

# Vibrieren des Mastes

## 1 Theoretischer Hintergrund

Vibrationen im Mast treten bei kleineren Windgeschwindigkeiten (theoretisch 2 - 6 m/s, entsprechend Windstärke 2 - 4 ) und der Windrichtung etwa quer zum Schiff auf. Der Mast schwingt dann in Längsschiffsebene, d.h. quer zur Windrichtung.

Der Mast wird zu dieser Schwingung von sich im "Totwassergebiet", d.h. der Leeseite des Mastes alternierend vom Mast ablösenden Wirbeln angeregt, dem sogenannten "Kärmän-Effekt". Die Wirbelablösefrequenz ist abhängig von der Windgeschwindigkeit, den Mastabmessungen in Längsschiffsebene und in geringem Umfang von der Aussenkontur des Mastquerschnittes. Der Kärmän-Effekt birgt trotz seiner grossen technischen Bedeutung nicht nur für Segelbootmasten sondern auch für Schornsteine, Fernשמasten und Hochspannungsfreileitungen immer noch viele ungeklärte Einzelheiten. Wenn die Eigenfrequenz des Mastes in Längsschiffsebene mit der Wirbelablösefrequenz zusammenfällt, gerät der Mast in Resonanz (dem sog. "stall-flutter"). Die Vibrationen werden spürbar, wenn die Windgeschwindigkeit etwa 80 % der "Resonanzwindgeschwindigkeit" erreicht, und sie verstärken sich dann mit wachsender Windgeschwindigkeit (weil der Wind den schwingenden Mast breiter auffasst als den geometrischen Abmessungen entspricht), bis sie wieder abnehmen, wenn die Windgeschwindigkeit auf etwa das 1.5 fache der "Resonanzwindgeschwindigkeit" angewachsen ist.

## 2 Faktoren, die die Amplitude beeinflussen

Die Amplitude (=Abstand zwischen der Aussenlage und Mittellage des Mastes) der Schwingungen hängt in hohem Masse vom Quermass (Abmessung in Längsschiffsebene), aber auch das Profildgewicht und die äussere mechanische Dämpfung (theoretisch auch die aerodynamische Dämpfung) beeinflussen die Amplitude.

Durch Verkleinern des Profilmasses in Längsschiffsebene erreicht man ein Abnehmen der Amplitude. Erhöht man das Profildgewicht, ergibt sich ebenfalls eine Abnahme der Amplitude. Ein erhöhtes Gewicht ist zwangsläufig die Folge von verkleinerten Profilmassen, wenn die Flächenträgheitsmomente längsschiffs und querschiffs aus Festigkeitsgründen beibehalten werden sollen.

Wünscht man ein Mastprofil mit kleinerer Amplitude, wird es also schwerer und damit teurer. Auch eine stärkere Dämpfung (nur die mechanische Dämpfung ist von praktischer Bedeutung) verringert die Amplitude, sie ist aber schwer zu erreichen. Wir arbeiten fortlaufend auf diesem Gebiet, aber bis jetzt haben wir keine geeigneten Lösungen gefunden.

Eine Art der Dämpfung ist das Verstagen der Mastmitte in Längsschiffsrichtung sowohl nach vorn als auch nach achtern mit verhältnismässig kräftigem Draht (normales Seil lässt jeden Dämpfungseffekt vermissen).

Ein prinzipiell anderer Weg, die Schwingungsauslässe zu verringern und meistens auch völlig auszuschalten ist der, die gleichförmig wechselnde Wirbelablösung zu stören. Der von uns empfohlene "Schlips" arbeitet nach diesem Prinzip. Der vibrationshemmende Effekt beruht mit grösster Wahrscheinlichkeit darauf, dass die Wirbelablösung hinter dem biegsamen "Schlips" unregelmässig wird und dass dadurch eine Resonanz ausgeschlossen wird

Das Prinzip der wirbelstörenden Spiralen (sog. Scruton-Spiralen, die man an Spitzen hoher Schornsteine erkennen kann) kann bei Masten angewendet werden, indem man Leisten schraubenförmig um das mittlere Fünftel des Mastes anbringt. Um die beste Wirkung zu erreichen, sollen die Höhe der Leisten mindestens

$0.1 \times D$  ( $D$  = Aussenabmessung des Profils in Längsschiffsebene) die Steigung etwa  $5 \times D$  und der vertikale Abstand zwischen zwei benachbarten Leisten etwa  $1,7 \times D$  betragen.

### **3 Faktoren, die die Resonanzwindgeschwindigkeit beeinflussen**

Wenn man Massnahmen ergreift, die die Resonanzwindgeschwindigkeit ändern, erscheint die Vibration bei einer anderen Anströmgeschwindigkeit. Man verlagert also den Resonanzbereich.

Bei bestimmten Gelegenheiten kann es sich doch als praktisch erweisen, die Resonanzwindstärke zu ändern. Für einen gegebenen Mast kann die Eigenfrequenz u.a. geändert werden durch Verstagen der Mastmitte oder durch Ver-grössern der Axial-Belastung. Eine Verstagung der Mastmitte (die mit kräftigem Draht nach vorn und nach achtern mit wenigstens  $20^\circ$  Winkel zwischen Draht und Mast ausgeführt sein muss, um wirksam zu sein) kann eine erhebliche Erhöhung der Eigenfrequenz des Mastes und damit eine Erhöhung der Resonanzwindgeschwindigkeit ergeben.

Eine Vergrösserung der Axial-Last (die durch Spannen des Vor-/Achterstages erreicht werden kann) ergibt eine Verringerung der Eigenfrequenz des Mastes und damit eine Verkleinerung der Resonanzwindgeschwindigkeit. Wird die Spannung im Vor-/Achterstag um 50% erhöht, nimmt die Resonanzwindgeschwindigkeit um etwa 15% ab, man hat es also hier mit sehr kleiner Wirksamkeit zu tun.

### **4 Literatur**

SBN 1975	Kap. 21:64
Sachs, Peter	Windforces in Engineering
Rosemeier	Winddruckprobleme bei Bauwerken
Petersen	Abgespannte Masten und Schornsteine