



# Der Mast als Druckstab

**Mast und Rigg sind auch auf einem Fahrtenschiff extrem hohen Belastungen ausgesetzt. Der Kieler Schiffbauingenieur Klaus Schröder beschreibt die einwirkenden Kräfte und gibt Tipps zur Vermeidung von Schäden. Dieser Artikel stammt aus Schröders neuem Sachbuch Yachtschäden und ihre Vermeidung, das der palstek-Verlag im Herbst herausbringen wird.**

**Text und Fotos: Klaus Schröder**

**E**ine große Anzahl von Kräften wirken auf den Mast. Diese unterscheidet man in statische und dynamische Kräfte.

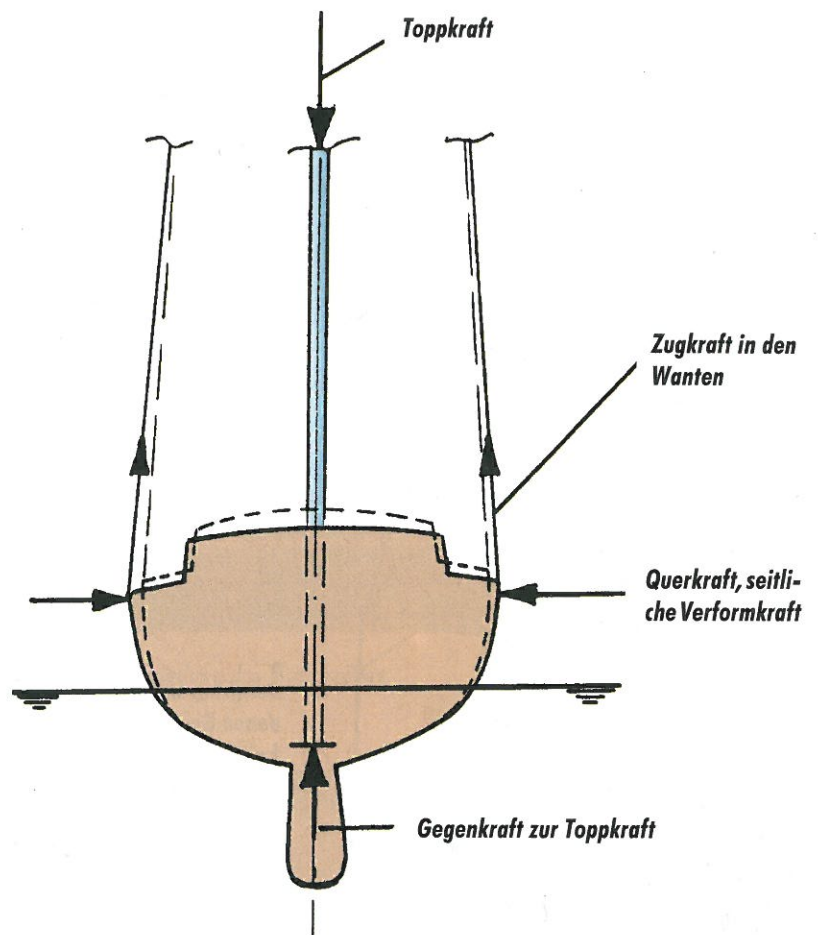
Betrachten wir zunächst die statischen Kräfte und ihre Auswirkungen. Sie lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen:

1. Der Mast muß sein Eigengewicht tragen, mit allen zum Mast gehörigen Bauteilen und allen Drähten des Riggs.

2. Durch das Spannen der Drähte des Riggs, der Wanten und Stagen werden Kräfte in den Mast eingeleitet. Diese Kräfte, die beim Trimmen entstehen, können schon beachtlich sein. Man stelle sich das System aus Schiff und Mast mit seinen Drähten, einfach als Druckstab auf einem Brett vor. Beim Anziehen der Spanndrähte leitet der Druckstab Mast die Spannkraft in das Brett ein. Gesetzt den Fall, daß der Druckstab

völlig starr ist und sich nicht durchbiegt, so wird nun das Brett mit den Enden vorne und hinten nach oben durchgebogen, bis es im Extremfall einem durchgebogenen Flitzbogen gleicht und schließlich bricht.

