



Auftrieb und Schwimmen

So lange man sich erinnern kann, fahren Menschen auf dem Wasser. Das älteste erhaltene Boot ist ein in Afrika gefundener über 8000 Jahre alter Einbaum. Schon viel früher müssen Menschen mit Flößen und Schiffen Meerengen und sogar ganze Ozeane überquert haben, um neue Lebensräume in Australien und Amerika zu gewinnen. Sie nutzen auch seit langem Schiffe, um schwere Lasten zu transportieren. Einige Forscher glauben, dass die Steine von Stonehenge vor über 4000 Jahren auf dem Wasserweg aus Wales geholt wurden. Wie kann das Wasser solche Steinkolosse tragen, schwer wie fünf Eisenbahnwaggons? Wie kommt die tragende Kraft des Wassers zustande, und warum kippen heutige Schiffe nicht einfach um, wenn sie bis zu 24.000 Container, gestapelt in 22 Lagen mit einem Gesamtgewicht von 6.000 Eisenbahnwaggons über die stürmische See transportieren?

Auftrieb

Archimedisches Prinzip

Das Gesetz, das das Phänomen „Schwimmen“ erklärt und damit auch die ingenieurwissenschaftliche Konstruktion moderner Schiffe ermöglicht, ist das Archimedesche Prinzip, dass Archimedes vor rund 2000 Jahren formulierte:

Auf jeden in eine Flüssigkeit eingetauchten Körper wirkt im Schwerfeld eine Auftriebskraft, die der Schwerkraft entgegen-gerichtet ist und so groß wie das Gewicht der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Erklärung

Ein Quader, dessen obere und untere Begrenzungsflächen F_O und F_U parallel zur Wasseroberfläche ausgerichtet sind, sei - wie in Abbildung 1 zu sehen - ganz in eine Flüssigkeit eingetaucht. Auf die Fläche F_O drückt als Kraft K_1 das Gewicht des über dem Quader stehenden Wassers. Die rechts neben dem Quader skizzierte Fläche F ist die fiktiv nach rechts auf gleicher Höhe verschobene Fläche F_U der Quaderunterseite. Auf sie drückt von oben das Gewicht K_2 der über ihr stehenden Wassersäule. Da der Druck in einer Flüssigkeit *allseitig* ist, drückt auf dieselbe Fläche F von

unten eine Kraft K_3 derselben Größe wie K_2 aber mit entgegengesetzter Richtung. Andernfalls bewegten sich die Wasserteilchen ja nach oben oder nach unten. Auf die Unterseite F_U des Quaders drückt genau die gleiche Kraft K_3 , weil der Wasserdruck nur von der Tiefe abhängt. Der direkte Gegendruck durch K_2 von oben fehlt hier aber. Stattdessen drückt auf die Oberseite F_O des Quaders nur die kleinere Kraft K_1 . Damit wirkt auf den Quader insgesamt die Summe der beiden Kräfte K_3 und K_1 . Dies ist aber gerade eine Kraft nach oben, die so stark ist wie das Gewicht des verdrängten Wassers, der Auftrieb $A = K_1 + K_3$.

Bemerkungen

1. Die seitlich auf den Quader wirkenden Kräfte sind links und rechts bzw. vorn und hinten jeweils gleich groß und heben sich auf.
2. Dass das Archimedisches Prinzip auch für einen unregelmäßigen Körper (vgl. Abbildung 2) gilt, sieht man ein, indem man ihn ganz fein (und immer feiner) durch die Vereinigung kleiner Würfel ausschöpft. Diese bilden dann zusammen viele schmale quaderförmige Säulen, für die man jeweils genau so argumentieren kann wie für den Quader aus Abbildung 1.

