

Sound & Science: Digital Histories

Archives NAG: Publicatie No. 22 van de Geluidstichting, Koch, J.J., Visser, N.J. & Kosten, C. W. (1939). Symposium over trillingsdemping. Voordrachten gehouden voor de Geluidstichting en voor de Afdeeling voor Werktuigen Scheepsbouw van het Kon. Instituut van Ingenieurs op 1 December 1938 te Delft, Delft: Geluidstichting, 1939

<https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/text/publicatie-no-22-van-de-geluidstichting>



Scan licensed under: [CC BY-SA 3.0 DE](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/) | Max Planck Institute for the History of Science



MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE HISTORY OF SCIENCE

SYMPOSIUM OVER TRILLINGSDEMPING.

Voordrachten gehouden voor de Geluidstichting en voor de Afdeling voor Werktuig- en Scheepsbouw van het Kon. Instituut van Ingenieurs op 1 December 1938 te Delft.

HET ONTSTAAN EN VOORKÓMEN VAN TRILLINGEN

DOOR

dr. ir. J. J. KOCH.

TRILLINGSBESTRIJDING DOOR MIDDEL VAN KURK

DOOR

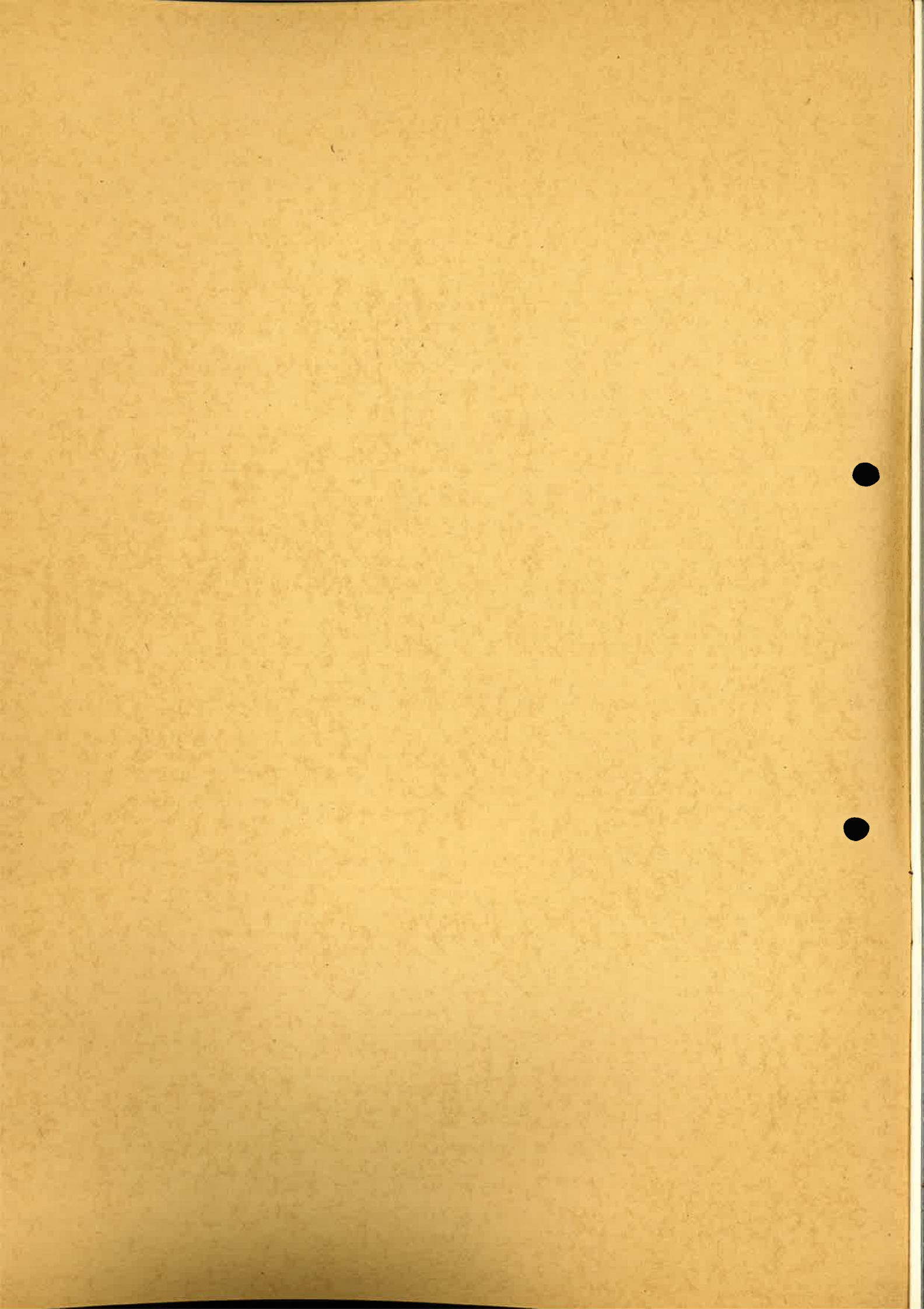
N. J. VISSER.