Aber nicht nur in der Schiffs-Längsrichtung wird das Schiff durchgebogen und verformt, sondern auch im Hauptspannbereich in der Querschiffsebene. Der Hauptspannbereich ist der Spant, in



**Abb 1: Hauptspanntverformung durch statische und dynamische Kräfte, die über Mast und Rigg in den Schiffskörper eingeleitet werden.**

dessen Ebene der Mast und meistens auch das Salonfrontschott steht. Das übermäßige Anspannen der Wanten kann den Hauptspant stark verformen. Die eingeleiteten Zugkräfte der Wanten über die Püttings können zusammen mit den Druckkräften des Mastes den Hauptspant soweit verformen, daß er gegenüber seiner Normalbreite schmaler wird und das Hauptdeck mit Kajüte einen Buckel macht (Abb. 1).

Dieses Schmalwerden des Hauptspantes allein durch Wantenttrimm leuchtet besonders ein, wenn man bedenkt, daß bei den meisten Yachten der Hauptquerverband des Hauptspantes, das Salonschott durch einen Durchgang unterbrochen wird, der einen großen Teil der halben Schottbreite einnimmt. Zusammen mit den dynamischen Kräften im Seegang kann es dann zu Brüchen und Verschiebungen am Salonschott am Durchgang kommen sowie zu Bewegungen in den Anlaminierbereichen des Schottes unter Deck und zur Außenhaut. Diese Schäden sind durch zahllose Beispielfälle aus der Praxis bekannt. Die Durchbiegung des gesamten Schiffskörpers nur durch das

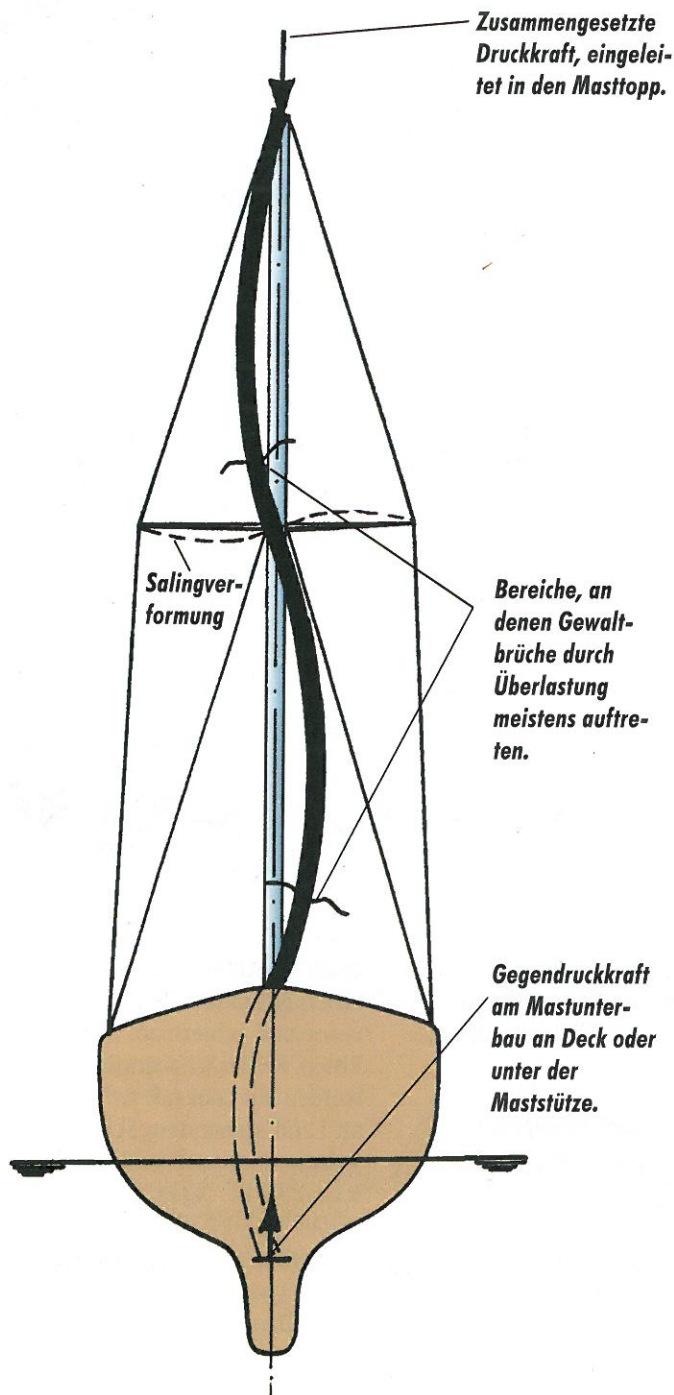
angespannte Rigg ist besonders bei Kurzkielertypen meß- und sichtbar, so z.B. bei folgenden Vorkommnissen.

