

Door de schuifspanning wordt voor de schuifmodulus (glijmodulus) $G = 78\,500\text{ N/mm}^2$ aan het staafoppervlak een verdraaiing van $\gamma = \tau/G$ veroorzaakt.

Voor het polaire oppervlaktetraagheidsmoment $I_p = (\pi/32) \cdot d^4$ volgt met de torsiehoek in de boogmaat $\alpha = T \cdot l / (G \cdot I_p)$ of door het invullen van T uit vergelijking (10.34) de torsiehoek in graden

$$\alpha^\circ = (180^\circ/\pi) \cdot \alpha = \frac{(180^\circ/\pi) \cdot T \cdot l_f}{(\pi/32) \cdot d^4 \cdot G} = \frac{(360^\circ/\pi) \cdot \tau_f \cdot l_f}{G \cdot d} \quad (10.35)$$

Volgens figuur 10-17b geldt in het algemeen voor de veerconstante

$$R = \frac{T}{\alpha^\circ} = \frac{(\pi/32) \cdot G \cdot d^4}{(180^\circ/\pi) \cdot l_f} \quad (10.36)$$

Bovendien kan de vlaktedruk, bij aanname van een over de koplengte constante en over het oppervlak lineaire spanningsverdeling, bij benadering berekend worden; voor *vertande koppen*

$$p = \frac{12 \cdot d_s \cdot T}{z \cdot l_k \cdot (d_s^3 - d_f^3)} \leq \bar{p} \quad (10.37a)$$

voor *koppen met zeskant*

$$p = \frac{6 \cdot T}{l_k \cdot d_f^2} \leq \bar{p} \quad (10.37b)$$

voor *koppen met vierkant*

$$p = \frac{3 \cdot T}{l_k \cdot d_f^2} \leq \bar{p} \quad (10.37c)$$

z aantal tanden (zie tabel 12-4)

\bar{p} toelaatbare vlaktedruk volgens tabel 12-1b

Let op: Als een torsiestaafeer elastisch vervormd wordt en de verdraaiing gedurende langere tijd constant gehouden wordt, treedt bij een constante torsiehoek een torsiemomentverlies, of bij een constant torsiemoment een torsiehoekvergroting op. Dit wordt relaxatie dan wel kruip (plastische vervorming door het afnemen van de aanvangsspanning) genoemd.

10.7.2 Cilindrische (schroef)veren met cirkelvormige doorsnede

1. Toepassing, fabricage

Cilindrische (schroef)veren, meestal vervaardigd van ronde draad of ronde staven, kunnen als schroeflijnvormig gewonden torsiestaafeeren beschouwd worden. Dit zijn de meest toegepaste veren.

Vanwege de toepassing als druk- en trekveren, de mogelijkheid om veren van zeer kleine en zeer grote afmetingen te vervaardigen in de meest uiteenlopende materialen en vanwege de mogelijkheid om het veergedrag sterk te beïnvloeden door het combineren van veren met verschillende afmetingen, voldoet dit type veer aan nagenoeg alle eisen. Afhankelijk van het fabricageproces wordt onderscheid gemaakt tussen koud- en warmgevormde veren.

Voor *koudgevormde drukveren* zijn volgens DIN 2095 kwaliteitsvoorschriften voor de volgende grenswaarden vastgelegd:

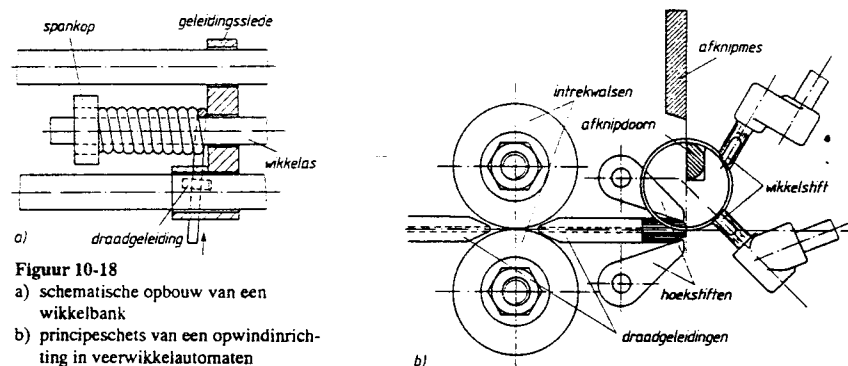
$$d \leq 17\text{ mm}; D = (D_c + D_s)/2 \leq 200\text{ mm}; L_0 \leq 630\text{ mm}; n \geq 2;$$