TRILLINGSBESTRIJDING DOOR MIDDEL VAN RUBBER

DOOR

ir. C. W. KOSTEN.

PUBLICATIE No. 22
VAN DE
GELUIDSTICHTING
DELFT - HOLLAND



Symposium over trillingsdemping.

Voordrachten¹⁾ gehouden voor de Geluidstichting en voor de Afdeling voor Werktuig- en Scheepsbouw van het Kon. Instituut van Ingenieurs op 1 December 1938 te Delft,

Het ontstaan en voorkómen van trillingen

door

dr. ir. J. J. KOCH.

Ik heb mij tot taak gesteld een algemeene bespreking te houden over dit onderwerp, waarbij ik zooveel mogelijk het geheele gebied wil bestrijken. Op *volledigheid* kunt U daarbij niet rekenen. Ook zal ik niet de bronnen vermelden, waaruit ik, naast mijn eigen ervaring, geput heb. Veel zal U reeds lang bekend zijn. Het is echter nuttig, aan het begin van dit symposium de algemeene beginselen nog eens nader uiteen te zetten en eenige begrippen vast te leggen.

Ik heb de stof in 6 hoofdstukken gesplitst, n.l.

- 1e. De krachten, welke trillingen kunnen veroorzaken.
- 2e. Het tegenwerken dezzer krachten.
- 3e. De kinematica van de trillingsbeweging.
- 4e. Onaangename gevolgen van trillingen.
- 5e. Isolatie van trillingen.
- 6e. Demping van trillingen.

1e De krachten, welke trillingen kunnen veroorzaken.

In het algemeen zal *elke* kracht, waarvan grootte of richting of grootte en richting met den tijd verandert, een trilling veroorzaken. Daarmede is natuurlijk niet gezegd, dat deze trilling altijd *hinderlijk* zal zijn.

Bij iedere machine en ieder machineonderdeel kunnen wij, wat de belasting betreft, onderscheid maken tusschen *uitwendige* en *inwendige* krachten. *Uitwendige* krachten worden van buiten af op het lichaam uitgeoefend. Het uitwendige krachtstelsel zal in het algemeen *geen* evenwichtskrachtsysteem zijn, zoodat het lichaam onder zijn inwerking een beweging zal uitvoeren. *Inwendige* krachten komen steeds voor als paarsgewijze gelijke, doch tegengestelde krachten met dezelfde werklijn; zij vormen dus *wel* een evenwichtskrachtsysteem, zoodat het zwaartepunt van het lichaam in rust blijft, ook al kunnen de onderdeelen t.o.z. van elkaar een beweging uitvoeren, welke afhangt van de stijfheid en de massaverdeeling van het lichaam.

Tot de trillingveroorzakende krachten behooren allereerst de traagheidskrachten. Onder de traagheidskracht van een volume-element verstaan wij een kracht, die in grootte gelijk is aan het product van massa en versnelling van het volume-element en in richting tegengesteld is aan de versnelling van het element.

Eenige voorbeelden van trillingverwekkende massa-krachten mogen hier volgen:

1e. Draait een lichaam met eenparige hoeksnelheid om een vaste as, dan werkt op elk volumedeeltje van het lichaam een traagheidskracht, welke naar buiten gericht is (de centrifugaalkracht). Al deze krachten kunnen samengesteld worden tot 2 krachten, die constant van grootte zijn en met het lichaam mee roteeren.

Het zijn dus voor het draaiende lichaam, tezamen met het gestel, waarin het lichaam draait, krachten, die met den tijd van richting veranderen.

