

# 1 Schwimmfähigkeit

## 1.1 Die physikalischen Grundlagen der Schwimmfähigkeit

### Warum schwimmt ein Körper?

Auch ein Laie wird ohne Weiteres darauf kommen, dass Schwimmfähigkeit etwas mit dem Gewicht zu tun hat.

Nun kann man aber nicht einfach sagen, dass ein Körper schwimmt, wenn er leichter ist als Wasser. Eine solche Aussage deutet auf ein Gewichtsverhältnis hin, bleibt aber die Erläuterung genau dieses Verhältnisses schuldig. Wir müssen sie daher präzisieren.

Vergleichbar sind die Gewichte des Körpers und des Wassers nur dann, wenn wir genausoviel Körper wie Wasser haben.

Archimedes (287- 212 v.Chr.) stellte fest:

Merke:

**Ein Körper, der (vollständig) in Flüssigkeit getaucht wird, verdrängt genau soviel Flüssigkeitsvolumen, wie er selbst an Volumen einnimmt.**

Ein Würfel, mit einer Kantenlänge von genau 10cm verdrängt demnach genau 1 Liter Wasser ( $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm} = 1000\text{cm}^3$  oder  $1\text{ dm}^3$  oder 1 Liter) vorausgesetzt, er wird vollständig untergetaucht.

Nun lässt sich untersuchen, ob 1 Liter Körper schwerer oder leichter ist, als 1 Liter Wasser. Dies kann man bei jedem Material und unabhängig von der Beschaffenheit des Körpers tun.

Tatsächlich legte man ein bestimmtes Volumen fest und wog dieses Volumen des zu untersuchenden Materials ab. Das ermittelte Gewicht ist das sog. Spezifische Gewicht und endlich eine Größe, mit der wir unser oben angesprochenes Verhältnis genau genug beschreiben können, nämlich als Quotient aus Masse und Volumen:

$$\text{Spezifisches Gewicht} = \text{Masse (kg)} : \text{Volumen (dm}^3\text{)}$$

(für die Bezeichnung des Spezifischen Gewichts sind auch andere Masse- und Volumeneinheiten zulässig, z.B.  $\text{kg/m}^3$ , oder  $\text{g/cm}^3$ ; anstelle Spezifisches Gewicht wird auch der Ausdruck *Dichte* mit dem Zeichen  $\rho$  verwendet)

Kommen wir auf unsere anfangs gemachte Aussage zurück (die übrigens nicht ganz falsch war, aber eben nur die halbe Wahrheit). Wenn wir die Aussage nur wenig abändern, wird sie präzise:

Merke:

**Ein Körper schwimmt, wenn sein spezifisches Gewicht (oder seine Dichte) geringer ist, als das (die) des Wassers.**

Ja, und wieso schwimmt dann ein modernes Schiff? Das ist doch überwiegend aus Eisen gebaut und das hat ein spezifisches Gewicht von ca.  $7 \text{ kg/dm}^3$ . Eine kleine Schraube, die ich ohne Weiteres tragen kann, geht unter und ein Schiff, das ich ohne Technik nicht auch nur im Geringsten bewegen kann schwimmt!

Nun, schauen wir uns den Aufbau eines Schiffes einmal genauer an. Wir stellen fest, dass ein solches Schiff in der Gesamtheit betrachtet nicht nur aus Eisen, sondern auch den verschiedensten anderen Materialien besteht, in der Hauptsache jedoch aus umbauter Luft. Wir werden uns wohl ohne weiteres darauf verständigen können, dass Luft ein sehr niedriges spezifisches Gewicht hat.

Bei einem Schiff ist also mit einer relativ geringen Masse an Material ein sehr großes Volumen umbaut worden. Wir erinnern uns an den zuvor erarbeiteten Grundsatz:

$$\text{Spezifisches Gewicht} = \text{Masse (kg)} : \text{Volumen (dm}^3\text{)}$$

Bei einem Binnenschiff durchschnittlicher Größe können wir dessen Masse durchaus mit 200 Tonnen, d.h. 200 000 kg annehmen. Umbaut ist aber mit dieser Masse ein Volumen von, nehmen wir an  $2000 \text{ m}^3$  oder  $2\,000\,000 \text{ dm}^3$ . Setzen wir die Werte doch einmal in unseren Grundsatz ein:

$$\begin{aligned}\text{Spezifisches Gewicht} &= 200\,000 \text{ kg} : 2\,000\,000 \text{ dm}^3 \\ \text{Spezifisches Gewicht} &= 0,1 \text{ kg/dm}^3\end{aligned}$$

Siehe da, das Spezifische Gewicht des Schiffes in unserem Beispiel ist also weit geringer als  $1 \text{ kg/dm}^3$  und damit auch geringer, als das des Wassers. Es schwimmt.

Dabei haben wir nicht etwa durch einen Rechenrick das Spezifische Gewicht von Eisen so zurecht frisiert, dass es schwimmt, sondern wir haben prinzipiell nichts anderes gemacht, als das **durchschnittliche** Spezifische Gewicht des Schiffes, mit all seinen unterschiedlich schweren Massen bestimmt.

Fassen wir kurz zusammen:

1. Ein Körper schwimmt, wenn sein Spezifisches Gewicht geringer ist als  $1 \text{ kg/dm}^3$ .
2. Das Spezifische Gewicht von Wasser ist  $1 \text{ kg/dm}^3$ .
3. Ein Schiff schwimmt, weil sein **durchschnittliches** Spezifisches Gewicht geringer ist als  $1 \text{ kg/dm}^3$ .

Die bisherigen Erkenntnisse sind aber im allerstrengsten und wissenschaftlichen Sinne lediglich Beobachtungen. Sie sind absolut richtig, können für sich genommen jedoch immer noch nicht ausreichend **erklären**, warum ein Körper schwimmt. Ein wichtiger Aspekt blieb nämlich bisher unberücksichtigt.

Vielleicht haben Sie auch schon einmal den Ausdruck gehört: „...das Wasser trägt!“ Was sich hinter dieser schlichten Aussage verbirgt, wird eigentlich erst klar, wenn der Mensch die Aufgabe übernehmen soll, die sonst dem Wasser zukommt, nämlich das Tragen. Um z.B. ein Schiff aus dem Wasser zu haben muss man einen Kran haben, der vor allen anderen Attributen eines haben muss: Kraft!!! Seine Kraft muss so groß sein, dass sie mindestens die Gewichtskraft des angehängten Schiffes nicht nur im Wortsinne aufhebt.

Bei unserem Kran kommt die Kraft aus der Antriebsmaschine. Woher kommt sie beim Wasser? Auch hier gilt, dass der Gewichtskraft des Schiffes mindestens eine gleich große Kraft entgegenstehen muss. Eine solche Kraft ist tatsächlich existent. Sie nennt sich **Auftriebskraft**.

Auch hierzu gibt es eine auf Archimedes zurückgehende Erkenntnis:

Merke:

**Auf einen Körper, der in Flüssigkeit\* getaucht wird, wirkt eine Auftriebskraft. Diese entspricht der Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit.**

\*Streng genommen müsste hier stehen: „...der in Flüssigkeit oder in ein Gas getaucht wird...“. Tatsächlich entsteht auch in der Luft ein Auftrieb, der jedoch so klein ist, dass er in den Bereichen, mit denen wir uns hier beschäftigen vernachlässigt werden kann.

Merke:

**Für einen vollständig unter Wasser getauchten Körper gilt:**

**Ein Körper sinkt zu Boden, wenn seine Gewichtskraft größer ist, als die Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge**

**Ein Körper ist in der Schwebelage, wenn seine Gewichtskraft und die Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit gleich sind.**

**Ein Körper steigt an die Oberfläche, wenn seine Gewichtskraft kleiner ist, als die der verdrängten Flüssigkeit.**

Ein steigender Körper durchbricht irgendwann die Wasseroberfläche. Von diesem Moment an verringert sich das Volumen des eingetauchten Körpers. Der Körper steigt solange, bis das noch eingetauchte Volumen eine Flüssigkeitsmenge verdrängt, deren Gewicht seinem eigenen entspricht. Auftrieb (also die Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeitsmenge) und Gewicht des Körpers heben sich dann exakt auf und ein Teil des Körpervolumens ist oberhalb der Wasserlinie; er schwimmt!