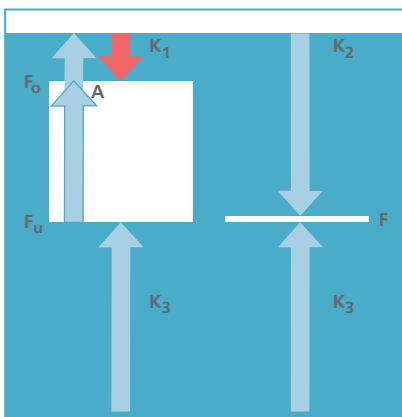


Abb. 1: Auftrieb

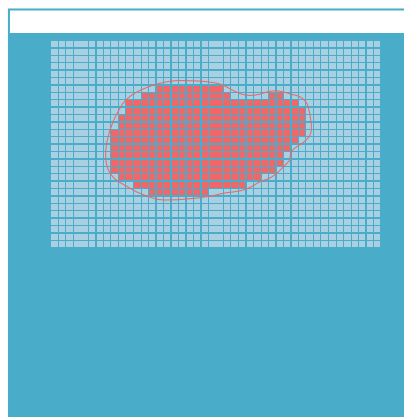


Abb. 2: Auftrieb

Schwimmen

Schwimmen von Vollkörpern

In Wasser wirkt auf einen ganz eingetauchten Körper eine *Auftriebskraft*, die dem Gewicht des verdrängten Wassers entspricht. Hat das Material des Körpers eine geringere *Dichte* als Wasser, so ist die Auftriebskraft größer als das Gewicht des Körpers (blaue Auftriebskraft links in Abbildung 3, die rote Gewichtskraft ist dort in allen drei gezeigten Positionen gleich). Sie wird den Körper daher nach oben bewegen. Ist der Körper in einer Lage, wo das von ihm verdrängte Wasser weniger wiegt als er selbst (Beispiel in Abbildung 3 rechts), so wird der Körper so weit sinken, bis das verdrängte Wasser so viel wiegt wie er selbst. Er wird aus der Position links so weit aufsteigen bzw. aus der Position rechts so weit sinken, bis die Auftriebskraft gerade gleich der Gewichtskraft wird. (mittlere Position in Abbildung 3).

Schwimmen von Schiffen

Seeschiffe bestehen heute aus Stahl. Stahl hat eine viel höhere Dichte als Wasser, so dass ein massiver Stahlklotz in Wasser so lange sinken wird, bis er den Boden erreicht hat.

Stahlschiffe schwimmen trotzdem, weil sie durch ihre Form Wasser von dem Gewicht verdrängen können, das sie und ihre Ladung haben, so dass der erzeugte Auf-

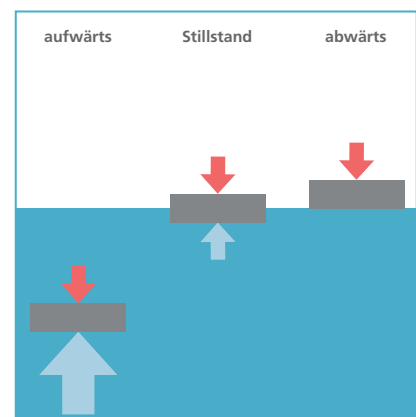


Abb. 3: Die größere Kraft siegt.

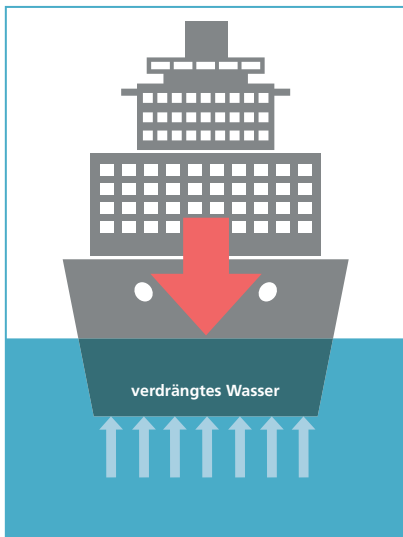


Abb. 4: Schiff mit aufrechter Schwimmhaltung

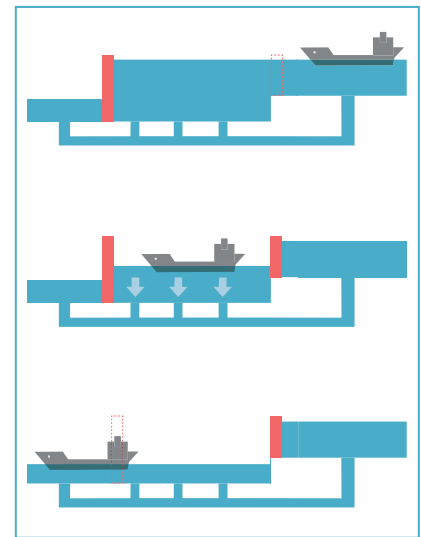


Abb. 6: Schleuse

trieb das Schiff samt Ladung trägt. Es kann das Baumaterial eines Schiffes also so dicht sein wie es will, wenn es nur durch seine Form Wasser verdrängen kann, das so viel wiegt wie das Schiff (siehe Abbildung 4, links). Hilfreich mag der Hinweis sein, dass das Schiff ja nicht nur das Wasser verdrängt, dass ehemals am Platz der Schiffswand war, sondern auch das Wasser, das einmal in dem Teil des Schiffsbauchs war, der unterhalb der Wasserlinie liegt.

