

1.5 Festigkeitsberechnung im Stahlschiffbau¹

Schiffe werden durch Ladung und sonstige Gewichte wie z.B. Maschinen, Wasserdruck und ganz besonders durch Seegangslasten beansprucht. Diese letzteren sind schwierig zu erfassen und selbst unter Einsatz der modernsten Rechnertechnologien ist es noch nicht möglich, die zu erwartenden Seegangslasten genau vorauszusagen, so dass immer noch mit unvorhergesehenen großen Lasten gerechnet werden muss. Eine größere Bedeutung kommt hierbei dem Seeschlag zu.

Die Bauteile werden teilweise nach der Erfahrung und teilweise nach Berechnungen dimensioniert, mit der Tendenz zu mehr Berechnungen. Der letzte Satz gilt auch für die Bauvorschriften der Klassifikationsgesellschaften, nach denen heute die Handelsschiffe gebaut werden.

Schiffe erfahren grob eingeteilt eine örtliche Beanspruchung der Detailkonstruktionen und eine globale Beanspruchung des ganzen Schiffskörpers. Diese letztere gewinnt mit steigender Schiffgröße an Bedeutung.

Wir betrachten das Schiff als einen dünnwandigen Balken, der hauptsächlich durch 3 globale Beanspruchungen belastet wird:

1. Längsfestigkeit
2. Querfestigkeit
3. Torsionsfestigkeit

Hinzu kommt die Detailfestigkeit, z.B. Lukenecken, Längsspantdurchbrüche durch Tankerrahmen, Deckstützen, ...

1.5.1 Beanspruchungen (Übersicht)²:

Schwerkraft

Gewicht von Rumpf, Maschinen, Ausrüstung, Ladung, Menschen, Gepäck, Eis, Wasser an Deck, Verbrauchsstoffe (Brennstoff, Wasser, Vorräte)

Vortriebsanlage

Drehmoment und Schub

Bodenreaktionen

Stapellauf, Docken, Stranden

Wasserdruck

Hydrodynamische Kräfte

Gleichmäßig/ungleichmäßig auf den Rumpf wirkend, stoßartig (Slamming, Wasserschlag, Kavitation), Wellen, wiederkehrend (Schiffsschraube)

Wind

Trägheitsmomente

Rumpf, Ladung und Vorräte (fest, beweglich, schwappend), Eis, Antriebsanlage (Ungleichgewichte, Kreiselmomente)

Sonstiges

Kollision, Ankern, Festmachen, Schleppen, Greiferstöße, Kranlast, Wärme, Helikopterlandung

¹ Rainer Alte, Henning Matthiessen: Schiffbau kurzgefasst; Hamburg: Schiffahrts-Verlag „Hansa“ C. Schroedter & Co, 1978; S. 124ff; ISBN 3-87700-028-2

² Schiffstechnik und Schiffbautechnologie; Hrsg.: Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V., Hamburg; Hamburg: Seehafen Verlag, 1998, S. 15



1.5.2 Allgemeine Grundlagen der Festigkeit

Bevor wir uns wieder der Frage zuwenden, wie ein Schiffsrumpf gestaltet und dimensioniert werden muss, um die vielfältigen o. g. Belastungen aufzunehmen ohne zu versagen, müssen zum besseren Verständnis einige allgemeine Hinweise gegeben werden.

