

# Das dynamische Verhalten eines vorgespannten Kabelnetzes

Autor(en): **Jensen, Jens Jacob**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht**

Band (Jahr): **9 (1972)**

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-9585>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

**Das dynamische Verhalten eines vorgespannten Kabelnetzes**

The Dynamic Behaviour of a Prestressed Cable-Net Structure

Le comportement dynamique d'un filet de câbles précontraint

**JENS JACOB JENSEN**  
The Technical University of Norway

1. EINLEITUNG

Die heutigen Berechnungsverfahren der Seil- und Membrantragwerke ermöglichen eine theoretische Berechnung dieser Systeme in statischer und dynamischer Beziehung (1), (2), (3). Für eine dynamische Untersuchung aber, sind die Dämpfungseigenschaften von Bedeutung. Bisher liegen wenige Angaben über die Dämpfungseigenschaften ausgeführter Seil- und Membrantragwerke vor. Versuche in grossem Masstab können Auskunft über die Dämpfungseigenschaften, die Einwirkung der umgebenden Luft sowie das dynamischen Verhalten unter Windlast geben. Im folgenden soll über den Bau eines vorgespannten Kabelnetzes für die Durchführung von dynamischen Versuchen in grossem Masstab, und die erzielten Ergebnisse berichtet werden.

2. VERSUCHSOBJEKT

Die erbaute Dachkonstruktion ist ein vorgespanntes Kabelnetz, bestehend aus gegenseitig gekrümmten Stahlseilen. Das Tragwerk überspannt eine Fläche von etwa 170 m<sup>2</sup> und ist durch vier Stützen gestützt. Das Netz weist eine Maschenweite von 1,50 m auf und ist an Randseilen, die über den Stützen und im Boden verankert sind befestigt. Als Dachhaut wurde ein Polyestergewebe mit beidseitiger PVC-Beschichtung gewählt. Die Dachfolie ist über das Kabelnetz gespannt und an den Netzknoten befestigt.

Für die Netz- und Randseile wurden verzinkte Spiraldrahtseile mit einer Zugfestigkeit von 145 kp/mm<sup>2</sup> verwendet. Die Netzseile bestehen aus zwei parallelen Spiralseilen von je  $\phi$  9,0 mm ( $F=50$  mm<sup>2</sup>), während die Randseile bestehen aus drei parallelen Spiralseilen von

