab. 1; »Längenschwerpunkt«), ist daher in der Abb. 5 hinterlegt. Verbindet man die $B(\varphi)$ unterschiedlicher Krängungen, entsteht die Formschwerpunktskurve $F(\varphi)$.

Die Wirklinie der Auftriebskraft verläuft senkrecht zur Wasserlinie durch den Auftriebsschwerpunkt $B(y_B, z_B)$,

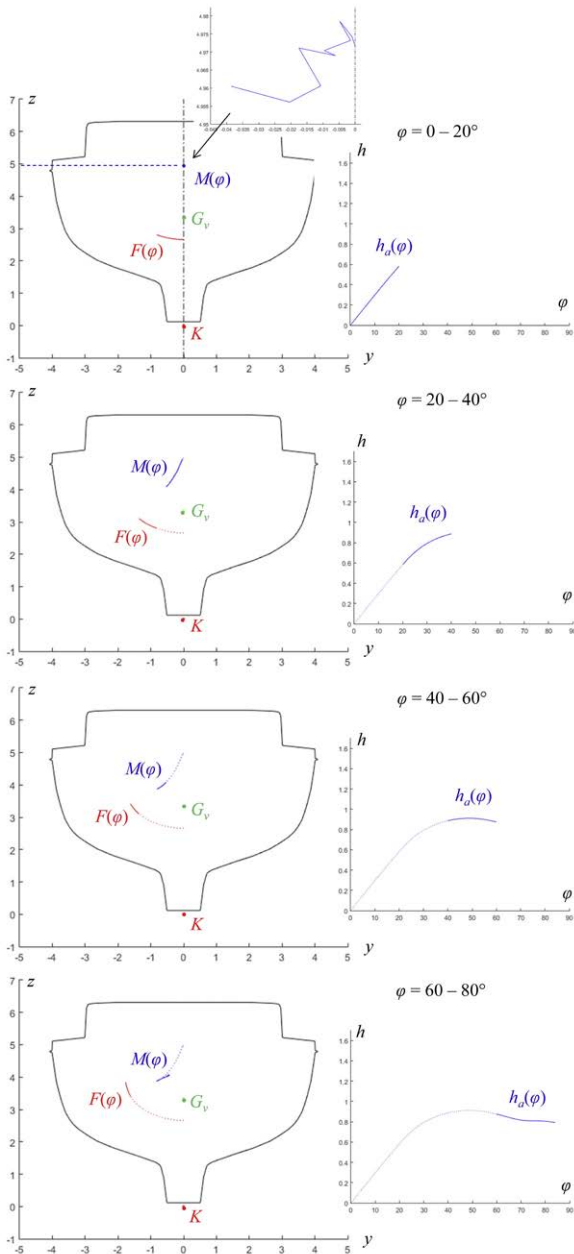


Abb. 5: Formschwerpunktskurve und metazentrische Evolute

siehe die Abb. 9, und ist bei unveränderter Trimmlage und gegebenem Tiefgang allein eine Funktion der Krängung. Das Lot vom Kielpunkt auf die Wirklinie der Auftriebskraft sind die Pantokarenen $w = w(\varphi)$, ihre Bestimmung ist eine Aufgabe der Kongruenztransformation:

$$w(\varphi) = y_B \cdot \cos \varphi + z_B \cdot \sin \varphi. \quad (6)$$

Für den aufrichtenden Hebelarm $h_a(\varphi)$ erhält man somit

$$h_a(\varphi) = w - u; \quad u(\varphi) = y_G \cdot \cos \varphi + z_G \cdot \sin \varphi, \quad (7)$$

siehe die Abb. 4. Bezeichnet man mit Z die Projektion von G auf die Wirklinie des Auftriebs, kann der aufrichtende Hebelarm $h_a(\varphi)$ auch als GZ angegeben werden (siehe DIN 81209-1, 1999). Die Größe u ist eine Funktion der Massenverteilung im Schiffsinnen und somit vom

Ladezustand abhängig, insbesondere dem Füllstand der Tanks unter Berücksichtigung freier Oberflächen bei Neigung und der Anordnung der Ladung bei frachttragenden Schiffen. Bei symmetrischer und unveränderlicher Gewichtsverteilung in Längsrichtung ist $y_G = 0$. Für $h_a(\varphi) > 0$ nimmt das Schiff eine kleinere Krängung ein, richtet sich also auf. In den Abb. 4b und 4c sind die Pantokarenen w und die Größe u bei einer Krängung von $\varphi = 20^\circ$ nach Steuerbord eingetragen. Bei $h_a(\varphi) < 0$ liegt Instabilität vor und bei $h_a(\varphi) = 0$ Gleichgewicht, sofern keine zusätzlichen Momente auf das Schiff einwirken (Abb. 4a). Wird h_a über die Winkel φ aufgetragen, entsteht die Kurve der aufrichtenden Hebelarme eines Schiffes, siehe die Abb. 6.