1.5.2.1 Biegung

1.5.2.2 Schub

1.5.2.3 Spannung und Verformung

1.5.2.4 Belastung eines Balkens

1.5.3 Längsfestigkeit

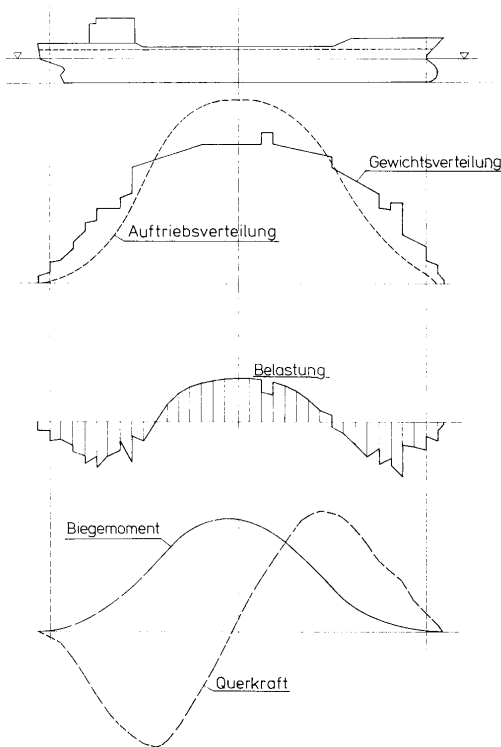
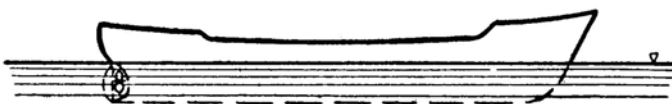


Bild: Längsfestigkeitsberechnung³

Das Schiff wird von oben durch die Ladung und sein Eigengewicht (Rumpfgewicht, Maschinen, Aufbauten u. dgl.) und von unten durch den Auftrieb belastet. Diese Lasten sind ungleich über die ganze Schiffslänge verteilt, ergeben jedoch im Gleichgewichtszustand zusammen Null.

Aus den Lasten lässt sich durch einmalige Integration die Querkraft und durch zweimalige Integration das Biegemoment bestimmen. Für glattes Wasser ist das Verfahren relativ einfach. Außerdem gibt es „Rezepte“, nach denen man leicht die Querkraft und die Biegemomentenkurve am Ende auch zu Null bringen kann.

Für Seegang ist eine einfache Lösung nicht möglich. Brauchbare Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn man das Schiff in jeweils ein Wellental und einen Wellenberg legt mit der Wellenlänge etwa gleich der Schiffslänge L und der Wellenhöhe H von Berg zu Tal (Doppelamplitude) von etwa $H = L/20$.



Schiff im ruhigen Wasser

Bild: Schiff im ruhigen Wasser, auf einem Wellenberg und im Wellental⁴

Die beiden unteren Bilder stellen die höchsten Belastungsfälle dar.



Schiff auf Wellenberg



Schiff im Wellental

³ *Bildquelle:* Rainer Alte, Henning Matthiessen: Schiffbau kurzgefasst; Hamburg: Schifffahrts-Verlag „Hansa“ C. Schroedter & Co, 1978; S. 125; ISBN 3-87700-028-2

⁴ *Bildquelle:* Fritz Barth: Festigkeitsberechnung im Stahlschiffbau; Leipzig: Fachbuchverlag, 1957; S. 85



Bei Längsfestigkeitsberechnungen werden die ungünstigsten Fälle berücksichtigt. Weiter wird als ungünstigste Annahme hinsichtlich der Wellenlänge angenommen, dass deren Länge etwa gleich der Schiffslänge ist. Außer der Wellenlänge ist aber auch die Wellenhöhe zu berücksichtigen. Auf Grund von Beobachtungen hat Dahlmann⁵ die Formel

$$\text{Wellenhöhe } H_w = \frac{1}{30} \cdot (L + 60)$$

aufgestellt.

Als allgemein üblicher Wert für die Höhe der Standardwelle⁶ kann auch

$$\text{Wellenhöhe } H_w = \frac{1}{20} \cdot L$$

oder

$$H_w = 0,6 \cdot \sqrt{L}$$

angenommen werden.

Etwas genauer wird das Rechenverfahren, wenn wir berücksichtigen, dass größere Wellen seltener vorkommen als kleinere und damit größere Schiffe weniger beansprucht werden. Wir rechnen mit⁷:

Schiffslänge L	Wellenhöhe H
$L < 100 \text{ m}$	$H_w = L/17,3$
$100 \text{ m} \leq L \leq 270 \text{ m}$	$H_w = 1,25 \cdot \sqrt[3]{L}$
$L > 270 \text{ m}$	$H_w = 8,07 \text{ m}$

⁵ Wilh. Dahlmann: Festigkeit der Schiffe; Berlin: Springer-Verlag, 1925

⁶ Schiffstechnik und Schiffbautechnologie; Hrsg.: Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V., Hamburg; Hamburg: Seehafen Verlag, 1998, S. 16