$$\text{wikkelverhouding } w = D/d = 4 \dots 20.$$

Voor *warmgevormde drukveren* geldt volgens DIN 2096 T1 (tot 5000 stuks als seriegrootte):

$$d \leq 8 \dots 60\text{ mm}; D_s \leq 460\text{ mm}; L_0 \leq 800\text{ mm}; n \geq 3; \text{ wikkelverhouding } w = D/d = 3 \dots 12.$$

Koudgevormde veren worden meestal gefabriceerd van gepatenteerd getrokken ongelegeerd verendraad volgens DIN 17 223 T1 in de draadsoorten A, B, C, D met de maatnauwkeurigheden B en C en veredeld verendraad volgens DIN 17 223 T2 in de draadsoorten FD, VD (ongelegeerd en CrV- of SiCr-gelegeerd). Raadpleeg tabel 10-2b voor de keuze van de draadsoorten. Voor speciale doeleinden worden ook schroefveren gemaakt van non-ferrometalen, bijvoorbeeld van Cu-kneedlegeringen volgens DIN 17 682 met de maatnauwkeurigheid C of van roestvaste stalen volgens DIN 17 224 tot $d = 10\text{ mm}$. Warmgevormde veren worden vervaardigd van veredelbaar staal volgens DIN 17 221, bijvoorbeeld 55Cr3, 50CrV4; zie tabel 10-2b voor de diameter en toelaatbare afwijkingen. Met betrekking tot het wikkelen is sprake van twee wijzen van fabriceren: wikkelen om een doorn en wikkelen op een wikkelautomaat. Bij het wikkelen op wikkelbanken, die op draaibanken lijken, wordt het vrije draaduiteinde aan het einde van een *wikkeldoorn* vastgehouden. Vooral bij dikkere draden heeft de geleiding via een meelopende geleidingslede plaats. Na het bereiken van de veerlengte en het uitzetten van de machine wordt de draad afgeknipt (zie figuur 10-18a).



Figuur 10-18

- a) schematische opbouw van een wikkelbank
b) principeschets van een opwindinrichting in veerwikkelautomaten

Het *volautomatisch wikkelen* van veren wordt voor grote series toegepast. De draad wordt door één of meer paren intrekrollen met uitgespaard halfdraadprofiel in de machine getrokken. Na het doorlopen van de draadgeleidingen wordt de draad tussen wikkelstiften gebogen, die zodanig ten opzichte van elkaar gepositioneerd zijn, dat een volledige winding ontstaat. Na het bereiken van het aantal windingen worden de rollen stilgezet en wordt het veerlichaam afgeknipt door een bewegend mes. De veerdiameter wordt ingesteld door de wikkelstiften te verstellen, waarbij rekening wordt gehouden met de verwachte vering van het veerlichaam. De spoed van de windingen en daarmee het bereiken van de afstand tussen de windingen wordt bewerkstelligd door spoedmesses, waarvan het opkomen en terugtrekken de vorm van de eindwindingen bepaalt.

Voor een wezenlijke verbetering van de vermoeigingssterkte-eigenschappen kunnen gefabriceerde veren worden gekogelstraald. Dit verhoogt de levensduur in hogere mate dan de keuze van een betere draadsoort of een bepaalde veredeling. Oppervlaktebescherming is voor dergelijke veren bijzonder belangrijk. In het algemeen worden veren geolied of ingevet afgeleverd; in overleg met de fabrikant zijn andere oppervlaktebehandelingen mogelijk.

2. Uitvoering van cilindrische veren met cirkelvormige doorsnede; afmetingen van het veerlichaam Drukveren

Voor de uitvoering, toleranties en controle van koudgevormde veren gelden de voorschriften volgens DIN 2095, voor warmgevormde volgens DIN 2096.

