

Beanspruchung der Seildrähte bei Zugbelastung

von

Mikio NAKAI*, Susumu SATO** und Toshio AIDA**

(Received March 31, 1973)

Zusammenfassung

Wir legen hier die Berechnungsergebnisse für die in den Drähten von Spiralseilen und Litzenseilen auftretende Beanspruchung bei gehemmter und freier Eigendrehung dar, die wir mit einer für die Erforschung von mechanischen Eigenschaften geeigneten analytischen Methode gefunden haben, und vergleichen diese Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen.

1. Einleitung

Über die Beanspruchung von Seildrähten wurden viele Untersuchungen veröffentlicht,^{1),2),3),4),5),6)} aber in diesen Untersuchungen wurde die Beanspruchung unter einfachen geometrischen und dynamischen Bedingungen bestimmt, ohne daß ein Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den Berechnungsergebnissen gemacht worden wäre. Daher kann die Beanspruchung der Seildrähte bei gehemmter Eigendrehung nach einer analytischen Methode, die in diesen Veröffentlichungen angegeben ist, verhältnismäßig genau berechnet werden, aber für freie Eigendrehung besteht diese Möglichkeit nicht. Außerdem ist aus diesen Veröffentlichungen nicht ersichtlich, daß bei Zug die Drahtbeanspruchungen an verschiedenen Drahtstellen der Litzenseile sehr große Unterschiede zeigen.

Wenn Seile einer Zugbelastung ausgesetzt sind, entsteht im Draht nicht nur eine Zugbeanspruchung, sondern auch eine Biegebeanspruchung, Torsionsbeanspruchung usw. Aber im allgemeinen beschränkt man sich wegen der Schwierigkeit einer genaueren Bestimmung dieser Beanspruchungen auf die Zugbeanspruchung, die bei Zug wohl den größten Wert aufweist.

* Institut für Maschinenbau

** Institut für Präzisionsmechanik

So wurde bisher für Drähte nur die folgende einfache Beanspruchungsgleichung angewandt:

$$\sigma_t = \frac{\bar{P}}{A_r} \quad (1)$$

Dabei ist: \bar{P} : Zugbelastung, A_r : Seilquerschnitt

Weiter verwendete man Näherungs-Gleichungen, die den Einfluß des Schlagwinkels berücksichtigten.⁶⁾

$$\begin{aligned} \text{Für Spiralseile} \quad \sigma_t &= \frac{\bar{P}}{A_r} \cos \alpha_s \\ \text{Für Litzenseile} \quad \sigma_t &= \frac{\bar{P}}{A_r} \cos \alpha_s \cos \alpha_r \end{aligned} \quad (2)$$

α_r : Seilschlagwinkel α_s : Litzenschlagwinkel

Aber aus den theoretischen und experimentellen Untersuchungen mit Spiralseilen von einfacher Ausführung zeigte sich, daß die beiden obigen Gleichungen (1) und (2) fast gleiche, wenn auch etwas niedrigere Beanspruchungswerte ergaben als die Versuche bei gehemmter Eigendrehung, und daß sich diese Gleichungen für die Berechnung der Beanspruchung der Drähte bei freier Eigendrehung nicht eignen.⁷⁾ D.h. bei freier Eigendrehung entsteht im Draht eine viel größere Beanspruchung als sich aus Gl.(1) ergibt.

Wegen der komplexen Struktur der Litzenseile wurde bisher die Beanspruchung in diesen Seilen noch nicht hinreichend ermittelt und es wurde noch nicht untersucht, ob sich Gl.(1), (2) für die Beanspruchungsberechnung eignen.

In der vorliegenden Abhandlung bringen wir die Berechnungsergebnisse für die in den Drähten von Spiralseilen und Litzenseilen auftretende Beanspruchung bei gehemmter und freier Eigendrehung, die wir mit einer für die Erforschung der mechanischen Eigenschaften geeigneten analytischen Methoden gefunden haben,⁸⁾ und vergleichen diese Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen.

2. Theoretische Analyse

2.1 Spiralseil

Wenn Zugbelastung auf ein Spiralseil wirkt, werden die Zugkraft p_{wzn} , das Biegemoment m_{wn} und das Torsionsmoment n_{wn} , die in den einzelnen Seitendrähten jeder Lage auftreten, folgendermaßen ausgedrückt:⁸⁾

$$\left. \begin{aligned} p_{wzn} &= -R_{wn} X_n + P_n \sin \beta_{sn} \\ m_{wn} &= -R_{wn} X_n (\tan^2 \beta_{sn} - 1) + N_n \cos \beta_{sn} - P_n R_{wn} \sin \beta_{sn} \\ n_{wn} &= 2R_{wn} X_n \tan \beta_{sn} + N_n \sin \beta_{sn} + P_n R_{wn} \cos \beta_{sn} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

X_n : Druck je Längeneinheit zwischen n -ter und $(n-1)$ ter Seitendrahtlage
 P_n, N_n : auf den Kerndraht wirkende Zugbelastung und Torsionsmoment
 R_{wn} : mittlerer Windungshalbmesser der Seitendrähte
 β_{sn} : Neigungswinkel der Seitendrähte

p_{wzn}, m_{wn}, n_{wn} werden als eine Funktion der Zugbelastung \bar{P} bestimmt. (Aber wir nahmen an, daß das Torsionsmoment n_{wn} in der Längsrichtung der einzelnen Seitendrähte keinen Einfluß auf die Drahtbeanspruchung hat, so daß wir es vernachlässigten.)

Nachdem p_{wzn}, m_{wn} bestimmt worden sind, kann man die Zugbeanspruchung σ_t' und die Biegebeanspruchung σ_m' folgendermaßen berechnen.

$$\sigma_t' = \frac{p_{wzn}}{\frac{\pi}{4} d_n^2} \quad \sigma_m' = \frac{m_{wn}}{\frac{\pi}{32} d_n^3} \quad (4)$$

Daher ist auf der Außenseite der Seitendrähte jeder Lage die Drahtbeanspruchung σ'

$$\sigma' = \sigma_t' + \sigma_m' \quad (5)$$

auf der Innenseite der Seitendrähte ist sie:

$$\sigma' = \sigma_t' - \sigma_m' \quad (6)$$

Im Kerndraht des Spiralseils ist nur eine Zugbeanspruchung σ_{to}' wirksam, denn hier tritt kein Biegemoment auf. (Also ist $\sigma_m' = 0$)

σ_{to}' (die Zugbeanspruchung im Kerndraht) ist:

$$\sigma_{to}' = \frac{p_{wo}}{\frac{\pi}{4} d_o^2} \quad (7)$$

Dabei ist : d_o : Kerndrahtdurchmesser

p_{wo} : die auf den Kerndraht wirkende Zugbelastung

2.2 Litzenseil

Wenn das Litzenseil unter Zugbelastung steht, kann man unter Berücksichtigung nicht nur des Druckes zwischen der Kernlitze (oder Hanfseele) und den Seitenlitzen, sondern auch der Drücke zwischen den benachbarten Litzen, die einzelnen Kräfte (Zugkraft p_z , Biegemoment m , Torsionsmoment n , siehe Bild 1), die auf eine Litze wirken, berechnen.⁸⁾

Wenn die auf eine Litze wirkenden Kräfte bekannt sind, können sie in einzelne Kraftkomponenten, wie Zugkraft p_z , Biegemoment m und Torsionsmoment n unterteilt werden.