Wenn eine gewisse Menge Wasser in das Schiff gelangt, sei es durch ein kurzfristig offene Beschädigung der Schiffswand oder durch Wellenschlag, so wird dieses ein-

geflossene Wasser nicht mehr verdrängt. Der Auftrieb sinkt um das Gewicht des eingedrungenen Wassers, und das Schiff muss tiefer tauchen, um das Defizit an Wasserverdrängung soweit gutzumachen, dass wieder das Gewicht ausgeglichen werden kann (siehe Abbildung 4, rechts). Das Schiff wird auch tiefer eintauchen, wenn die Ladung und damit das Gewicht erhöht wird. Durch die höhere Wasserverdrängung beim Tiefertauchen kann der Auftrieb wieder so groß werden wie das Gewicht des nun schwerer beladenen Schiffes.

Die i.a. in der Mitte eines Schiffs angebrachte *Freibordmarke* (siehe Abbil-

dung 5) zeigt an, wie weit ein Schiff maximal tauchen - sich also (siehe Abbildung 7) nach unten bewegen - darf, damit es bei den üblichen Schiffsbelastungen und -bewegungen noch sicher ist. Steigt das Wasser um das Schiff, etwa in einer Schleuse (Abbildung 6) oder durch eine große Welle (siehe Titelseite oder Abbildung 18), so wird das Schiff mit gehoben, weil die Wasserverdrängung des Schiffs ja gleich dem Gewicht sein muss. Stiege das Schiff nicht mit dem Wasser, verdrängte es mehr Wasser, was zu einer zusätzlichen Auftriebskraft führte.