Is het gestel veerend ondersteund, dan zal het onder

inwerking van deze traagheidskrachten een trillende beweging uitvoeren.

2e. De zuigers en drijfstanen van een stoommachine of verbrandingsmotor bewegen heen en weer en worden dus afwisselend in twee richtingen versneld. De daarbij behoorende traagheidskrachten zijn dus wisselende krachten, die aan de machine, wanneer deze niet met een volkomen stijve verbinding aan den grond is bevestigd, een trillende beweging zullen verleenen.

3e. Bij schaaftanken beweegt óf de beitelhouder, óf de slede met het werkstuk heen en weer. Ook hier veroorzaken de daaruit voortvloeiende traagheidskrachten trillingen.

4e. Mechanische hamers kunnen een ernstige storingsbron vormen. De hamer wordt opgelicht en met groote snelheid naar beneden bewogen. Aan het einde van den neergaanden slag raakt de hamer het smeedstuk, dat op het aambeeld rust. In zeer korten tijd komt hij hier tot rust. De versnelling is dus gedurende een zeer korten tijd zeer groot en evenzoo de traagheidskracht. Door deze kortstondige groote traagheidskracht, welke wij een stoot noemen, wordt niet alleen de machine zelf, maar ook de geheele omgeving in trilling gebracht.

Als tweede soort trillingverwekkende krachten wil ik U noemen: *Veranderlijke gasdrukken*, zooals die bijvoorbeeld optreden bij zuigerstoommachines en verbrandingsmotoren. Voor de machine, als één geheel beschouwd, zijn het inwendige krachten, voor het samenstel van bewegende deelen, bestaande uit zuiger, drijfstang, krukas en vliegwiel zijn de gasdrukken, tezamen met de daardoor opgewekte lijbaan- en lagerkrachten, uitwendige krachten, die resulterend een koppel opleveren, dat een onregelmatig ronddraaiende beweging van de krukas veroorzaakt. De reacties van deze krachten op het stilstaande deel der machine vormen eveneens tezamen een wisselend koppel, dat aan dit deel een trilling verleent. Iets dergelijks treedt op tengevolge van de electriche krachten, die bij éénphasemotoren en-generatoren door stator en rotor op elkaar worden uitgeoefend. Ook hierbij zal de beweging van den rotor niet gelijkmatig zijn, terwijl de stator vaak hinderlijke trillingen uitvoert.

Een derde categorie van trillingverwekkende krachten wordt gevormd door de krachten, die ontstaan, wanneer een wiel over een niet rechte baan rolt. Ik heb hierbij speciaal op het oog de beweging van treinen en auto's. Hierbij zijn de wielen, die door veeren met het voertuig verbonden zijn, gedwongen een zeer grillig gevormde baan te volgen. De veeren zullen daardoor afwisselend ingedrukt en uitgerekt worden, waardoor wisselende krachten op het voertuig worden uitgeoefend. Wanneer deze krachten groot zijn, doordat de hobbels groot of de veeren stijf zijn, worden aan het voertuig belangrijke versnellingen medegedeeld, die voor de te vervoeren goederen slecht of voor de passagiers onaangenaam zijn.

Geheel een hetzelfde type zijn de krachten, die golven op een schip uitoefenen. Ook hier gaat het schip als één vast geheel meer of minder regelmatig trillen, welk trillen

¹⁾ Door de tijdsomstandigheden is het niet mogelijk de voordracht van Dipl. Ing. H. HARTZ te publiceren.

slingeren en stampen wordt genoemd. De bewegingen zijn regelmatig dan die van een voertuig, maar door het ontbreken van voldoende demping zijn de uitslagen groter. Dat de gevolgen voor de passagiers niet altijd aangenaam zijn, is bekend.

Tot zoover een indeeling van de trilling-verwekkende krachten naar haar oorzaak. Wij kunnen nog andere indeelingen maken, bijvoorbeeld in kleine en groote krachten. De laatste zullen altijd hinderlijk zijn, terwijl kleine krachten slechts dan hinder kunnen veroorzaken, wanneer haar frequentie in de buurt ligt van een eigentrillingsgetal van de constructie, waarop zij werken.

Nog één andere indeeling zal ik U noemen, n.l. in: periodiek veranderlijke krachten, willekeurig veranderlijke krachten, en stooten.

2e Het tegenwerken van de storende krachten.