Dann kann man zuerst gemäß 2.1 die durch die auf die Litze einwirkende Zugkraft

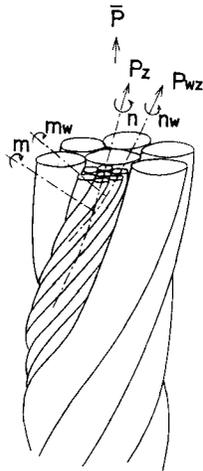


Bild 1. Bei Zug auf das Litzenseil wirkende Kräfte

p_z in den Seitendrähten entstehende Zugbeanspruchung $(\sigma_t)_p$ und Biegebeanspruchung $(\sigma_m)_p$ berechnen.

Zweitens, weil durch die Einwirkung des Torsionsmoments n auf die Litze die Seitendrähte unter der Zugkraft p_{wz} und dem Biegemoment m_w stehen, ergeben sich die in den Seitendrähten durch das Torsionsmoment n entstehende Zugbeanspruchung $(\sigma_t)_n$ und Biegebeanspruchung $(\sigma_m)_n$, indem man p_{wz} und m_w in Gl.(4) einsetzt.

Die durch das Biegemoment m in den Seitendrähten entstehende Beanspruchung kann, wegen der zwischen den Drähten auftretenden Reibung, nicht auf so einfache Weise berechnet werden. Also muß man versuchen, diese Beanspruchung auf andere Weise zu erhalten.

Unter Berücksichtigung der Reibung zwischen den Drähten der Litze verhält sich die Litze, bei kleinem Biegemoment m , ähnlich wie ein Stahlstab. (Bei unveränderlichem Litzenquerschnitt erhält man vollkommene Reibungssteifigkeit.) Mit größer werdendem m wird die Schubkraft, zuerst in den äußersten Drahtlagen, größer als die Reibung zwischen den Drähten, und die Drähte fangen an zu gleiten. (Wegen teilweise überwundener Reibung beginnt der Litzenquerschnitt sich zu verformen.) Wenn m bis zu einen bestimmten Wert ansteigt, beginnen alle Drähte zu gleiten und

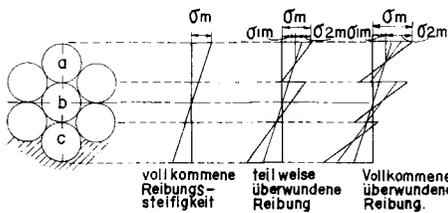


Bild 2. Verlauf der Biegebeanspruchung bei Einwirkung des Biegemoments

sie lösen sich vollständig vom Kerndraht. (Wegen vollkommen überwundener Reibung, bewegen sich alle Litzenquerschnitte.) Die Beanspruchungen für diese Fälle werden schematisch in Bild 2 gezeigt.

Aus den Untersuchungen des Biegeverhaltens bei Litzenseilen folgt, daß sich die Litze in einem mittleren Zustand zwischen den beiden erwähnten Fällen (vollkommene Reibungssteifigkeit und vollkommen überwundene Reibung) befindet. Also kann die im Draht durch Biegemoment m entstehende Biegebeanspruchung $(\sigma_m)_m$ folgendermaßen ausgedrückt werden.

$$(\sigma_m)_m = \sigma_{1m} + \sigma_{2m} \quad (8)$$

Dabei ist:

σ_{1m} : die Biegebeanspruchung um die Litzenachse, bis sich der entsprechende Draht vom Kerndraht (od. der inneren Drahtlage) löst.

σ_{2m} : die zusätzliche Biegebeanspruchung, die durch die Loslösung des Drahtes vom Kerndraht (od. der inneren Drahtlage) um die Schwerpunktsachse des Drahtes entsteht.

Nun drücken wir den Krümmungshalbmesser der Litze folgendermaßen aus:

ρ_0 : Krümmungshalbmesser der Litze bei Biegemoment $m = \text{Null}$.

ρ_1 : Krümmungshalbmesser der Litze für kleines Biegemoment m .

ρ_2 : Krümmungshalbmesser der Litze bei größer werdendem Biegemoment m und teilweise überwundener Reibung.

ρ : Krümmungshalbmesser der Litze bei weiterhin wachsendem Biegemoment m und vollkommen überwundener Reibung.

Zuerst werden in einem Draht der äußersten Lage (Bild 2, a-Draht) σ_{1m} und σ_{2m} durch Gl.(9) ausgedrückt.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1m} &= \frac{E(d_s - d)}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} \right) \\ \sigma_{2m} &= \pm \frac{E_b d}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Dabei ist: E : Elastizitätsmodul des Drahtes d_s : Litzendurchmesser

E_b : Elastizitätsmodul für Biegebeanspruchung der Litze

$$\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = \frac{m}{E_{fs} I_s} \quad \begin{array}{l} E_{fs} I_s: \text{ Biegesteifigkeit der Litze} \\ E_{fs}: \text{ Elastizitätsmodul für Biegesteifigkeit} \\ I_s: \text{ Trägheitsmoment des Litzenquerschnitts} \end{array}$$

+ : Außenseite des a-Drahtes - : Innenseite des a-Drahtes

(Außen- und Innenseite befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten des Seilmittelpunktes)

Selbst wenn man annimmt, daß die Biegebeanspruchung auf der Außenseite des Drahtes

$$(\sigma_m)_m = E_b k \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (10)$$

ist, gibt Gl. (10) die Biegebeanspruchung nach Verformung des Litzenquerschnitts (gemäß dem k -Wert) wieder.

Wie aus Bild 2 ersichtlich, ist der Grad der Loslösung des Drahtes vom Kerndraht je nach der Position des Drahtes verschieden und der k -Wert ebenfalls. Die Beziehung zwischen k und E_{fs} haben wir bereits experimentell erhalten.⁷⁾ Also kann nach unserem experimentellen Ergebnis der Durchschnittswert für k aus der Biegesteifigkeit E_{fs} der Litze bestimmt werden. Gemäß dem erhaltenen Wert von k wird für den a-Draht ein Wert k_a angenommen.

Man setzt k_a im Gl.(10) ein und berechnet $(\sigma_m)_m$ für die Außenseite des a-Drahtes. Nach Gl.(8), (9) ergibt sich $(1/\rho - 1/\rho_0)$ und so können σ_{1m}, σ_{2m} für den a-Draht bestimmt werden. Also kann man auch $(\sigma_m)_m$ für die Innenseite des a-Drahtes berechnen.