De veren worden in het algemeen rechtsgewikkeld. Voor een goede overdracht van de veerkracht op de veerschotels (opsluitdelen) wordt bij koudgevormde veren de spoed van de voorlaatste winding verkleind, zodat het einde van deze winding de volgende raakt (figuur 10-19). Om bij elke veerinstelling een axiaal inveren bij een voldoende groot draagvlak te bereiken worden de eindwindingen vlak geslepen. Het vlaklijpen van de eindwindingen wordt bij drukveren met $d < 1$ mm of $w > 15$ om economische redenen achterwege gelaten.

Koudgevormde drukveren bestaan uit $n \geq 2$ werkzame verende windingen met in het algemeen een constante spoed en twee extra niet-verende windingen. Bij warmgevormde drukveren met $n \geq 3$ is vaak een spleet aanwezig, die tijdens de fabricage tussen de aanliggende windingen ontstaat. De eindwindingen worden op $d/4$ vlakgeslepen of bij $d > 14$ mm gesmeed en geslepen. Slechts $3/4$ van een winding aan een uiteinde van de veer wordt als niet-verend beschouwd. Het totale aantal windingen bedraagt daarom

$$\begin{aligned} \text{bij koudgevormde drukveren} \quad n_t &= n + 2 \\ \text{bij warmgevormde drukveren} \quad n_t &= n + 1,5 \end{aligned} \quad (10.38)$$

Bij drukveren, vooral drukveren die onderhevig zijn aan veel belastingswisselingen, wordt aanbevolen het totale aantal windingen op $1/2$ of ($\dots, 5$) te laten eindigen, dat wil zeggen steeds te streven naar $n_t = 3,5, 4,5, 5,5, \dots$ windingen.

De spoed van de onbelaste verende windingen moet zo gekozen worden dat bij de grootst toelaatbare veerkracht nog altijd een afstand tussen de verende windingen aanwezig is.

De som van de minimale afstanden is bij de kleinst toelaatbare veerlengte L_n

bij statische belasting

voor koudgevormde veren

$$S_s = (0,0015 \cdot (D^2/d) + 0,1 \cdot d) \cdot n$$

voor warmgevormde veren

$$S_s = 0,02 \cdot (D + d) \cdot n$$

(10.39)

bij dynamische belasting

voor koudgevormde veren

$$S'_s = 1,5 \cdot S_s$$

voor warmgevormde veren

$$S'_s = 2 \cdot S_s$$

Binnen S_s kan de veer karakteristiek uiterst progressief toenemen. Om fabricagetechnische redenen moeten alle veren op een *bloklengte* L_c alle windingen liggen tegen elkaar) samengedrukt kunnen worden. Deze bedraagt met $d_{\max} = d + A_b$ (bovenste grensafmeting A_b volgens tabel 10-2a) voor veren

koudgevormd, eindwindingen ...

aangelegd en geslepen

$$L_c \leq n_t \cdot d_{\max}$$

aangelegd en onbewerkt

$$L_c \leq (n_t + 1,5) \cdot d_{\max}$$

(10.40)

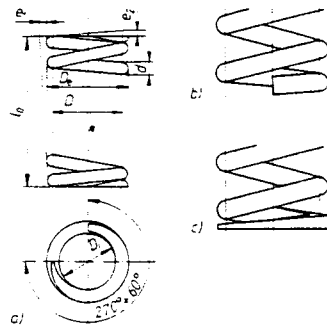
warmgevormd, eindwindingen ...