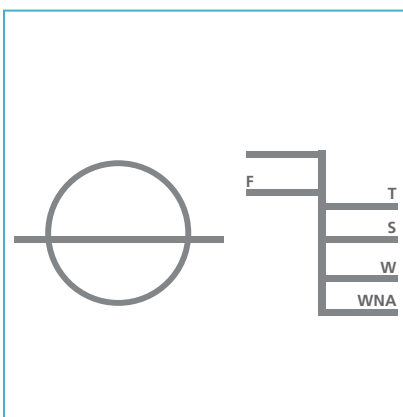


Abb. 5: Freibord-Marke

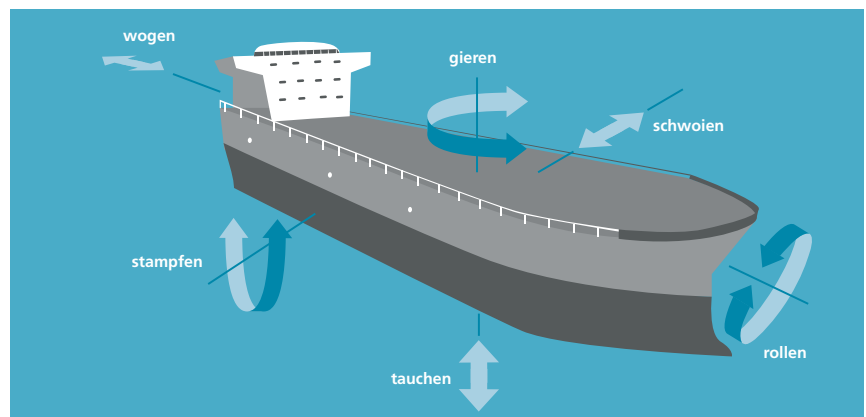


Abb. 7: Schiffsbewegungen

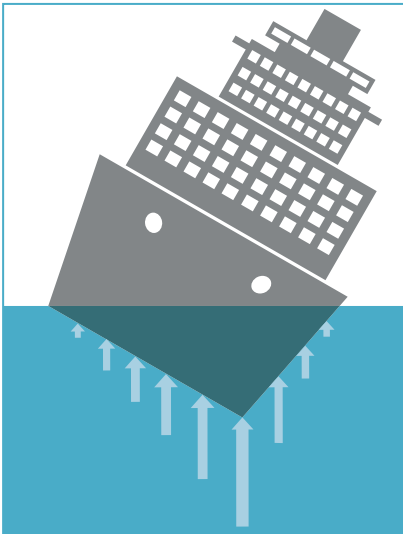


Abb. 8: Schiff mit Krängung

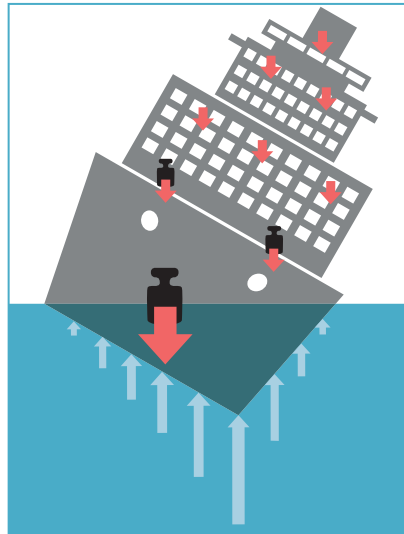


Abb. 9: mit Krängung und Gewicht

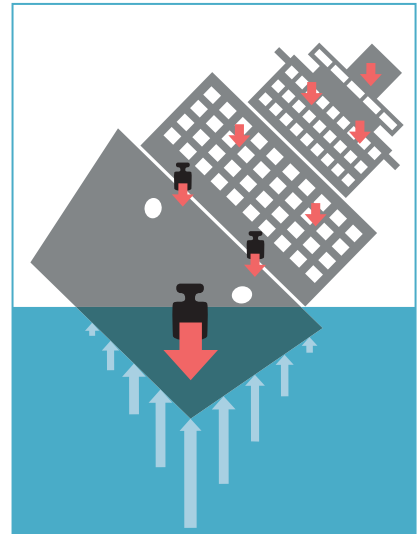


Abb. 10: Kentern

Stabile Schwimmelage

Dringt Wasser dauerhaft durch Löcher im Rumpf in das Schiff ein, so bedeutet das den fast sicheren Untergang, wenn nicht *Schotten* verhindern, dass das Schiff vollläuft. Wenn zu viel Wasser von oben in das Schiff gelangt, hat das denselben Effekt, muss also vermieden werden. Es muss deshalb darauf geachtet werden, dass das Schiff bei den durch Wind und Wellen verursachten Bewegungen (vgl. Abbildung 7) kein Wasser aufnimmt. Unter den verschiedenen Bewegungen eines Schiffs ist die Drehung um die Längsachse vermutlich am gefährlichsten. Diese Neigung eines Wasserfahrzeuges zu Seite heißt *Krängung* oder *Schlagseite*. Besonders bei periodisch sich wieder-

holender Bewegung um die Längsachse spricht man davon, dass das Schiff *rollt*. Krängung oder Rollen mit einem zu großen *Krängungs- oder Rollwinkel* kann zum *Kentern* führen, also zum irreversiblen Umkippen.

Wenn es nicht zu sehr krängt, kann ein Schiff sich aber allein wieder aufrichten. Wie macht es das? Abbildung 4 zeigte bereits, dass der Auftrieb keine große einzelne Kraft ist, die von unten das Schiff hochhebt, sondern dass das Wasser überall gegen den Schiffsrumpf drückt und zwar proportional zur jeweiligen Wassertiefe. Die Skizze 8 der vertikalen Anteile der Wasserkräfte zeigt, dass diese ein moderat krängendes Schiff wieder

aufrichten wollen. Allerdings findet man in Abbildung 9 als Widersacher der aufrichtenden Kräfte die Gewichte einiger Massen des Schiffs rot eingezeichnet. Man sieht, dass diese Gewichte bei Krängung gegen die aufrichtenden Kräfte arbeiten und das Schiff schließlich *kentern* lassen werden, wenn die Krängung zu groß wird (Abbildung 10). Kehrt das Schiff nach leichter Störung verlässlich in eine Schwimmelage zurück, so heißt diese Lage *stabil*. Man kann das Verhalten des Schiffes mit dem einer Kugel auf einer Berg- und Talbahn vergleichen, wie in Abbildung 11 gezeigt. Die stabile normale Schwimmelage könnte dabei z.B. der Position der Kugel in Tal A entsprechen.