**Die über die Wanten und Püttings ins Schiff eingeleiteten Kräfte können so groß sein, daß das Hauptdeck mit der Kajüte einen Buckel macht.**

Nach Grundberührung eines Kurzkielers entstanden Brüche im Laminat vorne und achtern am Kielansatz mit Rissen. Bei der Schadensuntersuchung, wurden auf dem mit stehendem Rigg an Land stehendem Schiff die Riggspannung entlastet und Vor- und Achterstag gelöst. Darauf fielen die Schiffsenden in ihre Normallage zurück und die vorher klaffenden Risse am Kielansatz schlossen sich, oder verringerten ihre klaffende Breite. Die Schiffsdurchbiegung war weitgehend bis auf die sta-

**Die untere Bruchstelle eines Mastes im Bereich der Decksdurchführung. Hier, am Lümmellager, werden durch den Großbaum zusätzlich belastende Schubkräfte eingeleitet.**





**Abb. 2:** Durchbiegeverhalten eines hochgetakelten, einfach abgestagten Einsalingmastes. Einleitung der zusammengesetzten Kräfte in den Masttopp. Auswirkung der Summe der statischen und dynamischen Kräfte auf den Mast, der kurz vor dem Gewaltbruch steht.

tische Eigendurchbiegung aufgehoben. Würde man nun das Rigg bei diesem beschädigten Kurzkieler noch mehr anspannen als vorhanden gewesen, dann würden die Risse sichtbar weiter aufklaffen, genau so, wie sie beim Entlasten der Riggs ihre Klaffung verringerten.

Die weit gefährlicheren dynamischen Kräfte, die auf das Schiff über Mast und Rigg wirken, kommen zu den vorhandenen statischen Kräften hinzu. Die Wirkung der Kräfte auf den Mast sind:

1. Beim Einsetzen des Schiffes in den Seegang erfährt der Mast unablässig Stauchbewegungen. Vergleichbar ei-

nem Hammerstiel, den man aufstaucht, damit sich das Eisen festzieht.

2. Zu diesen Stauchkräften, die in den Mast durch die Schläge im Seegang eingeleitet werden, kommen Peitschkraften hinzu.

Beim Einsetzen in den Seegang wird der Mast nicht nur senkrecht gestaucht, sondern auch aus der Bewegung heraus nach vorne und nach Lee gepeitscht. Die Peitschbewegung, die kraftmäßig im Schwerpunkt des Riggs angreift, wird weitgehend vom Achterstag und den Backstagen abgefangen.

3. Durch den Winddruck auf die Segel werden Zug- und Biegekräfte in den Mast eingebracht. Der Winddruck greift im Schwerpunkt der Segel an, und die Segel leiten ihre Zugkräfte über die Vorlieken in die Masten ein.

4. Der Baum gibt seine Schubkräfte, die durch den Segeldruck entstehen, über das Lümmellager in das Mastprofil weiter.

Die statischen und dynamischen Kräfte, die in den Mast eingeleitet werden, kann man vereinfacht zusammenfassen in eine einzige im Masttopp ansetzende Druckkraft. Diese Druckkraft aus den vielen zusammengesetzten Einzelkräften wird nun über den Druckstab Mast in das Schiff eingeleitet und trägt zur Gesamtschiffsdurchbiegung bei. Da der Mast aber kein starres Bauelement ist, sondern ebenfalls Durchbiegungen unterworfen ist, können sich diese Verbiegungen extrem steigern.