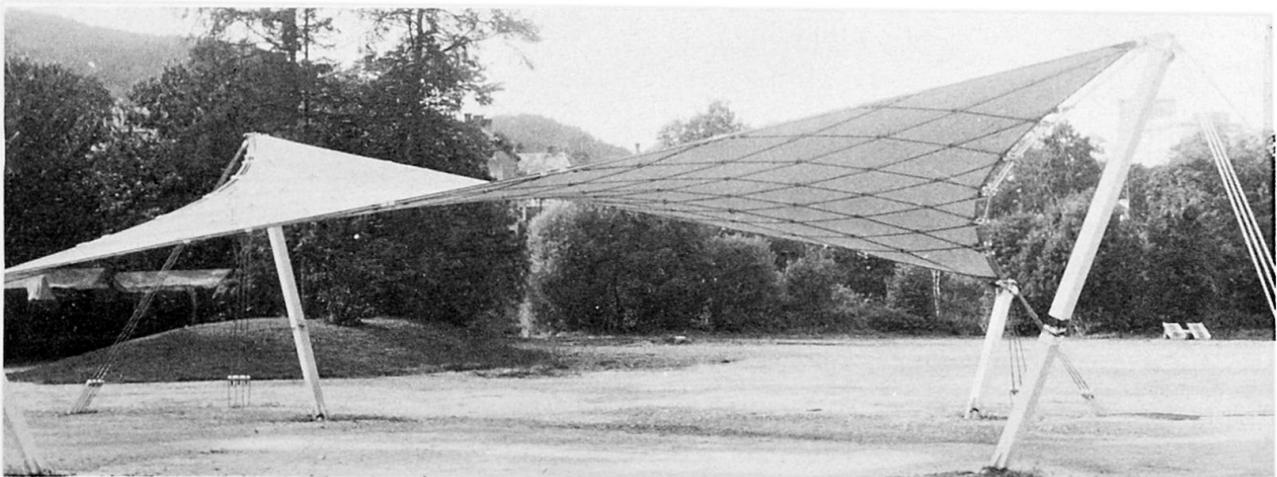


Bild 1. Versuchsobjekt

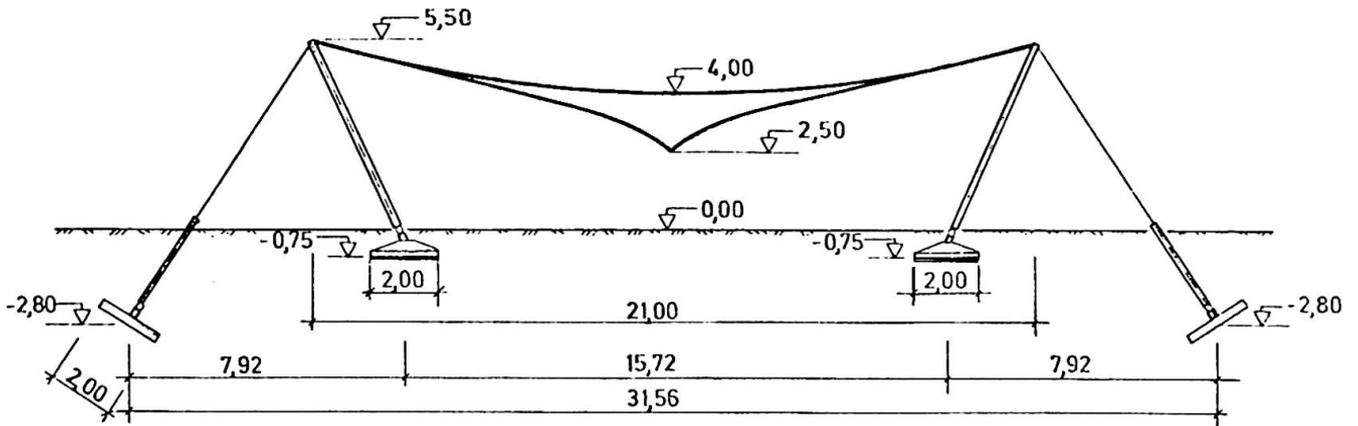


Bild 2. Abmessungen des Versuchsobjektes

je  $\phi$  21,0 mm ( $F=260$  mm<sup>2</sup>). Die inneren Knotenpunkte verbinden die sich kreuzenden Netzseile durch Klemmwirkung, und die Netzseile sind an den Randseilen gelenkig angeschlossen.

Die Seilverankerungen der Netz- und Randseile sollen weil es sich um eine Neuentwicklung handelt, kurz etwas näher beschrieben werden. Sie vermittelt die Verbindung zwischen Seil und einem Anschlussstück und dient zum Anschluss der Netzseile an den Knotenpunkten der Randseile, und zum Anschluss der Randseile an den Bodenverankerungen. Es handelt sich um ein patentiertes Kompressionssystem, wobei das Anschlussstück durch Explosive an das Kabelende aufgedrückt wird. Bei Detonation der Explosive wird das Anschlussstück einem Aussendruck der ein Mehrfaches der Fließgrenze des Materials des Anschlussstückes beträgt ausgesetzt. Man erhält somit eine Verformung des Anschlussstückes und des Seilquerschnittes, und erzielt die Verbindung zwischen Seil und Anschlussstück (Bild 4).

Zur Festlegung der Hauptabmessungen der Netz- und Randseile sowie der Hauptabmessungen der Stützen und Bodenverankerungen wurden die Schnittkräfte des Kabelnetzes mittels einfacher Seilstatik ermittelt. Für eine genauere Untersuchung des Tragwerkes wurden elektronische Berechnungen nach dem in (1) aufgestellten Verfahren durchgeführt. Es wurde mit zwei Berechnungsmodellen gerechnet, ein großes Modell und ein einfaches Modell. Das große Modell enthält 208 Elemente und 117 Knotenpunkte und kommt dem vorhandenen Kabelnetz sehr nahe. Das kleine Modell ist im Bild 5 wiedergegeben und enthält 48 Elemente und 25 Knotenpunkte.