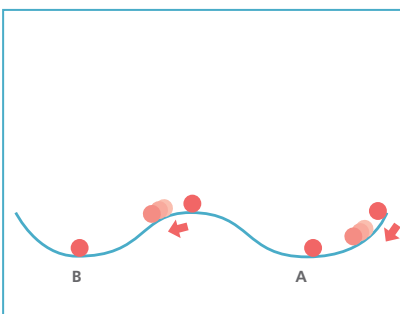


Abb. 11: Gleichgewichte



Abb. 12: Kiel oben

(© BSU: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung)

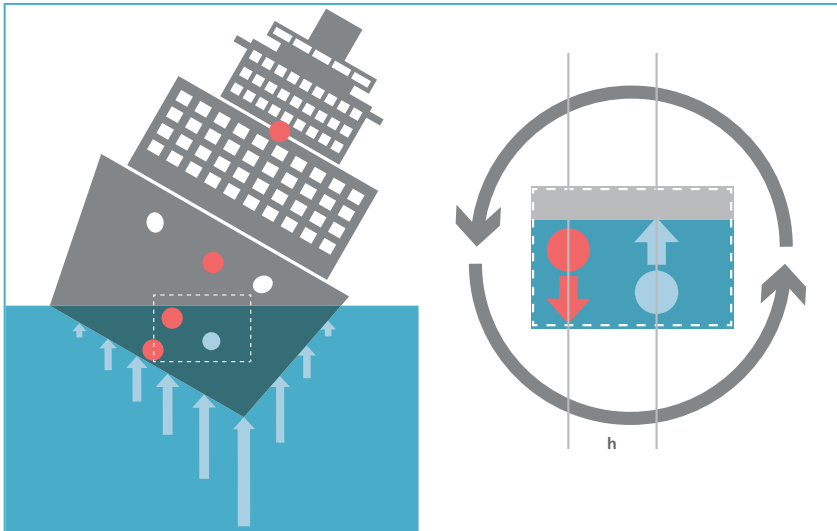


Abb. 13: Schwerpunktlagen

Wird die Kugel dort nur leicht ausgelenkt, so kehrt sie wieder zu ihrem stabilen Ruhepunkt zurück. Bei zu großer Auslenkung kann sie aber von diesem Zustand wegstreben und etwa in eine andere stabile Position wie z.B. Tal B übergehen. Bei Schiffen könnte B die ebenfalls stabile aber nicht beliebte Schwimmelage „kiel-oben“ sein (vgl. Abbildung 12).

Stabilitätsanalyse

Man hat herausgefunden, dass man bei der Beurteilung der Stabilität einer Schwimmelage eines Schiffes die Wirkung der Schwerkraft aller Teile des Schiffes äquivalent darstellen kann als die Wirkung des Gesamtgewichtes an einem einzigen Punkt des Schiffes, am *Gewichts-Schwerpunkt* oder einfach *Schwerpunkt*. Zugleich kann die Wirkung aller Wasserdruckkräfte auf die Einwirkung einer einzigen großen Auftriebskraft von der Größe des Gewichtes des verdrängten Wassers auf den Schwerpunkt des verdrängten Wassers reduziert werden. Dieser Punkt heißt *Auftriebspunkt* oder *Formschwerpunkt*. Wenn das Schiff auf dem Wasser schwimmt, sind diese beiden Kräfte gleich groß (nämlich so groß wie das Gewicht G des Schiffes) aber entgegengesetzt. Sie gleichen sich

in Hinblick auf die vertikale Bewegung aus, können aber als *Kräftepaar* das Schiff drehen, wenn ihre Wirkungslinien verschieden sind. Mit dem Abstand h der Wirkungslinien ist die ausgeübte Drehstärke $M = h \cdot G$. Verbunden mit der Drehrichtung ist dies ein sogenanntes *Drehmoment*. h ist der sogenannte *Hebelarm* des Drehmomentes. Eine Schwimmelage ist dann stabil, wenn das Drehmoment das Schiff in seine Ruhelage zurücktreibt.

