

Physikalische Grundlagen des Vertäuens von Schiffen

Dipl.-Ing.(FH) Kapt.(AG) Wolf Scheuermann

Hamburg, 1986

Contents

1	Einführung	2
2	Physikalische Grundlagen des Festmachens	2
2.1	Trossengeometrie und Trosseneigenschaften	3
2.1.1	Erster Ansatz	4
2.1.2	Zweiter Ansatz	5
3	Schlußfolgerung: "Mixed Mooring" ist unvermeidbar	6
4	Quellen	8

1 Einführung

Dieser Text basiert auf dem Kapitel A-2.1. der Diplomarbeit von Margret Eismann und Wolf Scheuermann 1986 ([1], S.15-23).

2 Physikalische Grundlagen des Festmachens

Das Vertäusystem eines Schiffes setzt sich aus dem Zusammenspiel der Komponenten Schiff, Leinen, Winden, Klüsen, Fender und Poller zusammen.

Ein mit mehr oder weniger elastischen Trossen vertäutes Schiff ist ein statisch unbestimmtes System, das sich grundsätzlich in sechs Freiheitsgraden bewegen kann.

Jede äußere, auf das Schiff einwirkende Kraft, deren Wirkungslinie nicht genau durch den Massenschwerpunkt verläuft, bewirkt eine komplexe Bewegung des Schiffes, die sich aus drei Translationen und drei Rotationen zusammensetzt ([2], S.317).

Das Schiff selbst hat keine Eigenfrequenz im Sinne einer einzigen eindeutig festlegbaren Frequenz, es kann aber, z.B. durch Wellenbewegungen, zu subharmonischen Resonanzen angeregt werden, wobei die Resonanzfrequenz von der Amplitude der Schiffsbewegungen abhängt ([4], S.2119).

Die bei einer Auslenkung des Schiffes aus seiner Ruhelage einsetzenden Rückstellkräfte sind aufgrund des nichtlinearen Last-Dehnungs-Verhaltens der Trossen ebenfalls nichtlinear, d.h. die Rückstellkräfte sind nicht proportional zur Auslenkung. Dabei ist bei einer Surge-Bewegung des Schiffes die Beziehung zwischen Auslenkung und Rückstellkraft nicht linear, aber symmetrisch, bei einer Sway-Bewegung des Schiffes ist die Beziehung zwischen Auslenkung und Rückstellkraft nichtlinear und asymmetrisch, da das Schiff in seiner Bewegung durch die Pier "behindert" wird ([5], S.415 f.).

Erfährt das vertäute Schiff durch äußere Einflüsse (Wind, Strom, Wellenbewegungen) eine Beschleunigung und damit eine Auslenkung aus seiner momentanen Ruhelage, so müssen die Trossen den größten Teil der Energie aufnehmen. Die Distanz, über die die Trossen Energie absorbieren, hängt nach Chernjawski ([6], S.3 f) ab von:

"(a) the resultant of external forces and hydrostatic restoring forces acting

on the vessel,

(b) the configuration of mooring arrangement, and

(c) the size, unstressed length and modulus of elasticity of the mooring lines.”

Der Elastizitätsmodul ist eine Materialkonstante, nämlich der Proportionalitätsfaktor zwischen Spannung σ und Dehnung ε , $\sigma = E \cdot \varepsilon$ bzw. $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, und beschreibt die elastischen Eigenschaften des Materials.

”Der E-Modul ist eine gedachte Spannung, die einen Probestab elastisch auf die doppelte Länge dehnen würde, sofern der Werkstoff diese hohe Spannung aushalten könnte. Mit Hilfe des E-Moduls lassen sich dann die elastischen Formänderungen der Bauteile unter Spannung ausrechnen.” ([7], S.275)

Dem Elastizitätsmodul liegt die Auffassung vom elastischen Material als lineare (Hook’sche) Feder (innerhalb der Elastizitätsgrenze) zugrunde, der Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul E und Federkonstante D ist

$$D = \frac{E \cdot A}{s}, \quad \text{wobei} \quad D = \frac{F}{\Delta s}.$$

Δs Längenänderung

A Querschnitt des Stabes

s Länge des Stabes vor der Dehnung

F dehnende Kraft

2.1 Trossengeometrie und Trosseneigenschaften

Bei einem vertäuten Schiff läßt sich die Elastizität des Gesamtsystems nicht einfach anhand der Elastizitätsmodule der einzelnen Trossen berechnen, denn deren Elastizitätsmodule sind nicht konstant, sondern werden erheblich von der Geometrie der Vertäuerung bestimmt.