Für den Draht (Bild 2, c-Draht), von dem angenommen wird, daß er sich zuletzt vom Kerndraht ablöst, werden σ_{1m} und σ_{2m} folgendermaßen dargestellt.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1m} &= -\frac{E}{2} d \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} \right) - \frac{E_b (d_s - 2d)}{2} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_0} \right) \\ \sigma_{2m} &= \pm \frac{E_b d}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

+ : Außenseite des Drahtes - : Innenseite des Drahtes

Wenn wir den Wert von k für den c-Draht mit k_c bezeichnen, wird

$$\sigma_m = -k_c E_b \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (12)$$

Aus Gl.(11), (12) wird $(1/\rho_2 - 1/\rho_0)$ bestimmt und σ_{1m}, σ_{2m} können berechnet werden und man erhält $(\sigma_m)_m$ für die Außen- und Innenseite des c-Drahtes.

Zuletzt, sind σ_{1m}, σ_{2m} im Kerndraht der Litze (Bild 2, b-Draht)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1m} &= -E \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} \right) + E_b \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_0} \right) \\ \sigma_{2m} &= \pm E \frac{d_0}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

+ : Außenseite des Drahtes - : Innenseite des Drahtes

Also kann man $(\sigma_m)_m$ für die Außen- und Innenseite des Kerndrahtes (b-Draht) berechnen.

Die Drahtbeanspruchung σ in der Litze ist:

$$\sigma = (\sigma_t)_p \pm (\sigma_m)_p + (\sigma_t)_n \pm (\sigma_m)_n + (\sigma_m)_m \quad (14)$$

Wobei die beigesetzten Buchstaben p , m , n die durch Zugkraft p_z , Biegemoment m und Torsionsmoment n entstehenden Beanspruchungen bedeuten.

+: Außenseite des a-Drahtes und Innenseite des c-Drahtes

–: Innenseite des a-Drahtes und Außenseite des c-Drahtes

Im Kerndraht der Litze werden $(\sigma_t)_p = (\sigma_{to})_p$, $(\sigma_m)_p = (\sigma_t)_n = (\sigma_m)_n = 0$.

3. Versuchsverfahren

Etwa in die Mitte der Probeseile (etwa 3 m lang) haben wir, parallel zur Drahtachse, Dehnungsmesser (Dehnmeßstreifen) an die Oberflächen der Drähte der äußersten Drahtlage der Litze (bei den Spiralseilen an die Drähte der äußersten Drahtlage) geklebt und die Seile mehrmals, unter gehemmter und freier Eigendrehung, durch Seilzugprüfmaschinen mit 1000 t bzw. 300 t Belastung gezogen, und dabei die Drahtbeanspruchung gemessen.

Tafel 1 zeigt Ausführungen und Moduln R für das Eigendrehungsverhalten der Probspiralseile. Das Spiralseil mit 61 Drähten wurde als ein vollkommen eigendrehungsfreies Seil hergestellt.

Tafel 2 zeigt Ausführungen der Probelitzenseile.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Spiralseil

Die Bilder zeigen die Beanspruchungen in den Drähten der äußersten Lage der Spiralseile bei gehemmter und freier Eigendrehung und zwar: Bild 3 für ein Seil mit 7 Drähten, Bild 4 für ein Seil mit 19 Drähten, Bild 5 für ein Seil mit 37 Drähten (ZSS), Bilder 6 und 7 für ein Seil mit 61 Drähten (SSSZ, eigendrehungsfreies Seil).⁹⁾

Aus diesen Bildern ergibt sich folgendes.

(1) Bei gehemmter Eigendrehung ist die Drahtbeanspruchung bei allen Spiralseilen etwa gleich \bar{P}/A_r .

(2) Bei gehemmter Eigendrehung ist die Drahtbeanspruchung beim ersten Zug ein wenig kleiner als \bar{P}/A_r . Denn zwischen den Drähten der Seile befindet sich beim ersten Zug ein Zwischenraum. (Da kein Druck zwischen den Drähten wirkt, verhalten sich diese wie Sprungfedern.)

(3) Bei gehemmter Eigendrehung liegt vom zweiten Zug an die Beanspruchung auf einer in einem Abstand auftretenden, zur Kurve \bar{P}/A_r parallelen Kurve. Diese Verschiebung ist vielleicht der vor allem durch die Einwirkung des ersten Seilzuges entstehenden Hysteresis zuzuschreiben.

Tafel 1. Ausführung der Probespiralseile

| Seil- ausführung | d_r mm | d_o mm | 1. Lage | | | 2. Lage | | | 3. Lage | | | 4. Lage | | | Eigen- drehungs- modul R(°) |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|--------|--------------------------|-------------|--------|--------------------------|-------------|--------|--------------------------|-------------|--------|--------------------------|--------------------------------------|
| | | | d_n mm | a_s | Schlag- richt- ung | |
| 1×7 G/S | 9,40 | 3,50 | 2,95 | 14°28' | S | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 7,2 |
| 1×19G/S | 16,60 | 3,80 | 3,20 | 14°30' | S | 3,20 | 13°50' | S | — | — | — | — | — | — | 18,9 |
| 1×37O/S | 18,89 | 2,90 | 2,698 | 18°06' | Z | 2,698 | 14°00' | S | 2,599 | 15°52' | S | — | — | — | 16,2 |
| 1×61O/S | 24,15 | 2,90 | 2,697 | 17°51' | S | 2,697 | 13°59' | S | 2,595 | 15°49' | S | 2,638 | 13°29' | Z | 0,1 |

 d_r : Seildurchmesser d_o : Kerndrahtdurchmesser d_n : Seitendrahtdurchmesser a_s : Litzenschlagwinkel

Tafel 2. Ausführung der Probelitzenseile

| Seil- ausführung | d_r mm | a_r | Seil- schlag- richtung | Kernlitze | | | | Seitenlitze | | | |
|---------------------|-------------|--------|------------------------------|-------------|-------------|--------|--------------------------------|-------------|-------------|--------|--------------------------------|
| | | | | d_o mm | d_n mm | a_s | Litzen- schlag- richtung | d_o mm | d_n mm | a_s | Litzen- schlag- richtung |
| 6×7C/L | 32 | 15°44' | Z | — | — | — | — | 3,70 | 3,55 | 11°23' | Z |
| 6×7C/O | 32 | 16°15' | Z | — | — | — | — | 3,71 | 3,57 | 10°29' | S |
| 6×37G/O | 50 | 16°40' | Z | — | — | — | — | | * | | |
| 7×7C/L | 32 | 14°58' | Z | 4,00 | 3,87 | 13°04' | Z | 3,71 | 3,57 | 10°49' | Z |
| 7×7C/O | 32 | 15°39' | Z | 4,01 | 3,88 | 13°10' | Z | 3,70 | 3,57 | 10°48' | S |
| 7×7G/O | 32 | 12°14' | Z | 3,87 | 3,70 | 10°01' | Z | 3,70 | 3,55 | 9°56' | S |