Merke:

**Ein schwimmender Körper wiegt genau so viel, wie das von ihm verdrängte Wasser.**

## **Woher kommt die Auftriebskraft?**

Wenn Sie schon einmal im Schwimmbad getaucht sind, so macht sich ab einer gewissen Tiefe auf ihren Ohren ein unangenehmes Gefühl bemerkbar. Wir sagen dann, dass der Wasserdruck uns Ohrenscherzen bereitet. Das rührt daher, dass sich über uns eine Menge Wasser befindet, das mit seinem Gewicht auf uns lastet, also vom Schweredruck des Wassers.

Weiter stellen wir fest, dass der Druck auf unseren Ohren um so größer wird, je tiefer wir tauchen. Es befindet sich eine immer größere Wassermenge über uns.

Der Schweredruck des Wassers wirkt aber nicht nur von oben auf uns, sondern aus allen Richtungen.

Stellen wir uns einen Würfel vor, mit einer Kantenlänge von 10 cm. Diesen tauchen wir wieder in ein mit Wasser gefülltes Gefäß. Jetzt wirkt der Schweredruck des Wassers von allen Seiten auf den Würfel.

Den Drücken, die seitlich auf den Würfel wirken, steht ein exakt gleich großer Druck genau gegenüber. Diese Drücke heben sich auf und sind für unsere Untersuchung der Auftriebskraft nicht weiter von Bedeutung.

Ganz anders sieht es mit dem Druck, der von oben und unten auf den Würfel wirkt aus.

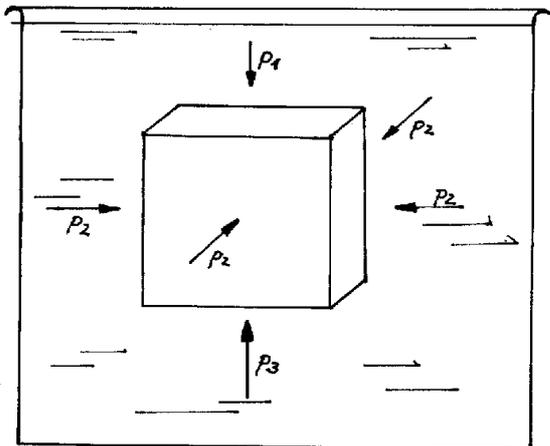
Auf die obere Fläche des Würfels lastet eine bestimmte Wassermenge und damit ein bestimmter Druck. Auf die untere Fläche wirkt auch ein Druck. Da sich die untere Fläche des Würfels jedoch in tieferem Wasser befindet, als die obere, ist auch der Druck, der auf sie wirkt ein größerer.

Druck ( $p$ ) ist physikalisch gesehen eine Kraft, die auf eine Fläche wirkt, also

$$p = \frac{F}{A}$$

Da die Flächen ( $A$ ) unseres Würfels alle gleich groß sind, der Druck sich aber mit der Wassertiefe trotzdem verändert hat, kann diese Veränderung nur erklärt werden, wenn sich die wirkende Kraft ( $F$ ) verändert hat. Das ist auch so, auf die tiefer gelegene Fläche unseres Würfels wirkt eine größere Kraft, als auf die obere. Die Differenz zwischen den beiden Kräften ist unsere Auftriebskraft.

Übrigens: diese Differenz ist in allen Tiefen gleich groß, egal ob Sie sie im Mariannengraben, oder bei sich zu Hause in der Badewanne messen würden.



*Skizze:*

*Würfel im Wasser mit wirkenden Kräften*

*$p$  = Wasserdruck*

*in der Skizze gilt:*

*- alle  $p_2$  sind gleich groß und heben sich auf*

*-  $p_1 < p_3$*

Wir sind fast durch mit den physikalischen Grundlagen für die Schwimmfähigkeit. Hier an dieser Stelle sei nur noch kurz darauf hingewiesen, dass wir immer dann, wenn wir von Kräften reden, uns auch darüber im Klaren sein müssen, in welche Richtung diese wirken und wo sie angreifen.

Die Gewichtskraft eines Körpers kann man sich als in einem Punkt angreifend vorstellen. Dieser Punkt ist der Gewichtsschwerpunkt des Körpers. Die

Gewichtskraft wirkt senkrecht nach unten, in Richtung Erdmittelpunkt (mittlerweile gibt es Annahmen, dass das nicht immer so ist, sondern dass es auf der Erde Gravitationszentren gibt, die nicht im Kern liegen, so dass die Gewichtskraft nicht in jedem Fall genau nach unten wirkt. Für unsere Betrachtungen vernachlässigen wir diesen Aspekt aber einfach mal).

Die Auftriebskraft greift ebenfalls in einem Punkt an. Auch dieser Punkt ist Schwerpunkt. Hierbei handelt es sich jedoch um einen anderen Schwerpunkt. Wir betrachten nämlich nicht mehr den gesamten Körper, sondern nur noch den Teil des Körpers, der in das Wasser eingetaucht ist. Da das eingetauchte Volumen eines Schiffes genau den Platz einnimmt, den vorher das Wasser eingenommen hatte, kann man sich vorstellen, dass das verdrängte Wasser auch die gleiche Form wie das eingetauchte Schiffsvolumen hat. Diese imaginäre Form aus Wasser hätte ihrerseits natürlich auch einen Schwerpunkt. Durch äußere Einflussfaktoren kann die Lage des Körpers im Wasser verändert werden. Damit ändert sich auch die Form des eingetauchten Volumens und mit ihm, die Lage des Schwerpunktes. Der Schwerpunkt von dem hier die Rede ist, wird daher auch **Formschwerpunkt** genannt.

Die Auftriebskraft wirkt der Gewichtskraft genau entgegen, also senkrecht nach oben.

Wenn Sie alles verstanden haben, dann sollten Sie in der Lage sein, die folgenden kleinen Kontrollfragen zu beantworten:

1. Zwei Würfel mit einer Kantenlänge von genau 10cm werden in Wasser getaucht und zwar so, dass sie vollständig untergetaucht sind. Der eine Würfel besteht aus Blei, der andere aus Styropor.

Welcher der beiden Würfel hat den größeren Auftrieb?

Ein kleiner Tipp: Lassen Sie sich nicht zu sehr von den offen zu Tage liegenden Eigenschaften der beiden Würfel beeinflussen und überlegen Sie genau!!

2. Aus 7 kg Eisen werden unterschiedliche Würfel hergestellt. Der erste hat eine Kantenlänge von 10cm, der zweite von 19,129cm, der dritte 30cm.

Wie beurteilen Sie die Schwimmfähigkeit der drei Würfel?

So weit erforderlich, werden Ergebnisse einzelner Rechenoperationen auf ganze Zahlen gerundet.

## **1.2 Die Bedeutung der physikalischen Grundlagen für den Schiffsbetrieb**

Im vorherigen Abschnitt haben wir festgestellt, dass ein Körper schwimmt, wenn sein spezifisches Gewicht geringer ist, als das des Wassers. Da ein Schiff aus vielen

Baustoffen besteht und zudem noch ein großer Hohlraum ist, haben wir sein spezifisches Gewicht als den Quotient aus Masse (kg) und Volumen beschrieben und somit sein durchschnittliches spezifisches Gewicht bestimmt.

Dieses durchschnittliche spezifische Gewicht ist keineswegs immer gleich, sondern kann verändert werden. In der Regel geschieht das durch Zuladung irgendwelcher Güter.

Schauen wir uns noch einmal das Zahlenbeispiel eines leeren Binnenschiffes an:

Leergewicht:                200 t = 200 000 kg  
Volumen:                    2 000 000 dm<sup>3</sup>

Daraus folgt ein durchschnittliches spezifisches Gewicht von 0,1 kg/dm<sup>3</sup> (Spezifisches Gewicht = Masse : Volumen).

Jetzt soll mit diesem Binnenschiff eine Ladung Sojaschrot mit einem Gewicht, genauer gesagt einer Masse von 1000 t transportiert werden. Damit erreicht unser Binnenschiff eine Gesamtmasse von 1200 t, oder 1 200 000 kg. Das hat Folgen für unser spezifisches Gewicht:

**spezifisches Gewicht = 1 200 000 kg : 2 000 000 dm<sup>3</sup>**  
**spezifisches Gewicht = 0,6 kg/dm<sup>3</sup>**

Wir stellen fest, dass sich das durchschnittliche spezifische Gewicht des Schiffes dem Wert 1 annähert. Würde es ihn erreichen, wäre das Schiff nicht mehr schwimmfähig, sondern könnte nur noch schweben, ohne dass ein Teil seines Volumens aus dem Wasser herausragt.

