

Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften von Seilen

von

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

(Received December 28, 1972)

Zusammenfassung

Hierin werden die mechanischen Eigenschaften von Seilen theoretisch analysiert, wobei bei den Spiralseilen besonders der Druck zwischen zwei Drahtlagen und bei den Litzenseilen außerdem der Druck zwischen den benachbarten Litzen, und weiter der Druck zwischen den Litzen und der Hanfseele beachtet werden. Die angestellten Vergleiche zwischen den theoretischen Ergebnissen und den Versuchsergebnissen zeigten gute Übereinstimmung.

1. Einleitung

Drahtseile werden für Fahrstühle, Kräne und in seigeren Schächten als Betriebsseile verwendet. Dabei gibt es zwei verschiedene Befestigungsverfahren für das Seil: eine Befestigung, die eine freie Eigendrehung erlaubt und eine Befestigung, die sie nicht erlaubt. Dementsprechend ist das Verhalten der Seile bei Zug verschieden. Wenn Drahtseile, deren Befestigung eine Eigendrehung erlaubt, durch Zug belastet werden, verdrehen sie sich. Auf Grund dieser Rotation um die Seilachse auftretende Änderung der Schlaglänge, Verformung der Seile und Schwingung des Seiles wirken sich auf die Lebensdauer der Drahtseile negativ aus. Auch wenn die Verdrehung gehemmt wird, können im entlasteten Seil durch den verbleibenden Drall Klanken entstehen, und damit unerwartete Unfälle. Also müssen wir das Verhalten der Seile für die beiden Befestigungsarten bei Zugspannung untersuchen.

Die mechanischen Eigenschaften in Spiralseilen und Litzenseilen sind in vielen Veröffentlichungen erörtert worden.^{1),2),3),4),5),6),7),8),9),10)} Aber hierbei ist der Einfluß des Drucks zwischen zwei Drahtlagen auf die mechanischen Eigenschaften nicht beachtet worden und in dieser Literatur sind die analytischen Methoden sehr vereinfacht dargelegt. Der Seilelastizitätsmodul bei gehemmter Eigendrehung

* Institut für Präzisionsmechanik

** Institut für Maschinenbau

kann mittels analytischer Methoden, die den Druck zwischen zwei Drahtlagen nicht beachten, verhältnismäßig genau berechnet werden, aber die Dehnung, der Drehwinkel und die Drahtbeanspruchungen bei freier Eigendrehung sind nicht zu bestimmen.

In dieser Abhandlung werden die mechanischen Eigenschaften der Seile theoretisch analysiert, wobei bei den Spiralseilen besonders der Druck zwischen benachbarten Drahtlagen und bei den Litzenseilen außerdem der Druck zwischen den benachbarten Litzen, und weiter der Druck zwischen den Litzen und der Hanfseele beachtet werden. Auch erfolgen Vergleiche zwischen den theoretischen Ergebnissen und den Versuchsergebnissen.

2. Theoretische Analyse

2.1 Spiralseil

Wir sind von der Äquivalenz-Gleichung von Kirchhoff für dünne Stäbe ausgegangen, haben angenommen, daß an den Berührungsflächen des Kerndrahtes mit den Seitendrähten teilweise elastische Deformierungen entstehen¹⁾, und haben theoretische Analysen über die mechanischen Eigenschaften zugbelasteter Spiralseile mit mehreren Drahtlagen durchgeführt.

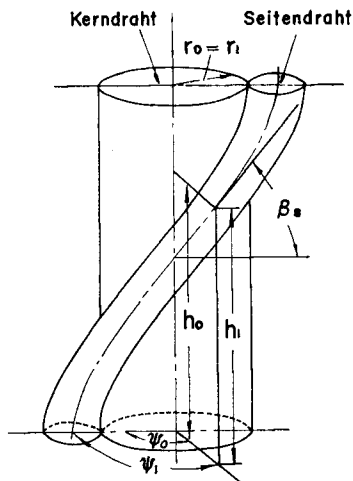


Bild 1. Schema eines Kerndrahtes und Seitendrahtes eines Spiralseiles.

Bild 1 zeigt ein Schema von Kerndraht und Seitendrähten eines Spiralseiles, dabei ist:

- h_0 : Höhe des Kerndrahtes ψ_0 : Drehwinkel des Kerndrahtes
 r_0 : Halbmesser des Kerndrahtes

- h_1 : Höhe der schraubenförmigen Kurven, die die Seitendrähte der innersten Lage beschreiben
- ψ_1 : Drehwinkel in der Seilachsenrichtung
- r_1 : Halbmesser des die Seitendrähte an den Innenpunkten berührenden Kreises

Angenommen, daß bei Zug die Deformierung des Kerndrahtes so groß ist wie die der Seitendrähte, ergibt sich die folgende Gleichung für den Kerndraht und die Seitendrähte der innersten Drahtlage.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h_0}{h_0} = \frac{\partial h_1}{h_1} &= j_{11} X_1 + j_{21} P_1 + j_{31} N_1 = j_{10} P_0 \\ \frac{\partial \psi_0}{h_0} = \frac{\partial \psi_1}{h_1} &= q_{11} X_1 + q_{21} P_1 + q_{31} N_1 = q_{30} N_0 \\ \frac{\partial r_0}{r_0} = \frac{\partial r_1}{r_1} &= k_{11} X_1 + k_{21} P_1 + k_{31} N_1 = k_{10} X_1 + k_{20} P_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

Betrachten wir die Seitendrähte bis zur $(n-1)$ ten Drahtlage als Kerndraht, so bekommen wir die Gleichung. (2) für die Seitendrähte der n -ten Drahtlage.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h_n}{h_n} &= j_{1n} X_n + j_{2n} P_n + j_{3n} N_n = j_{10} P_0 \\ \frac{\partial \psi_n}{h_n} &= q_{1n} X_n + q_{2n} P_n + q_{3n} N_n = q_{30} N_0 \\ \frac{\partial r_n}{r_n} &= k_{1n} X_n + k_{2n} P_n + k_{3n} N_n = \omega_{1n-1} P_0 + \omega_{2n-1} N_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

dabei ist:

- X_1 : Druck je Längeneinheit zwischen dem Kerndraht und den Seitendrähten
- P_n, N_n : auf die Seitendrähte der innersten Lage wirkende Zugbelastung und Torsionsmoment
- P_0, N_0 : auf den Kerndraht wirkende Zugbelastung und Torsionsmoment
- X_n : Druck je Längeneinheit zwischen n -ter und $(n-1)$ ter Seitendrahtlage
- $j_{1n}, j_{2n}, j_{3n}, q_{1n}, q_{2n}, q_{3n}, k_{1n}, k_{2n}, k_{3n}$: aus der geometrischen Form und der Zug-, Biege-, Torsions-, Schub-Steifigkeit der Seitendrähte resultierende Koeffizienten
- $j_{10}, q_{30}, k_{10}, k_{20}$: aus der geometrischen Form und der Zug- und Torsions-Steifigkeit resultierende Koeffizienten für den Kerndraht (Siehe Anhang)

Von den beiden Beizahlen der Koeffizienten $j_{11}, j_{21}, \dots, k_{21}, k_{31}$ treten 1, 2, 3

als erste Beizahl zusammen mit X, P, N auf, die zweite Beizahl zeigt eine beliebige Drahtlage.