*

| 6×37 G/O 50 φ | d_o mm | 1. Lage | | | 2. Lage | | | 3. Lage | | |
|------------------|-------------|-------------|-------|---------------------|-------------|-------|---------------------|-------------|-------|---------------------|
| | | d_n mm | a_s | Schlag- richtung | d_n mm | a_s | Schlag- richtung | d_n mm | a_s | Schlag- richtung |
| | | 2,55 | 2,40 | 12°51' | S | 2,40 | 12°32' | S | 2,40 | 12°25' |

 d_r : Seildurchmesser d_o : Kerndrahtdurchmesser d_n : Seitendrahtdurchmesser a_r : Seilschlagwinkel a_s : Litzenschlagwinkel

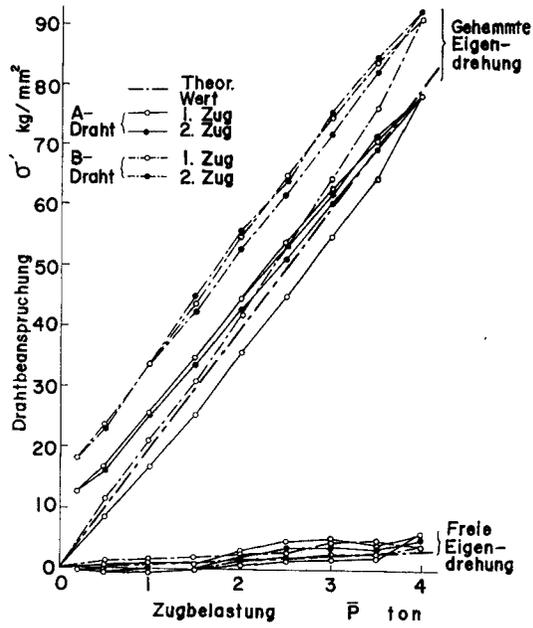


Bild 3. \bar{P} - σ' Kurven für 1x7 G/S-Seil

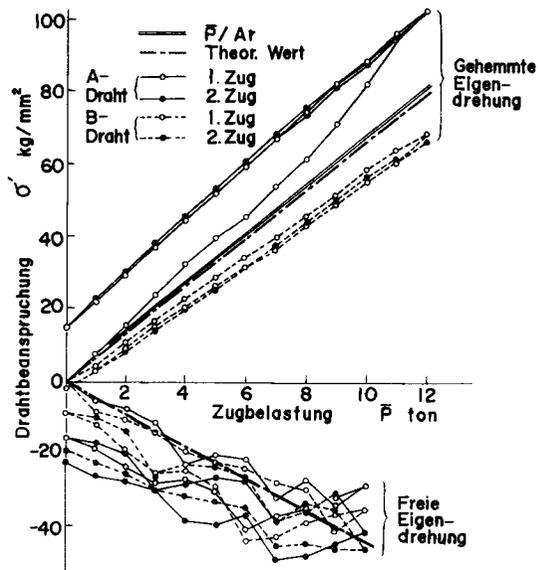


Bild 4. \bar{P} - σ' Kurven für 1x19 G/S-Seil

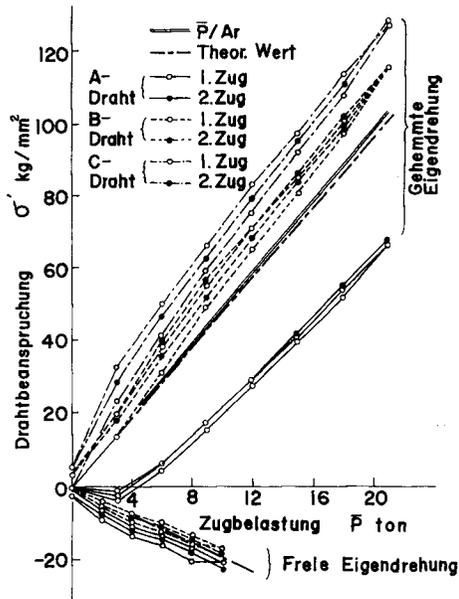


Bild 5. $\bar{P}-\sigma'$ Kurven für 1×37 O/S (ZSS)-Seil

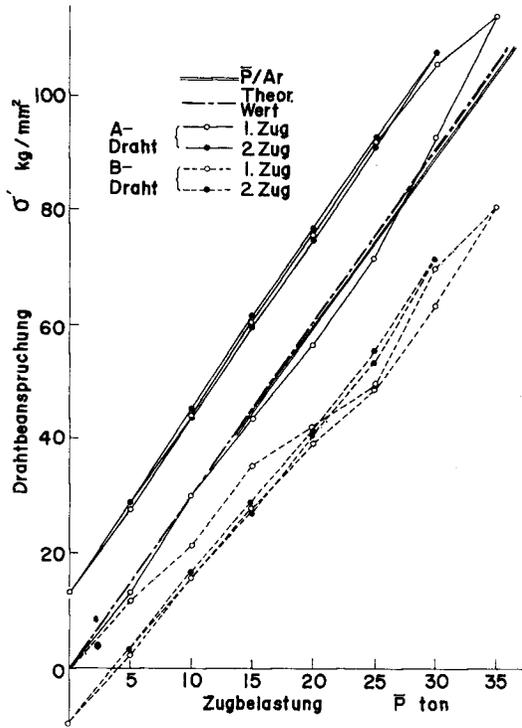
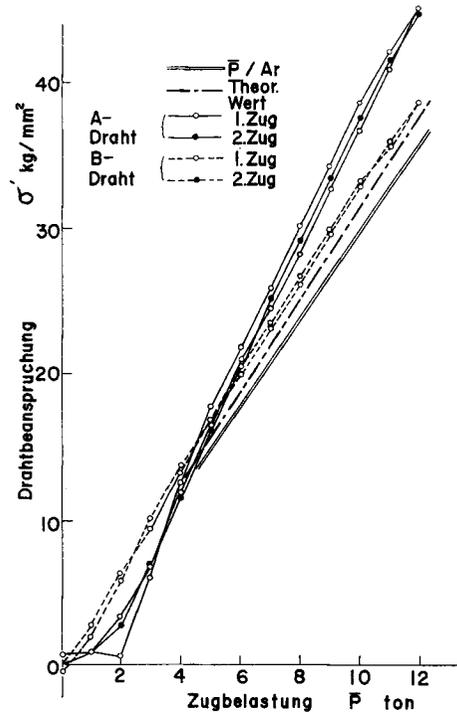


Bild 6. $\bar{P}-\sigma'$ Kurve für 1×61 O/S (SSSZ)-Seil bei gehemmter Eigendrehung

Bild 7. \bar{P} - σ' Kurve für 1×61 O/S (SSSZ)-Seil bei freier Eigendrehung

(4) Bei freier Eigendrehung ist die Drahtbeanspruchung im allgemeinen erheblich von \bar{P}/A_r verschiedenen. Besonders bei Seilen mit größerer Eigendrehungstendenz entstehen größere Druckbeanspruchungen.

(5) Bei einem eigendrehungsfreien Spiralseil mit z.B. 61 Drähten (SSSZ) zeigt sich die Drahtbeanspruchung bei freier Eigendrehung beinahe gleich der bei gehemmter Eigendrehung.