⁷ Rainer Alte, Henning Matthiessen: Schiffbau kurzgefasst; Hamburg: Schiffahrts-Verlag „Hansa“ C. Schroedter & Co, 1978; S. 124; ISBN 3-87700-028-2



1.5.3.1 Normalspannungen durch Druck bzw. Zug im Längsverband⁸

Durch die entgegengesetzt gerichteten Kräfte Strömungswiderstand des Wassers und Propellerschub werden in Richtung der Längsachse des Schiffes Druckkräfte hervorgerufen. Bei konstanter Geschwindigkeit des Schiffes befinden sich die beiden wirkenden Kräfte im Gleichgewicht. Nur bei Beschleunigung bzw. Verzögerung des Schiffes treten also Normalspannungen im Längsverband des Schiffes auf. Darüber hinaus wächst im Seegang der Widerstand auch stoßweise an.

In erster Näherung gilt zur Ermittlung der Druckspannung

$$p_D = \frac{F_W + F_a}{A_{\text{Hauptspant}}}$$

Der (statische) Strömungswiderstand F_W errechnet sich aus

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_W$$

Für die Ermittlung der dynamischen Kraft F_a gilt

$$F_a = m \cdot a \\ = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Schiff}} \cdot a$$

F_W	Strömungswiderstand
C_W	Widerstandsbeiwert, abhängig von der Form des umströmten Körpers. C_W ist eine Zahl und besitzt keine Einheit. ¹⁰
A	Größter der Strömung entgegenstehender Körperquerschnitt (Hauptspantfläche)
ρ	Dichte des strömenden Mediums
v	Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Medium
m_{Schiff}	Masse des Schiffes
a	Beschleunigung (Verzögerung) des Schiffes

Da nur die Druck- bzw. Zugkraft im Hauptspantquerschnitt, hervorgerufen durch die Masse des Schiffes, ermittelt werden soll, ist für m nur die halbe Schiffsmasse einzusetzen.⁹

Die Beschleunigung bzw. Verzögerung a beträgt im Maximum etwa 2,5 m/s².

Ergänzung/en, Nebenbetrachtungen:

Diese beiden Kräfte müssen als effektive Kraft von der Maschinenleistung zur Verfügung gestellt werden. Es gilt

$$P_e = P_i \cdot \eta \\ P_i = \frac{P_e}{\eta} \\ = \frac{F_e \cdot v}{\eta} \\ = \frac{(F_W + F_a) \cdot v}{\eta}$$

⁸ dto., S. 82f

⁹ Fritz Barth: Festigkeitsberechnung im Stahlschiffbau; Leipzig: Fachbuchverlag, 1957; S. 82f