Idealisiert man einen Rumpf durch ein geometrisches Primitiv, insbesondere werden in der Hydrostatik Quader benutzt, ändert sich das Auftriebsverhalten unstetig, wenn die Seite Deck ein- oder die Kimm austauscht. Bei einem Segelschiffsrumpf, siehe die Abb. 2, gibt es derartige markante Stellen des Ein- und Austauschens längs des gesamten Rumpfes nicht. Zur Bewertung markanter Stellen des Ein- und Austauschens sind die Krümmungsverhältnisse der Formschwerpunktskurve zu ermitteln. Da das Auswandern von B um ein Wegstück dp parallel zur Wasserlinie bei Krängung um $d\varphi$ gleich ist dem Flächenträgheitsmoment I_φ geteilt durch die Verdrängung V_O (Krüger 2013, S. 54), gilt

$$dp = \frac{I_\varphi}{V_O} d\varphi. \quad (8)$$

Für die Krümmung einer Kurve ist bekannt

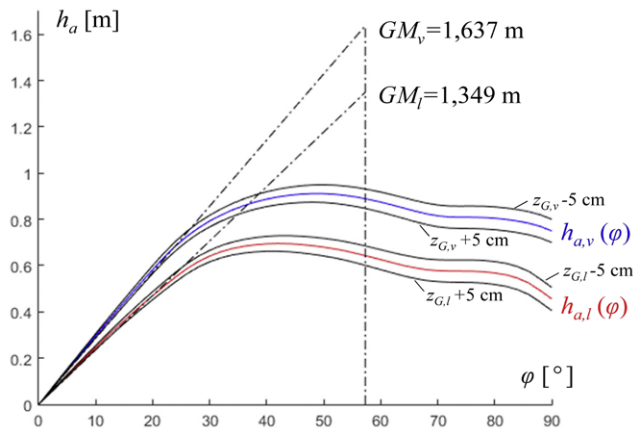
$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{ds} \approx \frac{d\varphi}{dp}, \quad (9)$$

so dass sich die Krümmungsradien $\rho(\varphi)$ der Formschwerpunktskurve $F(\varphi)$ mit

$$\rho(\varphi) = \frac{1}{12 \cdot V_O} \sum_{j=1}^{p-1} (x_{j+1} - x_j) \left(\frac{1}{2} (WL_{j+1}(\varphi) + WL_j(\varphi)) \right)^3 \quad (10)$$

ergeben (vgl. Flächenträgheitsmoment eines rechteckigen Querschnitts $I = \frac{1}{12} a \cdot b^3$). Trägt man die Krümmungsradien orthogonal zu $F(\varphi)$ auf, gelangt man zur metazentrischen Evolute, also der Kurve der Krümmungskreismittelpunkte und somit zu den wahren Metazentren $M(\varphi)$. $F(\varphi)$ ist die Evolvente. Festzuhalten bleibt, dass die Bestimmung von $M(\varphi)$, d.h. auch von M_0 eine rein geometrische Aufgabe ist.

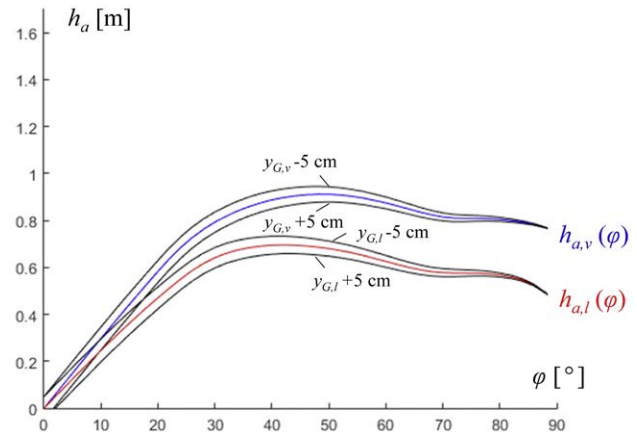
Mit der Abb. 5 sind die Ergebnisse für $F(\varphi)$ und $M(\varphi)$ sowie $h_a(\varphi)$ für die Krängungsbereiche $0^\circ - 20^\circ$, $20^\circ - 40^\circ$, $40^\circ - 60^\circ$ und $60^\circ - 80^\circ$ bei vollem Schiff sequentiell dargestellt. Eine Krängung $\varphi \leq 5^\circ$ wird bei Schiffen als »klein« angesehen. In diesem Bereich ist $M(\varphi)$ nahezu punktstabil und die Annahme eines unveränderlichen Anfangsmetazentrums ist gerechtfertigt. Bei dem hier betrachteten Schiff bleiben bei Krängungen bis 10° die Verschiebun-

Abb. 6: Aufrichtende Hebelarme h_a bei vollem und leerem Schiff

gen von $M(\varphi)$ unterhalb 1 cm, wie der Detailausschnitt in der Abb. 5 oben zeigt. Die Sprünge in dem Detailausschnitt resultieren aus numerischen Effekten, etwa bedingt durch den iterativen Abgleich von V_O und V_K . Bei vollem Schiff beträgt $KM_v = 4,972$ m, bei leerem Schiff ist $KM_l = 4,999$ m, d. h. das Anfangsmetazentrum $M_0 \approx M_{0,v} \approx M_{0,l}$ ist nahezu identisch eine schiffsspezifische Größe. Die Hebelarmkurve $h_a(\varphi)$ steigt bis $\varphi = 20^\circ$ praktisch linear. Im Bereich $20^\circ < \varphi \leq 40^\circ$ wandert, bedingt durch die Krümmungsänderungen von $F(\varphi)$, $M(\varphi)$ stark aus und im Bereich $40^\circ < \varphi \leq 60^\circ$, wo der aufrichtende Hebelarm sein Maximum erreicht, verringert sich das Maß der Auswanderung. Bei $\varphi > 60^\circ$ wandert das wahre Metazentrum sogar wieder von der Formschwerpunktskurve $F(\varphi)$ weg. In diesem Krängungsbereich tauchen die Aufbauten nach und nach ein. Der Verlauf der Formschwerpunktskurve $F(\varphi)$ ist stetig und zeigt keine markanten Stellen.