Während der Schwerpunkt des Schiffes bei Krängung an der gleichen Stelle des Schiffes bleibt, wandert der Auftriebspunkt auf die Schiffseite, auf der mehr Wasser verdrängt wird. Liegt der Schwerpunkt in der aufrechten Lage unterhalb des Auftriebspunktes, so entsteht auf jeden Fall ein rücktreibendes Moment. Das Schiff heißt dann *gewichtsstabil*.

Üblicherweise liegt der Schwerpunkt bei Seeschiffen aber oberhalb des Auftriebspunktes. Dann entsteht ein rückstellendes Moment durch die Form des Schiffes, die bei Krängung den Auftriebspunkt auf „die richtige Seite“ wandern lässt. Das Schiff heißt dann *formstabil*.

In Abbildung 13 sind für das Schiff aus den Abbildungen 4, 8 und 9 verschiedene mögliche Schwerpunktslagen rot eingezeichnet. Für die zweithöchste Schwerpunktslage ist die gemeinsame aufrichtende

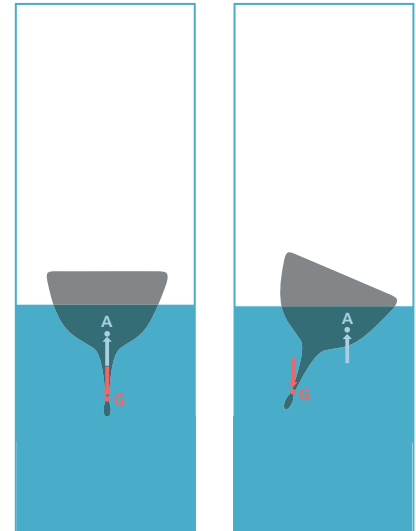


Abb. 14: Gewichtsstabilität

Wirkung des durch Auftrieb und Gewicht erzeugten Kräftepaares in einer Vergrößerung erläutert. Wie stabil ein formstabiles Schiff ist, wie viel Krängung es also verträgt bevor es kippt, hängt von der Höhe seines Schwerpunktes ab. In Abbildung 13 wird das Schiff bei den beiden unteren Schwerpunktslagen in die aufrechte Stellung zurückgezogen. Bei der nächst höheren Schwerpunktslage ist das Moment gerade Null, und etwas mehr Krängung wird das Schiff kentern lassen. Bei der höchsten Lage ist dieser *Kenterpunkt* überschritten. Das Schiff wird umkippen und ist nicht mehr zu retten.

Bei verschiedenen Krängungen eines Schiffes ist die Stärke des jeweils herrschenden rückstellenden Momentes durch die Größe des *Hebelarms* h (rechts in der Abbildung 13) bestimmt, da die Kräfte immer gleich dem Gewicht des Schiffes sind.

Das Verhalten des Schiffes bei veränderlicher Krängung wird deshalb durch die sogenannte *Hebelarmkurve* beschrieben, die über jeder Krängung den zugehörigen Hebelarm aufträgt. Aus ihr sieht man, wie stark das Schiff bei jeder Krängung in Normallage zurückstrebt. Das zur Abbildung 15 gehörige Schiff kentert laut Hebelarmkurve theoretisch bei etwa