¹⁰ Vgl.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstand>

1.5.3.2 Normalspannungen durch Biegung im Längsverband¹¹

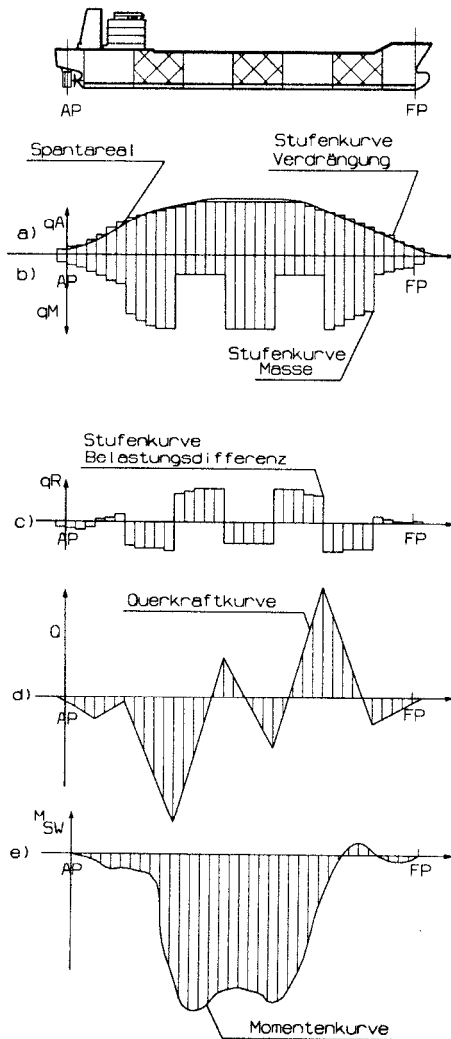


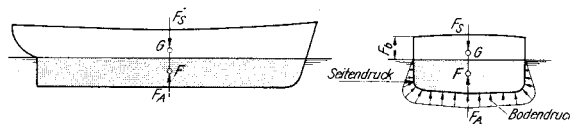
Bild:
Ungleichmäßig beladenes Schiff in Glatzwasser für den Fall der Aufbiegung

Ursache der Biegung im Längsverband ist die ungleiche Verteilung der Auftriebs- und der Gewichtskräfte innerhalb der Länge des Schiffes.

Die Gleichgewichtslage des Schiffes erfordert, dass der Auftrieb gleich der Gewichtskraft des Schiffes ist:

$$F_A = F_{g_Schiff}$$

Weiter gilt die Forderung, dass der Auftriebsschwerpunkt und der Gewichtsschwerpunkt des Schiffes in einer lotrechten Linie zusammenfallen.



Querkräfte und Momente werden also nur durch die örtlichen Differenzen von Auftrieb und Gewicht hervorgerufen. Daraus folgend wird zur Ermittlung des maximalen Biegemomentes im Längsverband nachstehender Lösungsweg beschrieben:

1. Ermittlung der Gewichtslinie
2. Ermittlung der Verdrängungslinie
3. Festlegung der Differenzenfläche durch Überlagerung von Gewicht- und Verdrängungslinie
4. Aufzeichnung der Querkraftfläche
5. Ermittlung der Biegemomentenlinie

¹¹ dto., S. 82f

Lokale Beanspruchungen des Schiffskörpers (Querfestigkeit)

Überall auf einem Schiff kann man lokale Belastungen erkennen. Wenn man auf das Deck tritt, erzeugt das Körpergewicht eine Belastung, die durch die Rumpfstruktur bis zum Schiffsboden fortwirkt, wo die Auftriebskräfte des Wassers einen gleichen Gegendruck erzeugen, der wiederum eine Belastung darstellt. Das Gleiche gilt für die Ladung und für das Gewicht des Schiffsrumpfes selbst.

Die Seitenwände und der Boden des Schiffes werden durch den Wasserdruck belastet, der mit zunehmender Wassertiefe zunimmt. Diesem Wasserdruck muss die Rumpfstruktur standhalten.

Falls das Schiff im Seegang rollt, taucht die eine Bordseite tiefer ein als die andere, so dass der Wasserdruck den Rumpf einseitig belastet und den Spantrahmen auf Verschieben beansprucht, der besonders an seinen Ecken stark belastet wird.

„Slamming“ und überkommendes Wasser erzeugen dynamische stoßartige Belastungen. Da sie schwer zu berechnen sind, hilft man sich dadurch, dass man statische Druckbelastungen annimmt, die den dynamischen Belastungen in der Größenordnung entsprechen.

Die Bedeutung der Querfestigkeit nahm im Verhältnis zur Längsfestigkeit mit steigender Schiffgröße ab und ist erst besonders bei den großen Tankern wieder sehr wichtig geworden.