aangelegd en vlakbewerkt

$$L_c \leq (n_t + 0,3) \cdot d_{\max}$$

onbewerkt

$$L_c \leq (n_t + 1,1) \cdot d_{\max}$$



Figuur 10-19

a) onbelaste drukveer met aangelegde, geslepen eindwindingen

b) aangelegde, onbewerkte eindwindingen

c) aangelegde, gesmeede eindwindingen

De bij de grootste toelaatbare veerkracht F_n behorende kleinste toelaatbare veerlengte bedraagt daarom altijd

$$L_n = L_c + S_s \quad (10.41)$$

Als een drukveer na het vervaardigen voor de eerste keer wordt samengedrukt, wordt na de ontlasting de oorspronkelijke onbelaste lengte niet meer bereikt, dat wil zeggen de veer 'zet' zich. Pas na een aantal belastingen is de veer gezet en behoudt deze de als richtwaarde geldende lengte van de onbelaste veer

$$L_0 = S_c + L_c = S_n - S_s + L_c \quad (10.42)$$

L_c bloklengte (windingen liggen tegen elkaar) volgens vergelijking (10.40)

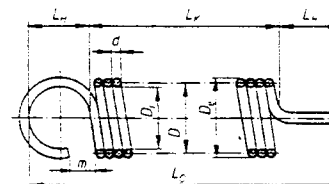
S_s som van de minimale afstanden volgens vergelijking (10.39)

S_c veerweg in de blokttoestand

S_n de veerweg die behoort bij de veerkracht F_n

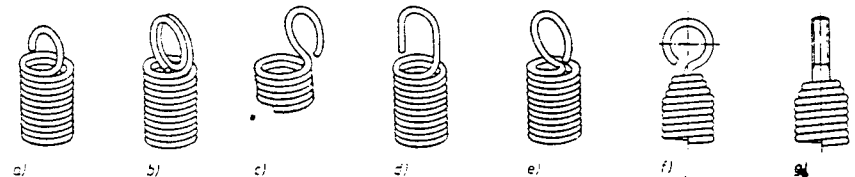
Trekveren

Voor trekveren gelden de voorschriften volgens DIN 2097. In vergelijking met de drukveren vervallen bij trekveren de geleidingsonderdelen (doorn, huls). Ook kunnen de veerschotels voor de montage vaak uitgespaard worden en bestaat de mogelijkheid tot een centrische krachtoverbrenging door een overeenkomstige uitvoering van de eindwindingen. Nadelig in vergelijking met de drukveren is de meestal grotere inbouwruimte, die afhankelijk is van de uitvoering van de eindwindingen. Daarom worden trekveren, om de voorspanveerweg te verkleinen tot een draaddiameter van $d = 17$ mm, meestal met een (inwendige) voorspanning koudgevormd, zodat de windingen tegen elkaar liggen, zie figuur 10-20; ze worden in het algemeen rechtsgewikkeld. Veren met $d > 17$ mm worden warmgewikkeld en hebben dan geen voorspanning; de windingen hoeven niet tegen elkaar te liggen. Voor de overbrenging van de veerkracht worden niet alleen ogen in verschillende uitvoeringen gebruikt, maar ook bevestigings-elementen, waarvan de buitendiameter niet groter dan D_c is, zie figuur 10-21. De ogen liggen in het algemeen in één vlak, eindigend op gehele windingsaantallen van $n_t = n$ of op halve windingsaantallen; met 90° of 270° ten opzichte van elkaar verdraaid met $n_t = n$ eindigend op $\dots, 25$ of $\dots, 75$, of afhankelijk van de oogopening, zijdelings gebogen.



Figuur 10-20

Weergave van een trekveer met 90° verdraaide dichte Duitse ogen. $L_n = (0,8 \dots 1,1) \cdot D$; oogopening $m \geq 2 \cdot d$



Figuur 10-21 Oogvormen en bevestigingsonderdelen van cilindrische trekveren a) half Duits oog ($L_n = (0,55 \dots 0,8) \cdot D$), b) dubbel Duits oog (L_n zie figuur 10-20), c) volledig Duits oog, zijdelings hooggeplaatst ($L_n = D$), d) haak oog ($L_n \geq 1,5 \cdot D$ tot $30 \cdot d$), e) Engels oog ($L_n = 1,1 \cdot D$), f) ingerolde haak ($n_t = n +$ het aantal door het inrollen niet-verende windingen), g) schroefdraadstift ($2 \dots 4$ ingeschoefde niet-verende windingen)