4.2 Litzenseil

Für die Zugprüfung sind die Beanspruchungen in den Drähten der äußersten Lage der Litzenseile bei gehemmter und freier Eigendrehung zu ersehen : aus Bild 8 für ein 6×7 Kreuzschlagseil, aus Bildern 9 und 10 für ein 6×7 Gleichschlagseil, aus Bild 11 für ein 6×37 Kreuzschlagseil, aus Bildern 12 und 13 für ein 7×7 Kreuzschlagseil. (Die Versuchsergebnisse für 7×7 Gleichschlagseil sind nicht angegeben.) Diese Bilder lassen folgendes erkennen:

(1) Bei gehemmter Eigendrehung ist die Drahtbeanspruchung etwa gleich \bar{P}/A_r oder ein wenig kleiner, wie im Fall von Spiralseilen.

(2) Wie beim Spiralseil sind bei gehemmter Eigendrehung die Meßwerte manchmal beim ersten Zug ein wenig kleiner als \bar{P}/A_r und vom zweiten Zug an liegen sie

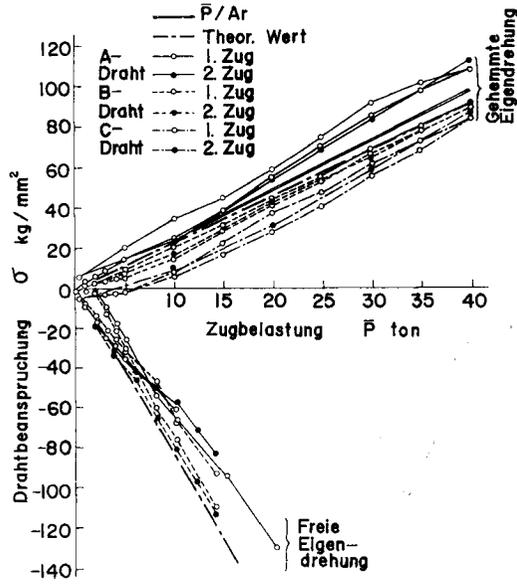


Bild 8. $\bar{P}-\sigma$ Kurven für 6x7 C/L- Seil

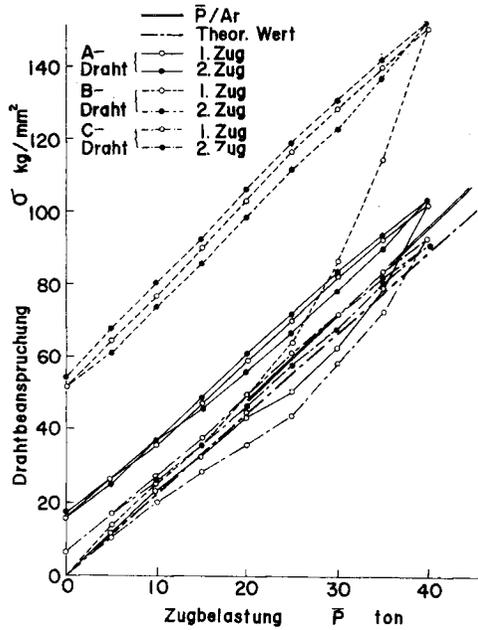


Bild 9. $\bar{P}-\sigma$ Kurve für 6x7 C/O- Seil bei gehemmter Eigendrehung

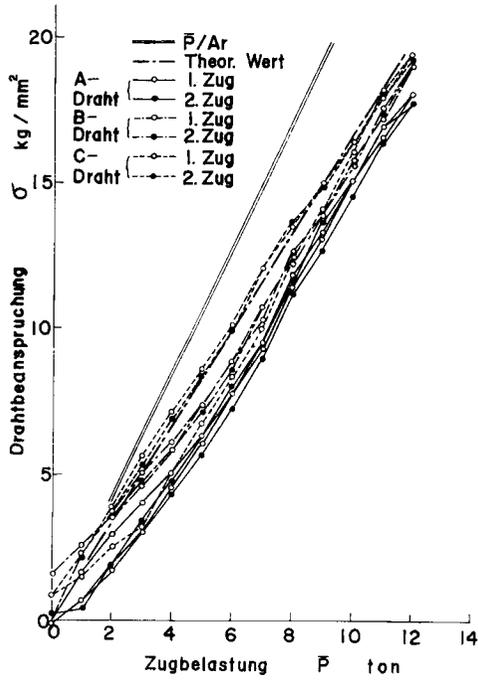


Bild 10. \bar{P} - σ Kurve für 6×7 C/O-Seil bei freier Eigendrehung

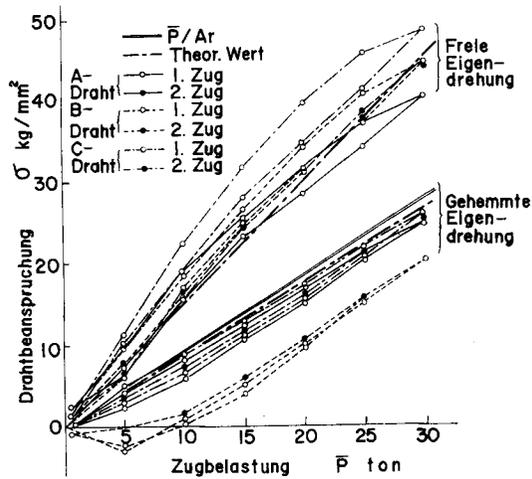
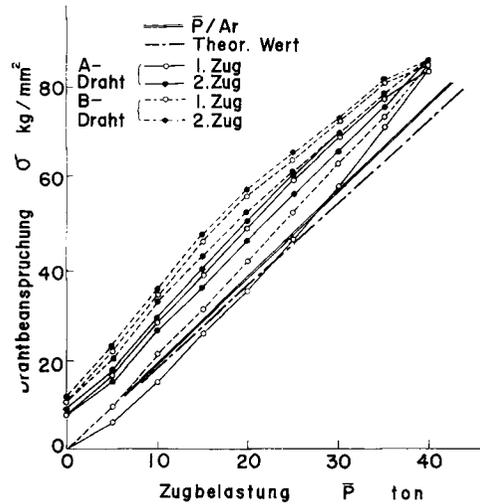
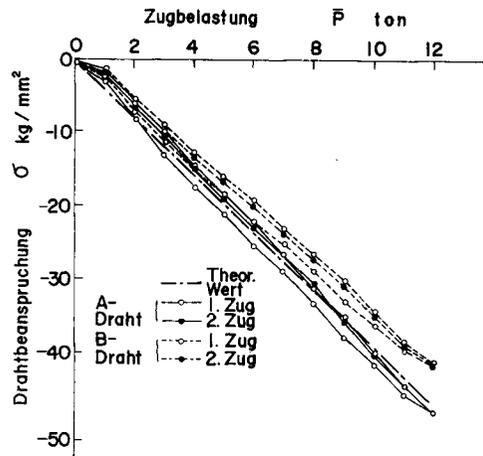


Bild 11. \bar{P} - σ Kurven für 6×37 G/O-Seil

Bild 12. \bar{P} - σ Kurve für 7×7 C/L-Seil bei gehemmter EigendrehungBild 13. \bar{P} - σ Kurve für 7×7 C/L-Seil bei freier Eigendrehung

auf einer stark verschobenen, zur Kurve \bar{P}/A_r parallelen, Kurve. Diese Erscheinung hat denselben Grund wie beim Spiralseil. (Siehe 4.1)

(3) Bei freier Eigendrehung ergibt sich, wie im Fall des Spiralseiles, ein merklicher Unterschied zwischen der Drahtbeanspruchung und \bar{P}/A_r .