Weiterhin haben wir festgestellt, dass das Gewicht eines eingetauchten Körpers (hier also unseres Schiffes) dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge entspricht.

Da das Gewicht des Schiffes zugenommen hat, müsste es also auch mehr Wasser verdrängen. Das ist auch so und das ist leicht von außen erkennbar, denn das Schiff taucht tiefer in das Wasser ein.

Merke:

**Ein Schiff taucht um so tiefer in das Wasser ein, je mehr es beladen ist, bzw. je schwerer es ist!**

Dieser Umstand ist für den Schiffsbetrieb von mehrfacher Bedeutung:

2 Das Gewicht des Schiffes darf nicht ungewollt und in einem Maße zunehmen, dass sein spezifisches Gewicht sich zu sehr dem des Wasser nähert. Eine ungewollte Gewichtszunahme wäre z.B. durch einen Wassereinbruch möglich. Hier ist also der Grund, warum die Dichtigkeit von Schiffen von entscheidender Bedeutung ist.

Aber nicht nur durch ein Leck kann Wasser ungewollt in ein Schiff eindringen. Für Fahrzeuge, die mit einer offenen Ladeluke in tropische Gebiete fahren, stellen die dort üblichen sintflutartigen Regenfälle durchaus eine Bedrohung dar und so sind solche Fahrzeuge nicht ohne Grund mit leistungsfähigen Pumpen ausgestattet.

3 Das Schiff als Waage:

Bauen wir den letzten Merksatz nur wenig um, dann lautet er:

Je schwerer ein Schiff ist, desto tiefer taucht es ein.

Bringen wir nun außen am Schiff eine Skala an, an der wir die Eintauchtiefe ablesen können, können wir Rückschlüsse auf seinen Beladungszustand ziehen.

Da durch die Form des Schiffes jede Eintauchebene ein anderes Volumen hat, kann man allerdings nicht pauschal sagen, dass das Gewicht des Schiffes mit jedem Zentimeter, den es tiefer eintaucht, die gleiche Gewichtszunahme erfährt.

Weil das so ist, hat man mit dem Schiff das Gleiche gemacht, wie mit einer Waage: es wurde geeicht!

Von seiner Leerebene an (das ist die Ebene, in der das Schiff im leeren, aber betriebsbereiten Zustand eingetaucht ist) wurde für jeden Zentimeter, den das Schiff tiefer eintaucht die Gewichtszunahme in einer Tabelle festgehalten.

Um einen sicheren Schiffsbetrieb zu gewährleisten wurde eine Obergrenze festgelegt, bis zu der das Schiff unter bestimmten Bedingungen eintauchen darf.

Anhand dieser Tabelle und anhand der tatsächlichen Eintauchtiefe kann man nach einem anderen Orts beschriebenen Verfahren überprüfen, ob diese Obergrenze eingehalten worden ist, oder ob das Schiff überladen wurde (Eichaufnahme).

## 1.3 Einflussfaktoren auf die Schwimmfähigkeit

Nach dem bisher Gesagten liegen die Einflussfaktoren auf die Schwimmfähigkeit schon fast auf der Hand. Es dürfte klar sein, dass hier die ungewollte, bzw. die unerlaubte Gewichtszunahme das entscheidende Kriterium ist.

Wie viel Gewichtszunahme jedoch erlaubt ist, bzw. toleriert werden kann, hängt jedoch seinerseits wieder von verschiedenen Kriterien ab.

### 4. Die Größe

Je größer das Schiff, desto mehr Ladung kann es tragen. Natürlich, werden Sie sagen, aber man kann nicht einfach immer größere Schiffe bauen. Der Größe eines Schiffes sind nämlich unterschiedliche Grenzen gesetzt.

Zum einen wäre da das Fahrtgebiet zu berücksichtigen. Im Binnenbereich ist die maximale Größe eines Schiffes durch relativ enge Fahrwasser und geringe Wassertiefen beschränkt. Hier bliebe nur die Möglichkeit, die Schiffe länger zu bauen. Das Bestreben geht tatsächlich in diese Richtung. Die Verlängerung des Tankmotorschiffes „Joseph Jaegers“ auf 135m und der Bau der großen Containerschiffe wie z.B. das MS „Yovi“ deuten diese Entwicklung an.

Auch im Seebereich geht die Entwicklung in die gleiche Richtung. Containerschiffe wie die „Hamburg Express“ und die großen Supertanker haben eine immer größere Ladekapazität. Aber auch hier stößt man auf ein weiteres Kriterium, welches die Schwimmfähigkeit beeinflusst:

### 5. Die Festigkeit

Je mehr die Länge eines Schiffes im Verhältnis zu seiner Höhe und Breite ansteigt, desto mehr neigen die Schiffe dazu, sich durchzubiegen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass sich ein solches Schiff in seiner Länge verdreht. Man sagt dann, dass die Schiffe mit zunehmender Länge biege- und torsionsweich werden. Derartige Biege- und Torsionsbeanspruchungen (z.B. durch Seegang, punktuelle Beladung) belasten die Verbände eines Schiffes und stellen hohe Anforderungen an deren Festigkeit. Der Aufwand, den die Berücksichtigung dieser Umstände erfordert ist sehr hoch und stellt die Wirtschaftlichkeit des Schiffes in Frage, da damit auch die Kosten ansteigen.

Weiterhin hängt die Festigkeit eines Schiffes auch davon ab, aus welchem Material es gebaut wurde. Dem verständlichen Wunsch nach Verringerung des Gewichts durch die Verwendung leichterer Baustoffe (Aluminium, Kunststoffe) kann bestenfalls in Form eines Kompromisses zwischen Gewichtersparnis und Festigkeit Rechnung getragen werden. Mögliche Störungen durch Eisgang und Grundberührung (z.B. für Fahrzeuge, die in Gebieten mit starkem Tidenhub verwendet werden) müssen berücksichtigt werden, damit auch in diesen Fällen die Dichtigkeit gewährleistet ist.

## **6. Die Bauform**

Besonders im Seebereich -und hier gilt der Nordatlantik mit seinen Winterstürmen als besonders gefährlich- stellen überkommene Wellen eine Gefahr für das Schiff dar. Bei einem im starken Seegang stampfenden Schiff tauchen die Schiffsenden bisweilen tief in die Wellen ein. Damit sie sich wieder aus den Wellen befreien können, müssen die Schiffsenden genügend Reserveauftrieb zur Verfügung stellen. Daher sind die Schiffsenden zumeist so gebaut, dass sie sich V-förmig nach oben hin verbreitern. Zuviel Auftriebsreserven führen jedoch dazu, dass die Schiffsbewegungen ruckartig erfolgen und damit die Verbände wieder stark belasten. Die beste Form ist also auch hier wieder ein Kompromiss.

## **7. Die Stabilität**

Hier muss genau unterschieden werden zwischen der Festigkeit des Schiffes und seiner Stabilität. Gemeint ist nämlich nicht seine Fähigkeit, Biege- und Torsionsbeanspruchungen aufzunehmen (=Festigkeit), sondern die Fähigkeit eines Schiffes, sich aus einer geneigten (gekrängten) Lage wieder aufzurichten.

Da es sich jedoch um ein sehr komplexes Thema handelt, wurde ihm nachfolgend ein separates Kapitel gewidmet.

## 1.4 Zusammenfassung

Ein Körper der in eine Flüssigkeit getaucht wird verdrängt genauso viel Flüssigkeitsvolumen, wie er selbst an Volumen einnimmt.

Ein Körper ist schwimmfähig, wenn sein (durchschnittliches) Spezifisches Gewicht kleiner ist, als das der Flüssigkeit in der er sich befindet.

Auf einen Körper, der in Flüssigkeit getaucht wird, wirkt eine Auftriebskraft. Sie ist so groß, wie die Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Für einen vollständig unter Wasser getauchten Körper gilt:

Gewichtskraft > Auftriebskraft	der Körper sinkt
Gewichtskraft = Auftriebskraft	der Körper schwebt
Gewichtskraft < Auftriebskraft	der Körper steigt.

Der steigende Körper durchbricht die Wasseroberfläche. Dadurch verringert sich sein verdrängendes Volumen und damit die Auftriebskraft. Auftriebskraft und Gewichtskraft kommen ins Gleichgewicht und ein Teil des Körpervolumens ragt über die Wasserlinie; er schwimmt.