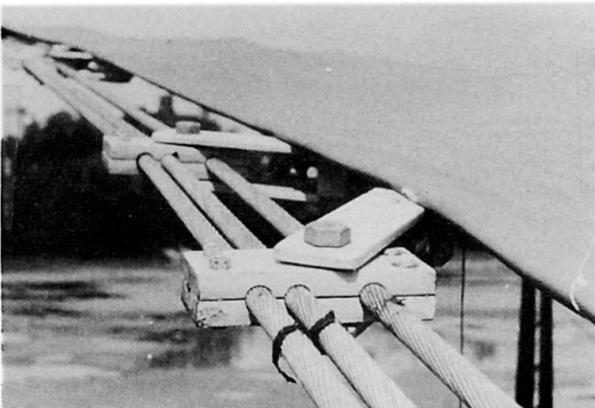


Bild 3. Randknotenpkt.

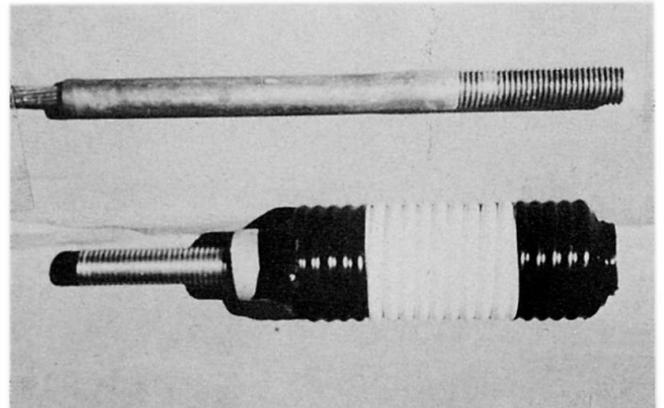


Bild 4. Seilverankerung

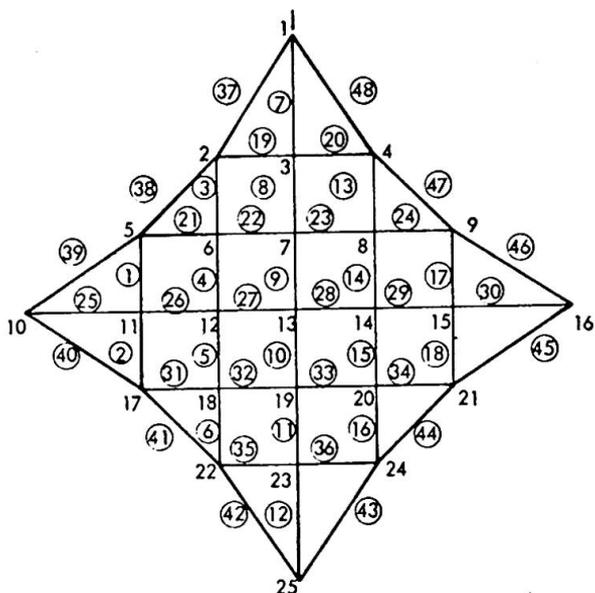


Bild 5.

Kleines Berechnungsmodell

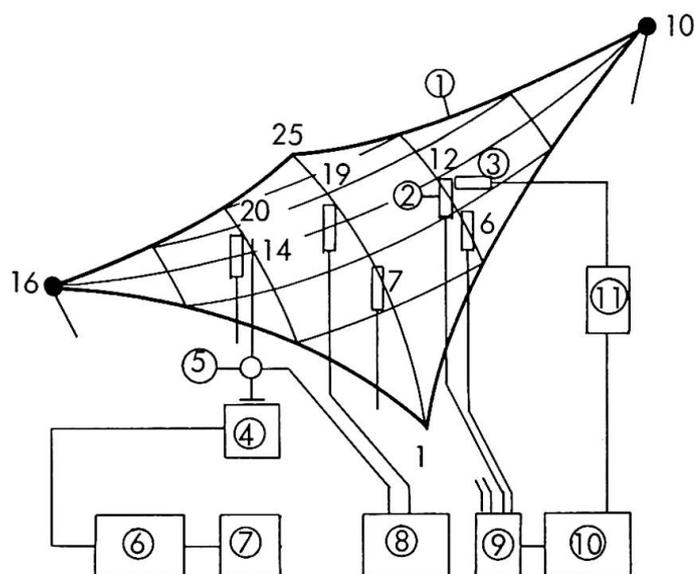


Bild 6. Versuchseinrichtung

1. Kabelnetz 2. Verschiebungsmesser 3. Luftdruckmesser 4. Vibrator 5. Kraftmesser 6. Verstärker 7. Oszillator 8, 10. Schreiber 9, 11. Messbrücke.