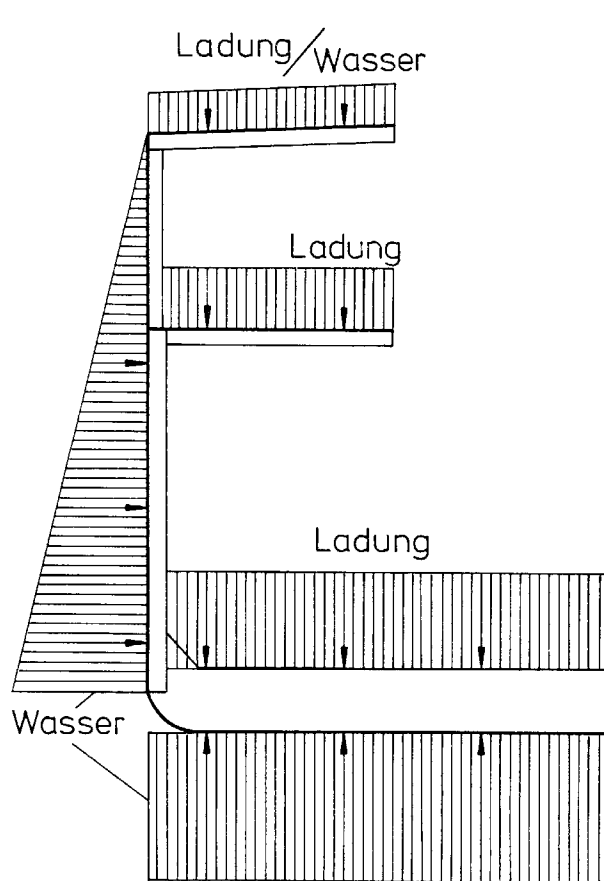


Bild:
Belastungsschema eines Schiffsquerschnitts¹²

¹² *Bildquelle:* Rainer Alte, Henning Matthiessen: Schiffbau kurzgefasst; Hamburg: Schifffahrts-Verlag „Hansa“ C. Schroedter & Co, 1978; S. 126; ISBN 3-87700-028-2

1.5.4 Der Rumpf als Kastenträger¹³

Klassische Versagensarten: Das nebenstehende Bild zeigt unter a) ein Schiff, das sich in einer Welle von der Länge des Schiffes und mit dem Wellenberg mittschiffs befindet (sog. „hogging condition“).

Dies hat zu einem Versagen des Rumpfes geführt: Das Deck hat aufgrund der Zugspannung nachgegeben, während der Boden durch den Druck zusammengebeult wurde. Die Linie N – F ist die Grenze, in der die Beanspruchung von der Zug- auf die Druckbeanspruchung wechselt. Man nennt diese Linie die „neutrale Faser“ oder auch Nulllinie.

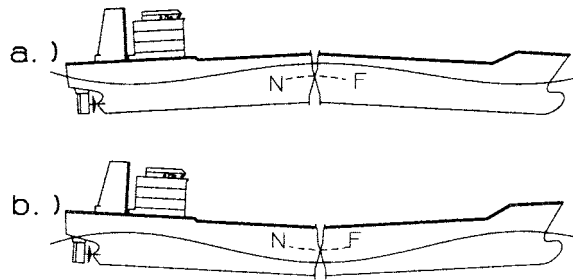


Bild:
Versagen des Rumpfes auf Grund hoher Längsbiegemomente

a) „hogging condition“; b) „sagging condition“;
 N - F: neutrale Faser

Skizze b) zeigt den entgegen gesetzten Fall eines klassischen Versagens. Hier haben die beiden Wellenberge am vorderen bzw. hinteren Ende des Schiffes ein Versagen in der sog. „sagging condition“ hervorgerufen. In diesem Fall hat das Deck durch Druck eine Beulung erfahren während der Boden durch Zug aufgerissen wurde. Auch hier gibt es wieder eine neutrale Faser, in der der Rumpf weder einer Zug- noch einer Druckbelastung unterliegt.

Die neutrale Faser liegt immer an der gleichen Stelle, unabhängig davon, ob das Schiff sich auf dem Wellenberg oder zwischen Wellenbergen befindet.

Die neutrale Faser: Theoretische Untersuchungen zeigen, dass die neutrale Faser sich in der Regel genau im Flächenschwerpunkt des Balkenquerschnitts einstellt. Dies bedeutet, dass bei einer Biegebelastung alles Material auf der einen Seite des Flächenschwerpunktes eine Zugspannung erfährt, während alles Material auf der anderen Seite unter Druck steht.

Bei den in der nebenstehenden Abbildung unter a) gezeigten Profilen liegt der Flächenschwerpunkt aus Symmetriegründen und damit auch die neutrale Faser genau auf halber Höhe.