Mit der Abb. 6 sind die Kurven der aufrichtenden Hebelarme bei vollem und leerem Schiff wiedergegeben. Ihre Berechnung erfolgt hier in Inkrementen von $\Delta\varphi = 2^\circ$ bis $\varphi_{\max} = 90^\circ$. Bei vollem Schiff wird der maximale Hebelarm (»statischer Kenterwinkel«) bei $\varphi_v = 48^\circ$ mit $h_{a,\max,v} = 0,911$ m erhalten, bei leerem Schiff ist der Kenterwinkel $\varphi_l = 42^\circ$ und $h_{a,\max,v} = 0,696$ m. Der Krängungsbereich, bis zu dem $h_a(\varphi)$ positiv ist, wird Stabilitätsumfang genannt und der zugehörige Winkel als dynamischer Kenterwinkel bezeichnet. Anders als bei dem hier betrachteten Segelschiff, liegt der Stabilitätsumfang für die meisten formstabilen Schiffe deutlich unter einem dynamischen Kenterwinkel von $\varphi = 90^\circ$.

Bestimmt man bei $\varphi = 0^\circ$ die Steigung der Tangente, ergibt sich für 1 rad das Anfangsmetazentrum $GM_0 = KM - KG$. Für das volle Schiff erhält man $GM_v = 1,637$ m, für das leere $GM_l = 1,349$ m. Die metazentrische Höhe GM_0 ist eine der wesentlichen Kenngrößen zur Beurteilung der Seetüchtigkeit eines Schiffes. Zudem sind in der Abb. 6 die Verläufe der aufrichtenden Hebelarme dargestellt, wenn z_G um ± 5 cm variiert wird. Eine entsprechende Variation von y_G ist mit der Abb. 7 dargestellt. Eine Unsicherheit der Bestimmung von G in

Abb. 7: Aufrichtende Hebelarme bei Verschiebung von G in y -Richtung

z -Richtung wirkt bei größeren Krängungen, eine Unsicherheit in y -Richtung vor allem bei kleineren Neigungen. Man erkennt, dass für das hier betrachtete Schiff mit ca. 200 t Displacement (leer) der Gewichtsschwerpunkt in y - und z -Richtung besser als ± 5 cm bestimmt seien sollte, um die aufrichtenden Hebelarme verlässlich zu berechnen. Zugleich ist damit gezeigt, welchen Effekt eine veränderte Lage von G und in der Folge ein verändertes u hat, z. B. durch ungleiche Stauung von Zuladung bezüglich der Mittschiffsebene.

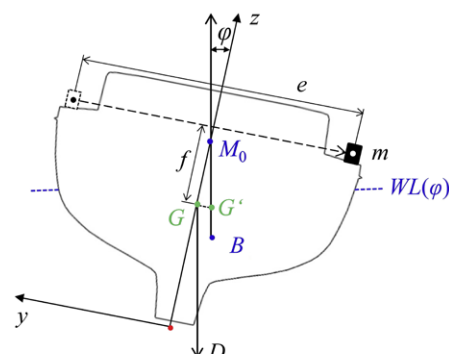
4.2 Krängungsversuche

Die übliche Methode, die metazentrische Höhe GM_0 zu bestimmen, sind Krängungsversuche. Beim Verschieben einer Masse m um eine Strecke e verschiebt sich parallel dazu der Schwerpunkt von G nach G' entsprechend der Abb. 8, wobei im neuen Gleichgewicht G' lotrecht über B liegt. Solche Versuche werden nur für kleine Krängungswinkel durchgeführt, so dass von einem punktstabilen Anfangsmetazentrum M_0 ausgegangen werden darf.

Für die metazentrische Höhe mit dem beim Versuch gültigen Displacement D , u. a. abhängig von dem jeweiligen Füllgrad der Tanks, gilt

$$GM_0 = \frac{m \cdot e}{D \cdot \tan \varphi} \quad (11)$$

Bei einer Testmasse $m \approx 1\% - 2\% D$, die von der Backbord- zur Steuerbordseite verlagert wird, erhält man Nei-

Abb. 8: Krängungsversuch mit einer Testmasse m

gungswinkel von ca. $\varphi \approx 2^\circ - 5^\circ$. Mit dem totalen Differential (Niemeier 2002, S. 54)

$$dGM = \frac{\partial GM}{\partial m} dm + \frac{\partial GM}{\partial e} de + \frac{\partial GM}{\partial D} dD + \frac{\partial GM}{\partial \varphi} d\varphi \quad (12)$$

lässt sich der Einfluss der beteiligten Größen auf das Ergebnis GM_0 quantifizieren. Um bei quadratischer Addition der Anteile gemäß Varianzfortpflanzung sicherstellen zu können, dass z_G besser als ± 5 cm bestimmt wird, gelten für D und m einzuhaltende relative Genauigkeiten von $dD \leq 2\% D$ und $dm \leq 2\% m$ sowie für den zu messenden Neigungswinkel $d\varphi < 0,1^\circ$. Der geringste Einfluss resultiert aus der Verschiebestrecke e , die mit ca. 5 cm ausreichend bestimmt ist. Da sich $M_0(y_M, z_M)$ aus $F(\varphi)$ ableiten lässt, ergibt sich bei symmetrischer Gewichtsverteilung die Lage von $G(y_G, z_G)$ unmittelbar ohne weitere Kenntnisse zur Massenverteilung im Schiffskörper. Bezeichnet f den Abstand der Testmasse m zu G in z -Richtung, resultiert aus

$$\Delta z_G = \frac{m \cdot f}{D - m} \quad (13)$$

der Betrag, um welchen G tiefer zu liegen kommt, nachdem die Testmasse entfernt wird (Middendorf 2010, S. 40). Entsprechend ist zu verfahren, um auf die Nominalzustände volles und leeres Schiff zu reduzieren, was dann allerdings Kenntnisse zur Lage der Tanks, zur Stauung der Ladung etc. bedingt.