### 3. VERSUCHS- UND MESSEINRICHTUNGEN

Die Durchführung einer experimentellen Untersuchung des Kabelnetzes, speziell im Rahmen eines Feldversuches, erforderte besondere Einrichtungen. Vor allem wurden die Versuche auf das dynamische Verhalten des Kabelnetzes konzentriert, womit die verschiedenen Eigenfrequenzen, Schwingungsformen und Dämpfungseigenschaften sowie die Einwirkung des Luftdruckes und das Verhalten bei Wind untersucht werden sollte. Statische Versuche wurden vor und nach der dynamischen Untersuchung, vorwiegend um die Geometrie und den Spannungszustand des Kabelnetzes zu überprüfen durchgeführt. Das Versuchsprogramm sah freie und erzwungene Schwingungen des Kabelnetzes vor, und zwar mit und ohne Dachhaut. Durch Luftdruckmessungen während des Schwingungsvorganges sollten Fragen in bezug auf die aerodynamische Dämpfung und das Verhalten der umgebenen Luft geklärt werden. Die allgemeine Versuchseinrichtung ist im Bild 6 dargestellt.

### 4. VERSUCHSERGEBNISSE

#### Freie Schwingungen

Das Kabelnetz wurde entweder von Hand, oder durch Loslassen eines aufgehängten Gewichtes im Kabelnetz in Schwingungen versetzt. Dabei konnten die tieferen Eigenschwingungsformen mit den zugehörigen Eigenfrequenzen und Dämpfungseigenschaften bestimmt werden. Die Versuche wurden mit und ohne Dachhaut und mit variabler Masse durchgeführt. Die Stufen der Massenverteilung werden wie folgt bezeichnet:

- $m=1$ : Masse entsprechend eine volle Belastung von etwa  $10 \text{ kp/m}^2$  (23,0 kp in jedem inneren Knotenpunkt), zusätzlich Eigengewicht.
- $m=\frac{1}{2}$ : Masse entsprechend einer Belastung von 23,0 kp in jedem zweiten inneren Knotenpunkt, zusätzlich Eigengewicht.
- $m=0$ : Masse entsprechend Belastung infolge Eigengewicht.

Die gemessenen Eigenfrequenzen der ersten Schwingungsform (Bild 7) sind zusammen mit berechneten Werten als Funktion der Masse im Bild 8 dargestellt. Die rechnerischen Werte der Eigenfrequenzen sind am einfachen Berechnungsmodell (Bild 5) ermittelt. Eine wichtige Erkenntnis dieser Versuchsergebnisse ist die unterschiedliche