Eine festgemachte Trosse läßt sich in zwei Teile gliedern:

- das Stück Trosse außenbords vom Poller bis zur Klüse in der Bordwand des Schiffes
- das Stück Trosse binnenbords von der Klüse bis zur Windentrommel oder einem Poller an Deck.

Beide Teile wirken sehr unterschiedlich:

Betrachtet man das Teilstück Trosse außenbords so als sei es in der Klüse befestigt, dann bestimmen sich allein aus der Geometrie und den physikalischen Eigenschaften dieses Trossenstückes die externen Kräfte und Momente, die aus dem Trossenzug auf den Schiffsrumpf wirken. Angriffspunkt dieser Kräfte am Rumpf ist die Klüse.

Dagegen bewirkt das Trossenstück binnenbords, wenn man es als in der Klüse befestigt betrachtet, keine externen Kräfte am Schiffsrumpf, sondern lediglich innere Kräfte (Verspannungen in den Verbänden).

Beide Teilstücke der Trosse sind jedoch nicht in der Klüse befestigt, sondern miteinander verbunden und (unter Vernachlässigung der Klüsenreibung) frei in der Klüse verschiebbar. Im folgenden sind zwei verschiedene Ansätze für die Beschreibung der Physik einer solcherart zweigeteilten Trosse dargestellt.

Zur Vereinfachung sei angenommen, die Trosse sei eine lineare Feder mit

$Z = \varepsilon \cdot E \cdot A$	Trossenzug
$\sigma = \varepsilon \cdot E$	Spannung
$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$	Dehnung
E	Elastizitätsmodul
$D = \frac{E \cdot A}{L}$	Federkonstante
$A = \text{const.}$	Trossenquerschnitt
$L = L_a + L_b$	Trossenlänge
L_a	Länge des Trossenstückes außenbords
L_b	Länge des Trossenstückes binnenbords

2.1.1 Erster Ansatz

Eine Trosse der Länge L wird durch den Trossenzug Z eine Dehnung ε erfahren, ebenso wird eine Trosse der Länge L_a unter Z die Dehnung ε erfahren, da $Z = \varepsilon \cdot E \cdot A = \text{const.}$ (vgl. z.B. [8], S,496 ff.). Für alle Trossenlängen L , L_a ist $\varepsilon = \text{const.}$, wenn $Z = \text{const.}$, woraus folgt, daß

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_a}{L_a} = \text{const.}$$

Da die Strecke L_b konstant ist (der Abstand Winde - Klüse ändert sich nicht), findet sich die Längenänderung des Trossenstückes L_b außenbords

wieder, d.h. statt der Längenänderung ΔL_a wird L_a die Längenänderung ΔL erfahren. Für das Trossenstück L_a bedeutet dies

$$Z = \varepsilon \cdot E \cdot A = \frac{\Delta L}{L} \cdot E \cdot A = \frac{\Delta L}{L_a} \cdot \bar{E} \cdot A = \text{const.}$$

Wird nur die Wirkung des Trossenstückes L_a berechnet, so muß der Elastizitätsmodul \bar{E} dieses Teilstücks korrigiert werden, um die Wirkung des Trossenstückes L_b zu berücksichtigen:

$$\bar{E} = \frac{L_a}{L} \cdot E = \frac{L_a}{L_a + L_b} \cdot E$$

Der Elastizitätsmodul ist also nicht mehr eine konstante Materialeigenschaft, sondern hängt ab vom Verhältnis der Längen der Trossenstück außenbords und binnenbords.

2.1.2 Zweiter Ansatz

Die Trossenstücke L_a und L_b lassen sich als in Serie geschaltete Federn betrachten.

$D_1 = \frac{Z}{\Delta L_a}$ sei die Federkonstante des Teilstücks außenbords und

$D_2 = \frac{Z}{\Delta L_b}$ die Federkonstante des Teilstücks binnenbords.