## 2 Stabilität

### 2.1 Begriffe

Im vorangegangenen Kapitel haben wir bereits festgestellt, dass es sich bei der Stabilität nicht um die Fähigkeit eines Schiffes handelt, Beanspruchungen widerstehen zu können, sondern um das Vermögen eines Schiffes, sich aus einer geneigten Lage wieder aufzurichten zu können.

Wie ausgeprägt diese Fähigkeit ist, hängt in entscheidendem Maße von der Lage des Gewichtsschwerpunktes und des Formschwerpunktes zueinander ab.

Exkurs:

**Gewichtsschwerpunkt ist der Punkt, für den wir uns vorstellen, dass dort die gesamte Gewichtskraft des Körpers angreift.**

**Formschwerpunkt ist der Punkt, für den wir uns vorstellen, dass dort die gesamte Auftriebskraft angreift. (siehe auch Kap. 1.1, S. 5)**

Eine geneigte Lage kann ein Schiff sowohl über seine Längsachse, als auch über seine Querachse aufnehmen.

Merke:

**Die Fähigkeit, sich aus einer Neigung um die Längsachse (Krängung) wieder aufzurichten bezeichnet man als Querstabilität!**

**Die Fähigkeit, sich aus einer Neigung um die Querachse (Trimm) wieder aufzurichten bezeichnet man als Längsstabilität!**

Aufgrund der regelmäßig weit aus größeren Länge des Schiffes im Verhältnis zu seiner Breite, stellt die Längsstabilität von Schiffen i.d.R. kein Problem dar. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich daher auf die Querstabilität.

## 2.2 Die physikalischen Grundlagen der Stabilität

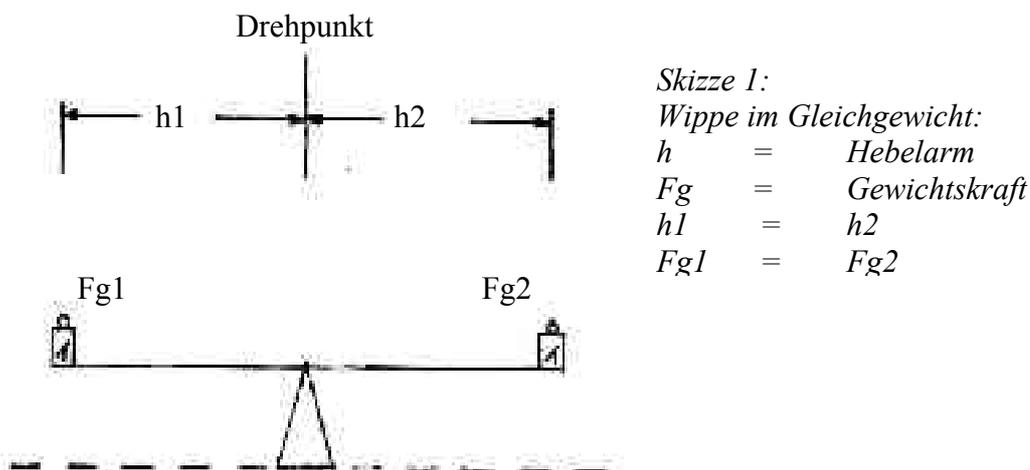
### 2.2.1 Vorüberlegungen

Um die Vorgänge zu verstehen, die im Zusammenhang mit der Stabilität ablaufen, bedarf es einiger Grundlagen. Eine wesentliche Grundlage sind die Hebelgesetze.

Eine in einem bestimmten Punkt angreifende Kraft kann verstärkt werden, wenn wir sie auf einen Hebel einwirken lassen. Es entsteht ein Drehmoment. Physikalisch gesehen ist ein Drehmoment das Produkt aus Kraft und der Länge des Hebelarms, also:

$$M = F \times h$$

Als einfaches Beispiel für die Wirkung eines Moments kann die Wippe dienen.



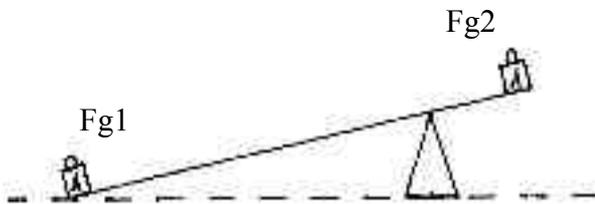
In der Skizze greift an beiden Enden eine Kraft an, in diesem Fall die Gewichtskraft. Beide Gewichtskräfte sind gleich groß und der Punkt, in dem sie angreifen, hat auf beiden Seiten die gleiche Entfernung zum Lager der Wippe, dem Drehpunkt. Die Wippe befindet sich im Gleichgewicht.

Aus der physikalischen Beschreibung des Drehmoments lässt sich ableiten, dass wir den Wert dieses Moments verändern können, wenn wir einen der beiden Faktoren verändern, aus denen es sich zusammensetzt. Das kann entweder die Kraft selbst, oder aber die Länge des Hebels sein, über den sie wirkt.

Verschieben wir den Drehpunkt der Wippe, ergibt sich für die eine Seite eine Verlängerung und für die andere Seite eine Verkürzung des Hebels. Die Gewichte bleiben unverändert, aber trotzdem befindet sich die Wippe nicht mehr im Gleichgewicht.



Skizze 2:  
 Wippe mit verschobenem  
 Drehpunkt:  
 $h1 > h2$   
 $Fg1 = Fg2$



Um sie wieder ins Gleichgewicht zu bringen, müssen wir auf der Seite mit dem kurzen Hebelarm die auf diesen wirkende Kraft vergrößern.



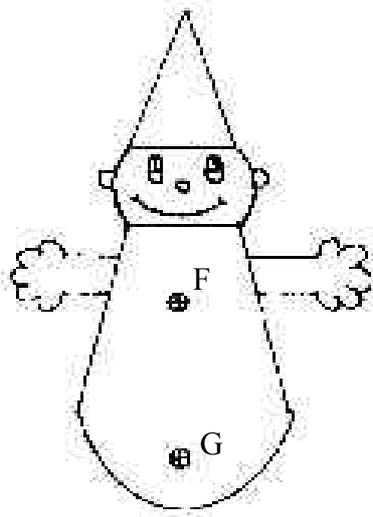
Skizze 3:  
 Wippe im Gleichgewicht:  
 $h1 > h2$   
 $Fg1 < Fg2$



Außerdem dürfte klar sein, dass wenn einer der beiden Faktoren eines Moments den Wert „0“ hat, auch das gesamte Moment „0“ ist.

Vielleicht ist dem Einen oder Anderen noch aus Kindheitstagen das „Stehaufmännchen“ bekannt.

Auf einer Halbkugel aus Blei oder einem anderen schweren Material ist eine Figur aus einem sehr leichten Material gesetzt und egal, in welchem Maß wir die Figur in eine Schiefelage bringen, sie kehrt immer wieder in ihre aufrechte Position zurück.

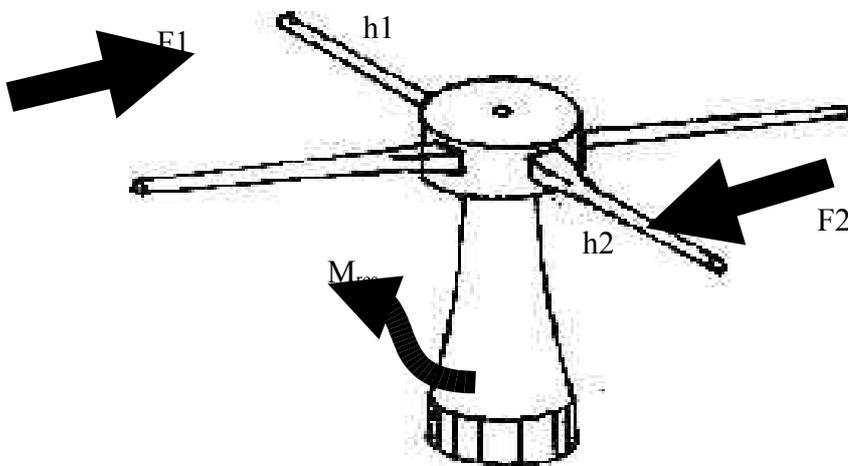


Skizze 4:  
 Stehaufmännchen  
 F = Formschwerpunkt  
 G = Gewichtsschwerpunkt

Das liegt daran, dass der Schwerpunkt der Figur durch den schweren Fuß sehr weit nach unten gerückt ist. Er befindet sich in Ruhelage genau über der Auflagefläche. Drehen wir das Männchen zur Seite, so liegt die Halbkugel mit einem anderen Punkt auf. Die Lage des Schwerpunktes bleibt unverändert, jedoch liegt er nun nicht mehr genau über der Auflagefläche, sondern erhält zu diesem einen seitlichen Abstand.