Het beste middel, om de onaangename gevolgen van wisselende krachten tegen te gaan, is om kunstmatig tegenwerkende krachten op het beschouwde lichaam te laten werken. Het ideaal zou hierbij zijn, deze krachten te allen tijde gelijk en tegengesteld te maken aan de storende krachten. Een *dan* nog zal de storende invloed pas geheel opgeheven worden, wanneer de tegenwerkende krachten hetzelfde aangrijpingspunt hebben als de storende krachten, welke ze moeten tegenwerken.

Zijn de storende krachten traagheidskrachten, dan kiezen wij voor de tegenwerkende krachten andere traagheidskrachten. Dit proces is U allen welbekend en heet „*balanceeren*”. De balanceering van de krachten, veroorzaakt door rondraaiende deelen, waarbij het zwaartepunt niet samenvalt met de draaiingsas, is bijna altijd mogelijk en wanneer de stijfheid van het machinedeel voldoende is, ook practisch ideaal. Bij heen en weer gaande deelen kan de balanceering, wanneer deze deelen een harmonische of bijna harmonische beweging uitvoeren, ook zeer goed zijn. De balanceering van meer-cylindere machines heeft dan ook een hoogen graad van volmaaktheid bereikt. Een ideale balanceering is echter slechts mogelijk, wanneer de motor zelf oneindig stijf is, een *bijna* ideale balanceering, wanneer de motor *zeer* stijf is. Ontleent de motor zijn stijfheid aan de fundatie, dan kunnen toch nog hinderlijke trillingen optreden, wanneer het eigentrillingsgetal van de fundatie overeenkomt met de frequentie der wisselende massakrachten. Bij een schip b.v. kunnen kinematisch goed gebalanceerde motoren hinderlijke schepstrillingen veroorzaken. De fundatie is n.l. in dit geval het schip zelf en de frequentie der eigentrillingen van het schip ligt vaak in de buurt van de frequentie der massakrachten.

Een tweede, in sommige gevallen zeer effectief, middel om de storende krachten tegen te werken is het aanbrengen van een hulpmassa, welke veerend aan de hoofdmassa bevestigd is. Daarbij moet het eigentrillingsgetal van deze hulpmassa met veer gelijk zijn aan de frequentie der storende krachten. Dit middel zal dan ook slechts *dan* goede resultaten geven, wanneer de storende krachten ongeveer sinusvormig verlopen en een constante frequentie hebben. Wordt de frequentie der storende krachten door de frequentie van het elektrische net bepaald, welke frequentie tamelijk constant is, dan is dit middel goed te gebruiken. Het eenige geval, dat mij hiervan bekend is, is het trillingsvrijmaken van een electrischen haarknipper.

Zouden wij kans zien het eigentrillingsgetal van het hulpsysteem tegelijk met de frequentie der storende krachten te veranderen, dan zou voor *elke* frequentie een goede oplossing verkregen zijn. Kiezen wij nu voor het hulpsysteem een slinger, die met de as van een machine rondraait, waarbij het draaipunt excentrisch gelegen is en die dus slingert onder invloed van de centrifugaalkracht, dan zal het eigentrillingsgetal van dezen slinger evenredig met het toerental van de as toenemen. Daar de frequentie der storende krachten bij een motor ook evenredig met het toerental verloopt, is het mogelijk het hulpsysteem ineens voor alle toerentalen de juiste instelling te geven.

Dergelijke trillingsvoorkómers worden met succes op verschillende motoren toegepast.

Werken de storende krachten onregelmatig, dan kunnen ze alleen tegengewerkt worden door krachten, die geregeld worden *naar* de storende krachten. Ook dit is bij niet te snelle wisselingen mogelijk, bijvoorbeeld bij het slingeren van schepen. Wij moeten daarbij ten eerste beschikken over een middel om de tegenwerkende krachten (die samengesteld een moment moeten opleveren) op het schip uit te oefenen. Wij kunnen hiervoor gebruik maken van een gyroscoop met verticale as, bevestigd in een raam, dat draaibaar is om een dwarsscheepsche as. Draaien wij het raam met een motor, dan zal de gyroscoop een moment om de langsscheepsche as van het schip op het schip uitoefenen. Bij een varend schip kunnen ook krachten op het schip uitgeoefend worden door dwarsscheeps uitstaande, draaibare vinnen. Worden deze vinnen, die in haar nulstand geen krachten op het schip uitoefenen, aan stuurboord en bakboord tegengesteld gedraaid, dan zullen zij tezamen een moment om een langsscheepsche as op het schip uitoefenen. Ook is het nog mogelijk een zwaar gewicht vanuit het midden naar stuurboord of bakboord te bewegen. Er zijn dus verschillende middelen, om een moment op het schip uit te oefenen. Het voornaamste is, dat het moment *groot* moet zijn, wil het het storende moment van de golven belangrijk kunnen tegenwerken. De gyroscoop wordt zwaar en duur. De vinnen moeten groot en sterk zijn. Ze zijn bovendien, omdat ze uitsteken, kwetsbaar. Het verplaatsbare gewicht moet *zeer* groot zijn.