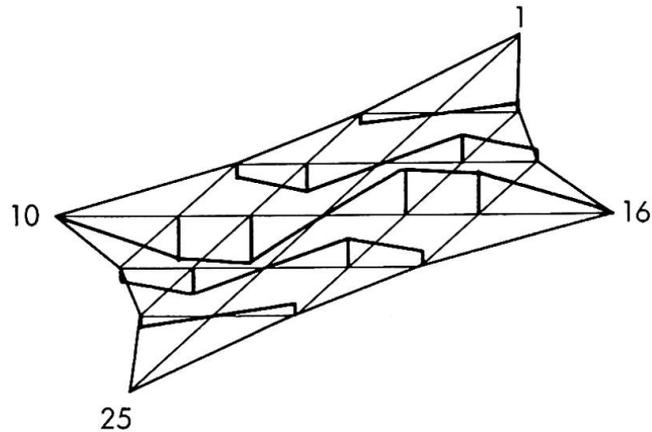


Bild 7. Erste Schwingungsform

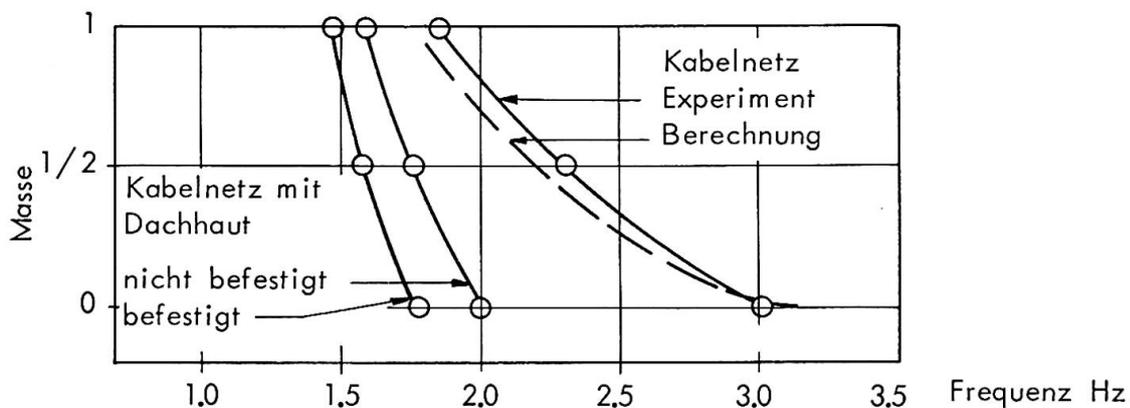


Bild 8. Erste Eigenfrequenz als Funktion der Masse

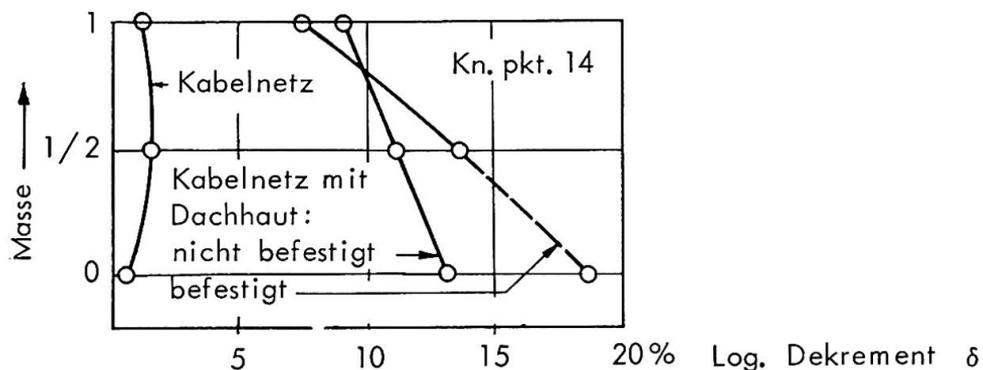


Bild 9. Dämpfung als Funktion der Masse

Massen- und Frequenzabhängigkeit des Kabelnetzes mit und ohne Dachhaut. Erstens liegen die Frequenzen des Kabelnetzes ohne Dachhaut höher, zweitens nehmen die Frequenzen mit abnehmender Masse stärker zu als beim Kabelnetz mit Dachhaut. Die theoretisch oder rechnerisch, ermittelten Eigenfrequenzen folgen im Ganzen den Frequenz-Masse-Verlauf des Kabelnetzes ohne Dachhaut. D.h. die rechnerischen Voraussetzungen stimmen gut mit den Verhältnissen des Kabelnetzes überein, im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Kabelnetz mit Membranhaut. Aus dem Bild 8 sieht man, dass das Kabelnetz mit Dachhaut für verschiedene Massen mit der gleichen Frequenz schwingt. Es ist anzunehmen, dass das Kabelnetz mit Dachhaut die Schwingung mit einer Zusatzmasse ausführt (die viel grösser als die Masse der Dachhaut sein muss), und dass diese Masse von der mitschwingenden Luft herkommen muss.

Die Dämpfungsmasse der ersten Schwingungsform sind als Funktion der Masse im Bild 9 dargestellt. Als Mass der Dämpfung wird das logarithmische Dekrement verwendet:  $\delta = \ln(A_i/A_{i+1})$  wobei  $A_i$  und  $A_{i+1}$  zwei aufeinander folgende Schwingungsamplituden darstellen. Man erkennt die unterschiedlichen Dämpfungsmasse der Versuche mit und ohne Dachhaut. Weiter erkennt man eine gewisse Abhängigkeit zwischen Masse und Dämpfung bei Kabelnetz mit Membranhaut; für das Kabelnetz ohne Dachhaut, aber nicht. Für das Kabelnetz mit Dachhaut nehmen die Dämpfungsmasse mit abnehmender Masse zu. Die Strukturdämpfung des Kabelnetzes konnte somit in dieser Weise getrennt werden. Sie beträgt etwa  $\delta = 1-2\%$ . Die restliche Dämpfung setzt sich aus die Strukturdämpfung des Dachhautes und die aerodynamische Dämpfung zusammen. Es darf angenommen werden, dass die aerodynamische Dämpfung von der Masse abhängig ist. Um diese Annahme zu überprüfen wurde der Einfluss der Luft durch Luftdruckmessungen untersucht.