**D**ie Abbildung 2 zeigt den Mast kurz vor dem Bruch. Er versucht, der eingeleiteten Kraft im Topp durch elastische Verformung auszuweichen. Da er an den Fixpunkten im Topp und an den Angriffspunkten der Unterwanten gegen das Ausweichen blockiert ist, weicht er an den ununterstützten Bereichen, den freien Feldern im Mastprofil aus. Er bildet die elastische Linie, die sich in der Regel in Form einer Sinus-Kurve, einer doppelten S-Kurve zeigt. Diese Regellinie bleibt solange elastisch, bis der Toppdruck so stark wird, daß es kein Zurückfedern mehr gibt, das Mastprofil sich bleibend verformt und schließlich bricht. Die Bruchpunkte liegen meistens oberhalb des Fixpunktes Saling und/oder oberhalb der Decks-

durchführung beim Steckmast. Sie bilden sich dort, wenn es sich um reine Überlast/Gewaltbrüche handelt.

Ist jedoch ein Bruch durch eine kleine Einbeulung des Mastes bereits eingeleitet, so bricht der Mast an der Einknickung (Beule). Das Mastprofil als Druckstab/Druckrohr darf keinerlei Beschädigungen der Oberfläche, durch Abscheuerung mit Materialabtrag, oder

### **Gewaltsames Übertrimmen kann eine Yacht bis zum Bruch belasten**

Eindellungen aufweisen. Jede Eindellung/Einknickung oder Abscheuerung der Wandung bildet eine Durchmesser-Verengung. An diesem geringeren Durchmesser des Mastrohres werden die Kraftlinien im Material eingeschnürt und bilden dort den Bruchpunkt.

Die kleinste Beule im Mastrohr kann bereits zum Mastbruch führen, wenn die Druckkräfte im Masttopp noch bei weitem nicht für einen Gewaltbruch ausreichen.

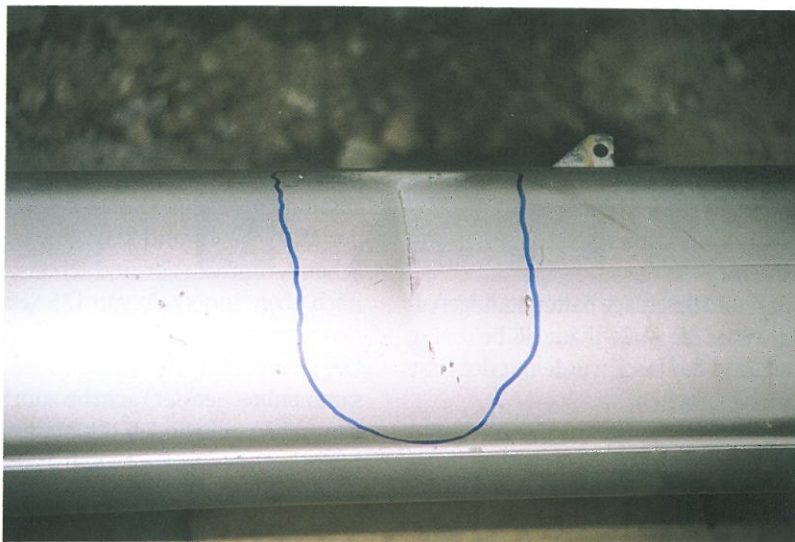
Um Mastbrüche wegen Verdellungen oder Einknickungen des Mastrohres zu vermeiden, ist Sorgfalt und Aufmerksamkeit des Eigners unerlässlich.

**A**uch die gewaltsame Übertrimmung, wenn z.B. bei Regattafahrzeugen der Mast zum Flachziehen des Segelprofils in Schiffs-längsrichtung zu stark gebogen wird, kann zum Bruch beitragen.

Alle auftretenden Kräfte verbleiben im Schiff und wirken sich auf seine Bauteile aus. Die Wirkung zeigt sich immer am schwächsten Glied. So kann die Übertrimmung nicht nur zu Mastbrüchen beitragen, sondern auch zu Schäden am Schiffskörper führen.