Om met één van de hiervoor genoemde constructies het juiste tegenwerkende moment op het schip te kunnen uitoefenen, zouden wij moeten weten, hoe groot het storende moment is, wat al heel moeilijk te constateeren is. Wel is echter te constateeren de hoekversnelling, die erdoor veroorzaakt wordt, of de, daarvan het gevolg zijnde, hoeksnelheid. Om dit te observeeren, kunnen wij een man gebruiken, of meestal beter een kleine gyroscoop, die, wanneer het schip een hoeksnelheid verkrijgt, een contact sluit, waardoor het mechanisme, dat het tegenwerkende moment moet opwekken, in werking gesteld wordt. Ook bij voertuigen zou in principe een dergelijk mechanisme mogelijk zijn, waarbij het er op aan zou komen, een mechanisme te construeeren, dat het wiel, dat een hobbel ontmoet, omhoog trekt, of het wiel, dat een kuil ontmoet, naar beneden drukt. Daar de krachtsveranderingen hierbij veel sneller plaats vinden dan bij het schip, is een doeltreffend mechanisme veel moeilijker te construeeren.

3e De kinematica van de trillingsbeweging.

In het kort zal ik U iets zeggen over de mogelijke bewegingen, welke een trillend lichaam kan uitvoeren.

Wanneer een *vast* lichaam veerend ondersteund is, zóó dat het 6 graden vrijheid van beweging heeft, dan ontstaan er 6 elementaire trillingsbewegingen (z.g. eigentrillingen), ieder met een eigen trillingsgetal (het z.g. eigentrillingsgetal), die elkaar bij gezamenlijk optreden niet beïnvloeden. Iedere willekeurige trilling van het lichaam is een lineaire combinatie van deze 6 eigentrillingen.

Door een juiste keuze van stijfheid en plaats van de veeren, waarmee het lichaam gesteund wordt, is het mogelijk twee of meer van deze eigentrillingsgetallen aan elkaar gelijk te maken. Steunen wij een lichaam gedeeltelijk vast, gedeeltelijk veerend, dan vervallen één of meer van de eigentrillingsgetallen.

Een *elastisch* lichaam kan in oneindig veel vormen een eigentrilling uitvoeren. Meestal zijn voor ons slechts *die* eigentrillingen van belang, waarbij de bijbehorende eigentrillingsgetallen van dezelfde orde van grootte zijn als de frequentie der belastende krachten. Is de stijfheidsverdeeling en de massaverdeeling van een lichaam bekend, dan levert het bepalen van de laagste eigentrillingsgetallen met bijbehorende trillingsvormen geen moeilijkheden op. Voor het bepalen van de hoogere eigentrillingsgetallen en eigentrillingsvormen wordt in de meeste gevallen een

grote hoeveelheid rekenwerk gevegd. De grootste moeilijkheid levert het bepalen van de stijfheid op. Van een moderne krukas is het b.v. niet mogelijk de torsiestijfheid rekenenderwijs te bepalen. Wij nemen daarom genoegen met een aantal uit proeven bepaalde gegevens, die voor de meest gebruikelijke krukasvormen in eenige empirische formules zijn verwerkt.