Met het totale aantal windingen n , de draaddiameter d en de ooglengte L_H volgt de lengte van het onbelaste veerlichaam L_K met de gewikkelde voorspanning c.q. de veerlengte L_0 tussen de binnenkanten van de ogen (figuur 10-22) uit

$$L_K = (n + 1) \cdot d_{\max} \quad \text{resp.} \quad L_0 = L_K + 2 \cdot L_H \quad (10.43)$$

Bij druk- en trekveren wordt door een weldoordachte fabricage rekening gehouden met toelaatbare afwijkingen voor de afmetingen en de krachten afhankelijk van de vereiste kwaliteit en overeenkomstig de bedrijfsomstandigheden (zie DIN 2095, 2096 en 2097). Om aan de veerkrachten en voorgeschreven bijbehorende lengten te voldoen moet de fabrikant een fabricagecompensatie worden toegestaan. Bij een voorgeschreven veerkracht, met een bijbehorende lengte van de gespannen veer en L_0 voor drukveren (voor trekveren ook de voorspanning F_0) moeten n en één van de grootheden d , D , D_o , D_i vrij zijn; bij twee voorgeschreven veerkrachten en de bijbehorende lengte van de gespannen veer moet ook L_0 (voor trekveren ook F_0) worden vrijgelaten. De waarden van de vrije grootheden moeten in de tekening aangegeven worden en gelden als richtwaarden.

3. Berekening van cilindrische drukveren met cirkelvormige doorsnede

De belasting van schroefveren berust net als bij torsiestaafterveren voornamelijk op torsie, zodat de berekeningsvergelijkingen voor torsiestaafterveren in een overeenkomstig omgezette vorm ook voor schroefveren (zowel voor druk- als voor trekveren) gelden. Figuur 10-22 illustreert het principe van de berekening van de schroefveer, voorgesteld als een half cirkelvormige winding van de veer. Als de hefbomen, die vast verbonden zijn met de eindvlakken van deze winding, met een kracht F worden samengedrukt, verdraaien de eindvlakken in totaal met een hoek α ; de halve winding wordt dus door het moment $T = F \cdot D/2$ op torsie belast. Met $W_p = (\pi/16) \cdot d^3$ is dus gegarandeerd dat $\tau_{\text{aanw}} = T/W_p = F \cdot D/(0,4 \cdot d^3) \leq \bar{\tau}$. Aangezien $\bar{\tau} = f(d)$ en dus nog niet bekend is, wordt de draaddiameter in eerste instantie bij benadering berekend.

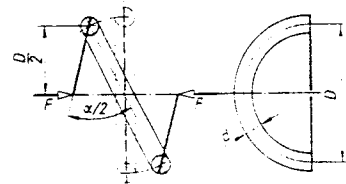
Als de afmetingen worden beperkt door de buitendiameter D_o of de binnendiameter D_i , kan bij het ontwerp van een koudgeformde veer met de maximaal vereiste veerkracht $F = F_2$ de draaddiameter d bij benadering gekozen worden uit

$$d = k_1 \cdot \sqrt[3]{F \cdot D_o} \quad \text{of} \quad d = k_1 \cdot \sqrt[3]{F \cdot D_i} + k_2 \quad \text{met} \quad k_2 = \frac{(2k_1 \cdot \sqrt[3]{F \cdot D_i})^2}{3 \cdot D_i} \quad (10.44)$$

met $k_1 = 0,15$ voor de draadsoorten A, B, C, D bij $d < 5$ mm
 $k_1 = 0,16$ voor de draadsoorten A, B, C, D bij $d = 5 \dots 14$ mm
 $k_1 = 0,17$ voor de draadsoorten FD, VD bij $d < 5$ mm
 $k_1 = 0,18$ voor de draadsoorten FD, VD bij $d = 5 \dots 14$ mm

De aldus gekozen (of in eerste instantie globaal berekende) diameter moet op sterkte gecontroleerd worden.