Der Schaden, der auf dem Foto unten rechts gezeigt wird, ereignete sich auf einer Yacht, die an den Regatten anlässlich der Kieler Woche Ende der 70-er Jahre teilgenommen hatte.

Mit einem hydraulischen Achtertagsspanner hatte man den Mast zu einer Kurve durchgetrimmt, um das Segelprofil auf Am-Windkursen flacher zu stellen. Diese Vorspannung mit ihren statischen Kräften war jedoch so groß, daß nur noch wenig zusätzliche dyna-



**Einknickung/Eindellung des Mastprofils.**



**Derartig beschädigte Mastprofile müssen sofort ausgewechselt werden. Werden sie weiter benutzt, ist ein Mastbruch vorprogrammiert.**

**Bei diesem Schiff hatte der Mast standgehalten. Der Überlastungsbruch erfolgte am schwächsten Punkt. Die GFK Außenhaut riß beidseitig auf, das Deck mit Bugbeschlag wurde hochgebrochen.**



mische Kräfte aus Seegang und Wind hinzukommen mußten, damit sich die Summe aller Spannungen durch einen Bruch wieder auf Null abbauen konnte. Die Spannungen hatten sich hier, wie in jedem anderen überlasteten System auch, das schwächste Glied in dem System Schiffskörper-Mast-Verdrahtung gesucht.

Mast und Beschlüge hatten standgehalten, aber die Außenhaut riß beidseitig auf, und das Deck wurde mit der Nase hochgebrochen.

Der Bruch begann an der untersten Durchbolzung des nur etwa 450mm am Vorsteven nach unten reichenden Beschlages, am Bolzenloch. Diese Perforierung des Vorstevens war die schwächste Stelle im System. Der Schaden ist noch relativ problemlos abgegangen. Das Schiff konnte unter Motor nach Kiel zurückkehren.

Daß durch die Summe aller Durchbiegekräfte durch Seegang, Wind und Übertrimmung auch Schiffe verloren gehen

können, beweist der Fall der ONE AUSTRALIA, die am America's-Cup vor San Diego/Kalifornien im Frühjahr 1995 teilnahm. Diese 22m lange Regattayacht ist bei Windstärken von knapp 5 Beaufort und harmlosem Seegang regelrecht zusammengeklappt. Das Schiff brach in der Mitte durch und klappte wie ein Scharnier mit dem Vor- und Achterschiff nach oben. Innerhalb von 135 Sekunden war die Yacht gesunken.

Der gesamte Schadensablauf, vom Zusammenbrechen der Yacht bis zum Sinken mit Verschwinden des Masttopps in der See, war weltweit durch das Fernsehen ausgestrahlt worden. Diese Kohlefaserleichtbauyacht hatte den Durchbiegekräften nicht standgehalten. Auf den Schiffskörper wirkten über Vor- und Achterstag Zugkräfte von ca. 25t und ein Ballastkielgewicht von 17t. Neben vielen anderen Ursachen war hier die Übertrimmung wohl entscheidend an dem Schiffverlust beteiligt.