(4) Bei Kreuzschlagseilen tritt bei freier Eigendrehung eine größere Druckbeanspruchung in den Drähten der äußersten Lage auf, dagegen ist bei Gleichschlagseilen die Zugbeanspruchung, besonders beim 6×37-Gleichschlagseil, erheblich größer als \bar{P}/A_r .

5. Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen und Betrachtung

5.1 Spiralseil

Aus den Bildern 3–7 ersieht man die nach Gl.(5) berechneten Drahtbeanspruchungen, und in allen Fällen stimmen die Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen - abgesehen von der Hysteresis-Erscheinung, die beim ersten Zugversuch im Seil auftritt - überein. Daraus folgt also, daß sich die besagte analytische Methode für die Errechnung der Drahtbeanspruchung eignet und sie erlaubt auch eine Berechnung der Beanspruchung an den Stellen, an denen keine Dehnungsmesser angebracht werden können. Tafel 3 zeigt die Berechnungsergebnisse der Beanspruchungen an verschiedenen Stellen. Daraus folgt:

(1) Bei gehemmter Eigendrehung macht die Zugbeanspruchung σ_t' den größten Teil der Drahtbeanspruchung aus und so ist in den einzelnen Lagen $\sigma' = \sigma_t' \pm \sigma_m'$ etwa gleich \bar{P}/A_r . Die Maximaldrahtbeanspruchung entsteht im Kerndraht und ist etwas größer als \bar{P}/A_r .

(2) Außer bei dem eigendrehungsfreien Spiralseil mit 61 Drähten (SSSZ), ist die Beanspruchung ($\sigma_t' + \sigma_m'$) an der Außenseite des Drahtes der äußersten Lage bei gehemmter Eigendrehung ziemlich klein, im Gegensatz zu der bei freier Eigendrehung, unter Umständen zeigt sich die Beanspruchung als Druckbeanspruchung. Denn bei freier Eigendrehung ist die Biegebeanspruchung σ_m' viel größer als die Zugbeanspruchung σ_t' . Also entsteht auf der Innenseite des Drahtes ($\sigma_t' - \sigma_m'$) eine um ein vielfaches größere Beanspruchung als \bar{P}/A_r .

(3) Bei Spiralseilen mit großem Modul für das Eigendrehverhalten ist bei freier Eigendrehung die Beanspruchung des Kerndrahtes σ_{to}' zwei bis dreifach größer als \bar{P}/A_r . Denn bei freier Eigendrehung wirkt eine große Zugkraft auf den Kerndraht.

(4) Bei einem eigendrehungsfreien Spiralseil mit 61 Drähten ist in den Seitendrähten jeder Lage die Drahtbeanspruchung bei gehemmter Eigendrehung etwa gleich wie bei freier Eigendrehung.

5.2 Litzenseil

Die berechneten Beanspruchungswerte an den Stellen, an denen die Beanspruchung gemessen wurde, (z.B. Außenseite des a- Drahtes in Bild 2) sind ebenfalls in Bildern 8–13 gegeben. Für alle Seile stimmen die Berechnungsergebnisse, abgesehen von den Hysteresis-Erscheinungen, mit den Versuchsergebnissen etwa überein. Weil sich also unsere analytische Methode augenscheinlich für die Berechnung der Drahtbeanspruchung eignete, berechneten wir die Beanspruchungswerte auch an den Stellen, an denen die Beanspruchung nicht gemessen werden konnte.

Tafel 3. Berechnungsergebnisse der Drahtbeanspruchungen jeder Lage für verschiedene Spiralseile

| Seilausführung | | 1×7 G/S S | 1×19 G/S SS | 1×37 O/S ZSS | 1×61 O/S SSSZ (Eigendrehungs- freies seil) | |
|-----------------------|---------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| | | $2,19 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $7,15 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $5,64 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,39 \times 10^{-3} \bar{P}$ | |
| Gehemmte Eigendrehung | 1. Lage | σ_{t0}' | $1,99 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $6,48 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $5,03 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,87 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | $-1,43 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $-4,69 \times 10^{-4} \bar{P}$ | $-3,27 \times 10^{-4} \bar{P}$ | $-3,48 \times 10^{-4} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | $1,84 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $6,01 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $4,70 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,53 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | $2,13 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $6,95 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $5,36 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,22 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | 2. Lage | σ_t' | — | $6,57 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $5,16 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,99 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | — | $-2,19 \times 10^{-4} \bar{P}$ | $-1,86 \times 10^{-4} \bar{P}$ | $-1,11 \times 10^{-4} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | — | $6,36 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $4,97 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,88 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | — | $6,79 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $5,35 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,10 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | 3. Lage | σ_t' | — | — | $5,05 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,93 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | — | — | $-1,48 \times 10^{-4} \bar{P}$ | $-8,82 \times 10^{-5} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | — | — | $4,90 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,84 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | — | — | $5,20 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,02 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | 4. Lage | σ_t' | — | — | — | $3,12 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | — | — | — | $-3,04 \times 10^{-5} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | — | — | — | $3,09 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | — | — | — | $3,15 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $3,54 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $2,02 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $1,22 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $3,39 \times 10^{-3} \bar{P}$ | |
| Freie Eigendrehung | 1. Lage | σ_{t0}' | $1,65 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $1,00 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $1,37 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $2,89 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | $-1,57 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $-8,46 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $1,83 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $-3,33 \times 10^{-4} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | $7,90 \times 10^{-4} \bar{P}$ | $1,54 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $1,56 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $2,56 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | $3,23 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $1,85 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $1,20 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $3,23 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | 2. Lage | σ_t' | — | $3,20 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $5,28 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,13 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | — | $-7,58 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $-3,08 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $-9,18 \times 10^{-5} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | — | $-4,37 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,20 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,03 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | — | $1,08 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $8,36 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $3,23 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | 3. Lage | σ_t' | — | — | $1,28 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,08 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | — | — | $-3,15 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $-7,45 \times 10^{-5} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | — | — | $-1,87 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,01 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | — | — | $4,44 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $3,15 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | 4. Lage | σ_t' | — | — | — | $3,08 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | σ_m' | — | — | — | $-6,28 \times 10^{-5} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' + \sigma_m'$ | — | — | — | $3,02 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| | | $\sigma_t' - \sigma_m'$ | — | — | — | $3,14 \times 10^{-3} \bar{P}$ |
| \bar{P}/Ar | | $1,98 \times 10^{-2} \bar{P}$ | $6,41 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $4,88 \times 10^{-3} \bar{P}$ | $2,98 \times 10^{-3} \bar{P}$ | |
| kg/mm ² | | | | | | |