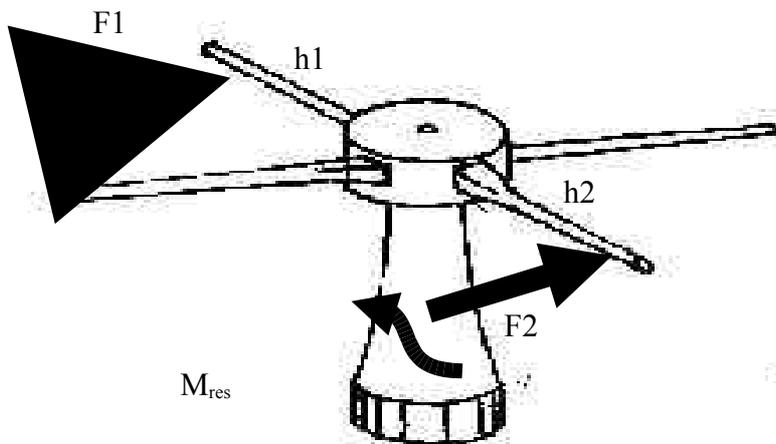
Dieser seitliche Abstand fungiert als Hebel, über den die Gewichtskraft des Fußes nun wirkt. Es entsteht ein Drehmoment, das das Männchen wieder aufrichtet.

Weiterhin ist von Bedeutung, in welche Richtung das Drehmoment wirkt, insbesondere dann, wenn mehrere Momente gleichzeitig auf einen Körper einwirken. Wirken beide Momente so, dass sie beide eine Drehung in die selbe Richtung ergeben, so addieren sie sich. Die Hebel beider Momente und die Kräfte kann man sich dann als einen einzigen Hebel und eine einzige Kraft vorstellen, deren Werte sich aus den entsprechenden Summen ergeben.



Skizze 5:  
 Gangspill (alte Ankerwinde):  
 h = Hebel  
 F = Kraft  
 M = Moment  
 es gilt:  
 $F1 \times h1 = M1$   
 $F2 \times h2 = M2$   
 $M1 + M2 = M_{res}$   
 $M_{res} = \text{resultierendes Moment}$

Wirken beide Momente in entgegengesetzter Richtung, entscheidet das größere Moment, in welche Richtung das System letztlich dreht.



Skizze 6:

Gangspill:

$h$  = Hebel

$F$  = Kraft

$M$  = Moment

es gilt:

$F1 \times h1$  =  $M1$

$F2 \times h2$  =  $M2$

da

$F1 > F2$  und  $h1 = h2$  gilt:

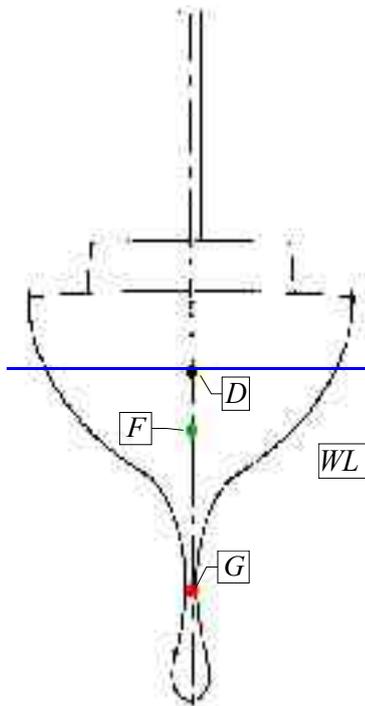
$M1 > M2 \Rightarrow$

$M_{res} = M1 - M2$

Das größere Moment reduziert sich um den Wert des kleineren und ergibt ein resultierendes Moment.

## 2.2.2 Gewichtsstabilität

Ähnlich verhält es sich mit Schiffen, die an einem tief reichenden Schwert einen Bleiballast fahren.



Skizze 6:  
Kielyacht

$F$  = Formschwerpunkt  
 $D$  = Drehpunkt  
 $G$  = Gewichtsschwerpunkt  
 $WL$  = Wasserlinie

Wenn Sie die Skizzen des Stehaufmännchens und der Kielyacht miteinander vergleichen, fällt Ihnen vielleicht eine Gemeinsamkeit auf: In beiden Fällen liegt der Gewichtsschwerpunkt unterhalb des Formschwerpunktes.

Merke:

**Liegt der Gewichtsschwerpunkt unter dem Formschwerpunkt, dann ist das Schiff *gewichtsstabil*!**

Darüber hinaus ist beiden gemeinsam, dass es einer Kraft bedarf, sie überhaupt erst in die geneigte Lage zu bringen. Beim Stehaufmännchen ist das der Finger, bei dem Schiff könnte das z.B. der Wind sein. Dann vollführen beide eine Drehung um ihren Drehpunkt.

Der Kraftaufwand, der dazu nötig ist, ist um so geringer, je höher der Punkt liegt, an dem diese Kraft angreift, weil auch hier wieder die Entfernung vom Angriffspunkt der neigenden Kraft zum Drehpunkt als Hebel fungiert.

*Die Lage des Drehpunktes um den ein Schiff sich bei einer Krängung dreht ist nur schwer bestimmbar, da sie von vielen Faktoren abhängig ist, u.a. von der Symmetrie des eingetauchten Teils des Schiffes und der Lage des Formschwerpunktes. Für unsere weiteren Überlegungen nehmen wir der Einfachheit halber an, dass er im Bereich des Schnittpunktes der Wasserlinie mit der vertikalen Mitschiffsebene liegt.*

Der Genauigkeit zuliebe sprechen wir also nachfolgend nicht von einer krängenden Kraft, sondern von einem **krängenden Moment!**

Entfällt nun das Moment, das die Yacht geneigt hat, so erwarten wir nichts Anderes, als dass sie sich wieder aufrichtet. Dies kann sie aber nur, wenn sie wiederum eine Drehung um den Drehpunkt vollführt, dieses Mal jedoch in die genau entgegengesetzte Richtung.

Um diese Drehung stattfinden zu lassen bedarf es ebenfalls eines Momentes, welches wir jedoch, da es dazu führt, dass der Körper wieder in seine aufrechte Lage zurückkehrt das **aufrichtende Moment** nennen. Auch für dieses Moment gilt:

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \times \mathbf{h}$$

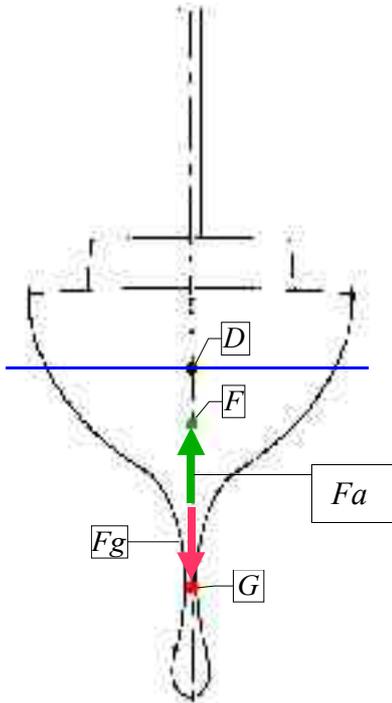
d.h. wir benötigen wieder eine Kraft, die über einen Hebelarm wirkt. Würde es dieses aufrichtende Moment nicht geben, würde der Körper in der von ihm zuletzt eingenommenen Lage verharren.

Was bleibt, um zu verstehen, warum sich der Körper doch wieder aufrichtet, ist zu untersuchen, woher die für das aufrichtende Moment notwendigen Kräfte und Hebel stammen, bzw. wie sie entstehen.

Da wir in unseren Überlegungen davon ausgehen, dass die für das krängende Moment nötige Kraft, und mit ihr das gesamt krängende Moment entfallen ist, verbleiben für das aufrichtende Moment nur noch zwei Kräfte, die die ganze Zeit über auf unser Schiff eingewirkt haben und immer noch wirken: die Gewichtskraft und die Auftriebskraft. Tatsächlich sind beide an der Entstehung des aufrichtenden Moments beteiligt.