Dann gilt für die Federkonstante D des Gesamtsystems:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}$$

oder

$$\frac{1}{D} = \frac{L_a}{E \cdot A} + \frac{L_b}{E \cdot A} = \frac{L_a + L_b}{E \cdot A}$$

Soll ein Trossenstück der Länge L_a dieselben Eigenschaften wie das System gekoppelter Federn haben, so muß für die Federkonstante D von L_a gelten:

$$D = \frac{\bar{E} \cdot A}{L_a}$$

Setzt man dies mit der Federkonstanten des gekoppelten Systems gleich, erhält man:

$$\frac{L_a}{\bar{E} \cdot A} = \frac{L_a + L_b}{E \cdot A}$$

bzw.

$$\bar{E} = \frac{L_a}{L_a + L_b} \cdot E$$

wie schon im ersten Ansatz.

3 Schlußfolgerung: "Mixed Mooring" ist unvermeidbar

Diese Ergebnisse lassen folgenden Schluß zu:

Selbst wenn in einem Vertäusystem alle Trossen von gleichem Material, gleicher Konstruktion, gleicher Machart und gleicher Länge sind, ist nicht sichergestellt, daß alle Trossen bei gleicher Vorspannung gleichmäßig belastet werden und dieselbe Arbeitsaufnahmefähigkeit besitzen. Vielmehr sind infolge der Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Verhältnis der Längen der Trossenstücke außenbords und binnenbords prinzipiell unterschiedliche Elastizitätseigenschaften der Trossen und damit "Mixed Mooring" unvermeidbar.

Die Rolle, die eine Trosse im Vertäusystem spielt, hängt von ihrer Fähigkeit zur Energieaufnahme und vom Winkel, unter dem sie ausgebracht worden ist, ab.

Die Fähigkeit zur Energieaufnahme hängt nicht nur von der Bruchlast der Leine ab, sondern auch von ihrer Dehnbarkeit; je geringer die Dehnbarkeit einer Trosse, umso größer ist die auf Sie wirkende Last ([3], S.176).

"The energy absorption capacity of a rope of uniform characteristics throughout its length, is proportional to such length." ([3], S.173)

Zugleich nimmt die Dehnbarkeit von Trossen mit ihrem Alter rapide ab.

Vasco Costa führt auch an, daß es nicht - wie allgemein angenommen - ausreicht, wenn eine Trosse Lasten in der Größenordnung der äußeren Kräfte standhalten kann. Er weist nach, daß selbst für den idealen Fall, daß die Leinen so straff vorgespannt sind, daß das Schiff sich unter dem Angriff beschleunigender Kräfte nicht bewegen kann, da die Leinen das Schiff, sowie es sich zu bewegen beginnt, sofort abstoppen, auf die Trossen eine Last kommt, die dreimal größer ist als die beschleunigende Kraft, die auf das Schiff wirkt ([3], S.173 und 175). Da der Fall, daß das Schiff sich überhaupt nicht bewegt, nur selten zu erreichen ist, ist es wichtig, Trossen zu benutzen, die

zu großen Verlängerungen fähig sind ([3], S.174).

Hinsichtlich der Energieaufnahme ist es völlig gleichgültig, in welchem Winkel zum Schiff die Trosse ausgebracht wird, da die Energie als skalare Größe unabhängig von irgendeiner Richtung ist. Je länger eine Trosse ist, desto mehr Energie kann sie absorbieren.

"The actual length of a rope from bitts to bollards is important; a rope that is twice as long will stretch twice the distance under the same load; thus it can absorb twice the energy" ([6], S.4)

Gleichzeitig trägt eine lange Leine aber weniger Last als eine kurze, weshalb ein Ausbringen von langen und kurzen Leinen nebeneinander eine sehr ungleiche Lastverteilung zur Folge hat.

"Line elasticity varies directly with line length and has a significant effect on line load. A 60 m long wire will assume only about half the load of a 30 m parallel and adjacent line of the same size and material. This is one reason why long bow and stern lines are inefficient when used in combination with shorter breast and spring lines." ([9], S.10 ff.)

Hinsichtlich des Bestrebens, das Schiff mit Hilfe des Vertäusystems möglichst dicht an der Pier zu halten, spielen die Winkel, die eine Trosse mit der Horizontale und mit der Schiffslängsrichtung bzw. der Normalen auf die Pier bilden, natürlich eine große Rolle.