Durch Auflösung von Gl. (1) und (2) erhält man alle $X_1, P_1, N_1, \dots, X_n, P_n, N_n$ als Funktionen von \bar{P} und \bar{N} . \bar{P} und \bar{N} bedeuten die auf das Seil wirkende Zugbelastung bzw. das Torsionsmoment

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= P_0 + i_1 P_1 + i_2 P_2 + i_3 P_3 + \dots + i_n P_n \\ \bar{N} &= N_0 + i_1 N_1 + i_2 N_2 + i_3 N_3 + \dots + i_n N_n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

i_n : Anzahl der Drähte einer beliebigen Lage

2.1.1 Bei freier Eigendrehung

Weil in diesem Fall eine Eigendrehung des Seiles bei Zug nicht verhindert wird, wirkt nicht das gesamte Torsionsmoment \bar{N} auf das Seil ($\bar{N}=0$).

Daher ergeben sich aus Gl. (3) P_0, N_0 wie folgt:

$$P_0 = \phi' \bar{P}, \quad N_0 = \phi \bar{P} \dots\dots\dots (4)$$

ϕ', ϕ : Konstanten

Gegenüber der Seillänge h lassen sich die Dehnung δh und der Drehwinkel $\delta \psi$ folgendermaßen ausdrücken.

$$\left. \begin{aligned} \delta h &= j_{10} P_0 h = j_{10} h \phi' \bar{P} \\ \delta \psi &= q_{30} N_0 h = q_{30} h \phi \bar{P} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

2.1.2 Bei gehemmter Eigendrehung

Wenn bei Zug beide Enden des Seiles so fixiert sind, daß die Eigendrehung gehemmt ist, wird $\delta \psi = 0$. Hieraus folgt $N_0 = 0$.

Aus Gl.(3)

$$P_0 = \xi \bar{P} \dots\dots\dots (6)$$

Daher ist die Dehnung δh gegenüber der Seillänge h

$$\delta h = j_{10} \xi h \bar{P} \dots\dots\dots (7)$$

Das auf das Seil wirkende Torsionsmoment \bar{N} kann durch die folgende Gleichung dargestellt werden.

$$\bar{N} = \sum_{n=1}^n i_n N_n = \xi' \bar{P} \dots\dots\dots (8)$$

ξ, ξ' : Konstanten

2.2 Litzenseil

In allgemeinen werden Litzenseile so hergestellt, daß durch einen größer Durchmesser der Kernlitze zwischen den benachbarten Seitenlitzten ein kleiner

Zwischenraum entsteht. Aber bei Litzenseilen mit Hanfseele verringert sich unter Belastung die Hanfseele in radialer Richtung, dabei wird der Zwischenraum zwischen den Seitenlitzten kleiner. Wenn die Zugbelastung einen bestimmten Wert erreicht, berühren sich die Seitenlitzten.

Dagegen verengt sich bei einem Litzenseil, dessen Kernlitze aus Drähten besteht, diese Kernlitze in radialer Richtung weniger als eine Hanfseele, sodaß sich die Seitenlitzten nicht berühren. Daraus kann man folgern, daß man bei der Analyse der mechanischen Eigenschaften im Fall eines Litzenseiles mit Kernlitze den Druck X_1 zwischen den Seitenlitzten und der Kernlitze, und im Fall eines Litzenseiles mit Hanfseele außerdem den Druck Y_1 zwischen den Seitenlitzten in Betracht ziehen muß. Weiter braucht man bei Litzenseilen mit Hanfseele nur den Druck Y_1 zu berücksichtigen, weil wegen der gegenseitigen Berührung der Seitenlitzten die Hanfseele keinen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften haben wird. Wir untersuchten besagte drei Fälle.

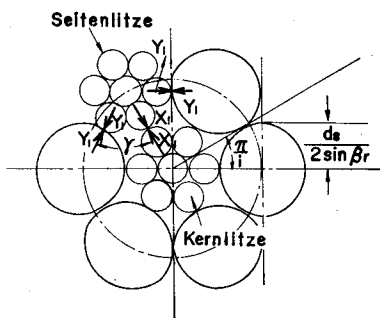


Bild 2. Zwischen Kernlitze und Seitenlitzten wirkende Kräfte.

2.2.1 Theoretische Analyse unter Berücksichtigung des Druckes X_1 zwischen Seitenlitzten und Kernlitze

Wenn wir eine Litze als Draht betrachten und die äquivalente Zug-, Biege-, Torsions-, und Schub-Steifigkeit ermitteln, können wir die mechanischen Eigenschaften in der gleichen Weise wie beim Spiralseil analysieren.

Bei Zug erhält man dann die folgende Gleichung für die Beziehung zwischen Seitenlitzten und Kernlitze:

$$\left. \begin{aligned} j_{11} X_1 + j_{21} P_1 + j_{31} N_1 &= j_{10} P_0 \\ q_{11} X_1 + q_{21} P_1 + q_{31} N_1 &= q_{30} N_0 \\ k_{11} X_1 + k_{21} P_1 + k_{31} N_1 &= k_{10} X_1 + k_{20} P_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

Gl. (9) ergibt sich auch für die n -te Litzenlage. Die Gleichgewichts-Bedingungen zwischen der auf das Seil wirkenden äußeren Kraft und den inneren Kräften werden folgendermaßen ausgedrückt.

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= P_0 + i_1 P_1 + i_2 P_2 + \dots + i_n P_n \\ \bar{N} &= N_0 + i_1 N_1 + i_2 N_2 + \dots + i_n N_n + N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

i_n : Seitenlitzenzahl \bar{P} : auf das Seil wirkende Zugbelastung
 \bar{N} : auf das Seil wirkendes Torsionsmoment

N ist das sich addierende Torsionsmoment, das bei Zug auf Kernlitze und Seitenlitzten wirkt, weil die Kernlitze und Seitenlitzten aus einem Spiralseil bestehen; N verteilt sich auf das auf die Kernlitze wirkende Torsionsmoment N_0' und auf das auf die Seitenlitzten wirkende Torsionsmoment N_n' . Die Torsionsmomente N , N_0' , N_n' erhält man durch die folgenden Gleichungen:

$$\left. \begin{aligned} N &= N_0' + i_1 N_1' + i_2 N_2' + \dots + i_n N_n' \\ N_0' &= \xi_0' P_0 \\ N_n' &= \xi_n' (-R_n X_n + P_n \sin \beta_{rn}) \sin \beta_{rn} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

β_{rn} : Neigungswinkel der Seitenlitzten
 R_n : Abstand zwischen Seilmittelpunkt und Seitenlitztenmittelpunkt
 ξ_0', ξ_n' : Konstante, je nach Ausführung der Kernlitze oder Seitenlitzten. Die Werte sind positiv bei rechtsgängiger Schlagrichtung und negativ bei linksgängiger Schlagrichtung

Ferner sind N_n' und N_0' für gehemmte Eigendrehung zu berechnen, wo sich die Litzten selbst bei Zug nicht drehen.

Aus den Gl. (9), (10), (11) ergeben sich $P_0, N_0, X_1, P_1, N_1, \dots, X_n, P_n, N_n$ als Funktion von \bar{P}, \bar{N} .

(1) Bei freier Eigendrehung

Wie beim Spiralseil ergeben sich P_0, N_0 unter der Bedingung $\bar{N}=0$ als Funktion von \bar{P} , und dann bekommen wir bei Zugbelastung \bar{P} unter Berücksichtigung der Seillänge h die Dehnung δh und den Drehwinkel $\delta \psi$ des Seiles folgendermaßen.

$$\left. \begin{aligned} \delta h &= j_{10} P_0 h = j_{10} \tau' \bar{P} \\ \delta \psi &= q_{30} N_0 h = q_{30} \tau \bar{P} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

τ', τ : Konstanten

(2) Bei gehemmter Eigendrehung

Durch $N_0=0$ ergeben sich P_0 und \bar{N} als Funktion von \bar{P} , dann kann wie in Gl. (7), (8) die Dehnung und das Torsionsmoment berechnet werden.