Skizze 7:  
Kielyacht, wirkende Kräfte

$F_g$  = Gewichtskraft  
 $F_a$  = Auftriebskraft



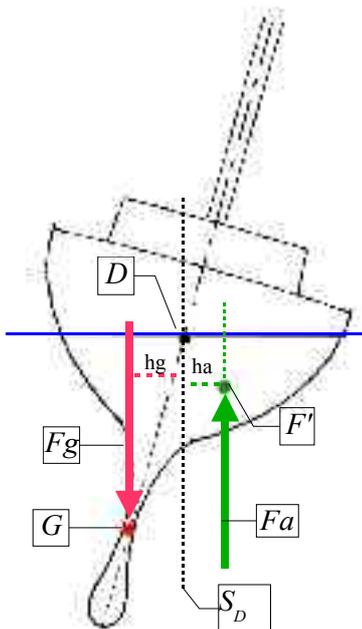
In einer gekrängten Lage verändert sich auch die Position der beiden Schwerpunkte zueinander.

Das wäre schon der Fall, wenn beide Schwerpunkte innerhalb des Schiffes ihre Position beibehalten würden. Zumindest der Formschwerpunkt tut dies aber nicht (siehe hierzu Ausführungen Kap. 1.1, S. 5). Er wandert zunächst einmal in der Richtung aus, in der der tiefer eingetauchte Teil des Schiffes liegt.

Durch die Krängung einerseits und das Auswandern des Formschwerpunktes andererseits erhalten die beiden Schwerpunkte, die bei aufrechter Lage des Schiffes genau übereinander gelegen haben nun einen seitlichen Abstand zum Drehpunkt und zueinander und mit ihnen die Wirklinien der in diesen Punkten angreifenden Kräfte.

Der seitliche Abstand, den der Gewichtsschwerpunkt zum Drehpunkt hat, ist die Länge des Hebels, über den die Gewichtskraft wirkt.

Skizze 8:  
Kielyacht gekrängt



- $F'$  = ausgewandelter Formschwerpunkt
- $Hg$  = Hebel, über den die Gewichtskraft wirkt
- $ha$  = Hebel, über den die Auftriebskraft wirkt
- $S_D$  = Senkrechte durch den Drehpunkt ( $D$ )

Das gleiche gilt für die Auftriebskraft.

Es entstehen zwei Momente, die beide eine Drehung in die gleiche Richtung bewirken. Weil sie beide in die gleiche Richtung wirken, können wir vereinfacht sagen:

Merke:

**Der seitliche Abstand zwischen den Schwerpunkten und damit zwischen den Wirklinien der in diesen Punkten angreifenden Kräfte stellt die Länge des Hebels für das aufrichtende Moment dar.**

Richtet sich das Schiff unter Einwirkung des Moments wieder auf, verändert sich die Lage der Schwerpunkte zueinander wieder, ihr seitlicher Abstand und damit die Länge des Hebels des aufrichtenden Moments wird kleiner, bis die Punkte wieder übereinander liegen. Der seitliche Abstand, d.h. der Hebel beträgt „0“ und damit das gesamte Moment. Das Schiff schwimmt wieder aufrecht.

## 2.2.3 Formstabilität

Es ist ein Trugschluss anzunehmen, dass ein Schiff, dessen Formschwerpunkt unterhalb des Gewichtsschwerpunktes liegt nicht mehr in der Lage ist, sich aus einer gekrängten Lage wieder aufzurichten.

Merke:

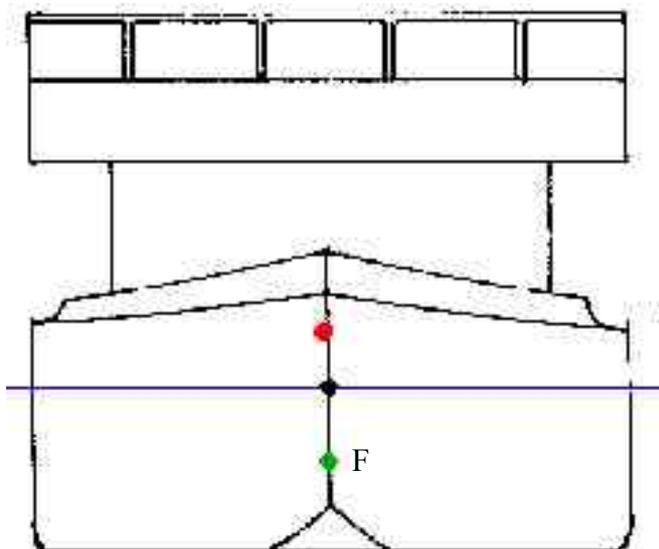
**Liegt der Gewichtsschwerpunkt über dem Formschwerpunkt, dann ist das Schiff *formstabil*!**

Auch Binnenschiffe sind fast ausnahmslos formstabil. Bedingt durch ihr Fahrtgebiet, in denen niedrige Wasserstände eher die Regel sind, als die Ausnahme, können sie schon gar nicht so gebaut sein, dass man unter ihren Rumpf einen Ballast anbringen könnte, der ihren Gewichtsschwerpunkt unter den Formschwerpunkt bringt. Ein Spaziergang am Rheinufer jedoch führt uns direkt vor Augen, dass trotzdem Binnenschiffe in der Lage sind, eine aufrechte Position zu halten, bzw. wieder einzunehmen.

Das bedeutet, dass auch bei formstabilen Schiffen ein Moment existieren muss, das es aus einer gekrängten Lage heraus wieder in die aufrechte bringt.

Dem ist tatsächlich so und wie bei der Gewichtsstabilität sind es wieder die Auftriebskraft und die Gewichtskraft, die an der Entstehung des aufrichtenden Moments beteiligt sind.

Doch schauen wir uns zunächst einmal ein formstabiles Schiff und die Lage seiner Schwerpunkte etwas genauer an.



Skizze 9:

*formstabiles Schiff*

*G* = Gewichtsschwerpunkt

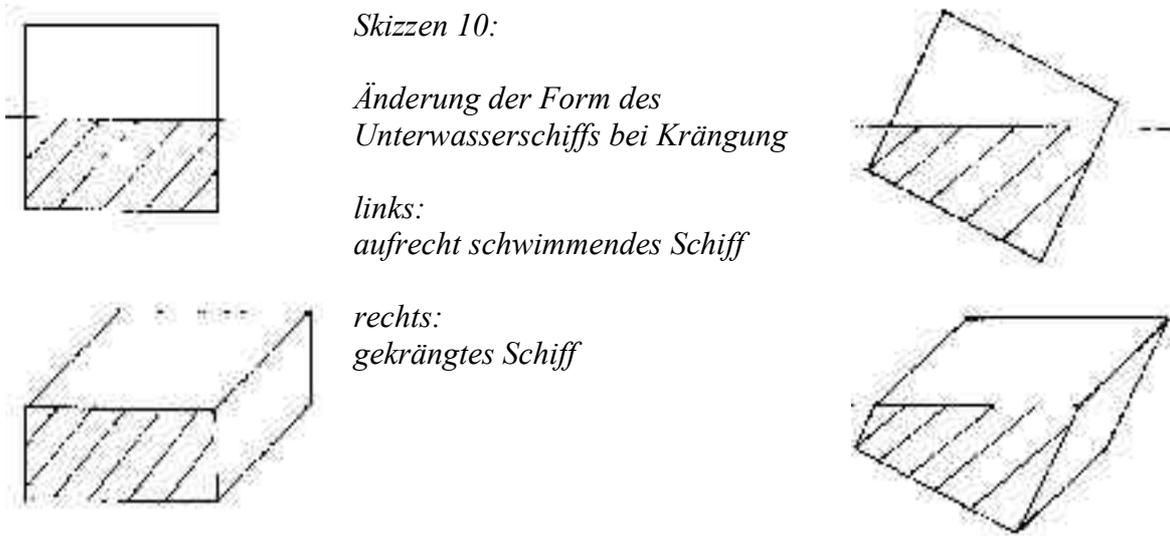
*D* = Drehpunkt

*F* = Formschwerpunkt

Nimmt nun das Schiff durch äußere Einflüsse eine gekrängte Lage ein (z.B. durch Winddruck, oder aber auch durch die auf das Schiff wirkende Zentrifugalkraft bei

einer Kurvenfahrt), findet statt, was wir schon bei der Gewichtsstabilität festgestellt haben: Die Schwerpunkte verändern ihre Position zueinander.