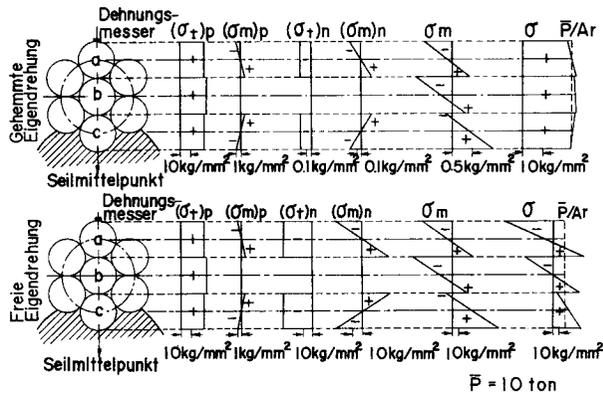


Bild 14. Beanspruchungen an verschiedenen Stellen bei 6×7 C/L-Seil

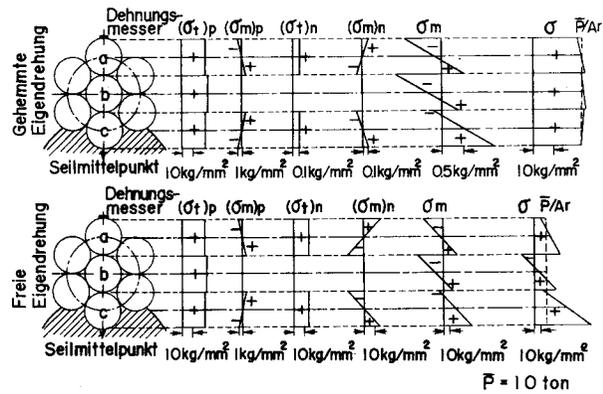


Bild 15. Beanspruchungen an verschiedenen Stellen bei 6×7 C/O-Seil

Als ein Beispiel für eine Zugbelastung $\bar{P}=10$ t zeigen die Bilder 14 und 15 die Beanspruchungen $(\sigma_t)_p$, $(\sigma_m)_p$, $(\sigma_t)_n$, $(\sigma_m)_n$, $(\sigma_m)_m$, die zusammen σ ergeben, an verschiedenen Stellen und zwar für ein 6×7 C/L-Seil (Kreuzschlag) und ein 6×7 C/O-Seil (Gleichschlag) jeweils bei gehemmter und freier Eigendrehung. Aus diesen Bildern ist folgendes zu entnehmen.

(1) Bei gehemmter Eigendrehung weist in allen unseren Seilen die durch Zugbelastung entstehende Zugbeanspruchung $(\sigma_t)_p$ den größten Drahtbeanspruchungswert auf, wogegen $(\sigma_m)_m$ einen kleinen Wert zeigt, besonders ist die durch das Torsionsmoment n entstehende Beanspruchung so klein, daß man sie vernachlässigen kann.

σ ist, außer an der Außenseite des a-Drahtes, ein wenig größer als \bar{P}/A_r .

(2) Dagegen hat bei einem 6×7 C/L-Seil bei freier Eigendrehung $(\sigma_m)_m$ einen sehr großen Wert und an der Außenseite des a-Drahtes ist die Druckbeanspruchung das dreifache von $(\sigma_t)_p$. Weiterhin werden die durch das Torsionsmoment entstehenden $(\sigma_t)_n$ und $(\sigma_m)_n$ zu Druckbeanspruchungen, weil die Eigendrehungsrichtung des Seiles

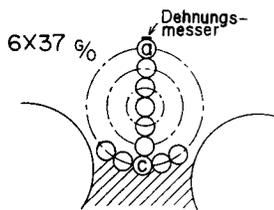
der Schlagrichtung des Litzendrahtes entgegengesetzt ist, und also an der Außenseite des a-Drahtes eine große Druckbeanspruchung auftritt. Umgekehrt entstehen an der Innenseite des a-Drahtes und c-Drahtes Zugbeanspruchungen mit dem dreifachen Wert von \bar{P}/A_r .

(3) Bei freier Eigendrehung ist $(\sigma_m)_m$ bei einem $6 \times 7C/O$ -Seil klein im Vergleich zu einem $6 \times 7C/L$ -Seil, und die Druckbeanspruchung beträgt etwa das zweifache von $(\sigma_t)_p$. Weil die Eigendrehungsrichtung der Seile gleich der Schlagrichtung des Litzendrahtes ist, werden $(\sigma_t)_n$, $(\sigma_m)_n$ zu Zugbeanspruchungen. Endlich entsteht an der Außenseite des a-Drahtes eine Zugbeanspruchung kleiner als \bar{P}/A_r . Dagegen entsteht an der Innenseite des c-Drahtes eine Zugbeanspruchung etwa fünfmal größer als \bar{P}/A_r .

Tafel 4 zeigt die Berechnungsergebnisse der Drahtbeanspruchungen für ein $6 \times 37 G/O$ -Seil (verzinkt, Gleichschlag) mit Hanfseele. Aus dieser Tafel ist das folgende zu ersehen: Bei gehemmter Eigendrehung, wie bei dem 6×7 Seil, sind die Drahtbeanspruchungen etwa gleich \bar{P}/A_r , oder etwa größer. Aber bei freier Eigendrehung entsteht an der Außenseite des a-Drahtes eine Zugbeanspruchung vom etwa 1,5 fachen von \bar{P}/A_r , und an der Innenseite des c-Drahtes die etwa 5,5 fache Zugbeanspruchung von \bar{P}/A_r , weil $(\sigma_t)_n$ und $(\sigma_m)_n$ größer sind, als beim $6 \times 7 C/O$ -Seil.

Tafel 5 gibt die Berechnungsergebnisse der Drahtbeanspruchungen für 7×7 -Seile mit Kernlitze (Kreuzschlag, Gleichschlag) wieder. Bei gehemmter Eigendrehung ist, an allen Stellen außer an der Außenseite des a-Drahtes, die Drahtbeanspruchung σ etwas größer als \bar{P}/A_r . σ zeigt die Druckbeanspruchung an der Außenseite des a-Drahtes für ein $7 \times 7 C/L$ -Seil, bei freier Eigendrehung, weil hier $|(\sigma_m)_m| > |(\sigma_t)_p|$ und $(\sigma_m)_m$ etwa doppelt so groß ist wie $(\sigma_t)_p$, aber der absolute Wert von σ ist nicht so groß wie bei einem $6 \times 7 C/L$ -Seil, da $(\sigma_t)_n$ und $(\sigma_m)_n$ kleiner ist als bei 6×7 -Seilen, und an der Außenseite des a-Drahtes des $7 \times 7 C/O$ -Seiles eine Zugbeanspruchung herrscht, die kleiner ist, als beim $6 \times 7 C/O$ -Seil.