Ist die metazentrische Höhe GM_0 bekannt und berechnet man für jedes $B(\varphi)$ den Schnitt der Auftriebslinie mit der Mittschiffsebene, d. h. die scheinbaren Metazentren $N(\varphi)$, lassen sich – vgl. Abb. 9 – alternativ zu (7) die aufrichtenden Hebelarme unter der Voraussetzung $y_G = 0$ mit

$$\begin{aligned} h_a(\varphi) &= (GM_0 + M_0 N(\varphi)) \sin \varphi \\ &= (KN(\varphi) - KG) \sin \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

bequem berechnen.

5 Krängende Hebelarme

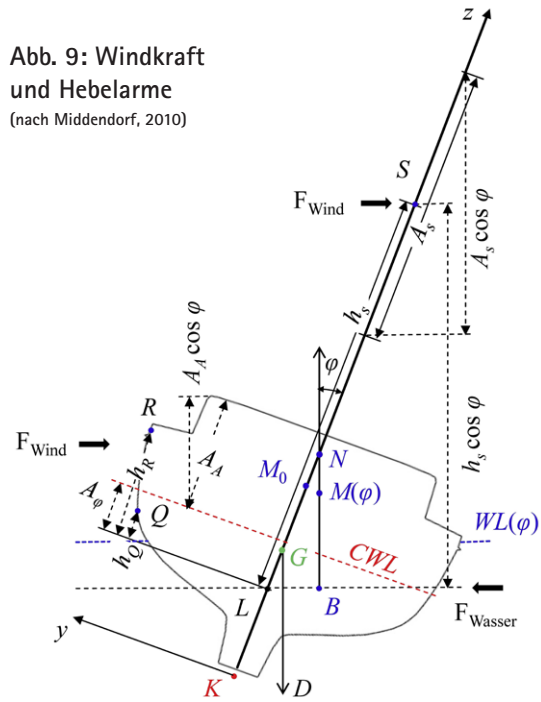
Krängende Momente bei einem Segelschiff entstehen vor allem durch Winddruck. Für die Stabilitätsberechnungen wird dabei die ungünstige Situation angenommen, dass die Segel brettsteif mittschiffs stehen und der Wind querab einfällt. Mit der in der Abb. 9 dargestellten Situation ergibt sich für das krängende Moment

$$M_w^M(\varphi) = p \cdot A_{LV} \cdot h_w \cdot \cos^2 \varphi \quad [\text{t} \cdot \text{m}]. \quad (15)$$

Darin bezeichnen p den Winddruck, A_{LV} die Summe aus Lateralfäche der Aufbauten A_A , der Segel A_S und des bei Krängung austauchenden Rumpfes A_φ und h_w den zu ermittelnden vertikalen Hebelarm des Windmoments (Bezeichnungen weitgehend in Anlehnung an DIN 81209-6,

Abb. 9: Windkraft und Hebelarme

(nach Middendorf, 2010)



2003). Der Winddruck p in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v und einer mittleren Dichte der Luft $\rho_L = 1,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (unter Berücksichtigung von Regen, Gischt usw.) errechnet sich zu

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot v^2 \cdot \frac{1}{9,81} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]. \quad (16)$$

Die Windkraft ergibt sich zu $F = p \cdot A_{LV}$. In der Tab. 2, die für ausgewählte Windstärken der Beaufort-Skala den Winddruck p angibt, sind auch die Relationen bezogen auf Bft. 5 angegeben. Eine Windzunahme auf Bft. 10 bedeutet bei gleicher Fläche A_{LV} eine Zunahme der Windkraft um das 7-fache, während eine Windabnahme auf Bft. 4 eine Halbierung der Kraft bedeutet.

Heute wird basierend auf Versuchsergebnissen für das krängende Moment des Winds an Stelle von (15) im Allgemeinen

$$M_w(\varphi) = c_w \cdot p \cdot A_{LV} \cdot h_w (0,25 + 0,75 \cdot \cos^3 \varphi) \quad (17)$$

benutzt (siehe Krüger 2013), wobei c_w ein Form- und Höhenbeiwert ist, um berücksichtigen zu können, wie verschiedene Flächen angeströmt werden und dass der Wind mit der Höhe exponentiell zunimmt. Für Höhen

Tab. 2: Winddruck ausgewählter Windstärken

Bft.	$v_{max} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$p [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}]$	Relationen
4	7,9	3,88	0,5
5	10,7	7,12	1,0
6	13,8	11,84	1,7
7	17,1	18,18	2,6
8	20,7	26,64	3,7
9	24,4	37,02	5,2
10	28,4	50,15	7,0

zwischen 15 m und 30 m über der Wasseroberfläche ist dieser Beiwert 1,1, darunter 1,0. Ebene Flächen haben den Beiwert 1,0, zylindrische Oberflächen wie Masten und Stagen den Beiwert 0,5, exponierte Bauteile den Beiwert 1,2 (IMO 1993, Tab. 4.6.3.3-1 & -2). Während die auf Middendorf (2010) zurückgehende Berechnung des Windmomentes mit (15) dazu führt, dass $M_w^M(\varphi)$ mit zunehmender Krängung gegen Null konvergiert, ist die Berechnung mit (17) dahingehend realitätsnäher, dass das Windmoment auch bei großen Neigungen auf mindestens 25 % des Anfangswertes verbleibt. Bei großen Neigungen entsteht zunehmend eine Wirkung über die austauchende Fläche A_φ , siehe die Abb. 9, wenngleich bei nur kleinem Hebelarm.