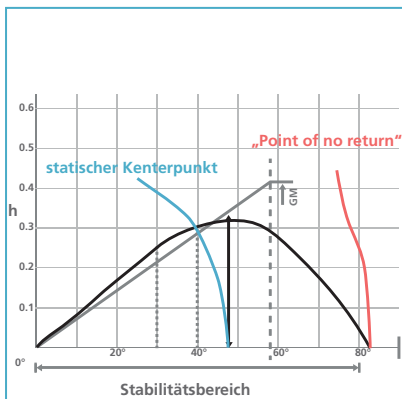


Abb. 15: Hebelarmkurve

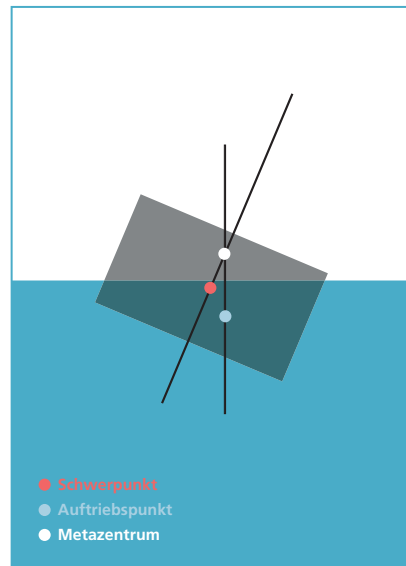


Abb. 16: positive metazentrische Höhe

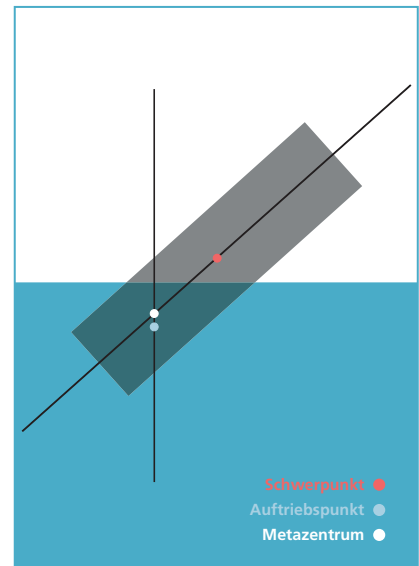


Abb. 17: negative metazentrische Höhe

81 Grad Krängung. Praktisch wird das Schiff auf See schon bei Überschreiten des *statischen Kenterpunktes* verloren sein. Weil die Krängung ja durch eine äußere Kraft hervorgerufen wird (Seitenwind?), gewinnt diese Kraft bei dieser Krängung; denn sie kann nun nicht mehr durch die Rückstellkraft ausgeglichen werden. Oberhalb des statischen Kenterpunktes wird diese ja wieder kleiner. Vermutlich wird das Schiff sogar noch früher kentern, wenn sich sein Schwerpunkt durch verrutschen der Ladung und Verlagern von Treibstoff zu Ungunsten der Stabilität verschiebt.

Eine weitere für die Stabilität eines Schiffes charakteristische Zahl ist die *metazentrische Höhe* GM. Sie sagt aus, wie hoch das sogenannte Metazentrum eines Schiffes über dem Schwerpunkt liegt. Das *Metazentrum* ist grob der Punkt, um

den sich das Schiff bei Krängung dreht. Man ermittelt ihn, indem man die Schiffsachse des leicht gekrängten Schiffes mit der senkrechten Gerade durch den Auftriebspunkt schneidet.

Ähnlich wird die metazentrische Höhe vor Auslieferung eines neuen Schiffes in einem *Werftkrängungsversuch* von der Werft bestimmt. Bei positiver metazentrischer Höhe schwimmt das Schiff stabil, bei negativer instabil.

Die Größe der metazentrischen Höhe zeigt dem Schiffsführer, wie stabil sein Schiff schwimmt. Sie ist überdies mit vielen wichtigen Daten verknüpft. Z.B. lässt sich aus ihr die *Rollperiode* des Schiffes bestimmen. Das ist die Zeit, die ein Schiff für eine *Rollschwingung* benötigt, wenn das Schiff nach einer Krängung hin und her schwingt. Diese zu kennen ist wichtig, da Rollschwingungen durch Wellen-

schlag angeregt werden können. Ist die Rollfrequenz gleich der Wellenfrequenz, so kann es durch *Resonanz* (Siehe: Flyer „Schwingungen“) zu starken Ausschlägen der Rollschwingungen und damit auch zum Kentern kommen.

Um seine aktuelle metazentrische Höhe zu ermitteln, sollte ein Kapitän vor jeder Fahrt eigentlich einen *Betriebskrängungsversuch* durchführen, bei dem durch Massenverschiebung oder durch Rollschwingungsversuche die aktuelle metazentrische Höhe bestimmt wird. Aktuell ist ein solcher Versuch aber leider (noch?) nicht gesetzlich vorgeschrieben.

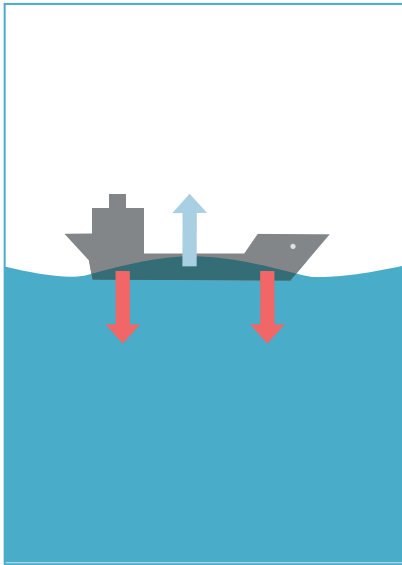


Abb. 18: Schiff auf Wellenberg



Abb. 19: SWATH

(© Abeking & Rasmussen)