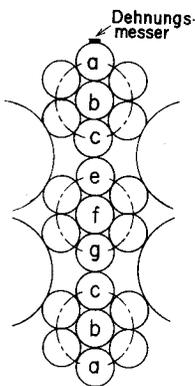
Tafel 4. Berechnungsergebnisse der Drahtbeanspruchungen an verschiedenen Stellen bei $6 \times 37 G/O$ -Seil



| Draht | Stelle | Gehemmte Eigendrehung ($\times 10^{-3} \bar{P}$) | Freie Eigendrehung ($\times 10^{-3} \bar{P}$) |
|---------------|------------|--|---|
| a | Außenseite | 0,94 | 1,51 |
| | Innenseite | 1,14 | 4,04 |
| c | Außenseite | 1,03 | 0,70 |
| | Innenseite | 1,19 | 5,59 |
| \bar{P}/A_r | | $0,99 \times 10^{-3} \bar{P}$ | |

kg/mm²

Tafel 5. Berechnungsergebnisse der Drahtbeanspruchungen an verschiedenen Stellen bei 7×7-Seile



Das Diagramm zeigt den Querschnitt einer 7x7-Drahtseile. Die Drahtstellen sind von außen nach innen wie folgt beschriftet: a (äußere Draht), b (äußere Draht), c (äußere Draht), e (äußere Draht), f (äußere Draht), g (äußere Draht), c (äußere Draht), b (äußere Draht), a (äußere Draht). Ein Dehnungsmesser ist an der Drahtstelle 'a' angedeutet.

| Seilausführung | | 7×7 C/L | | 7×7 C/O | |
|----------------|-------------|---|--|---|--|
| Draht | Stelle | Gehemmte Eigendrehung (×10 ⁻³ \bar{P}) | Freie Eigendrehung (×10 ⁻³ \bar{P}) | Gehemmte Eigendrehung (×10 ⁻³ \bar{P}) | Freie Eigendrehung (×10 ⁻³ \bar{P}) |
| a | Außen-seite | 1,84 | -3,75 | 1,91 | 0,57 |
| | Innen-seite | 2,13 | 2,18 | 2,14 | 2,25 |
| b | Außen-seite | 2,06 | -2,22 | 2,05 | -1,82 |
| | Innen-seite | 2,15 | 1,79 | 2,15 | 1,81 |
| c | Außen-seite | 2,09 | 0,06 | 2,09 | 0,33 |
| | Innen-seite | 1,97 | 1,85 | 2,05 | 5,65 |
| e | Außen-seite | 2,04 | 5,17 | 2,05 | 4,99 |
| | Innen-seite | 2,32 | 9,17 | 2,34 | 8,55 |
| f | | 2,52 | 10,1 | 2,55 | 9,42 |
| g | Außen-seite | 2,32 | 9,17 | 2,34 | 8,55 |
| | Innen-seite | 2,04 | 5,17 | 2,05 | 4,99 |
| \bar{P}/A_r | | $1,97 \times 10^{-3} \bar{P}$ | | $1,97 \times 10^{-3} \bar{P}$ | |

Weiterhin ist nach dieser Tafel bemerkenswert, daß bei freier Eigendrehung an der Innenseite des f- und e-Drahtes der Kernlitze (Außenseite des g-Drahtes) Zugbeanspruchungen entstehen, die das 4 bis 5-fache von \bar{P}/A_r betragen. Denn bei freier Eigendrehung wirkt die Maximalzugspannung auf die Kernlitze.

Nach den obigen Ergebnissen ist bei gehemmter Eigendrehung die Drahtbeanspruchung etwa gleich \bar{P}/A_r , aber an den Stellen, an denen die Maximalbeanspruchungen auftreten, wird σ ungefähr 10–20% Prozent größer als \bar{P}/A_r .

Folglich ist die Maximaldrahtbeanspruchung aus $\sigma_{max}=1,2 \bar{P}/A_r$ zu berechnen. Weil bei freier Eigendrehung die Beanspruchungen je nach der Stelle ein Vielfaches von \bar{P}/A_r betragen, muß man die Maximaldrahtbeanspruchung nach dieser analytischen Methode berechnen.

6. Zusammenfassung

Nach den Versuchs- und Berechnungsergebnissen erhält man für die Zugbeanspruchung bei Spiral- und Litzenseilen folgende Richtlinien.

- (1) Ein Vergleich der Versuchs- und Berechnungsergebnisse erweist, daß sie

etwa übereinstimmen. Daraus folgt, daß sich die analytische Methode, die die Drücke zwischen dem Kerndraht und den Seitendrähten oder zwischen der Kernlitze und den Seitenlitzten, und zwischen den benachbarten Seitenlitzten, berücksichtigt, für eine Bestimmung der Drahtbeanspruchungen eignet.

(2) Bei gehemmter Eigendrehung sind für ein Spiralseil die Drahtbeanspruchungen gleich \bar{P}/A_r , oder etwas größer und die Maximalbeanspruchung tritt im Kerndraht auf.

(3) Bei freier Eigendrehung entstehen bei Spiralseilen im allgemeinen in den Drähten der äußersten Lage Zugbeanspruchungen kleiner als \bar{P}/A_r , oder Druckbeanspruchungen etwa größer als \bar{P}/A_r , aber die maximale Zug-(Druck-)beanspruchung, die an anderer Stelle entsteht, ist um ein Vielfaches größer als \bar{P}/A_r .

(4) Für ein eigendrehungsfreies Spiralseil sind die Beanspruchungswerte bei freier und gehemmter Eigendrehung gleich.

(5) Bei Litzenseilen mit gehemmter Eigendrehung sind die Drahtbeanspruchungen etwa gleich \bar{P}/A_r , aber an manchen Stellen der Drähte sind sie etwas größer als \bar{P}/A_r . Also kann man die Maximaldrahtbeanspruchung wohl aus $\sigma_{max}=1,2 \bar{P}/A_r$ berechnen.

(6) Bei freier Eigendrehung ist für Litzenseile die Maximaldrahtbeanspruchung ein Vielfaches von \bar{P}/A_r .

Schrifttum

- 1) F. Hruska: Wire and Wire Products, p. 459, 27, May (1952).
- 2) F. Hruska: Wire and Wire Products, p. 455, 28, May (1953).
- 3) Th. Wyss: Die Stahldrahtseil der Transport- und Förderanlagen, (1956).
- 4) A. Leissa: Wire and Wire Products, p. 307, 372, 34, March (1959).
- 5) W. Bert, R. Stein: Wire and Wire Products, p. 621, 37, May (1962).
- 6) E. Czitary: Seilschwebebahnen (1962).
- 7) T. Aida, S. Sato: THIS MEMOIRS, 23, p. 47, Janu (1961).
- 8) T. Aida, S. Sato und M. Nakai: THIS MEMOIRS, 35, p. 141, April (1973).
- 9) S. Sato, M. Nakai und T. Aida: THIS MEMOIRS, 35, p. 164, April (1973).