Bei den unter b) gezeigten Profilen liegt die neutrale Faser oberhalb der halben Höhe, weil sich durch den zusätzlichen Wulst bzw. Winkel oder Flansch der Flächenschwerpunkt weiter nach oben verschoben hat.

Die Abbildungen beziehen sich auf senkrecht belastete Balken. Die gleichen Überlegungen gelten jedoch entsprechend unabhängig von der Richtung der Belastung.

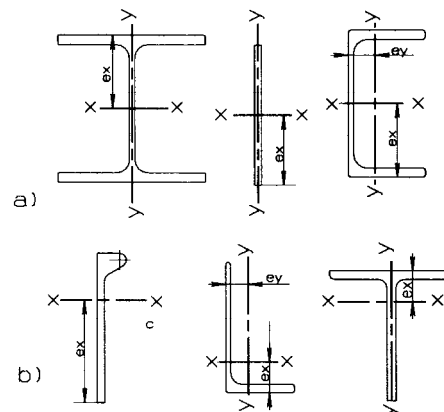


Bild:
Lage der neutralen Faser bei verschiedenen Versteifungsprofilen

Hinweis: Übungsaufgaben (Tabellenbuch)

¹³ Schiffstechnik und Schiffbautechnologie; Hrsg.: Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V., Hamburg; Hamburg: Seehafen Verlag, 1998, S. 18f

Um die neutrale Faser des Schiffsrumpfes zu ermitteln, muss man den Flächenschwerpunkt ermitteln. Hierbei sind allerdings nur die Teile des Schiffsrumpfes zu berücksichtigen, die unmittelbar zur Biegefestigkeit des „Kastenträgers“ beitragen. **Dies sind alle Bauteile, die ohne Unterbrechung von vorne nach achtern durchlaufen und zwar mindestens auf eine Distanz einer halben Schiffslänge.** Querlaufende Rahmenteile und unterbrochene längslaufende Bauteile werden nicht berücksichtigt (z.B. die Teile des Decks vor oder hinter Lukenöffnungen).

Heute werden diese Berechnungen mit Hilfe des Computers durchgeführt. Generell kann man aber davon ausgehen, dass die höchsten Spannungen im Oberdeck auftreten, da der Schiffsboden immer schwerer als das Deck ist (die neutrale Faser liegt näher zum Boden als zum Deck).

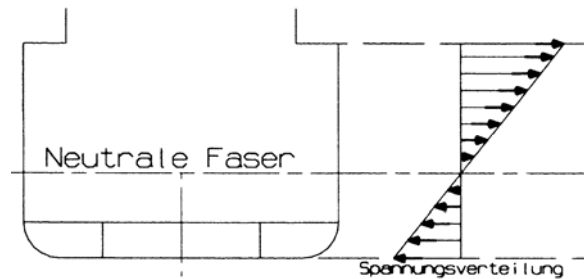


Bild:
 Verteilung des Biegemomentes in Abhängigkeit von der Entfernung zur neutralen Faser

Steifigkeit: Die Steifigkeit eines Trägers wird direkt von einer Eigenschaft seiner Querschnittsgeometrie beeinflusst, u .zw. vom Widerstandsmoment¹⁴. Wie weit ein Träger sich unter Belastung verformt, steht in unmittelbarem Verhältnis zu seinem Widerstandsmoment. Man ermittelt ein Widerstandsmoment grundsätzlich dadurch, dass man für jeden Bestandteil des Sektionsquerschnittes die Fläche mit dem Quadrat ihrer Entfernung von der neutralen Faser multipliziert und dann alle diese Produkte addiert. Die Widerstandsmomente von Profilen zusammen mit der „mittragenden Breite“ der ausgesteiften Platte als Gurtung werden in den von den Klassifikationsgesellschaften herausgegebenen Vorschriften angegeben.

Übung

Wie stark sich ein Balken verformt, hängt auch von dem Material ab, aus dem er hergestellt ist. Der technische Begriff für diese Eigenschaft ist der Elastizitätsmodul¹⁵. Man kann sich den Elastizitätsmodul als diejenige Spannung vorstellen, welche die Länge einer Materialprobe verdoppeln würde falls sie nicht vorher zerreißt.