Experimente

- Versuche zum Wasserdruck
- Versuche: Unterschied von Gewicht und Masse
- Bestimmung der Dichte
- Auftriebsversuche
- Experimentelle Bestimmung stabiler Schwimmstellungen
- Schwerpunktbestimmung verschiedener Körper (experimentell)
- Schwerpunktbestimmung verschiedener Körper (rechnerisch)
- Experimente mit der Drehmomentenwaage
- Beurteilung von Schwimmstellungen auf Stabilität
- Theoretische Bestimmung stabiler Schwimmstellungen
- Stabilitätsarten
- Krängungsversuche
- Zeichnen von Hebelarmkurven
- Bestimmung der metazentrischen Höhe aus der Hebelarmkurve
- Bestimmung der metazentrischen Höhe aus der Rollfrequenz.
- Berechnung der Rollfrequenz aus der metazentrischen Höhe
- Bestimmung verschiedener weiterer funktionaler Zusammenhänge

Wichtige Begriffe

Archimedisches Prinzip
 Auftrieb
 Auftriebspunkt
 Betriebskrängungsversuch
 Dichte
 Drehmoment
 Druck
 Formschwerpunkt
 Formstabilität
 Freibord
 Gewichtsschwerpunkt
 Gewichtsstabilität
 Hebelarm
 Hebelarmkurve
 Kentern
 Kenterpunkt
 Kräftepaar
 Krängung
 Metazentrum
 metazentrische Höhe
 Resonanz
 Rollperiode
 Rollschwingung
 Schlagseite
 Schott
 Schwerpunkt
 Stabilität
 Statischer Kenterpunkt
 verdrängen
 Werftkrängungsversuch

Zum Nachdenken

1. Wie misst man die Masse eines Astronauten in der ISS?
2. Ein luftgefülltes Glasrohr wird, unten abgedichtet durch eine locker aufgesetzte Glasscheibe, ins Wasser gedrückt. Nun füllt man vorsichtig von oben Wasser ein. Was geschieht wann und warum?
3. Wie findet man experimentell den Schwerpunkt eines unregelmäßig geformten Körpers?
4. Wie können am Schiff entlangziehende Wellen (vgl. Abb. 18) das Schiff beschädigen? (Siehe auch Flyer „Festigkeit“)
5. Warum liegt ein SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull, vgl. Abbildung 18) bei mittlerem Seegang ruhiger als ein herkömmliches Schiff?
6. Warum kann eine Fähre durch das Durchfahren einer zu engen Kurve kentern?
7. Eine schwimmende Schute mit flachem Boden, die bei Ebbe auf einem ebenso flachen Grund aufsetzt, kann bei wieder auflaufender Flut so lange am Boden liegen bleiben, bis sie von oben voll läuft. Wie kann man das erklären?
8. Wie sieht die Hebelarmkurve für einen quaderförmigen Ponton aus?
9. Wie sieht die Hebelarmkurve eines Seenotrettungskreuzers aus, der auch beim Kentern wieder in seine gewünschte Schwimmlage zurückkehrt?

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 16 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 7.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.

TU Hamburg Harburg

Die TUHH ist eine Universität mit hohem Leistungs- und Qualitätsanspruch, die in der Grundlagenforschung und ihren Kompetenzfeldern Forschungsexzellenz anstrebt. Etwa 100 Professorinnen und Professoren mit knapp 700 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bilden hier derzeit mehr als 6000 Studierende der Ingenieurwissenschaften und der Technomathematik aus. Schiffbau hat in Hamburg eine jahrhundertealte lebendige Tradition. Das DLR_School_Lab TUHH bietet Schülerinnen und Schülern Einblicke in dieses Kompetenzfeld der TUHH.



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

DLR_School_Lab
TU Hamburg

DLR_School_Lab TU Hamburg
Am Schwarzenberg-Campus 4 (C)
21073 Hamburg

Telefon: 040 42878-4363

schoollab@tuhh.de

<https://www.tuhh.de/nachwuchs/fuer-schulklassen-1/dlr-school-lab>
<https://www.dlr.de/schoollab>