Durch Schwingungen eines Tragwerkes in freier Luft wird die umgebende Luft in Bewegung gesetzt. Es entsteht somit eine Druckvariation des umgebenden Luftmediums, die die Schwingung eines leichten Tragwerkes beeinflussen kann. Gleichzeitige Messungen des Luftdruckes und der Verschiebungen des Tragwerkes haben gezeigt, dass der Extremalwert des Druckes beim grössten Ausschlag erreicht wurde (Bild 10). Es handelt sich somit um einen Beschleunigungsdruck im Gegensatz zu einem Geschwindigkeitsdruck. Im letztgenannten Fall wäre eine Phasenverschiebung von etwa  $\pi/2$  zwischen Druck und Verschiebung zu erwarten. Das Entstehen und die Berechnung des Luftdruckes kann auf die Theorie der mitschwingenden Luftmasse zurückgeführt werden. Die Folgen einer mitschwingenden Luftmasse sind normalerweise eine Herabsetzung der Resonanzfrequenzen, was auch deutlich bei den Versuchen der freien Schwingungen gezeigt wurde. Weiter kann die aerodynamische Dämpfung infolge des Entstehens der Luftdrücke erklärt werden.

Überschlägig kann die gesamte mitschwingende Masse der Luft als

$$m'' = C_m \rho_L a^3$$

bestimmt werden, wobei  $\rho = 0,125 \text{ kp sek}^2/\text{m}^3$  die Densität der Luft, und  $2a$  die Abmessungen (Seitenlänge) des Tragwerkes darstellen. Die Konstante  $C_m$  hängt von der Form des Tragwerkes ab und konnte für das untersuchte Tragwerk auf  $C_m = 2,5-7,5$  angesetzt werden.

Die aerodynamische Dämpfung konnte als

$$\delta = \frac{C_D \rho_0 F}{2m\omega^2 r_0} = \frac{1}{2} C_D \frac{m'' F}{F_{Tot} m}$$

gefunden werden (4). Dabei bedeutet  $p_0$  den Beschleunigungsdruck der Luft bei der Schwingungsamplitude  $r_0$ , und dem Kreisfrequenz  $\omega$ .