Het is van groot belang om de eigentrillings-getallen van een constructie te bepalen omdat, wanneer deze bekend zijn, wij er zorg voor kunnen dragen, dat ter voorkoming van hinderlijke resonantie de frequentie van de belastende krachten *niet gelijk of bijna gelijk* is aan één van de eigentrillingsgetallen. Ook de trillingsvorm is van belang. Of n.l. een stelsel wisselende krachten een elastisch lichaam volgens één van zijn eigentrillingsvormen η in trilling kan brengen, hangt af van het bedrag van

$$\sum_i P_i \eta_i,$$

waarin P_i een belastende kracht en η_i de bij haar aangrijppingspunt behorende uitwijking van de beschouwde eigentrilling is, gemeten in de richting van de kracht. Door een doelmatige keuze van de plaats der belastende krachten, is het vaak mogelijk bedoelde som nul of klein te maken, waardoor trilling voorkomen of verminderd wordt.

4e Onaangename gevolgen van trillingen.

Voordat men in een bepaald geval ingrijpende maatregelen neemt, om de gevolgen van schadelijke of onaangename trillingen te verkleinen, is het noodig, dat men zich eerst behoorlijk rekenschap er van geeft, *wat de onaangename gevolgen van de trillingen zijn*. Deze onaangename gevolgen kunnen onderscheiden worden in 3 rubrieken, n.l.;

a. Onaangenaam gevoel of gehoor.

Deze onaangename gevolgen van trillingen zijn wel het meest algemeen bekend. Ieder heeft wel eens op een schip gevaren, dat hinderlijk trilde, of in een onvoldoend geveerden auto gezeten, die over een slechten weg reed. De gevallen, waarin ons oor onaangenaam getroffen wordt door hinderlijke geluidstrillingen, zijn te veel om op te noemen. Bij het verkleinen van deze onaangename gevolgen van trillingen moeten wij voor elk geval op zichzelf nagaan, hoever deze verkleining moet gaan.

b. Onnauwkeurige aanwijzing van instrumenten ten gevolge van trillingen.

Hierbij is het noodig de trillingen *zooveel mogelijk* weg te werken. De beste isolatie is daarbij vaak nog niet goed genoeg.

c. Breuk ten gevolge van trillingen.

Vele constructiedeelen trillen in meerdere of mindere mate. Tegen het trillen bestaat, uit een sterkteoogpunt gezien, geen bezwaar, zoolang de materiaalspanningen beneden de z.g. vermoedheidsgrens blijven. Ernstiger zijn de verschijnselen, die optreden, wanneer de trilling-verwekkende krachten in resonantie komen met de eigentrilling van een constructiedeel. *Dan* kunnen de trillingsuitslagen en daardoor de materiaalspanningen zóó hoog oplopen, dat na verloop van tijd (bijv. na 1 miljoen trillingen) een vermoedheidsbreuk optreedt. Door demping moeten deze uitslagen dan verminderd worden en wel minstens zóó ver, dat de wisselende spanningen altijd onder de vermoedheidsgrens blijven. Het tegengaan van breuk is dus veel gemakkelijker dan het tegengaan van het trillen van instrumenten, daar in het laatste geval de trilling *geheel* moet worden weggewerkt.

5. Isolatie van trillingen.

Lang niet altijd is het noodig de trilling van een lichaam tegen te werken of te dempen, om de eenvoudige reden,

dat het trillen van zoo'n lichaam in het geheel geen bezwaar oplevert. Wel zullen de trillingen, die het lichaam via den grond op andere lichamen overbrengt, schadelijk of onaangenaam kunnen zijn. In zoo'n geval zullen wij *of* het storende lichaam *of* het gestoorde lichaam van den grond isoleeren. Isolatie van het storende lichaam heet *actieve isolatie*, isolatie van het gestoorde lichaam heet *passieve isolatie*. Veelal kunnen voor passieve en actieve isolatie dezelfde middelen worden toegepast. Heb ik bijvoorbeeld last van een straatzanger, dan sluit ik de ramen; dat is passieve isolatie. Ben ik van plan zelf te gaan zingen, dan sluit ik *ook* de ramen, maar nu is het actieve isolatie. In het algemeen moeten wij de voorkeur geven aan actieve isolatie, omdat daarbij de hinderlijke trillingen tot een zoo klein mogelijk gebied beperkt blijven. Lang niet altijd zal dit geheel mogelijk zijn, zoodat wij daarnaast passieve isolatie moeten toepassen.