Dividiert man durch das Gewicht des Schiffes, werden die krängenden Hebelarme erhalten:

$$h_k(\varphi) = \frac{M_w(\varphi)}{D}. \quad (18)$$

Zwischen dem vollen und leeren Beispielschiff beträgt der Gewichtsunterschied $\Delta D \approx 30$ t. Die krängenden Hebelarme sind folglich für beide Zustände separat zu ermitteln, wobei sich neben D auch A_{LV} und h_w ändern.

Aus Längsrissen der 3D-Punktwolke lassen sich mit (1) und (2) die Fläche A_{LV} und der Schwerpunkt W des Überwasserlateralplanes angeben, wie diese zur Bestimmung des krängenden Momentes durch Winddruck benötigt werden. Für die Windangriffsfläche A_{LV} gilt gemäß Abb. 9

$$A_{LV} = A_S + A_A + A_\varphi. \quad (19)$$

Die Flächenanteile für die Segelfläche A_S , die Aufbauten A_A (inklusive Masten, Stagen etc. unter Berücksichtigung von Beiwerten c_w) und die bei Krängung austauchende Fläche des Rumpfes A_φ sind jeweils in die Vertikale zu projizieren. Ihre zugehörigen Hebelarme h_S , h_A und h_φ sind mit Hilfe der Schwerpunkte S , R und Q zu ermitteln und für h_w entsprechend der Flächenanteile zu gewichten, wobei sich diese Hebelarme auf den Drehpunkt L beziehen.

Bei einem Segelschiff müssen im Schiffskoordinatensystem dazu die Positionen abgegriffen werden, wo die Segel angeschlagen sind, so dass sich individuell für jedes Segel bzw. für jeden Segelschwerpunkt S der Hebelarm KS über dem Kielpunkt ergibt. Für ein Gaffelsegel, siehe die Abb. 10, ist dies exemplarisch gezeigt. Typischerweise bilden Vor- und Unterliek einen Winkel $< 90^\circ$ und das Achterliek ist ausgestellt. Oft ist der Mast leicht nach achtern geneigt. Wird das Segel gerefft, wird die Segelfläche verkleinert und der Schwerpunkt nach unten verlagert. Für eine Bewertung, welche Segelfläche ein Schiff bei bestimmten Windstärken tragen kann, sind diesbezüglich differenzierte Ermittlungen von A_S und KS erforderlich.

Die Normalbesegelung des betrachteten Schiffes bestehend aus vier Segeln beträgt 376 m^2 . KS ergibt sich zu 15,16 m. Die Fläche der Aufbauten ist bei vollem Schiff $A_{A,v} \approx 120 \text{ m}^2$ bei $KR_v = 8,88 \text{ m}$ und bei leerem Schiff

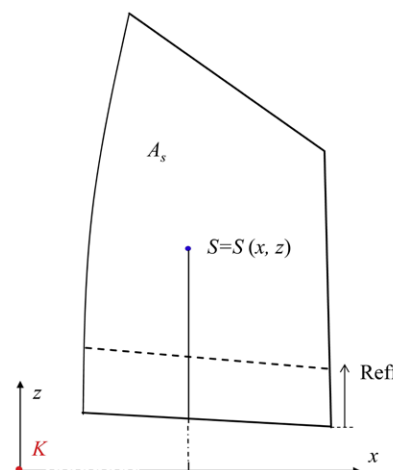


Abb. 10: Fläche und Schwerpunkt eines Gaffelsegels

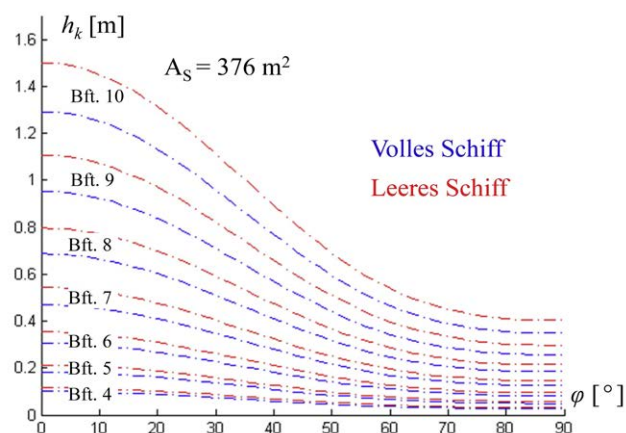


Abb. 11: Krängende Hebelarme bei vollem und leerem Schiff

$A_{A,v} \approx 125 \text{ m}^2$ bei $KR_v = 8,66 \text{ m}$. Die krängenden Hebelarme für die in Tab. 2 angegebenen Windstärken sind mit der Abb. 11 wiedergegeben.