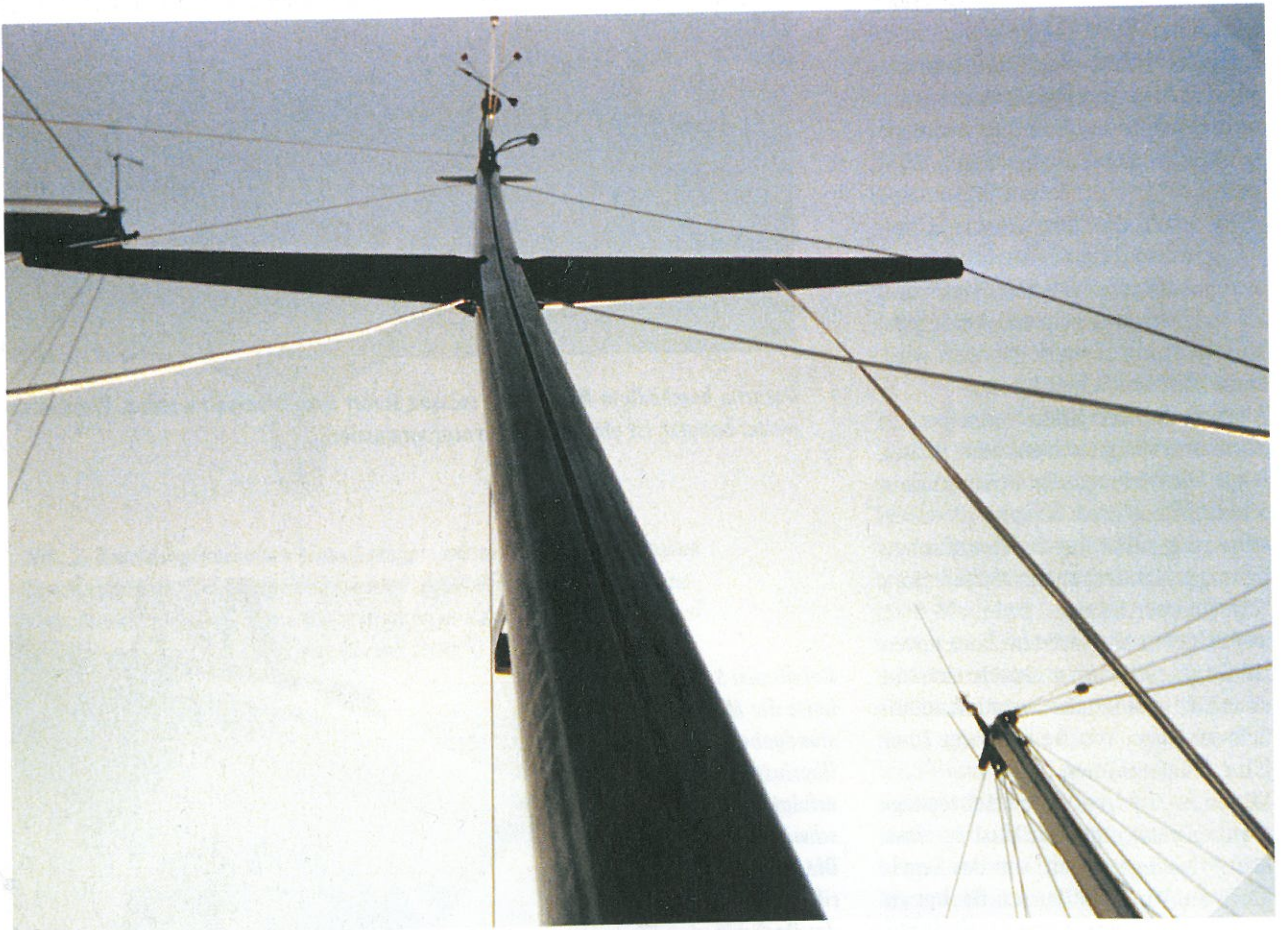
Dieses Beispiel zeigt nochmals deutlich,

was die Summe aus statischen und dynamischen Kräften am Schiff anrichten kann.

Durch die folgenden Maßnahmen kann der Eigner Schäden am Rigg vermeiden:

1. Sorgfältiger Trimm seines Riggs, Vermeidung von gewaltsamer Übertrimmung.
2. Intensive Kontrolle der Aluminiumspieren auf Verdellungen und Verknickungen.
3. Auch leicht eingedellte Alu-Spieren muß man sofort auswechseln lassen. Ein Weitersegeln mit solchen Spieren programmiert den Bruch vor.

Viele Mastbrüche entstehen durch reine Stauchung bei Starkwind und Seegang. Bei etlichen dieser Gewaltbrüche fließt als Ursache Übertrimmung mit ein. Die weitaus überwiegende Mehrzahl von Mastbrüchen hat jedoch ihre Ursache im Bruch von Walzterminals der Wanten und Stagen, sowie anderer Mast- und Decksbeschlüge; dazu mehr im nächsten *palstek*.



**Eine Maststauchung mit 120mm Ausknickung im Topp. Das Materialgefüge des Aluminiums an der Biegestelle ist zerstört. Der Mast hat seine Drucksteifigkeit verloren, das Mastrohr muß ausgewechselt werden.**