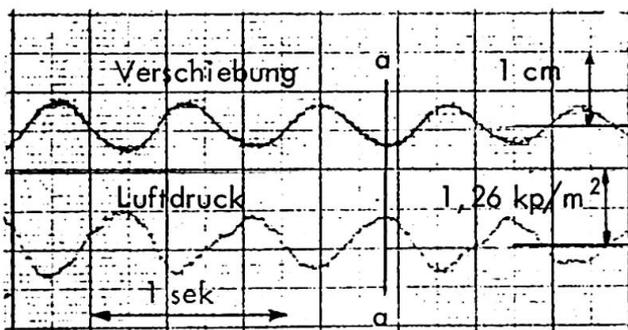


Bild 10. Verschiebung und Luftdruck in Kn.pkt. 12

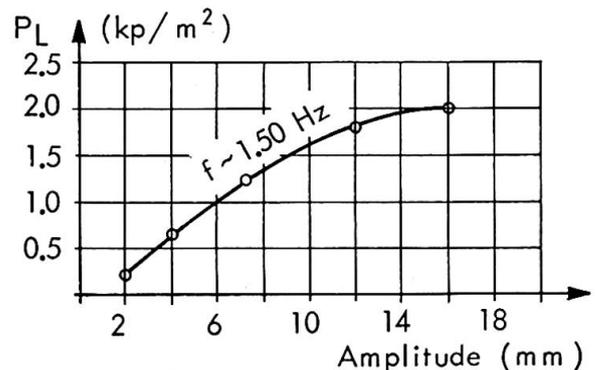


Bild 11. Gemessene Luftdrücke Kn.pkt. 12

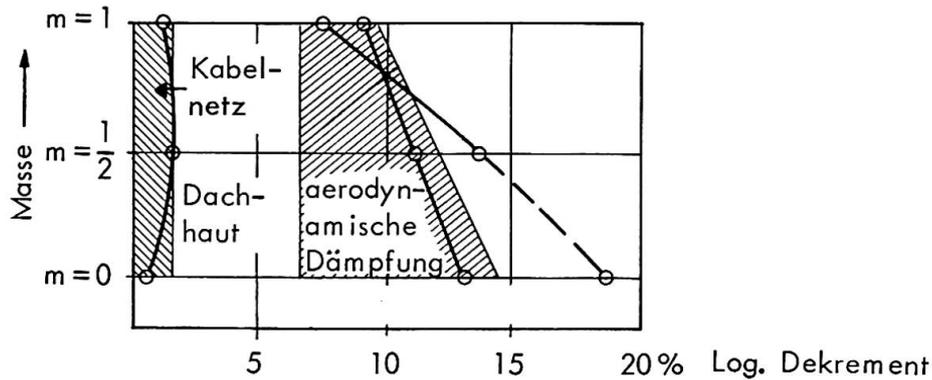


Bild 12. Trennung der Dämpfungseigenschaften

$m/F$  bedeutet die mittlere Masse des schwingenden Tragwerkes pro Flächeneinheit, und  $m''/F_{\text{Tot}}$  die entsprechende mittlere Masse pro Flächeneinheit der mitschwingenden Luft. Die Konstante  $C_p$  wurde bei den ausgeführten Versuchen als  $C_p=0,03-0,07$  gefunden.<sup>P</sup> Wichtig ist, dass die aerodynamische Dämpfung umgekehrt proportional der Masse ist, und dass die Bedeutung der aerodynamischen Dämpfung bei Schwingungen mit grossen Lasten (z.B. Schneelast) abnimmt. Die im Bild 9 erzielten Dämpfungsverhältnisse lassen sich wie folgt erklären:

Die Gesamtdämpfung des Tragwerkes besteht aus der Strukturdämpfung des Kabelnetzes, der Strukturdämpfung der Membranhaut und der aerodynamischen Dämpfung. Bild 12 zeigt die Trennung der Dämpfungseigenschaften.

#### Erzwungene Schwingungen

Durch einen Vibrator konnte das Tragwerk in erzwungenen Schwingungen versetzt werden. Dabei sollten die verschiedenen Resonanzstellen und die zugehörigen Schwingungsformen aufgenommen werden. Bei stetiger Änderung der Erregerfrequenz des Vibrators konnten die Resonanzstellen des Kabelnetzes entdeckt werden. Als Beispiel sollen die experimentell gefundenen Resonanzstellen des Kabelnetzes ohne Dachhaut für den Fall  $m=1$  d.h. Voll-last aufgeschrieben werden (4):

1,85, 1,90, 2,00, 2,40, 2,55, 2,80, 2,85, 3,15, 3,25, 3,40, 3,70 Hz.  
Die theoretisch ermittelten Eigenfrequenzen stimmen gut mit den experimentell gefundenen Werten des Kabelnetzes ohne Dachhaut überein. Man erkennt, dass die Eigenfrequenzen des Kabelnetzes sehr nahe liegen.

Ein beschränkter Zahl der Resonanzstellen des Kabelnetzes mit Dachhaut konnte ebenfalls gefunden werden.

Die Aufnahmen von Response-diagrammen wurde unter Konstanthalten der Erregerkraft (3,0 kp Doppelamplitude) in den Knotenpunkten 14 bzw. 20 durchgeführt. Dabei wurde der Unterschied der zwei Systemen, Kabelnetz ohne Dachhaut, und Kabelnetz mit Dachhaut, sehr deutlich. Als Beispiel sind die Frequenz-Amplituden-diagramme der Resonanzstelle des ersten Schwingungsformes im Bild 13 dargestellt. Erstens ist die Verschiebung der Resonanzstelle, zweitens der Unterschied den Ausschläge deutlich. Man erkennt sofort der Einfluss der Dämpfung.