Voor statisch belaste drukveren⁸⁾ is het qua nauwkeurigheid voldoende om alleen met het torsiemoment $T = F \cdot D/2$ (zie figuur 10-22) en het polaire weerstandsmoment $W_p = \tau \cdot d^3/16$ te rekenen. Uit de



Figuur 10-22 Halve winding als deel van een drukveer

hoofdvergelijking voor torsie $\tau = T/W_p \leq \bar{\tau}$ volgt (zonder rekening te houden met de kromming van de draad) de aanwezige schuifspanning

$$\tau = \frac{F \cdot D}{0,4 \cdot d^3} \leq \bar{\tau} \quad (10.45a)$$

Schuifspanning bij bloklengte

$$\tau_c = \frac{F_c \cdot D}{0,4 \cdot d^3} \leq \bar{\tau}_c \quad (10.45b)$$

F, F_c veerkracht respectievelijk veerkracht bij een bloklengte L_c
 D gemiddelde windingsdiameter uit $D = (D_o + D_i)/2 = D_o - d = D_i + d$
 $\bar{\tau}$ toelaatbare schuifspanning voor koudgeformde veren (tabel 10-12a)
 $\bar{\tau}_c$ toelaatbare schuifspanning bij een bloklengte L_c (tabel 10-12b); voor warmgeformde veren $\bar{\tau}_c$ -waarden volgens tabel 10-12c

Alle veren moeten tot L_c samengedrukt kunnen worden.

Voor dynamisch belaste drukveren⁹⁾ volgens figuur 10-23 geldt, inclusief de door de kromming van de draad ontstane spanningsverhoging, voor de gecorrigeerde schuifspanning

$$\tau_k = k \cdot \tau \leq \tau_{kD} \quad (10.46a)$$

en voor de slagspanning

$$\tau_{hk} = \tau_{kD} - \tau_{k1} \leq \tau_{kH} \quad (10.46b)$$

k spanningsfactor voor de spanningsverhoging als gevolg van de kromming van de draad volgens tabel 10-12d
 τ schuifspanning volgens vergelijking (10.45)
 τ_{kD} gecorrigeerde bovenspanning; tijds- of vermoeingssterktewaarden
 τ_{kH} overeenkomstig gecorrigeerde slagspanning, waarden volgens tabel 10-14 tot en met 10-17

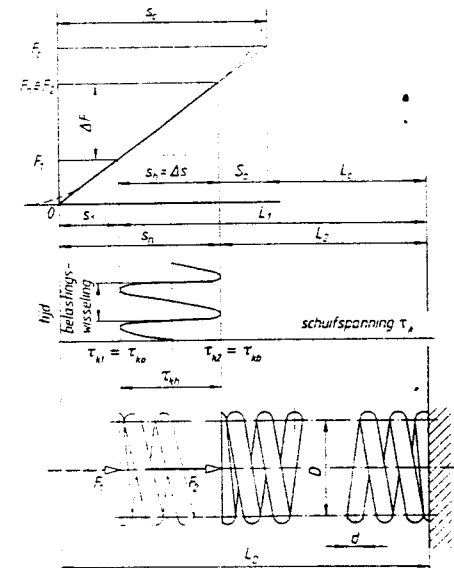
Ook bij dynamisch belaste drukveren moet $\bar{\tau}_c$ gecontroleerd worden, zie vergelijking (10.45)

Het elastische gedrag van de veer met de volgens DIN 2076 (tabel 10-2a) vastgelegde draaddiameter d en de (zo mogelijk) volgens DIN 323 R20 (tabel 1-14) vastgelegde windingsdiameter D wordt bepaald door het aantal werkzame windingen

$$n' = \frac{G}{8} \cdot \frac{d^4}{D^3 \cdot R_{\text{noodz}}} \quad (10.47)$$

Met het vastgelegde aantal windingen n bedraagt de veerconstante

$$R_{\text{vs}} = \frac{G}{8} \cdot \frac{d^4}{D^3 \cdot n} \quad (10.48)$$



Figuur 10-23 Cilindrische drukveer met belastingdiagram

⁸⁾ Van statisch of quasi-statisch is sprake als de belasting tijdelijk constant of tijdelijk veranderlijk is met een kleine slagspanning (tot 0,1 vermoeingsslagsterkte τ_{1H}) of met een grotere slagspanning τ_{1H} tot $N = 10^4$ belastingswisselingen.