6 Stabilitätshebelarmkurven

Die Gegenüberstellung der aufrichtenden (Abschnitt 4) und der krängenden Hebelarme (Abschnitt 5) führt zu den letztendlich interessierenden Stabilitätshebelarmkurven. Bei der statischen Stabilitätsrechnung wird das Momentengleichgewicht des aufrichtenden Drehmoments und des krängenden Moments bei ruhendem Schiff (Fahrt Null) betrachtet (»Glattwasserstabilität«). Bei Berücksichtigung dynamischer Effekte, z. B. bei einfallenden Böen und bei Seegang, wird ein Schiff soweit krängen, dass die bei Krängung gespeicherte potentielle Energie $E_P(\varphi)$ gleich der Energie $E_W(\varphi)$ der einfallenden Bö bzw. der krängenden Welle ist (»Energiegleichgewicht«), um danach wieder den statischen Gleichgewichtszustand einzunehmen. Hebelarmkurven müssen daher über das Momentengleichgewicht hinaus eine genügende Sicherheitsreserve bieten.

Auf dieses dynamische Verhalten, d. h. ein Überholen des Schiffes, sind die Kriterien der IMO (1993) ausgelegt, indem je nach Schiffstyp u. a. Mindestanforderungen an GM gestellt werden, Vorgaben zum statischen und dynamischen Kenterwinkel gemacht sind und insbeson-

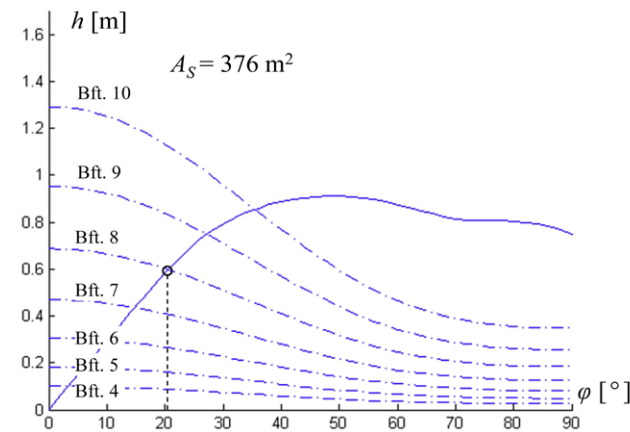


Abb. 12: Stabilitätshebelarmkurven bei vollem Schiff

dere die Flächen [m · rad] unter der Kurve des aufrichtenden Hebels bei bestimmten Krängungen eine spezifizierte Mindestgröße haben müssen. Diese Fläche zwischen zwei Winkeln φ_1 und φ_2 repräsentiert die potentielle Energie $E_P(\varphi)$, die sich bei Krängung bis zum Winkel φ_2 aufbaut. $E_W(\varphi)$ ergibt sich aus der Fläche unter den krängenden Hebelarmen. Es ist folglich über die Hebelarmkurven zu integrieren, um zu Aussagen zum Energiegleichgewicht zu gelangen. So lange

$$E'_P(\varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} h_a(\varphi) d\varphi > E'_W(\varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} h_k(\varphi) d\varphi, \quad (20)$$

also die aufnehmbare Energie $E'_P(\varphi)$ größer ist als die krängende $E'_W(\varphi)$, ist das Schiff stabil. $E_P(\varphi) = E_W(\varphi)$ führt zum dynamischen Krängungswinkel φ_{dyn} . Durch die Fahrt eines Schiffes werden die Kräfte und Momente verändert. Die Auswirkungen auf die Stabilität sind bei niedrigen Geschwindigkeiten gering, bei höheren Geschwindigkeiten jedoch zunehmend bedeutungsvoll (vgl. DIN 18209-1, 1999). Alle Stabilitätsbetrachtungen gehen davon aus, dass kein Wasser in das Schiffsinnere eindringt, also V_0 erhalten bleibt (»sichergestellter Verschlusszustand«) und der Rumpf sowie die Aufbauten und das Rigg intakt sind (»Intakstabilität«). Untersuchungen, bei denen eindringendes Wasser den Auftrieb vermindert, führen zu Fragen der sogenannten Leckstabilität.

Die Abb. 12 und 13 zeigen die Stabilitätshebelarmkurven bei vollem und leerem Schiff bei einer Normalbesegelung von $A_S = 376 \text{ m}^2$. Die jeweiligen Schnittpunkte geben das Momentengleichgewicht an, die statischen Krängungswinkel φ_s . Hervorgehoben ist die Situation bei Bft. 8, bei der bei vollem Schiff eine Krängung von $\varphi_s = 20,5^\circ$ eintritt (Seite Deck kommt in Lee zu Wasser, siehe Abb. 4), während sich in der gleichen Windsituation bei leerem Schiff ein statischer Krängungswinkel von $\varphi_s = 28,0^\circ$ einstellt. Für das volle Schiff wird $E_P(\varphi) = E_W(\varphi)$ bei $\varphi_{dyn} = 31,8^\circ$ erreicht, was die Faustregel $\varphi_{dyn} \approx 1,5 \cdot \varphi_s$ für moderate Krängungssituationen bestätigt. Bei einer plötzlich einfallenden Bö dieser Stärke und mittschiffs festgesetzten Segeln wird sich das Schiff etwa 1,5-fach überneigen als es geschieht, wenn der Wind das Schiff allmählich in die geneigte Lage bringt.