2.2.2 Theoretische Analyse unter Berücksichtigung der Drücke X_1 und Y_1

Wenn außer X_1 ein Druck Y_1 zwischen den benachbarten Litzten entsteht (Siehe Bild 2), erhält man außer Gl. (9) eine Bedingungsgleichung für das geome-

trische Verhältnis zwischen Kernlitze und Seitenlitzen und es ergibt sich folgende Gleichung.

$$\left. \begin{aligned} l_{11}X_1 + 2l'_{11} \cos \gamma Y_1 + l_{21}P_1 + l_{31}N_1 &= 0 \\ j_{11}X_1 + 2j_{11} \cos \gamma Y_1 + j_{21}P_1 + j_{31}N_1 &= j_{10}P_0 \\ q_{11}X_1 + 2q_{11} \cos \gamma Y_1 + q_{21}P_1 + q_{31}N_1 &= q_{30}N_0 \\ k_{11}X_1 + 2k_{11} \cos \gamma Y_1 + k_{21}P_1 + k_{31}N_1 &= k_{10}X_1 + k_{20}P_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

Demgegenüber gilt bei mehr als zwei Litzenlagen Gl. (9) wie im Fall von 2.2.1 der theoretischen Analyse, aber ohne Y_1 , da sich die Seitenlitzen in dieser Lage gegenseitig fast nicht berühren. Wendet man Gl. (9), (10), (13) an, so ergeben sich $X_1, P_1, N_1, \dots, X_n, P_n, N_n$ als Funktion von \bar{P}, \bar{N} .

Hieraus kann man die Dehnung, die Drehwinkel und die Torsionsmomente bei freier und gehemmter Eigendrehung bestimmen.

2.2.3 Theoretische Analyse unter Berücksichtigung des Druckes Y_1 zwischen den benachbarten Litzen (nur Litzenseil mit Hanfseele)

Im Bereich großer Zugbelastung, wo sich Litzen gegenseitig berühren, kann man annehmen, daß der Druck X_1 zwischen der Hanfseele und den Seitenlitzen noch kleiner wird. Daher scheidet man X_1 aus, dann wird

$$2l'_{11} \cos \gamma Y_1 + l_{21}P_1 + l_{31}N_1 = 0 \dots\dots\dots(14)$$

Unter der Voraussetzung, daß eine Hanfseele die Zugbelastung fast nicht aufnimmt, wird $P_0 = N_0 = N'_0 = 0$. Für mehr als 2. Litzenlagen gilt die folgende Gleichung:

$$\left. \begin{aligned} j_{1n}X_n + j_{2n}P_n + j_{3n}N_n &= 2j_{11} \cos \gamma Y_1 + j_{21}P_1 + j_{31}N_1 \\ q_{1n}X_n + q_{2n}P_n + q_{3n}N_n &= 2q_{11} \cos \gamma Y_1 + q_{21}P_1 + q_{31}N_1 \\ k_{1n}X_n + k_{2n}P_n + k_{3n}N_n &= \omega_{1n}P_1 + \omega_{2n}N_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

Zuerst, bei freier Eigendrehung ($\bar{N}=0$), werden in Gl. (10), (14), (15), $Y_1, N_1, X_2, P_2, N_2, \dots, X_n, P_n, N_n$ als Funktion von \bar{P} ausgedrückt. Dabei werden Dehnung und Drehwinkel bestimmt.

Dann, bei gehemmter Eigendrehung ($\partial\psi=0$),

$$2q_{11} \cos \gamma Y_1 + q_{21}P_1 + q_{31}N_1 = 0 \dots\dots\dots(16)$$

Aus der ersten Gleichung von Gl. (10) und aus Gl. (14), (15), (16) erhält man $Y_1, P_1, N_1, \dots, X_n, P_n, N_n$ als Funktion von \bar{P} und man kann die Dehnung und das Torsionsmoment bestimmen.

3. Dehnungs- und Drehungsmodul

3.1 Seilelastizitätsmodul E_w

Um die Dehnung des Seiles auszudrücken wird der Seilelastizitätsmodul E_w herangezogen, und zwar ist:

$$E_w = \frac{\bar{P}}{A_r} \cdot \frac{1}{\frac{\delta h}{h}} \dots\dots\dots(17)$$

A_r : Seilquerschnitt

3.2 Eigendrehungsmodul R

Wir definieren das von der Seilausführung bestimmte Eigendrehungsverhalten als Modul R und führen folgendes aus:

Unter Zugbelastung \bar{P} wird der spezifische Torsionswinkel $\partial\psi/h$ folgendermaßen ausgedrückt.

$$\frac{\partial\psi}{h} = q_{30} N_0 = \frac{N_0}{G_0 J_{d_0}} \dots\dots\dots(18)$$

G_0 : Torsionselastizitätsmodul des Kerndrahtes

J_{d_0} : polares Trägheitsmoment des Kerndrahtes

Weil das auf den Kerndraht wirkende Torsionsmoment N_0 als eine Funktion von β_n, i_n und $\lambda_n = d_n/d_0$ betrachtet wird, ist

$$N_0 = f(\beta_n, i_n, \dots, \lambda_n) d_0 \bar{P}.$$

Wenn man $N_0, \bar{P} = \frac{\pi}{4} (1 + \sum_{n=1}^n i_n \lambda_n^2) d_0^2 \sigma_B \eta, J_{d_0} = \frac{\pi d_0^4}{32}$ und $d_r = \{1 + 2(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)\} d_0$ in Gl. (18) einsetzt, wird der spezifische Torsionswinkel,

$$\frac{\partial\psi}{h} = \frac{8f\sigma_B\eta k}{G_0 d_r}$$

dabei ist:

σ_B : Zugfestigkeit des Drahtes k, η : Konstanten

d_r : Seildurchmesser

Angenommen, daß die Belastung ein Sechstel der Bruchbelastung beträgt ($\eta = 1/6$), ist der Torsionswinkel R für ein Seil von zehnfacher Länge des Seildurchmessers ($h = 10 d_r$):

$$R = \frac{40}{3} \cdot \frac{f\sigma_B k}{G_0} \dots\dots\dots(19)$$

R ist also eine nur von der Seilausführung bestimmte Kennziffer.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Versuchsverfahren

4.1.1 Zugprüfung

Die Zugprüfungen wurden auf zwei Zugprüfungsmaschinen für Seile mit maximalen Kapazitäten von 1000t und 300t durchgeführt (Siehe Bild 3). Zur Messung der Drehwinkel und Dehnung bei freier Eigendrehung ließen wir Ringe

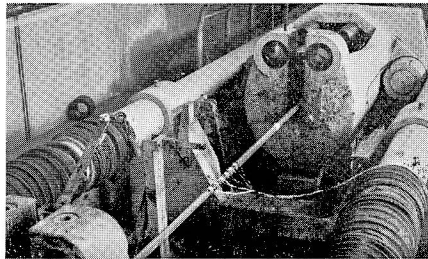


Bild 3. Seilzugprüfungsmaschine.

eines doppelseitig wirkenden Axial-Rillenkugellagers, in das das freie Ende des Seiles mündete, mittels eines Motors abwechselnd in den beiden Richtungen rotieren, damit der Widerstand zwischen dem gedrehten Teil und dem ungedrehten Teil möglichst klein wurde. Dann nahmen wir den Durchschnitt von aus den Versuchsergebnissen je in den beiden Richtungen.

Bei gehemmter und freier Eigendrehung wurden die Seile wiederholt bis zu etwa fünfzig Prozent der Bruchbelastung gedehnt und dabei wurden folgende Eigenschaften gemessen:

- (1) Dehnung (bei gehemmter und freier Eigendrehung)

Wir haben gegen die beiden Enden des Seiles hin zwei Markierungen angebracht und deren Ortsverschiebung mit zwei Dehnungsmessern gemessen.

Dabei zeigte der Unterschied zwischen den gemessenen Werten die Dehnung des Seiles an.

- (2) Drehwinkel (bei freier Eigendrehung)

Wir haben am Ende des Seiles einen Zeiger angebracht und die Drehwinkel auf einer graduierten Skala, die an der Fixierung festgemacht war, abgelesen.

- (3) Torsionsmoment (bei gehemmter Eigendrehung)

Wir haben das Torsionsmoment mittels eines Torsionsmessers mit Hebelarm gemessen.

Ausführungen der Probespiralseile und Probelitzenseile werden in Tafel 1, 2 gezeigt.

Tafel 1. Ausführungen der Probespiralseile.

Seil- ausführung	d_r mm	d_0 mm	1. Lage			2. Lage			3. Lage			4. Lage		
			d_1 mm	α_{s1}	Schlag- richtung	d_2 mm	α_{s2}	Schlag- richtung	d_3 mm	α_{s3}	Schlag- richtung	d_4 mm	α_{s4}	Schlag- richtung
1x 7G/S	9,40	3,50	2,95	14°28'	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1x19G/S	15,30	3,50	2,95	14°28'	S	2,95	13°57'	S	–	–	–	–	–	–
1x19G/S	16,60	3,80	3,20	14°30'	S	3,20	13°50'	S	–	–	–	–	–	–
1x37G/S	21,20	3,50	2,95	14°28'	S	2,95	13°57'	S	2,95	13°32'	S	–	–	–
1x37G/S	23,30	3,80	3,20	14°30'	S	3,20	13°50'	S	3,20	13°46'	S	–	–	–
1x37O/S	18,89	2,90	2,698	18°06'	Z	2,698	14°00'	S	2,599	15°52'	S	–	–	–
1x61O/S	24,15	2,90	2,703	18°03'	S	2,70	14°36'	Z	2,694	13°44'	S	2,598	14°28'	S
1x61G/S	40,48	4,72	4,47	15°21'	S	4,47	13°45'	Z	4,47	14°16'	Z	4,47	14°12'	S

d_r : Seildurchmesser d_1, d_2, d_3, d_4 : Seitendrahtdurchmesser

d_0 : Kerndrahtdurchmesser $\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \alpha_{s3}, \alpha_{s4}$: Schlagwinkel

Tafel 2. Ausführungen der Probelitzenseile für Zugprüfung.

Seil- ausführung	d_r mm	S_r ton	d_n mm	α_r	α_s		
					1. Lage	2. Lage	3. Lage
6x 7C/L	12	8,7	1,33	16°06' Z	10°57' Z	—	—
6x19O/O	16	14,1	1,06	20°42' Z	13°09' S	12°58' S	—
6x24G/O	20	18,5	1,11	16°00' Z	17°35' S	15°50' S	—
6x24G/O	23,4	24,1	1,22	18°41' Z	17°46' S	16°02' S	—
6x37O/O	12,8	7,9	0,57	18°51' Z	13°38' S	13°27' S	13°18' S
6x37O/O	18	17,5	0,87	16°58' Z	15°10' S	14°34' S	14°21' S

Seilausführung		d_r mm	S_r ton	d_o mmm	d_n	α_r	α_s
HC 18x7	Innenlitze	19,4	22,8	1,30	1,25	21°37' S	15°27' S
	Außenlitze			1,25	1,21	22°26' Z	14°55' S
HC 18x7	Innenlitze	30,3	54,0	2,02	1,93	22°15' S	15°25' S
	Außenlitze			1,93	1,86	22°18' Z	14°49' S

d_r : Seildurchmesser α_r : Seilschlagwinkel
 S_r : Seilbruchbelastung α_s : Litzenschlagwinkel
 d_n : Seitendrahtdurchmesser d_o : Kerndrahtdurchmesser

4.1.2 Aufhängeprüfung

Um die Eigendrehung des Seiles zu messen, wurde ein Seil aufgehängt, und an dessen unterem Ende ein Gewicht befestigt. Dabei wurde der Drehwinkel durch einen Drehungsmesser angezeigt.

Tafel 3 zeigt die Ausführungen für die Versuchslitzenseile.

Tafel 3. Ausführungen der Probelitzenseile für Aufhängeprüfung.

Seil- ausführung	d_r mm	S_r ton	d_n mm	α_p	Litzenschlagwinkel α_s		
					1. Lage	2. Lage	3. Lage
6x7 C/L	32	67,3	3,55	15°44' Z	11°23' Z	—	—
6x 7 C/O	32	67,0	3,57	16°15' Z	10°29' S	—	—
6x37 G/O	50	161,2	2,40	16°40' Z	12°51' S	12°32' S	12°25' S
7x 7 C/L	32	78,2	3,57	14°58' Z	10°49' Z	—	—
7x 7 G/O	32	80,3	3,55	12°14' Z	9°56' S	—	—

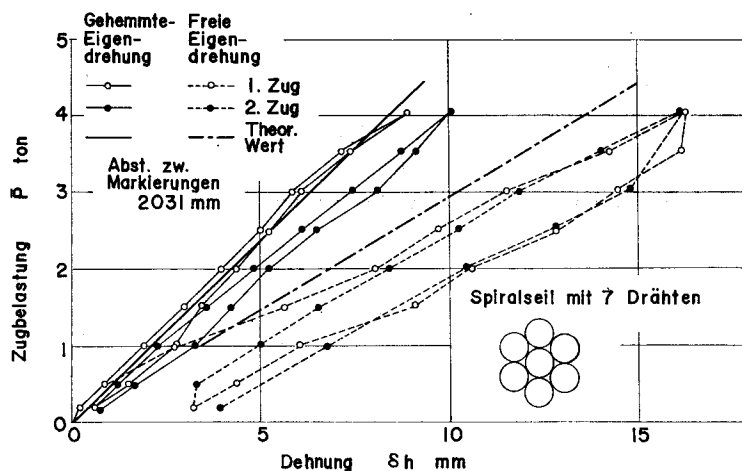
 d_r : Seildurchmesser d_n : Seitendrahtdurchmesser der äußersten Lage S_r : Seilbruchbelastung α_p : Seilschlagwinkel

4.2 Versuchsergebnisse

4.2.1 Spiralseil

(1) Dehnung

Bild 4, 5, 6 zeigen Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für Spiralseile mit z.B. 7, 19, 61 Drähten. Auch Tafel 4 zeigt die Seilelastizitätsmoduln E_w , die aus den Versuchsergebnissen, unter Außerachtlassung der beim ersten Zug auftretenden Hysterisis-Schleifen, berechnet wurden.

Bild 4. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für $1 \times 7G/S$ -Seil.

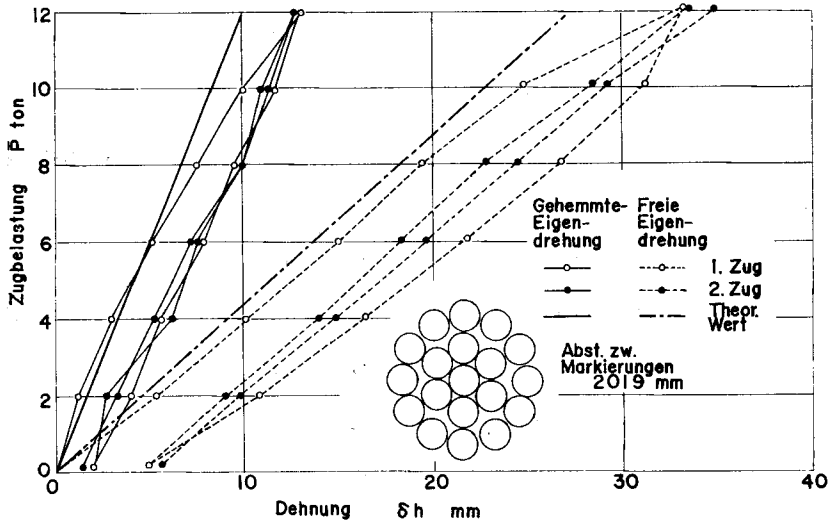


Bild 5. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für $1 \times 19G/S$ -Seil (SS).

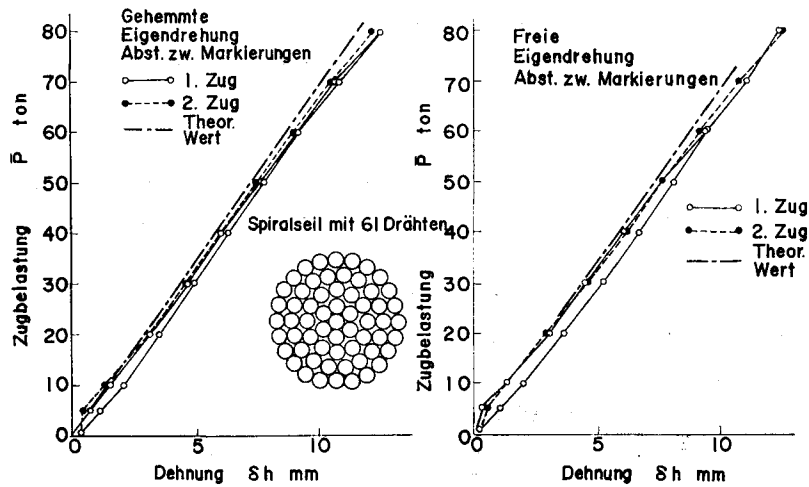


Bild 6. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für $1 \times 61G/S$ -Seil (SZZS),

Aus diesen Bildern und Tafel 4 haben wir folgende Resultate erhalten:

(i) Bei jedem Spiralseil entsteht beim ersten Zug eine für das Seil charakteristische Hysterisis-Kurve.

(ii) Bei freier Eigendrehung, abgesehen von Spiralseil (SZZS) mit 61 Drähten, (siehe (iv)) ist die Dehnung merkwürdigerweise größer als bei den Seilen mit gehemmter Eigendrehung.

Tafel 4. Seilelastizitätsmodul E_w für Spiralseile.

Seil- ausführung	Elastizitätsmodul E_w kg/mm ²	
	Gehemmte Eigendrehung	Freie Eigendrehung
1 x 7 G/S (S)	$1,91 \times 10^4$	$1,16 \times 10^4$
1 x 19 G/S (SS) 15,3 ϕ	$1,73 \times 10^4$	$0,61 \times 10^4$
1 x 37 G/S (SSS) 21,2 ϕ	$1,71 \times 10^4$	$0,47 \times 10^4$
1 x 37 O/S (ZSS)	$1,81 \times 10^4$	$0,89 \times 10^4$
1 x 61 O/S (SZSS)	$1,85 \times 10^4$	$1,01 \times 10^4$
1 x 61 G/S (SZSS)	$1,86 \times 10^4$	$1,75 \times 10^4$

(iii) Je größer bei in einer Richtung geschlagenen Spiralseilen die Lagenzahl ist, desto größer wird E_w bei freier Eigendrehung im Verhältnis zur gehemmten Eigendrehung.

(iv) Dagegen weist das Spiralseil mit 61 Drähten (SZSS) keinen Unterschied zwischen der Dehnung bei freier Eigendrehung und der bei gehemmter Eigendrehung auf.

(2) Drehwinkel und Torsionsmoment

Bilder 7, 8, 9 zeigen Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurven der verschiedenen Spiralseile. Im Spiralseil mit 61 Drähten tritt bei gehemmter Eigendrehung ein Torsionsmoment auf, wie es in Bild 10 gezeigt wird. Auch Tafel 5 zeigt den Eigendrehungsmodul R für verschiedene Spiralseile. Aus diesen Bildern und der Tafel ist das folgende zu entnehmen:

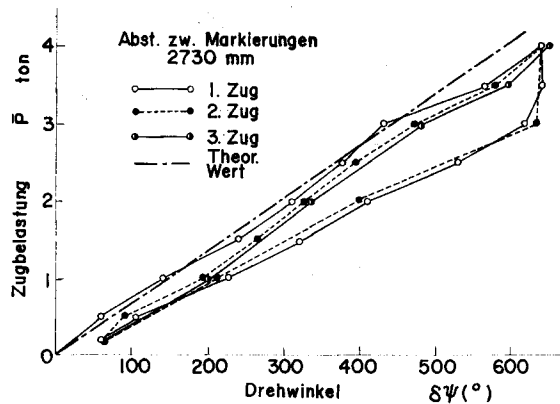


Bild 7. Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurve für 1 x 7 G/S-Seil.

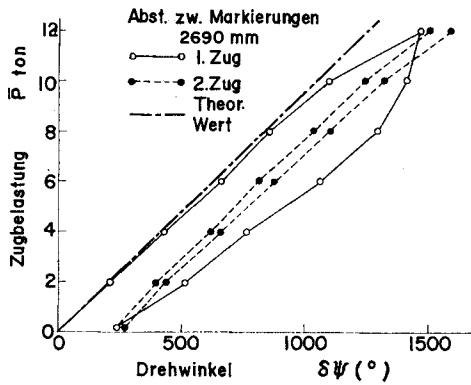


Bild 8. Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurve für $1 \times 19G/S$ -Seil (SS).

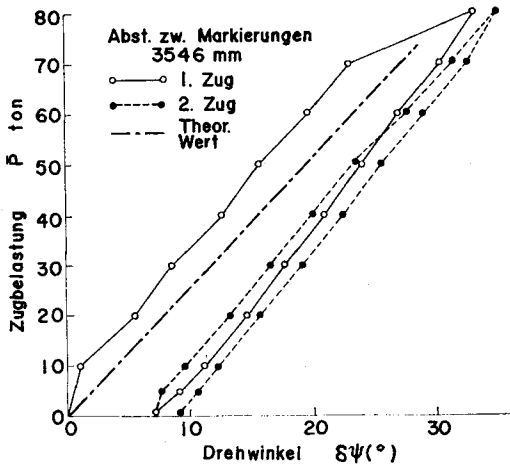


Bild 9. Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurve für $1 \times 61G/S$ -Seil (SZZS).

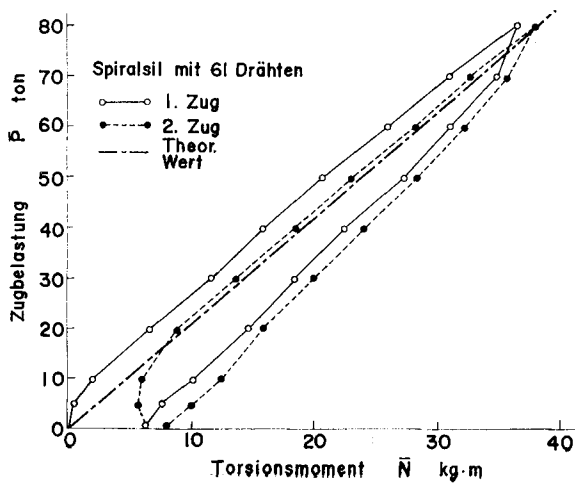


Bild 10. Zugbelastungs-Torsionsmoment-Kurve für $1 \times 61G/S$ -Seil (SZZS).

Tafel 5. Eigendrehungsmoduln R für Spiralseile.

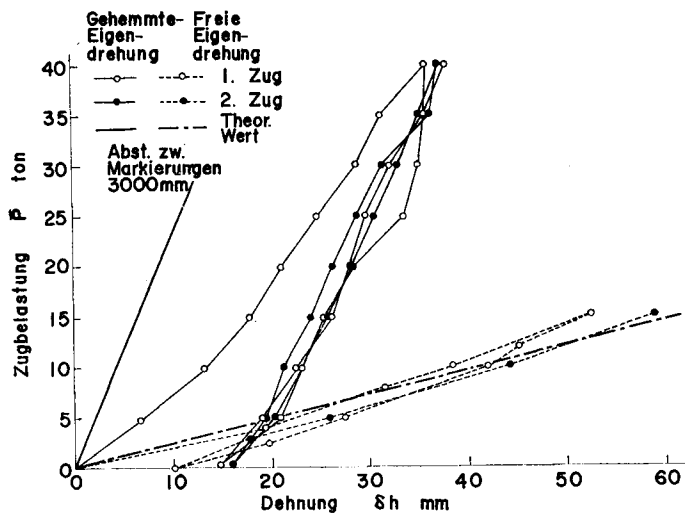
Seil- ausführung	Schlagschema	Seil- durchmesser	Eigendrehungs- modul R (°)
1 x 7 G/S	S	9,4	7,2
1 x 19 G/S	SS	15,30	18,7
1 x 19 G/S	SS	16,60	18,9
1 x 37 G/S	SSS	21,20	31,2
1 x 37 G/S	SSS	23,30	31,3
1 x 37 O/S	ZSS	18,89	16,2
1 x 61 O/S	SZSS	24,15	9,7
1 x 61 G/S	SZZS	40,48	1,1

Bei freier Eigendrehung werden die Drehwinkel in den Spiralseilen mit zunehmender Dehnung sehr groß. In einseitig geschlagenen Spiralseilen werden die Drehwinkel größer mit höherer Lagenzahl. Bei dem Spiralseil mit 61 Drähten werden die Drehwinkel kleiner, weil die Schlagrichtung durch Drahtlagen wechselt.

4.2.2 Litzenseil

(1) Dehnung

Bilder 11, 12, 13 zeigen bei gehemmter und freier Eigendrehung die Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für verschiedene Litzenseile. Auch Bild 14 zeigt die

Bild 11. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für $6 \times 7C/L$ -Seil.

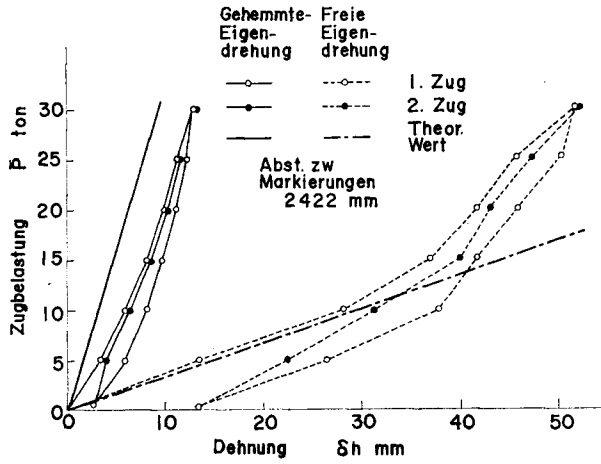


Bild 12. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für 6×37G/O-Seil.

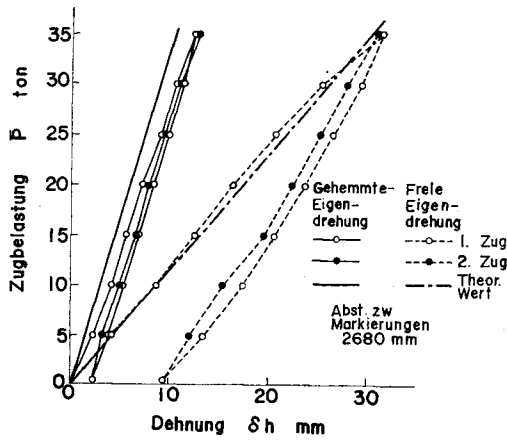


Bild 13. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für 7×7G/O-Seil.

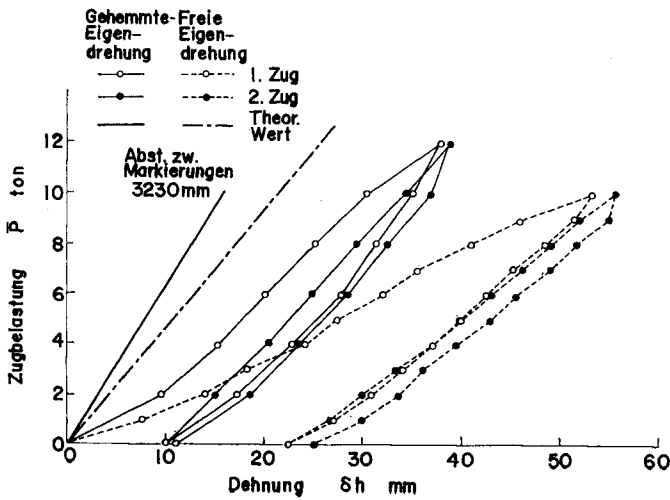


Bild 14. Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven für HC 18×7, 19,4φ-Seil.

Tafel 6. Elastizitätsmodul E_w für Litzenseile.

Seil- ausführung	Elastizitätsmodul E_w kg/mm ²	
	Gehemmte Eigendrehung	Freie Eigendrehung
6 x 7 C/L	1,43 x 10 ⁴	0,17 x 10 ⁴
6 x 7 C/O	1,54 x 10 ⁴	0,24 x 10 ⁴
6 x 37 G/O	0,56 x 10 ⁴	0,07 x 10 ⁴
7 x 7 C/L	1,52 x 10 ⁴	0,34 x 10 ⁴
7 x 7 G/O	1,57 x 10 ⁴	0,72 x 10 ⁴
18 x 7 O/O (19,4 ϕ)	1,20 x 10 ⁴	0,72 x 10 ⁴
18 x 7 O/O (30,3 ϕ)	1,10 x 10 ⁴	0,70 x 10 ⁴

Zugbelastungs-Dehnungs-Kurven des HC 18×7 Litzenseiles mit 2 Litzenlagen, das als eigendrehungsfreies Litzenseil ausgelegt ist. Im Tafel 6 stehen für die verschiedenen Litzenseile die Seilelastizitätsmoduln E_w , wie sie, unter Außerachtlassung der Versuchsergebnisse beim ersten Zug, berechnet wurden.

Aus diesen Bildern und der Tafel ist das folgende zu entnehmen.

(i) Außer im Fall des HC 18×7 Litzenseiles, sind, wie beim Spiralseil, die Seilelastizitätsmoduln E_w bei gehemmter Eigendrehung merklich verschieden von den E_w bei freier Eigendrehung, und bei den einzelnen Litzenseilen wird E_w bei freier Eigendrehung merklich klein. D.h. hier sind die Dehnungen bei freier Eigendrehung sehr groß.

(ii) Das Verhältnis der E_w -Werte bei gehemmter zu freier Eigendrehung bei einem Litzenseil mit Kernlitze ist kleiner als bei einem Litzenseil mit Hanfseele, und es ist besonders klein bei einem Litzenseil mit Gleichschlag und bei Seilen mit größerer Drahtzahl.

(iii) Dagegen ist bei einem HC 18×7-Seil, dessen 1. Litzenlage in der Gegenrichtung zur 2. Litzenlage geschlagen wird, der Unterschied zwischen der Dehnung bei gehemmter und bei freier Eigendrehung nicht so groß wie bei einem Litzenseil mit einer Litzenlage.

(2) Drehwinkel und Torsionsmoment

Bilder 15, 16, 17 zeigen Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurven der verschiedenen Litzenseile und Bild 18 zeigt Zugbelastungs-Torsionsmoments-Kurven.

In Tafel 7 sind die Eigendrehungsmoduln R gegeben, wie sie aus den Ergeb-

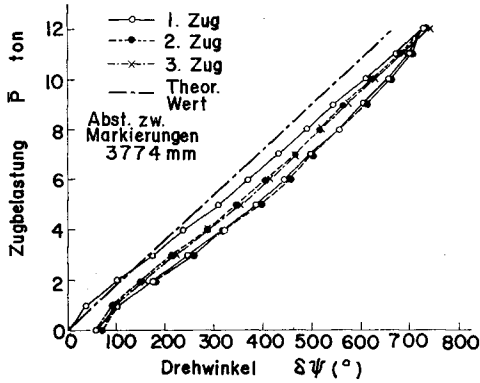


Bild 15. Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurve für $6 \times 7C/O$ -Seil.

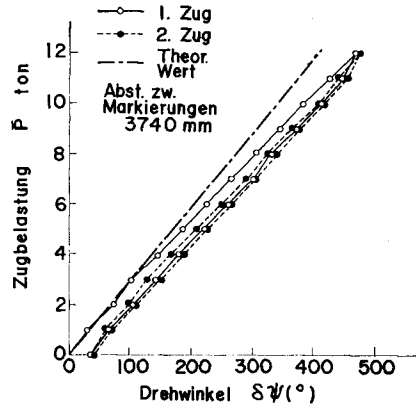


Bild 16. Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurve für $7 \times 7C/L$ -Seil,

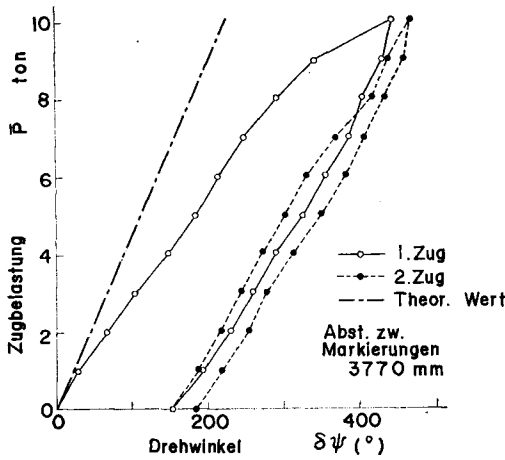


Bild 17 Zugbelastungs-Drehwinkel-Kurve für $HC 18 \times 7, 30,3\phi$ -Seil.

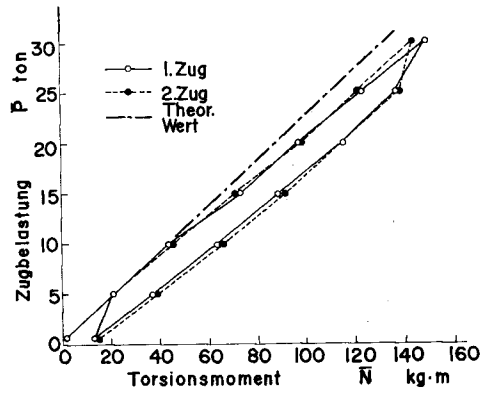


Bild 18. Zugbelastungs-Torsionsmoment-Kurve für $6 \times 37G/O$ -Seil.

nissen der Zug- und Aufhänge-Prüfungen berechnet wurden. Aus diesen Bildern und der Tafel ist das folgende zu entnehmen.

(i) Je stärker die Drehung bei freier Eigendrehung, desto größer die Dehnung des Litzenseiles.

(ii) Bei Litzenseilen mit Hanfseele beträgt R das Vielfache von Litzenseilen mit Kernlitze. Zum Beispiel ist R bei einem $6 \times 7 C/L$ -Seil etwa doppelt so groß wie bei einem $7 \times 7 C/L$ -Seil.

(iii) Unter den Litzenseilen mit Hanfseele drehen Kreuzschlagseile etwa stärker als Gleichschlagseile.

(iv) Dagegen unterscheiden sich bei den Litzenseilen mit Kernlitze die R -

Tafel 7. Eigendrehungsmoduln R für Litzenseile.

Seil- ausführung	Seil- durch- messer	Eigendrehungsmodul R (°)	
		Exper. Wert	Theor. Wert
6 x 7 C/L	12	91	83
6 x 7 C/L	32	88	88
6 x 7 O/O	32	56	53
6 x 19 O/O	16	112	97
6 x 24 G/O	20	118	123
6 x 24 G/O	23,4	158	145
6 x 37 O/O	12,8	147	155
6 x 37 O/O	18	144	133
6 x 37 G/O	50	144	140
7 x 7 C/L	32	40	36
7 x 7 G/O	32	25	23
18 x 7 O/O	19,4	5	4
18 x 7 O/O	30,3	5	4

Werte bei Gleichschlag- und Kreuzschlagseilen nicht so sehr wie bei Litzenseilen mit Hanfseele.

(v) Bei einem HC 18×7 -Seil ist R sehr viel kleiner als bei einem Litzenseil mit einer Litzenlage.

5. Vergleich der theoretischen Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen

In Bildern 4–18 sind die aus Gl. (5), (7), (8), (12) erzielten theoretischen Resultate (unter Berücksichtigung der Drücke X_1 , Y_1 im Litzenseil mit Hanfseele, und nur des Druckes X_1 im Litzenseil mit Kernlitze) dargestellt.

In allen Fällen stimmen die theoretischen Werte mit den Versuchsergebnissen, abgesehen von der beim ersten Zug auftretenden Hysteresis, sehr gut überein. Weil sich also bestätigt hat, daß unsere theoretische Methode auch für die Analyse der Dehnungs- und Drehungseigenschaften von Spiral- und Litzenseilen gültig ist,

nehmen wir an, daß eigendrehungsfreie Seile allgemein nach unserer Methode berechnet werden können.

6. Zusammenfassung

Aus einem Vergleich zwischen den theoretischen und den Versuchsergebnissen haben wir folgende Resultate erhalten.

(1) Die theoretische Methode, die die Drücke zwischen den Drähten, zwischen den benachbarten Litzen und zwischen den Litzen und der Hanfseele, berücksichtigt, eignet sich für die Bestimmung der Dehnungs- und Drehungseigenschaften. Eigendrehungsfreie Seile können also nach dieser theoretischen Methode berechnet werden.

(2) Die Eigendrehungstendenz wird quantitativ von R bestimmt.

(3) Bei einseitig geschlagenen Spiralseilen mit mehreren Lagen und Litzenseilen mit einer Litzenlage wird die Dehnung bei freier Eigendrehung merkwürdigerweise größer als bei gehemmter Eigendrehung.

(4) Bei freier Eigendrehung drehen sich sehr stark dehnbare Seile viel stärker.

(5) Bei Spiralseilen und Litzenseilen, die als eigendrehungsfreie Seile mit verschiedener Schlagrichtung ausgelegt sind, ist die Dehnung bei freier und gehemmter Eigendrehung beinahe gleich, und sie ist merkwürdig klein.

Schrifttum

- 1) H. Heinrich: Wasserwirtschaft und Technik, S. 271, H. 28/30 (1937)
- 2) F. Hruska: Wire and Wire Products, p. 459, 27, May (1952)
- 3) F. Hruska: Wire and Wire Products, p. 455, 28, May (1953)
- 4) Th. Wyss: Die Stahldrahtseile der Transport- und Förderanlagen, (1956)
- 5) E. Engel: Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, S. 33, H. 1, 1 (1958)
- 6) E. Engel: Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, S. 215, H. 6, 2 (1959)
- 7) A. Leissa: Wire and Wire Products, p. 307, 372, 34, March (1959)
- 8) W. Bert, R. Stein: Wire and Wire Products, p. 621, 37, May (1962)
- 9) E. Czitary: Seilschwebbahnen (1962)
- 10) G. Bechtloff: Draht-Welt, S. 251, H. 7, 49, Juli (1963)
- 11) S. Owada: Report of the Institut of Industrial Science, Univ. of Tokyo, 4, March (1955)

Anhang

$$\begin{aligned}
j_{1n} &= R_{wn}^3 \left(-\frac{1}{a_n R_{wn}^2} + \frac{\operatorname{tag}^2 \beta_{sn} - 1}{b_n} + \frac{2}{c_n} + \frac{1}{e_n R_{wn}^2} \right) \\
j_{2n} &= R_{wn}^2 \left(\frac{\sin \beta_{sn}}{a_n R_{wn}^2} + \frac{\sin \beta_{sn}}{b_n} + \frac{\cos \beta_{sn} \cot \beta_{sn}}{c_n} + \frac{\cos \beta_{sn} \cot \beta_{sn}}{e_n R_{wn}^2} \right) \\
j_{3n} &= R_{wn} \left(\frac{1}{c_n} - \frac{1}{b_n} \right) \cos \beta_{sn} \\
q_{1n} &= R_{wn}^2 \left(-\frac{\cot \beta_{sn}}{a_n R_{wn}^2} + \frac{2 \cot 2\beta_{sn}}{b_n} + \frac{2 \operatorname{tag} \beta_{sn}}{c_n} - \frac{\operatorname{tag} \beta_{sn}}{e_n R_{wn}^2} \right) \\
q_{2n} &= R_{wn} \left(\frac{1}{a_n R_{wn}^2} - \frac{1}{b_n} + \frac{1}{c_n} - \frac{1}{e_n R_{wn}^2} \right) \cos \beta_{sn} \\
q_{3n} &= \frac{\cos \beta_{sn} \cot \beta_{sn}}{b_n} + \frac{\sin \beta_{sn}}{c_n} \\
k_{1n} &= -\frac{R_{wn}^3}{\left(1 - \frac{d_n}{2R_{wn}}\right) \cos^2 \beta_{sn}} \left(\frac{d_n \cos^2 \beta_{sn}}{2m_n a_n R_{wn}^3} + \frac{K_n \cos^2 \beta_{sn}}{R_{wn}^4} + \frac{\cos^2 2\beta_{sn}}{b_n \cos^2 \beta_{sn}} + \frac{4 \sin^2 \beta_{sn}}{c_n} \right) \\
k_{2n} &= \frac{R_{wn}^2}{\left(1 - \frac{d_n}{2R_{wn}}\right) \cos^2 \beta_{sn}} \left(\frac{d_n \sin 2\beta_{sn} \cos \beta_{sn}}{4m_n a_n R_{wn}^3} + \frac{\cos 2\beta_{sn} \sin \beta_{sn}}{b_n} - \frac{\sin 2\beta_{sn} \cos \beta_{sn}}{c_n} \right) \\
k_{3n} &= -\frac{R_{wn}}{\left(1 - \frac{d_n}{2R_{wn}}\right) \cos^2 \beta_{sn}} \left(\frac{\cos 2\beta_{sn} \cos \beta_{sn}}{b_n} + \frac{\sin 2\beta_{sn} \sin \beta_{sn}}{c_n} \right) \\
\omega_{1n-1} P_0 + \omega_{2n-1} N_0 &= \frac{2}{D_{n-1}} \left\{ \left(f_{1n-1} + \frac{d_{n-1} R_{wn-1}}{2m_{n-1} a_{n-1}} + K_n \right) X_{n-1} \right. \\
&\quad \left. + \left(f_{2n-1} - \frac{d_{n-1} \sin \beta_{sn-1}}{2m_{n-1} a_{n-1}} \right) P_{n-1} + f_{3n-1} N_{n-1} \right\} \\
f_{1n} &= -\frac{R_{wn}^4}{\cos^2 \beta_{sn}} \left(\frac{\cos^2 2\beta_{sn}}{b_n \cos^2 \beta_{sn}} + \frac{4 \sin^2 \beta_{sn}}{c_n} \right) \\
f_{2n} &= \frac{R_{wn}^3}{\cos^2 \beta_{sn}} \left(\frac{\cos 2\beta_{sn} \sin \beta_{sn}}{b_n} - \frac{\sin 2\beta_{sn} \cos \beta_{sn}}{c_n} \right) \\
f_{3n} &= -\frac{R_{wn}^2}{\cos^2 \beta_{sn}} \left(\frac{\cos 2\beta_{sn} \cos \beta_{sn}}{b_n} + \frac{\sin 2\beta_{sn} \sin \beta_{sn}}{c_n} \right) \\
K_n &= \frac{m_n - 1}{m_n E_n \left(1 - \frac{d_n}{2R_{wn}}\right) d_n}
\end{aligned}$$

Dabei ist für Spiralseil

R_{wn} : mittlerer Windungshalbmesser der Seitendrähte

D_n : Kreisdurchmesser des Umkreises um die Drähte der Lage n

β_{sn} : Neigungswinkel der Seitendrähte

d_n : Drahtdurchmesser

$$a_n = A_{d_n} E_n, \quad b_n = I_{d_n} E_n, \quad c_n = J_{d_n} G_n, \quad e_n = A_{d_n} G_n$$

E_n : Elastizitätsmodul des Drahtes

m_n : Poissonsche Zahl des Drahtes

A_{d_n} : Querschnitt des Drahtes

I_{d_n} : Trägheitsmoment des Drahtes

G_n : Torsionselastizitätsmodul des Seitendrahtes

J_{d_n} : Polares Trägheitsmoment des Drahtes

$$j_{10} = 1/a_0, \quad q_{30} = 1/c_0, \quad k_{10} = \frac{m_0 - 1}{m_0 E_0 \left(1 - \frac{d_1}{2R_{w1}}\right) d_1}, \quad k_{20} = -\frac{1}{m_0 a_0}$$

$$a_0 = A_{d_0} E_0, \quad c_0 = J_{d_0} G_0$$

E_0 : Elastizitätsmodul des Kerndrahtes

A_{d_0} : Querschnitt des Kerndrahtes

G_0 : Torsionselastizitätsmodul des Kerndrahtes

J_{d_0} : Polares Trägheitsmoment des Kerndrahtes

m_0 : Poissonsche Zahl des Kerndrahtes

Für Litzenseil

die Koeffizienten $j_{1n}, j_{2n}, \dots, k_{3n}, f_{1n}, f_{2n}, f_{3n}$ werden für die Steifigkeiten des Drahtes durch Einsetzen der Zug-, Biege-, Torsions- und Schub-Steifigkeit der Litze berechnet, und für β_{sn}, m_n, d_n durch Einsetzen des Neigungswinkels des Seiles, der Poissonschen Zahl der Litze und des Litzendurchmessers. $j_{10}, q_{30}, k_{10}, k_{20}$ resultieren aus der geometrischen Form und der Zug- und Torsions-Steifigkeit der Hanfseele oder Kernlitze.