⁹⁾ Koudgeformde veren met een aantal belastingswisselingen $N \geq 10^7$ c.q. warmgeformde veren $N \geq 10^6$ in het vermoeingssterkegebied; koudgeformde veren met een aantal belastingswisselingen $N > 10^7$ c.q. warmgeformde veren $N > 10^6$ in het tijdssterkegebied.

en daarmee de *veerkracht*

$$F = R_{is} \quad s = \frac{G}{8} \cdot \frac{d^4}{D^3} \cdot \frac{s}{n} \quad (10.49)$$

of de *veerweg*

$$s = \frac{F}{R_{is}} = \frac{8}{G} \cdot \frac{D^3}{d^4} \cdot n \cdot F \quad (10.50)$$

en de *veerarbeid*

$$W = \frac{F \cdot s}{2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{V \cdot \tau^2}{G} \quad (10.51)$$

V verend volume uit $V = (d^2 \cdot \pi/4) \cdot l$ met de draadlengte $l = D \cdot \pi \cdot n$

De op druk belaste veren moeten op knik gecontroleerd worden. Afhankelijk van de wijze van inbouw kan met de plaatsfactor v de controle op knikveiligheid volgens tabel 10-13 uitgevoerd worden. Bij drukveren, die aan snelle belastingsveranderingen onderhevig zijn (bijvoorbeeld keefveren), kunnen resonantieverschijnselen optreden, die aanzienlijke spanningsverhogingen veroorzaken. Om vermoeiingsbreuk uit te sluiten moeten resonanties tussen de frequentie van de wisselende beweging van de eindwinding en de eigenfrequentie van de veer respectievelijk een 'geheel getal' vermeden worden. Voor drukveren van verenstaal ($G = 83000 \text{ N/mm}^2$) wordt uit de volgende formule de *laagste eigenfrequentie* berekend

$$\omega_e = 3,63 \cdot 10^5 \cdot \frac{d}{n \cdot D^2} \quad \text{of} \quad \omega_e = 13,7 \cdot \frac{\tau_{kb}}{k \cdot \Delta s} \quad (10.52)$$

n aantal verende windingen of werkzame windingen
 $\tau_{kb} = \tau_{k2} - \tau_{k1}$ slagspanning
 $\Delta s = s_2 - s_1$ slag
 k spanningsfactor, zie vergelijking (10.46)

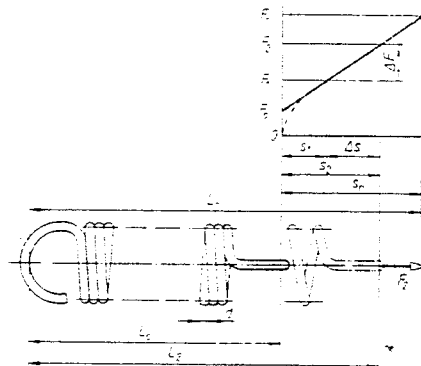
ω	$d, D, \Delta s$	τ_{kb}	k
1/s	mm	N/mm ²	1

de een Din mm!

Om de dynamische invloeden op de spanning zo klein mogelijk te houden moet een hoge eigenfrequentie nagestreefd worden dan wel moet de veer met een niet-lineaire spoed, of - met name bij warmgevormde veren - met een niet-constante staafdiameter D_e (progressieve karakteristiek) gefabriceerd worden.

4. Berekening van trekveren met cirkelvormige doorsnede

De berekening van trekveren is volgens DIN 2089 T2 genormaliseerd. In aangepaste vorm gelden voor trekveren volgens figuur 10-24 dezelfde berekeningsformules als voor drukveren. Bij de berekening van trekveren dient naast het veerlichaam ook rekening gehouden te worden met het uitbuigen (vervormen) van de haken en ogen. Kogelstralen heeft nauwelijks zin omdat de binnenzijde van de windingen niet bereikt kan worden. In tegenstelling tot bij drukveren wordt de toelaatbare spanning bij trekveren met $\bar{\tau} = 0,45 \cdot R_m$ lager gesteld (zie tabel 10-20a).



Figuur 10-24 Trekveer met belastingsdiagram