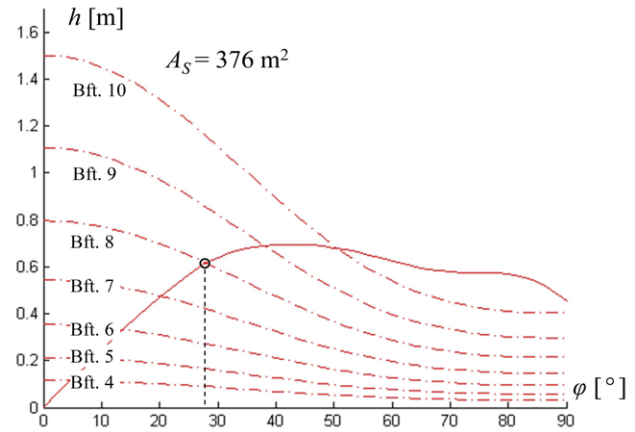


Abb. 13: Stabilitätshebelarmkurven bei leerem Schiff

In der Abb. 14 sind die Energiekurven $E'_P(\varphi)$ und $E'_W(\varphi)$ für die Beaufort-Windstärken 7 bis 10 dargestellt. Durch grafischen Abgriff der krängenden Energie am Momentengleichgewicht φ_s gelangt man zum dynamischen Krängungswinkel φ_{dyn} wie für die Situation Bft. 8 für das volle Schiff hervorgehoben. Im Einzelnen ergeben sich die Werte, wie sie mit der Tab. 3 zusammengestellt sind. Für größere Neigungen ist die besagte Faustregel zunehmend nicht mehr gültig. Middendorf (2010, S. 37) spricht pauschal davon, dass der dynamische Krängungswinkel annähernd doppelt so groß ist wie der statische Krängungswinkel.

Um die Sensitivität von $h_k(\varphi)$ auf die eingehenden Größen A_S , KS und D bewerten zu können, sind ihre Werte um jeweils $\pm 5 \%$ variiert. Aus der Abb. 15 ist ersichtlich, dass eine Bestimmung der genannten drei Größen

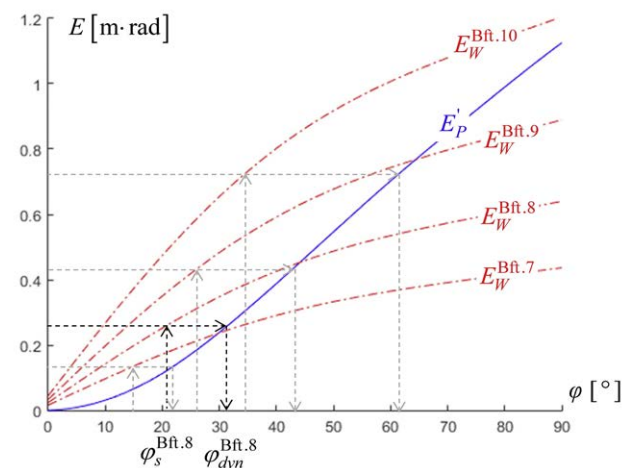


Abb. 14: Grafische Ermittlung des Energiegleichgewichts (volles Schiff)

Tab. 3: Statischer und dynamischer Krängungswinkel (volles Schiff)

Bft.	$\varphi_s [^\circ]$	$\varphi_{dyn} [^\circ]$	$\varphi_{dyn} / \varphi_s$
7	14,5	22,3	1,54
8	20,5	31,8	1,55
9	27,2	44,0	1,62
10	35,5	62,5	1,76

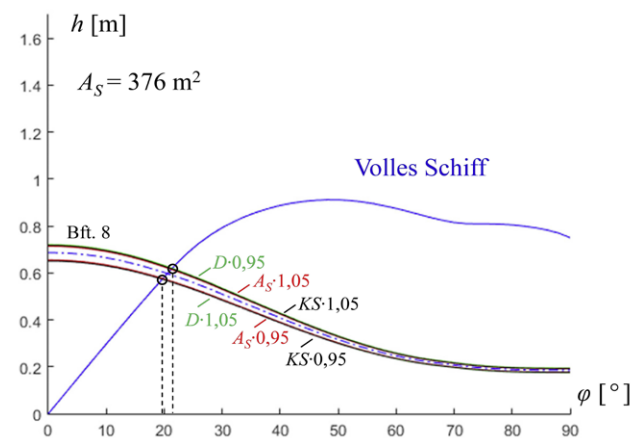


Abb. 15: $h_k^{Bft.8}(\varphi)$ bei Variation A_S , KS und D um je 5 %

möglichst besser als eine solche Variation erfolgen muss, um eine verlässliche Aussage zum Momentengleichgewicht und darauf aufbauend zum Energiegleichgewicht zu erzielen. Während eine Bestimmung von A_S [m²] und KS [m] mit entsprechender Genauigkeit auch mit einfachen Messmitteln möglich ist, liegt ein Wert einer Laserscanneraufnahme darin, das Volumen und in der Folge das Displacement exakt angeben zu können. Eine übliche Ermittlung von D [t] anhand von Völligkeitsgraden ist angesichts einer Rumpfgeometrie wie sie sich bei einem Segelschiff darstellt (vgl. Abb. 2) mit einer Unsicherheit verbunden, die leicht 5 % des tatsächlichen Wertes übersteigen kann. Auch bei der Auswertung von Krängungsversuchen sind entsprechend hohe Anforderungen an die Bestimmung von D zu stellen, siehe (12).