Übung

Die Sektionskennzahl Für die weitere Betrachtung muss auf die Sektionszahl eingegangen werden. Steifigkeit¹⁶ ist bei einem Träger immer eine gute Eigenschaft. Deshalb ist ein hoher Wert des Flächenträgheitsmomentes von Vorteil. Dieser Wert muss jedoch erreicht werden, ohne dass die am meisten beanspruchten Teile des Trägers überbeansprucht werden. Die höchsten Spannungen treten in den Teilen auf, die am weitesten von der neutralen Faser entfernt sind. Der Abstand von der neutralen Faser zu diesen äußersten Rändern wird mit dem Buchstaben „y“ gekennzeichnet. Die Fähigkeit eines Balkens nun, Biegemomenten standzuhalten, ist direkt proportional zu seinem Flächenträgheitsmoment J und umgekehrt proportional zum Abstand y der neutralen Faser zum Rand. Dieser mathematische Zusammenhang wird Sektionszahl (Zeichen: S) genannt: $S = J/y$.

¹⁴ <http://de.wikipedia.org/wiki/Widerstandsmoment>

¹⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Elastizit%C3%A4tsmodul>

¹⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Steifigkeit>



Die höchsten Biegespannungen, die in einem Träger auftreten (an den äußeren Rändern) sind proportional zum höchsten Wert des aufgetragenen Biegemomentes und umgekehrt proportional zu Sektionskennzahl. Es gilt:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M}{S} \\ &= \frac{M}{\frac{J}{y}} = \frac{M \cdot y}{J}\end{aligned}$$

Anm.:

Die Sektionszahl entspricht in der allgemeinen Festigkeitslehre dem Widerstandsmoment W .

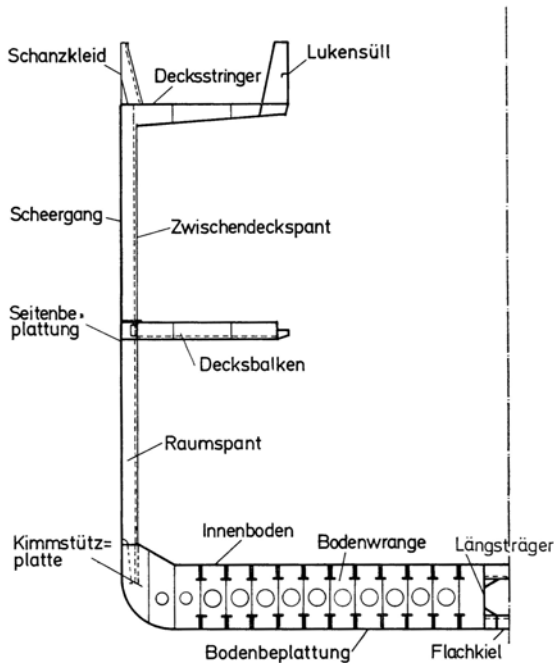
Übung:


Bild:
Hauptspant eines Frachtschiffes

1. Ermitteln Sie aus der nebenstehenden Skizze das Verhältnis H/B .
2. Bestimmen Sie eine/n zugehörige Schiffslänge L , Tiefgang T und Verdrängungskoeffizienten δ .
3. Berechnen Sie das zugehörige Gesamtgewicht des Schiffes für Seewasser. Dieses Gesamtgewicht behandeln wir im Weiteren als über die Länge gleichmäßig verteilte Streckenlast q .
4. Vereinfachen Sie den Hauptspant so, dass Sie für das Schiff einen Kastenträger erhalten.
5. Wählen Sie eine sinnvolle Doppelbodenhöhe.
6. Wählen Sie Plattenstärken und Profile für den Doppelboden.
7. Bestimmen Sie für den Hauptspant das Flächenträgheitsmoment, die Lage der neutralen Faser und das Widerstandsmoment.
8. Bestimmen Sie das Gewicht für den Schiffsrumpf (vereinfachter Kastenträger).
9. Bestimmen Sie das Biegemoment für den Kastenträger a) für die „hogging condition“ und b) für die „sagging condition“.
10. Wie groß wird die Spannung im Hauptdeck (Boden)?