Weil sich die Form des eingetauchten Teils des Schiffs (und nur des eingetauchten Teils, nicht etwa die des Schiffes an sich) verändert, verlagert sich darüber hinaus der Formschwerpunkt relativ zu seiner eigenen, ursprünglichen Lage.



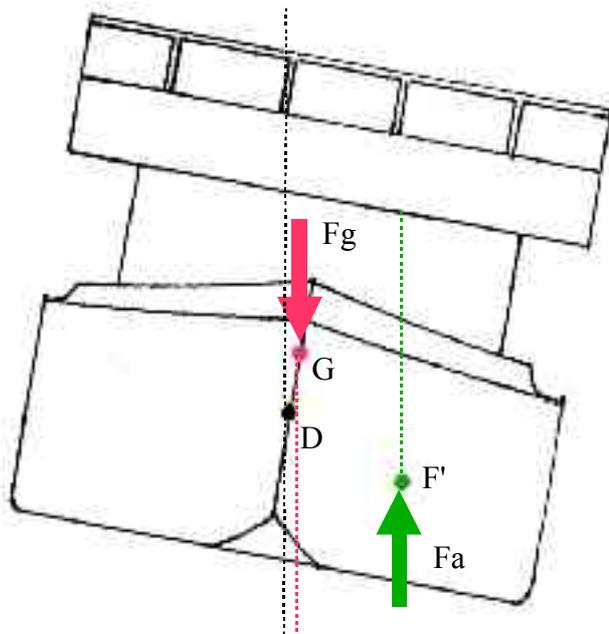
Er wandert aus, in Richtung der tiefer eingetauchten Seite. Das Volumen, mit dem das Schiff eintaucht bleibt aber gleich!

*Klarer wird dieses Auswandern am Beispiel einer Fläche. Wenn wir den Schwerpunkt eines Stückes Pappe ermitteln wollen, dann können wir das tun, in dem wir versuchen, es auf einem Finger zu balancieren. Haben wir das geschafft, markiert die Stelle, an der der Finger die Pappe berührt den Schwerpunkt der Fläche.*

*Schneiden wir nun ein Stück von der Pappe ab und setzen dieses abgeschnittene Stück an anderer Stelle wieder an, so müssen wir einen neuen Punkt suchen, in dem die Pappe auf unserem Finger die Balance hält. Die Lage ihres Schwerpunktes hat sich verändert, ihre Fläche ist aber gleich geblieben. Lediglich ihre Form hat sich verändert.*

*Das gleiche Prinzip lässt sich auf die dritte Dimension erweitern und gilt somit auch für unser Unterwasserschiff.*

Natürlich greifen auch hier die Gewichtskraft im Gewichtsschwerpunkt und die Auftriebskraft im Formschwerpunkt, d.h. im neuen, ausgewanderten Formschwerpunkt an.



Skizze 11:  
wirkende Kräfte am gekrängtem Schiff

$F_g$  = Gewichtskraft  
 $F_a$  = Auftriebskraft  
 $D$  = Drehpunkt  
 $F'$  = ausgewandertes Formschwerpunkt

Anmerkung:

Um den seitl. Abstand der Kräfte-wirklinien zum Drehpunkt zu verdeutlichen, wurde parallel zu den Wirklinien die Ebene, in der der Drehpunkt liegt dargestellt (= .....)

Anhand der Skizze können wir schon sehen, dass auch in diesem Fall die Wirklinien der Kräfte einen seitlichen Abstand zum Drehpunkt erhalten haben. Auch hier fungiert dieser seitliche Abstand zwischen den Wirklinien und dem Drehpunkt als Hebelarm, der mit den über ihn wirkenden Kräften je ein Moment bildet. Die Gewichtskraft bildet über ihren Hebel ein Moment, welches das Schiff weiter krängen lassen will. Die Auftriebskraft bildet mit ihrem Hebel ein Moment, welches das Schiff wieder aufrichten will. Welches Moment gerade das größere ist, ist davon abhängig, welches Moment den längeren Hebelarm besitzt, da die wirkenden Kräfte ja gleich groß sind (archimedisches Prinzip).

Um das zu überprüfen, reicht die obige Skizze nicht ganz aus. Wir müssen sie etwas erweitern.

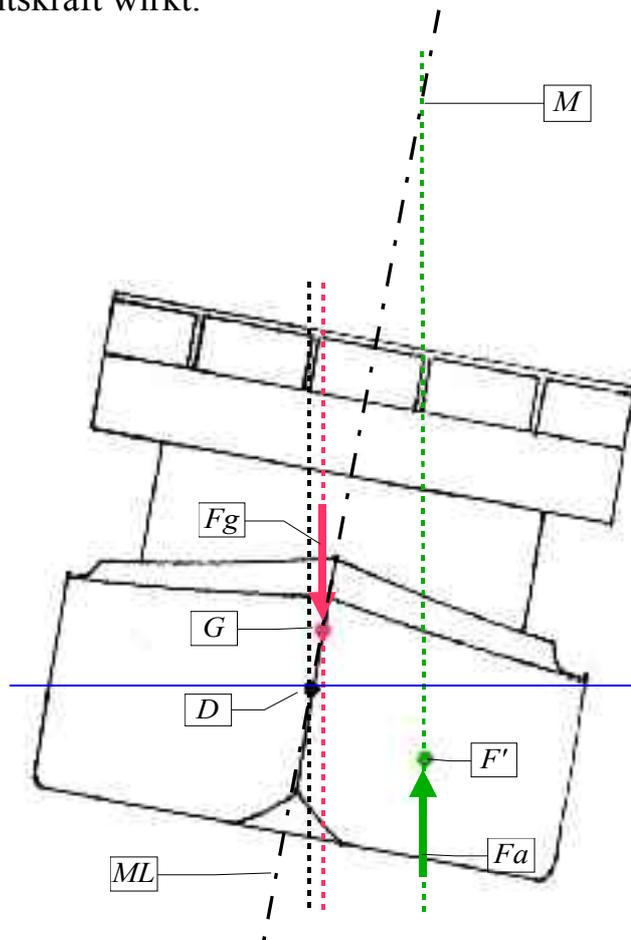
Zeichnen wir in den Schiffskörper eine Achse ein, die ihn in vertikaler Richtung halbiert und verlängern die Wirklinie der Auftriebskraft nach oben, so ergibt sich irgendwann ein Schnittpunkt dieser beiden Linien.

Dieser Schnittpunkt wird Metazentrum (M) genannt und seine Lage ist von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung, ob es sich bei dem resultierenden Moment um ein aufrichtendes oder ein krängendes handelt.

Merke:

**Solange das Metazentrum über dem Gewichtsschwerpunkt liegt, handelt es sich bei dem entstandenen Moment um ein aufrichtendes!**  
**Liegt das Metazentrum unterhalb des Gewichtsschwerpunktes, handelt es sich um ein krängendes Moment!**

Sollte das Metazentrum unterhalb des Gewichtsschwerpunktes liegen hat das schlimme Folgen für das betroffene Schiff: es kentert! Dann nämlich ist der Hebelarm, an dem die Auftriebskraft angreift kürzer, als der Hebelarm, über den die Gewichtskraft wirkt.



Skizze 12:

Kräfte und Momente am gekrängten formstabilen Schiff

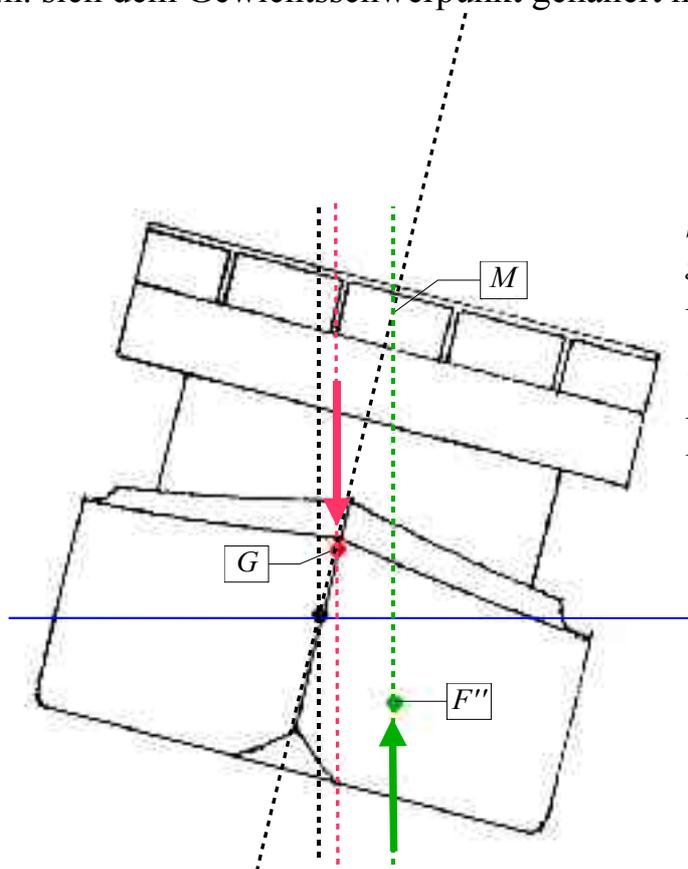
- $M$  = Metazentrum
- $G$  = Gewichtsschwerpunkt
- $MG$  = metazentrische Höhe
- $D$  = Drehpunkt
- $F'$  = ausgewandelter Formschwerpunkt
- $F_a$  = Auftriebskraft
- $F_g$  = Gewichtskraft
- $ML$  = vertikale Mittschiffslinie