#### Beobachtungen beim Wind

Der natürliche Wind ist der massgebliche Schwingungserreger eines Seil- oder Membrantragwerkes. Durch Wirbelbildungen, Windstösse oder durch Flattern, können die Tragwerke dynamisch beansprucht werden. Beobachtungen des vorhandenen Tragwerkes haben

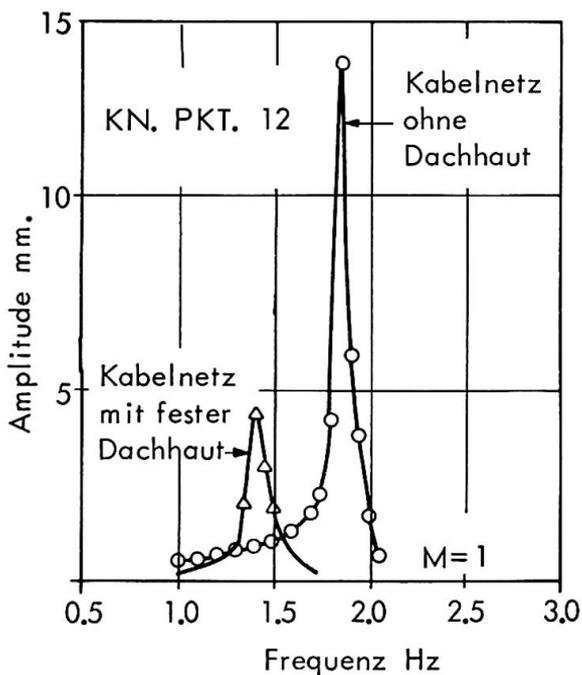


Bild 13. Response-diagramm

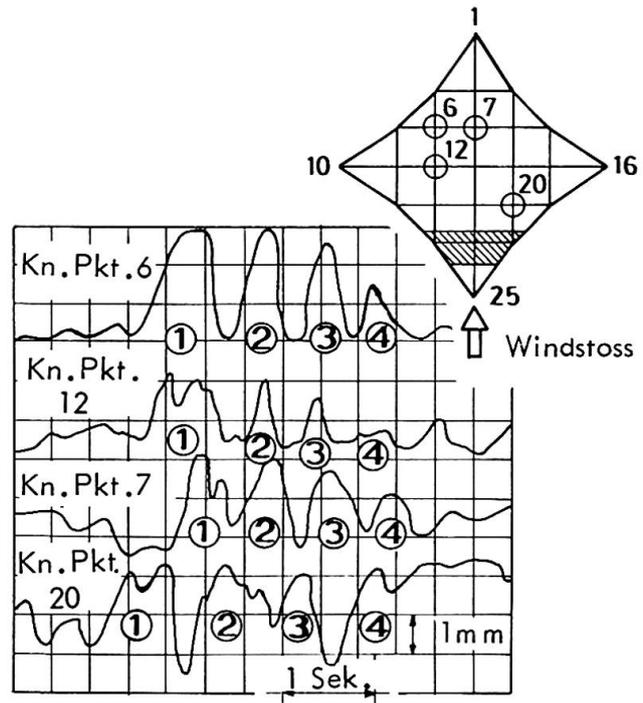


Bild 14. Windstoss

Auskunft über die Häufigkeit und die Entfaltungsdauer von Windböen gegeben. Die Bewegung der Windböen quer zur vorhandene Dachfläche wurde registriert, und auf Grund der Beobachtungen darf bei Berechnungen mit einem "Wandern" der Windböen gerechnet werden. Bild 14 zeigt das Fortschreiten einer Windböe quer zum vorhandenen Bauwerk. Die mitschwingende Luftmasse ist auch unter Windlast bei leichten Tragwerken in Rechnung zu stellen

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Durch experimentelle Untersuchungen in grossem Masstab wurde das dynamische Verhalten eines vorgespannten Kabelnetzes untersucht. Insbesondere haben die Versuche eine bessere Kenntnis der Dämpfungseigenschaften, der Einwirkung der umgebenden Luft, sowie des Verhaltens des Tragwerkes unter Windlast gegeben.

## LITERATUR

- (1) Jensen, J.J.:  
"Eine statische und dynamische Untersuchung der Seil- und Membrantragwerke" Division of Structural Mechanics, The Norwegian Institute of Technology, The University of Trondheim, Norway. Report No. 70-1, September 1970.
- (2) Knudson, W.C.:  
"Static and Dynamic Analysis of Cable-Net Structures" University of California, Berkeley. April 1971.
- (3) Argyris, J.H. und Scharpf, D.W.:  
"Berechnung vorgespannter Netzwerke" Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. München 1970.
- (4) Jensen, J.J.:  
"Das dynamische Verhalten eines vorgespannten Kabelnetzes" Division of Structural Mechanics, The Norwegian Institute of Technology. Report No. 71-2. September 1971.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide