

EINSATZ VERBESSERTER VOLLMETALLISCHER SEILKONSTRUKTIONEN IN TREIBSCHEIBENANTRIEBEN

P. GRÄBNER

Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden-DDR Sektion Fahrzeugtechnik
Eingegangen am 13. März 1983

Summary

The author writes about the results of the research, which were performed by the new rope fatigue-testing machine. This machine is able to fatigue with stochastic loading. The article informs the process of the number of the wiresplices, coefficient of friction, of Seal- and whole-steel-ropes in function of the angle of contact, of the groove-pressure and of the driving discs material.

Verzeichnis wesentlicher Symbole

a	Kurve nach Forderung der TGL 34022 (2)
b	Kurve nach Forderungen der Technischen Grundsätze für Aufzüge (1)
d	Seildurchmesser
F	Seilkraft
g	Erdbeschleunigung
$G(\omega)$	spektrale Leistungsdichte
j	imaginäre Einheit
m	Masse
N	Belastungswechsel; Versuchsanzahl
$p(x)$	Verteilungsdichte einer stochastischen Größe
$\nu_{\omega j}$	Frequenzfunktion
$\tilde{\nu}$	Effektivwert
x^2	quadratischer Mittelwert
t	Einlauftiefe der Treibscheibenrinne
t	Zeit
zul Z	Zahl der zulässigen Drahtbrüche
α	Sitzwinkel
β	Umschlingungswinkel
δ	Bettwinkel
ω	Kreisfrequenz
$\mu(t)$	Mittelwert einer Grundgesamtheit
μ	scheinbare Reibungszahl
μ_0	wirkliche Reibungszahl
$\sigma^2(t)$	Varianz einer Grundgesamtheit
σ	Spannung

Indizes:

<i>k</i>	Korb
<i>N</i>	Nutz
<i>D</i>	Dauerfestigkeit

Anliegen

Gemeinsam mit Betrieben der Seilindustrie der DDR arbeiten wir an der Verbesserung von Seiltrieben.

Im Vortrag wird insbesondere auf Ergebnisse eingegangen, die bei Treibscheibenantrieben erzielt wurden.

Die Resultate sind zur Anwendung im Aufzugsbau, in Rangieranlagen, Seilbahnen, Sesselliftnanlagen geeignet.

Tangierende wissenschaftliche Aufgabenstellungen wurden einbezogen.

Theoretische Grundlagen und Vorgehensweise

Die Untersuchungen beinhalten bewegte Seile.

In den oben genannten Anwendungsgebieten wurden meist Seale-Seile mit dem Aufbau 6×19 eingesetzt. Die verbesserte vollmetallische Seilkonstruktion für Treibscheibeneinsatz wird im Abb. 1 dargestellt.

Aussagen zur Lebensdauer und zu Betriebseigenschaften neuer Konstruktionen sind nur durch experimentelle Untersuchungen möglich.

Die Belastungssituation ist aus Abb. 2 erkennbar. Die Drähte der Seile unterliegen Zug-, Biege-, Schub- und Druckspannungen.

Als Modell zur Charakteristierung der auftretenden äußeren Kräfte [7] [8], [10] dient folgende Übersicht nach Abb. 3 Möglichkeiten zur Analyse der Schwingungen sind in Abb. 4 zusammengefaßt.

Das Ordnen der Kräfte nach ihrer Häufigkeit ergibt die bekannten Lastkollektive.

Für die Fördertechnik sind im Bereich der Seiltriebe und dabei z. B. für Baukrane, Umschlagkrane, Aufzüge entsprechende Zuordnungen vorzunehmen.

Eine Auswahl zeigt Abb. 5.

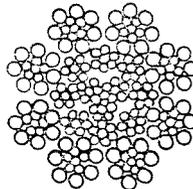


Abb. 1. Vollmetallisches Aufzugsseil — Querschnitt

Mit dieser Darstellung sind aber noch keine Aussagen zur Reihenfolge der auftretenden Belastungen an einem kritischen Seilabschnitt im Seiltrieb gegeben.

Folgende Möglichkeiten gemäß Abb. 6 bieten sich an. Die Reihenfolge muß durch ein Zufallsprogramm erzeugt werden. Für Baggerseile wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Damit kann man das Lastkollektiv, das vorgegeben wurden, realisieren und den Zufallscharakter beachten, so das Fehler, wie sie durch den Programmversuch entstehen, vermieden werden. Man muß jedoch einen zweiten Gesichtspunkt beachten. Die Analyse der Schwingungen erfolgt über Analyseverfahren, z. B. Fourieranalysen für periodische Verläufe. Neben dem Zeitbereich ist für die Seilbeanspruchung auch der Frequenzbereich bedeutungsvoll. Hierzu wurden z. B. gemeinsam mit dem Moskauer Institut für Transportingenieure Untersuchungen an Zugseilen für Zugschaufelbagger ausgewertet [6], [11].

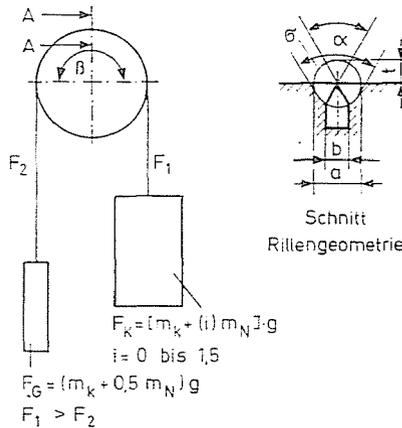


Abb. 2. Belastungssituation an der Treibscheibe

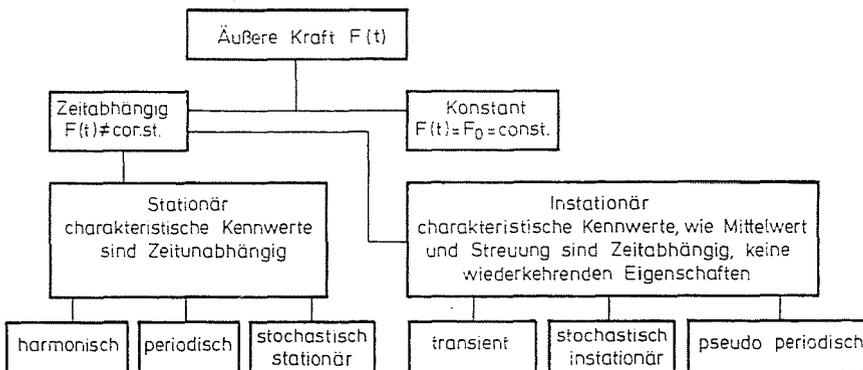


Abb. 3. Zeitfunktionen der Kraft

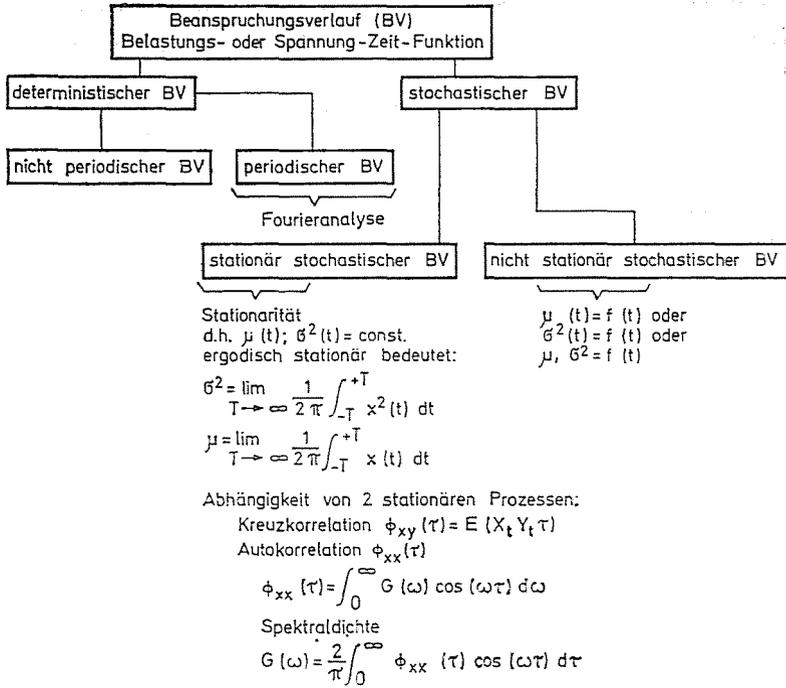
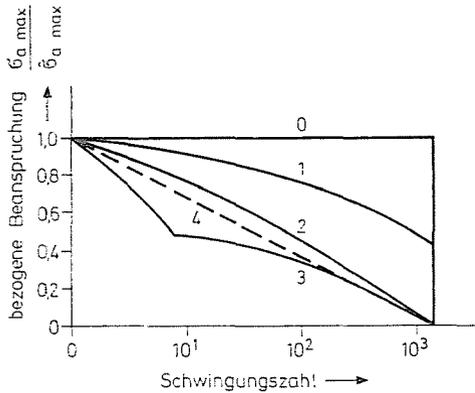


Abb. 4. Darstellung zum Beanspruchungsverlauf — Analyseverfahren



- 0: Einstufenbeanspruchung - Wöhlerversuch
- 1: Kollektivtyp I - völliger als Typ I.
- 2: Normalkollektiv - kollektiv Typ II.
- 3: Mischkollektiv - kollektiv Typ III.
- 4: Geradlinienverteilung

Abb. 5. Normkollektive

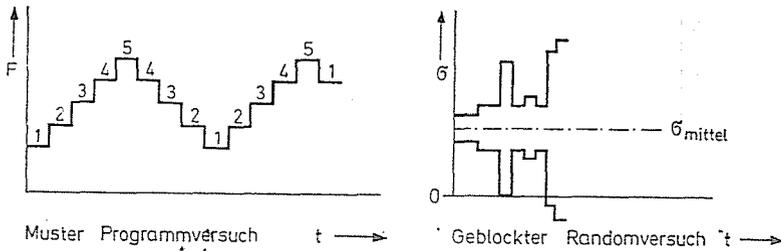


Abb. 6. Mögliche Belastungsfolgen

Die wesentlichen Zusammenhänge lassen sich wie folgt charakterisieren:

— Für die determinisierte Zeitfunktion werden Aussagen über das Fourier-Spektrum gewonnen.

Es gilt hierfür

$$X_{(j\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \tag{1}$$

— Für stochastische Zeitverläufe — es sollen dabei nur stationäre Vorgänge betrachtet werden — ist die spektrale Leistungsdichte einzige spektrale Kenngröße.

Sie ist definiert als

$$G(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\{\bar{x}^2(\omega)\}}{\Delta\omega} = \frac{d\bar{x}^2(\omega)}{d\omega} \tag{2}$$

Es gilt dabei

$$\bar{x}^2 = \tilde{x}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt \tag{3}$$

für den quadratischen Mittelwert bzw. das Quadrat des Effektivwertes.

Man kann weiter schreiben

$$\tilde{x} = \sqrt{\bar{x}^2} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2(t) dt} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx} \tag{4}$$

beachtet man, daß die Varianz

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx \tag{5}$$

ist, folgt, daß die Streuung σ für die Zeitfunktionen, die symmetrisch zur Ordinate $y = 0$ verlaufen (also $\bar{x} = 0$) mit dem Effektivwert x übereinstimmt.

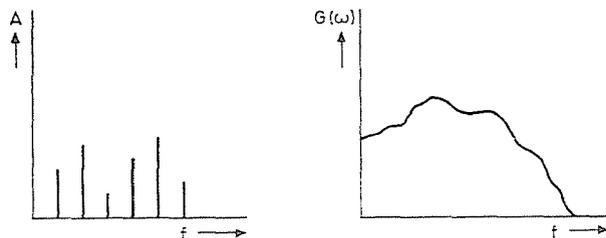


Abb. 7. Darstellung im Frequenzbereich

Mögliche Darstellungsformen für deterministischen und stationär stochastischen Verlauf dargestellt im Frequenzbereich zeigt Abb. 7.

Für die experimentelle Arbeit folgt die Notwendigkeit, im Prüfstand neben der Erzeugung von Zufallsfolgen für die Kraft beträge auch die Frequenzen ihres Auftretens zu variieren. Grundlage für das Prüfprogramm ist die Schwingungsanalyse. In unserer Prüfanlage wurde bisher nur bis zu einem Betrag von 0.5 Hz gearbeitet. Umfassendere Versuche sind in Vorbereitung.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich interessante Fragestellungen nach dem Einfluß der Frequenzen unter Beachtung der Reihenfolge auf die Seilensdauer. Darauf wird noch einmal Bezug genommen. Der Versuchsgestaltung zur Beurteilung der Drahtermüdung und damit Lebensdauerabschätzung wurden der Einstufenversuch (Wöhlerlinie) und angenäherte Randomversuche zugrunde gelegt.

Ein Gesamtprogramm unter Einbeziehung von Programmversuchen und auch auf die Zugkraft bezogene Mehrstufenversuche wird vorbereitet.

Die Bewertung erfolgt unter Einbeziehung bekannter Schadensakkumulationshypothesen, im vorliegenden Fall des Miner-Ansatzes mit

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^j n_i}{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}} \quad (6)$$

Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden beträgt

$$m = - \frac{\log N_i - \log N_j}{\log \sigma_i - \log \sigma_j} \quad (7)$$

Die Hypothesen von Corten/Dolan, Palmgren und Gnille weisen jeweils Besonderheiten auf, wie eine Darstellung gemäß Abb. 8 erkennen läßt.

Auf Einzelheiten kann nicht eingegangen werden. Für die Prüfstandspraxis von Baugruppen oder Bauteilen, also z. B. Seile, wurden Schlußfolgerungen für zeitraffende Versuche gezogen und angewendet.

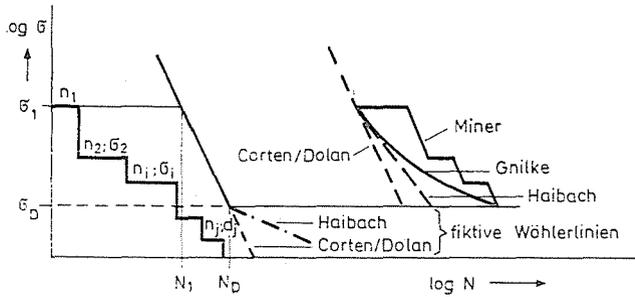


Abb. 8. Verlauf der Betriebsdauerlinien für verschiedene Berechnungsverfahren (7)

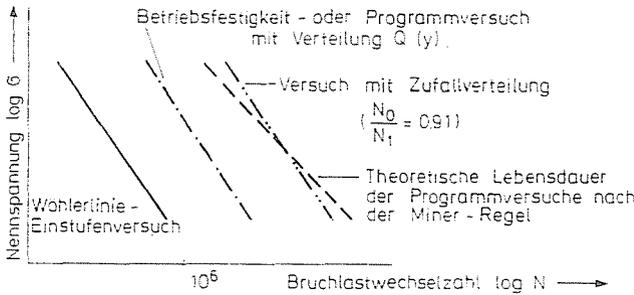


Abb. 9. Beispiel Betriebsfestigkeitslinie für Zufallsverteilung (9) Material: Al-Legierung

Zu beachten ist, daß bei Bauelementen zwischen Untersuchungsergebnissen zur Betriebsfestigkeit mit Programmbelastung und Versuchen mit zufallsverteilten Kräften entscheidende Unterschiede entstehen. Kowalewski [9] gibt für Elemente des Flugzeugbaues, Material Al-Legierung Lebensdauerquotienten je nach Belastungsart von 1 : 2 an.

Abbildung 9 zeigt den Sachverhalt, die Ergebnisse gelten für N_0/N_1 von 0.75 bis 0.98. Für andere Bauteile sind auch andere Verläufe zu erwarten.

Die bisher dargelegten Überlegungen führen zu der Fragestellung, welche Folgerungen sich für die Baugruppe Seil als inhomogenen Körper aus Stahldraht und Schmierstoff ergeben, wenn stochastische Beanspruchungen zugrundegelegt werden. Das betrifft sowohl den Kraft- als auch den Frequenzverlauf.

Es ist darauf hinzuweisen, daß in der Seilforschung die Theorie von Miner nicht kritiklos angewendet werden kann. Die Dauerfestigkeit des Seiles fällt nach einer Anzahl von Belastungen, die über der Ausgangsdauerfestigkeit liegen, ab. Ursache sind Drahtbrüche und die damit verbundene Querschnittsschwächung an der betrachteten Stelle.

Durch diese Vorgehensweise sind wesentliche Aussagen bezogen auf Ermüdung möglich.

Planmatrix Einflußgröße (Variable)	1 2 3			Matrix d. unabhängig Variablen			Antwortmatrix			
				0	1	2	3	Y ₁	Y ₂	Y ₃
Versuch-Nr.				I	12	13	23			
1	-	-	-	+	-	-	+	+	-	
2	+	-	-	+	+	-	-	-	+	
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	
4	+	+	-	+	+	+	-	-	-	
5	-	-	+	+	-	+	+	-	+	
6	+	-	+	+	+	-	+	+	-	
7	-	+	+	+	-	+	-	+	+	
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Effektmatrix										

Abb. 10. Gesamtmatrix für 2^k Versuche ($k = 3$)

Zur Bewertung und Beurteilung des Verschleißes in der Treibscheibenrille wurde die Verschleißtheorie genutzt.

Nach [13] wurde über die Verschleißintensität I_h

$$I_h = \frac{s_t}{s_s} \quad (8)$$

die Beziehung

$$s_{t_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 s_{t_2} \quad (9)$$

entwickelt. Dabei sind s_{t_1} die lineare Einlauftiefe in der Treibscheibenrille für Paarung 1 und p_i die jeweilige fiktive Flächenpressung. s_s ist der aufgetretene Schleichweg entsprechend dem Hookeschen Gesetz, da $F_1 \neq F_2$.

Zur Erhöhung der Aussagekraft und Reduzierung des experimentellen Aufwandes werden seit 1977 Methoden der statistischen Versuchsplanung angewendet.

Zum Einsatz kamen 2^k -Pläne.

Die Gesamtmatrix für 2^k Versuche mit $k = 3$ zeigt Abb. 10. Die Normalverteilung der Ergebnisse als Voraussetzung wird erfüllt. Einzelheiten sind [12] zu entnehmen.

Zu betonen ist, daß die Ergebnisse einer umfassenden statistischen Wertung unterzogen werden müssen.

Versuchsergebnisse

Schwerpunkt der Ausführungen sind wiederum Treibscheibenantriebe. Die experimentellen Untersuchungen wurden auf dem Treibscheiben- und dem Rollenprüfstand durchgeführt. Den schematischen Aufbau des Rollenprüfstandes zeigt Abb. 11.

- 1 Antriebscheibe
- 2 Seilschloß
- 3 Seilrollen
- 4 Verdrehsicherung
- 5 Belastungsarm
- 6 Hydraulikdämpfer

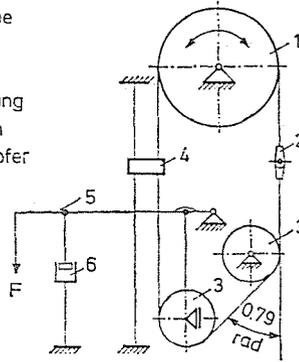


Abb. 11. Schematischer Aufbau Rollenprüfstand

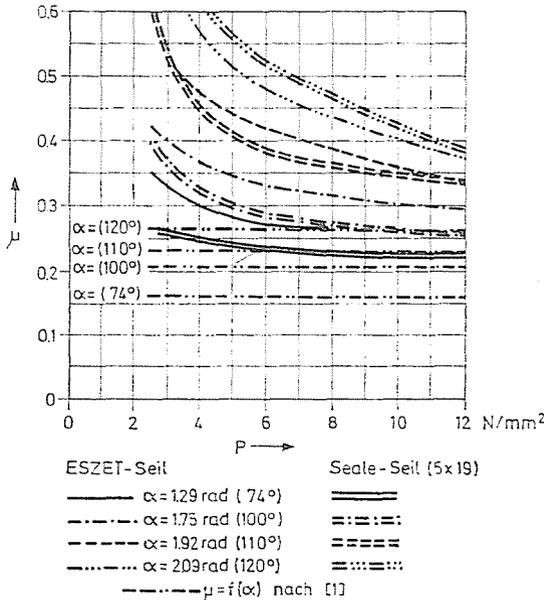


Abb. 12. Meßtechnisch ermittelte scheinbare Reibungszahl in Abhängigkeit vom Unterschnittwinkel, der Seilkonstruktion und der rechnerischen Pressung

Die Untersuchungen ergaben, daß vollmetallische Seile wesentlich genauer zu fertigen sind. Die Veränderung der geometrischen Parameter Rundheit und Seildurchmesser durch äußere Beanspruchungen im Betriebsablauf sind wesentlich geringer als bei Seale-Konstruktionen. Die Werte zeigen nur geringe Streuungen. Abbildung 12 zeigt Ergebnisse (4) zum Verlauf des Reibwertes in Abhängigkeit von den Pressungen.

Die Versuchsanlage wurde dafür umgebaut, in die Treibscheibe wurde ein Meßelement zur Aufnahme von Normal- und Tangentialkräften aufgenommen.

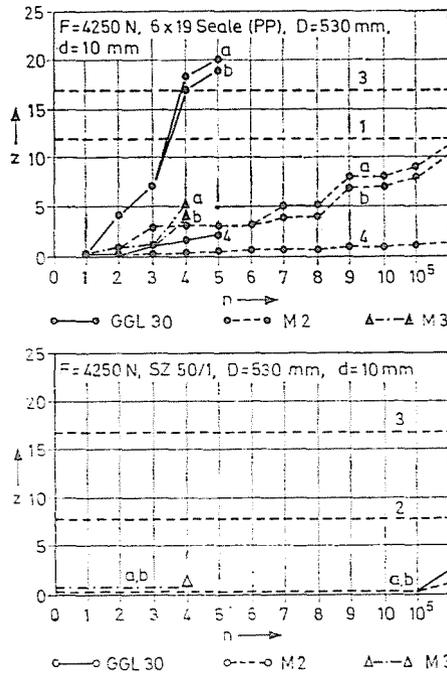


Abb. 13. Drahtbruchzahlen und Werkstoffeinfluß für $F = 4250 \text{ N}$. 1) zul. Z für a bei $l = 35 \text{ d}$ nach TGL 34022; 2) zul. Z für a bei $l = 25 \text{ d}$ nach TGL 34022; 3) zul. Z für b bei $l = 30 \text{ d}$ nach TG; 4) $Z_m(6 \text{ d})$

Die Meßwerte können kontinuierlich abgenommen und gespeichert werden. Die Auswertung erfolgt über EDV.

Die scheinbaren Reibwerte der untersuchten vollmetallischen Seile liegen höher als die der Seale-Seile. Bezogen auf die scheinbaren Reibungszahlen gemäß staatlichen Vorschriften nach (1) würden bei geringen fiktiven Pressungen um 100% höhere Werte ermittelt. Das ist für die Überwachungspraxis z. B. zur Beurteilung der Übertreibfähigkeit bedeutungsvoll.

Der scheinbare Reibwert wird nach der bekannten Gleichung — in diesem Fall für unterschmittene Rundrillen — berechnet

$$\mu = \mu_0 \frac{4 \left(\sin \frac{\delta}{2} - \sin \frac{\alpha}{2} \right)}{\delta + \sin \delta - \alpha - \sin \alpha} \quad (10)$$

Zur Beurteilung der Ermüdung wurden umfangreiche Prüfserien gefahren. Als Vergleich dienten 6×19 Seale-Konstruktionen.

Abbildung 13 zeigt ausgewählte Ergebnisse. Damit sind Rückschlüsse für Restnutzungsdauerprognosen und zur Gestaltung der Technischen Diagnose gegeben. Siehe dazu auch (5).

Den Einfluß des Scheibenwerkstoffes erkennt man deutlich aus Abb. 13. Vollmetallische Seile neigen im ungeschmierten Zustand zum Fressen, es ist ein dünner Schmierfilm im Betrieb zu gewährleisten.

Zusammenfassung

Mit dem Ziel, die Aufliegezeiten der Seile in Treibscheibenantrieben und Seiltrieben von Kranen und Baggern zu erhöhen, wurde über 2 Jahrzehnte die Entwicklung und Erprobung vollmetallischer Seile betrieben.

Die Grundlagen der erforderlichen Prüftechnik einschließlich Planung und Auswertung unter Beachtung stochastischer Belastungen wurden aufgezeigt.

Um zeitraffende und damit ökonomische experimentelle Prüfungen zu erhalten, wurden

a) Verfahren der statistischen Prüfplanung und

b) Gesetzmäßigkeiten der Wöhlerlinie bzw. Betriebsfestigkeitslinien genutzt.

Auf die Grenzen im Erkenntnisgewinn bei Programmversuchen wurde hingewiesen.

Die Untersuchung von Treibscheibenantrieben ergab, daß bei zweckmäßiger Wahl des Scheibenwerkstoffes deren Lebensdauer im Vergleich zu GG 26 um das 7fache und die Lebensdauer des vollmetallischen Seiles mindestens das 3fache des Seale-Seiles auf den besten Treibscheibenwerkstoff, bezogen, beträgt. Angaben zur Formstabilität, zum Reibwert und Verschleiß vervollständigen das Bild. Hinweise zur Wartung wurden gegeben.

Der stochastischen Prüftechnik sind weitere Arbeiten gewidmet.

Literatur

1. Anordnung über die Verbindlichkeit der technischen Grundsätze für den Bau und die Prüfung von Aufzügen vom 2. Mai 1973, Gesetzblatt der DDR, Sonderdruck 756
2. DDR-Standard, TGL 34022/01...04 Seiltriebe, 1980
3. GNILKE, W.: Möglichkeiten und Grenzen der Lebensdauerberechnung von Maschinenelementen. Maschinenbautechnik Berlin, 30, 355 (1981)
4. GRÄBNER, P.—KUHN, H.: Beitrag zur Seilbeanspruchung beim Lauf auf Treibscheiben mit Halbrundrillen und Ableitung von Folgerungen. Hebezeuge und Fördermittel, 20, 201 (1980)
5. GRÄBNER, P.—KÜNTSCHER, D.: Weiterentwickelte Aufzugsseiltriebe im Prüfstandtest, Teil 1. Hebezeuge und Fördermittel, 22, 236 (1982)
6. GRÄBNER, P.—SCHMIDT, H. J. —SCHMIDT, U.: Materialökonomische Gestaltung von Seiltrieben durch Prüfstandsversuche. Hebezeuge und Fördermittel, 20, 169 (1980)
7. GÜNTHER, W., u. a.: Schwingfestigkeit, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973
8. HOLZWEISSIG, D.—MELTZER, G.: Meßtechnik der Maschinendynamik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1978
9. KOWALEWSKI, J.: Über die Beziehungen zwischen der Lebensdauer von Bauteilen bei unregelmäßig schwankenden und bei geordneten Belastungsfolgen, Dissertation, TH Aachen, 1962
10. PROCHNOW, H. u. a.: Betriebsfestigkeit, 2. Lehrbrief, VEB Verlag Technik, Berlin, 1975
11. SAGORSKI, G. S.—MARJOROW, J. P.: Untersuchung der Zuverlässigkeit von Stahldrahtseilen bei Belastungsregimen. Bericht, Moskauer Institut der Eisenbahningenieure (MIIT), 1979
12. SCHEFFLER, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1974
13. KÜNTSCHER, D.: Beitrag zur Bemessung von Treibscheibenseiltrieben, Entwurf Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« — Dresden, 1982

Prof. Dr. P. GRÄBNER DDR-8010-Dresden