Die Kraft, die eine Leine ausübt, teilt sich in drei Komponenten auf: eine Komponente wirkt quer zum Schiff, eine längs zum Schiff und die dritte wirkt in der Vertikalen, dämpft also Stampfbewegungen.

Betrachtet man die Querkomponente, die in Richtung der Normalen auf die Pier zeigt, und nimmt an, daß sie mit dieser Normalen in der Vertikale einen Winkel α , in der Horizontale einen Winkel β bildet, so läßt sich die Querkomponente, die das Schiff an die Pier zieht, errechnen als eine Funktion der auf der auf die Trosse wirkenden Kraft F ([3], S.175):

$$F_n = F \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)$$

Die Distanz d , die sich das Schiff während der Einwirkung der Trossen bewegt, ist eine Funktion der Elongation e der Trosse ([3], S.176):

$$d = \frac{e}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)}$$

”The work done by the ropes in absorbing the kinetic energy of the ship, to be evaluated by multiplying the force towards the berth by the distance travelled by the ship, is independent of the angle at which the ropes are passed. This is because to absorb the amount of energy required to stop the ship they will, irrespective of the direction the ropes are passed, undergo the same elongation and be subjected to just the same load. It can therefore be stated that the effectiveness of the ropes in absorbing energy is not affected by the direction they are passed. The only advantage to be gained, which can be important in some cases, is that the nearer the ropes are passed to the direction of the motion the shorter will be the distance traveled by the ship.” ([3], S.176)

Ein Teil der auf das Schiff wirkenden Last wird durch Reibungseinflüsse in den Klüsen und an den Umlenkrollen abgetragen. ”Das Last-Dehnungsverhalten der fest belegten Trossen ebenso wie die Regellast derjenigen Trossen, die über Mooringwinden laufen, wird dadurch modifiziert.” ([10], S.31)

Die Umlenkverluste lassen sich nur schwer abschätzen, das Leichtweiss-Institut hält aber eine Größenordnung von 10-20% bei Rollen für möglich ([10], S.31).

Schließlich ist es wichtig, eine gewisse Vorspannung in den Leinen aufrechtzuerhalten, da das Schiff bei durchhängenden Leinen beim Einwirken äußerer Kräfte zu viel Fahrt aufnehmen kann, bevor die Leinen überhaupt zur Wirkung kommen können.

4 Quellen

References

- [1] Margret Eismann, Wolf-Werner Scheuermann:
Trossenkräfte beim festgemachten Containerschiff.
Diplomarbeit in der Fachrichtung Seefahrt.
Fachhochschule Hamburg, Fachbereich Seefahrt.
Hamburg, 1986.
- [2] F. Vasco Costa:
Moored Ships as Oscillating Systems.
In: The Dock and Harbour Authority, 1983
S.315-318.

- [3] F. Vasco Costa:
Shipping Ropes as Energy Absorbers.
In: The Dock and Harbour Authority, 1978
S.171-177.
- [4] T.E. Schellin:
Berechnung von Trossenkräften vertäuter Objekte,
Teil2.
In: Hansa, Nr. 20 1985,
S.2115-2120.
- [5] G. Van Oortmerssen:
The Mooring of Ships: From Skill to Science.
Rotterdam, Sept. 1982.
- [6] M. Chernjawski:
Mooring of Surface Vessels to Piers.
In: Marine Technology, Jan. 1980
S.1-7.
- [7] W.Weissbach:
Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung.
Braunschweig, 1981.
- [8] P. Dobrinski:
Physik für Ingenieure.
Stuttgart, 1984.
- [9] Oil Companies International Marine Forum:
Guidelines and Recommendations for the Safe Mooring
of Large Ships ant Piers and Sea Islands.
London, 1978.
- [10] A. Führböter, K. Haffke (Wiss. Mitarb.):
Trossenkräfte bei vertäut liegenden Schiffen.
Literaturstudie und Zusammenfassung.
Beauftragt 1976 von Strom- und Hafengebäudeamt, Hamburg.
Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Uni-
versität Braunschweig.
Lehrstuhl für Hydromechanik und Küstenwasserbau,
O. Prof. Dr.-Ing. A. Führböter.