In dieser Skizze liegt das Metazentrum über dem Gewichtsschwerpunkt. Nach Wegfall der Einflüsse, die es in die gekrängte Lage gebracht haben, wird es sich wieder aufrichten, da die Auftriebskraft über den längeren Hebel verfügt. Richtet sich das Schiff unter Einfluss der über den längeren Hebel wirkenden Auftriebskraft auf, verkleinern sich die Hebel beider Momente und zwar so lange, bis die beiden Schwerpunkte wieder genau übereinander liegen. Sie liegen dann auf einer Ebene mit dem Drehpunkt, die Folge: kein seitlicher Abstand der Kräftewirklinien zum Drehpunkt mehr, d.h. kein Hebel mehr und daher auch keine Momente. Das Schiff schwimmt aufrecht.

Es ist aber denkbar, dass der krängende Einfluss nicht entfällt, sondern im Gegenteil sogar zunimmt. Die Krängung verstärkt sich und das u.U. sogar so weit, dass auf der Leeseite (windabgewandten Seite) des Schiffes die Decks-kante unter die Wasserlinie gerät.

Wenn das geschieht, besteht höchste Gefahr für das Schiff! Die Form des Unterwasserschiffes ändert sich nun noch drastischer, als bis zu diesem Zeitpunkt. Diese Formänderung kann bewirken, dass sich der Formschwerpunkt so verlagert, dass sich der seitliche Abstand zwischen den beiden Schwerpunkten verringert. Das bedeutet auch eine Verkürzung des Hebels des aufrichtenden Moments und damit eine Verringerung des resultierenden aufrichtenden Momentes an sich!

Eine Verlängerung der Wirklinie der Auftriebskraft nach oben ergibt ein Metazentrum, das sich auf der vertikalen Mittschiffsachse nach unten verlagert hat, d.h. sich dem Gewichtsschwerpunkt genähert hat.



Skizze 13:  
gekrängtes Schiff mit unterschneidender Decks-kante

- $G$  =Gewichtsschwerpunkt
- $M$  =Metazentrum
- $F''$  =erneut ausgewandeter Formschwerpunkt

Es ergibt sich ein Beziehungsgeflecht zwischen dem Abstand des Metazentrums zu dem Gewichtsschwerpunkt und der Länge des Hebels des aufrichtenden Moments.

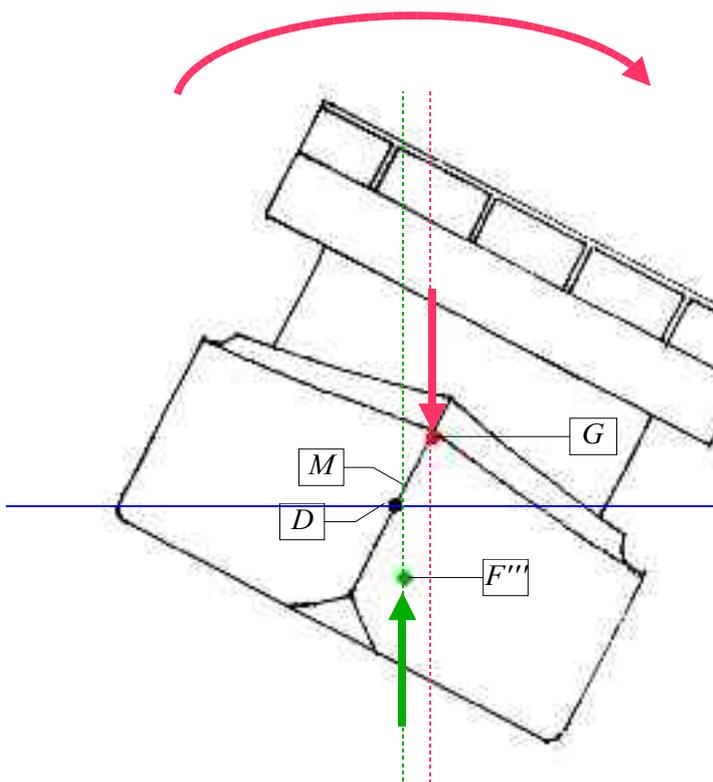
Merke:

**Der Abstand zwischen Metazentrum und Gewichtsschwerpunkt wird metazentrische Höhe genannt und ist ein wichtiges Maß für die Stabilität formstabiler Schiffe!**

Angenommen, die Krängung des Schiffes nimmt noch weiter zu. Irgendwann hat sich der Formschwerpunkt so weit verlagert, dass die nach oben verlängerte Wirklinie der in ihm angreifenden Auftriebskraft die Mittschiffsachse unterhalb des Gewichtsschwerpunktes schneidet und somit das Metazentrum unter ihm liegt.

Es existiert immer noch ein seitlicher Abstand zwischen den Wirklinien der Auftriebskraft und der Gewichtskraft, also auch immer noch ein Moment.

Die Wirkung dieses Moments hat sich jedoch ins Gegenteil verkehrt. Es ist zu einem krängenden Moment geworden, weil es nun die Gewichtskraft ist, die über den längeren Hebel verfügt und das Schiff wird unweigerlich kentern!



Skizze 14:  
weiter gekrängtes Schiff

$M$  = Metazentrum  
 $G$  = Gewichtsschwerpunkt  
 $F'''$  = erneut ausgewandeter Formschwerpunkt  
 $D$  = Drehpunkt

$M$  liegt nun unter  $G$  => neg. metazentrische Höhe.

Der seitliche Abstand zwischen den Wirklinien fungiert als Hebel für ein nun krängendes Moment.

Das Schiff kentert!

Kontrollfragen:

1. Welche Art der Stabilität kommt sinnvoller Weise nur für ein U-Boot in Betracht?
2. Wie wirkt sich zusätzliche Beladung eines Schiffes auf dessen Stabilitätszustand aus?

## 2.3 Zusammenfassung

Ein Schiff, dessen Gewichtsschwerpunkt unter dem Formschwerpunkt liegt ist gewichtsstabil.

Ein Schiff, dessen Gewichtsschwerpunkt über dem Formschwerpunkt liegt ist formstabil

Wird das Schiff gekrängt, verändert sich die Form des eingetauchten Teils des Schiffes. Mit der Formänderung ändert sich auch die Lage des Formschwerpunktes. Er wandert zu der tiefer eingetauchten Seite aus.

Sowohl Form-, als auch Gewichtsschwerpunkt erhalten einen seitlichen Abstand zu der Ebene, auf der der Drehpunkt des Schiffes für eine Drehung um die Längsachse (= Krängung) liegt.

Der seitliche Abstand der Wirklinien der Kräfte zur Ebene des Drehpunktes fungiert als Hebel, über den die Kräfte wirken und somit ein Moment bilden.

Der Abstand der Kräftewirklinien untereinander entspricht der Länge des Hebels für das aus beiden resultierende Moment.

Die Wirklinie der Auftriebskraft schneidet die vertikale Mittschiffsachse im Metazentrum.

Liegt das Metazentrum über dem Gewichtsschwerpunkt, fungiert das resultierende Moment als aufrichtendes Moment, liegt das Metazentrum unter dem Gewichtsschwerpunkt, fungiert das resultierende Moment als krängendes Moment.

Ist das resultierende Moment ein krängendes, kentert das Schiff.

Der Abstand zwischen Metazentrum und Gewichtsschwerpunkt wird als metazentrische Höhe bezeichnet.