7 Fazit

Die Bestimmung von Hebelarmkurven zur Stabilitätsbewertung ist maßgeblich von der Kenntnis der Geometrie von Rumpf und Aufbauten sowie der Segelflächen eines Schiffes abhängig. Die zweifache Integration über die Spantflächen entlang der x -Achse zur Volumenbestimmung sowie die Ermittlung der Formschwerpunktskurve wird bei Vorliegen einer 3D-Punktwolke durch eine numerische Approximation ersetzt, bei der jedes Querprofil durch eine Konturlinie dicht benachbarter Punkte gegeben ist und die Anzahl der Querprofile und ihr Abstand frei gewählt werden können. Darüber hinaus muss die Lage von G bekannt sein, was die Kenntnis der Lage der einzelnen Massekörper, z.B. Tanks, im Schiffsinnern verlangt und damit ebenfalls mit der Erfassung von Geometrien verbunden ist, sofern kein Krängungsversuch ausgeführt wurde.

Bei einem bestehenden Schiff bietet das Laserscanning die Möglichkeit der umfassenden und detaillierten Erfassung der erforderlichen geometrischen Kenngrößen, im Resultat vor allem exakte Angaben zur Verdrängung D und zu den Pantokarenen $w(\varphi)$. Wie die vorliegende Studie zeigt, muss die zentrale Größe D auf ca. 2 % ihres Wertes bekannt sein, um zu verlässlichen Aussagen so-

wohl bei einem Krängungsversuch als auch bei der Bestimmung der krängenden Hebelarme zu gelangen.

Eine Schiffsvermessung mittels Laserscanning kann insbesondere dann zur Anwendung kommen, wenn nach einem Umbau eine neue Stabilitätsbewertung gefordert ist oder wenn für ältere Schiffe, beispielsweise Traditionssegelschiffe, keine vertrauenswürdigen Unterlagen aus der Zeit des Baus verfügbar sind. Einhergehend mit einem Krängungsversuch ergeben sich alle erforderlichen Eingangsgrößen zu einer Stabilitätsbetrachtung allein aus Messwerten ohne jegliche Konstruktionsunterlagen, Kurvenblätter oder sonstigen zu treffenden Annahmen! Einer Bewertung der Stabilität mit klassischen Methoden (vom Baur et al. 2008) ist das diesbezügliche Nutzen der Ergebnisse einer Laserscanneraufnahme weit überlegen und bietet gegenüber der üblichen Vorgehensweise allein basierend auf Krängungsversuchen (z.B. Schwebbach 2003) erweiterte Möglichkeiten einer validen Aussage.

Literatur

- Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU): Sinken der Gotland, Untersuchungsbericht 49/2002. www.bsu-bund.de/DE/Publikationen/Unfallberichte/_functions/unfallberichte_table_2003.html, letzter Zugriff 14.12.2016.
- Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU): Kenterung der SY De Hoop, Untersuchungsbericht 288/2005. www.bsu-bund.de/DE/Publikationen/Unfallberichte/_functions/unfallberichte_table_2006.html, letzter Zugriff 14.12.2016.
- DIN 81209-1: Geometrie und Stabilität von Schiffen – Formelzeichen, Benennungen, Definitionen – Teil 1: Allgemeines, Überwasser-Einrumpfschiffe. Beuth-Verlag Berlin, 1999-06.
- DIN 81209-6: Geometrie und Stabilität von Schiffen – Formelzeichen, Benennungen, Definitionen – Teil 6: Segelschiffe. Beuth-Verlag Berlin, 2003-08.
- Gemeinsame Kommission für Historische Wasserfahrzeuge (GSHW): Merkblatt zur Sicherstellung der Stabilität von Traditionsschiffen, 2004. www.gshw.de/media/.../merkblatt_stabilitaet_06_06_29.pdf, letzter Zugriff 14.12.2016.
- Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft: Klassifikations- und Bauvorschriften, I Schiffstechnik, 4 Riggtechnik – Vorschriften für die Bemastung und Takelung von Segelschiffen (Traditionelle Riggs). Hamburg 1997.
- International Maritime Organization (IMO) A.749(18): Code on intact stability for all types of ships covered by IMO instruments. Resolution adopted 4 Nov. 1993.
- Krüger, S.: Hydrostatik von Schiffen. Schriftenreihe Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2013. www.ssi.tu-harburg.de/doc/webseiten_dokumente/ssi/vorlesungsunterlagen/Hydrostatik_Skript.pdf, letzter Zugriff 14.12.2016.
- Middendorf, F.L.: Bemastung und Takelung von Schiffen. 1903. Nachdruck Salzwasser Verlag Bremen, 2010. ISBN 978-3-86195-561-0.
- Niemeier, W.: Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter Berlin New York, 2002. ISBN 3-11-014080-2.
- Perrot, D.S.: Tall ships down, The McGraw Hill Companies, 2003. ISBN 0-07-139092-8.
- Schwebbach, B.: Stabilität und Stabilitätsnachweis für Segelschiffe am Beispiel des Toppsegelschoners Albatros. Diplomarbeit Hochschule Bremen, 2003, nicht veröffentlicht.
- vom Baur, M., Fock, J., Nürnberg, A.: Stabilität von traditionellen Segelschiffen mit klassischen Methoden. Hansa – International Maritime Journal, 2008, S. 20–24.

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
otto.heunecke@unibw.de