Trillingsisolatie kan verkregen worden door veerende ondersteuning van het lichaam. Zoowel voor actieve als passieve isolatie is deze veerende verbinding essentieel. Passieve en actieve isolatie verschillen in wezen dan ook weinig van elkaar. Ik zal eerst de *actieve* isolatie bespreken en bij de *passieve* isolatie slechts de verschilpunten met de actieve isolatie vermelden. Bij actieve isolatie is de werking van de veerende ondersteuning deze, dat zij het trillende lichaam zooveel mogelijk *vrij* laat trillen. De uiteinden van de veeren, welke aan het lichaam bevestigd zijn, zullen zich daarbij verplaatsen. De uiteinden, die aan den grond bevestigd zijn, staan bijna stil. De kracht, die door de veer wordt overgebracht, is gelijk aan de veerconstante maal de indrukking. Maken wij dus de veer zeer slap (geven wij haar een kleine veerconstante), dan zal de doorgeleide kracht klein zijn en is dus de isolatie goed. Ook wordt de kracht klein, wanneer het lichaam zich weinig verplaatst, wat het geval is, wanneer bij bepaalde storende krachten de massa van het lichaam groot is. De eischen voor een goede isolatie luiden dus: slappe veeren en groote massa van het lichaam. Groote massa beteekent echter ook groot gewicht, dat door de veeren gedragen moet worden. Hoe beter de isolatie dus is, hoe duurder de veeren, omdat haar gewicht en dus ook haar kosten evenredig zijn met de maximum toelaatbare kracht en omgekeerd evenredig met de veerconstante.

Wanneer de frequentie van de storende krachten of momenten gelijk of ongeveer gelijk wordt aan één van de zes eigentrillingsgetallen van het veerend ondersteunde lichaam, treedt resonantie op. De trillingsuitslagen van het lichaam worden zeer groot en de door de veeren doorgeleide krachten ook. De veeren werken dan niet isoleerend, maar juist trilling-versterkend. Resonantie moet dus vermeden worden. Meestal is het mogelijk alle eigentrillingsgetallen van het lichaam ver beneden de frequentie van de storende krachten te houden, omdat de eisch: slappe veeren en groote massa in zich sluit, dat de eigentrillingsgetallen laag zijn. Bij het aanloopen van een machine zal echter de frequentie der storende krachten tijdelijk wel met de eigentrillingsgetallen van het lichaam samenvallen. Geschiedt het aanloopen snel, dan zullen de trillingsuitslagen geen tijd hebben om een groote waarde te bereiken en zullen dus hiervan geen bezwaren ondervonden worden. Zorgen wij er bovendien voor, dat de eigentrillingsgetallen zooveel mogelijk gelijk zijn, dan is het resonantiegebied klein. Zijn evenwel toch te groote trillingsuitslagen te verwachten, dan moeten dempende krachten op het lichaam worden uitgeoefend. Hoewel ik aan de behandeling van de demping pas in paragraaf 6 toekom, moet ik nu reeds op de bespreking van deze demping vooruitloopen, omdat een behandeling van de isolatie, zonder daarbij de demping in aanmerking te nemen, onvolledig zou zijn.

Willen wij de groote trillingsuitslagen, die bij resonantie optreden, verkleinen, dan moeten de veeren *of* inwendige demping hebben, wat bij alle veeren, behalve bij stalen veeren het geval is, *of* er moet een extra demping met behulp van vloeistof- of luchtdempers worden aan-

gebracht. De beste isolatie door veeren met gebruikmaking van demping wordt *dan* bereikt, wanneer de demping in het resonantiegebied groot en in het normale werkgebied klein of liefst nul is. In het normale werkgebied, waar de frequentie der storende krachten hoog is t.o.z. van de eigentrillingsgetallen van het veerend ondersteunde lichaam en waarbij de door de veeren doorgeleide krachten klein worden, kunnen de krachten, die door inwendige demping of door de extra-dempers op den grond worden overgebracht, dikwijls veel grooter worden dan de door de veeren overgebrachte krachten. De demping maakt in zoo'n geval de isolatie belangrijk slechter.

Bij inwendige demping zal in het algemeen de demping bij hogere frequenties niet sterk toenemen, bij vloeistofdempers, waarbij de dempende krachten evenredig zijn met de snelheid, *wel*. Verbetering in het oplopen van de dempingskracht kan verkregen worden door den demper via een veer op het lichaam te laten inwerken. Bij luchtdempers is deze veerende verbinding in den vorm van een luchtkussen al aanwezig.

Een andere oplossing om, zonder dat te groote trillingsuitslagen in het resonantiegebied te vreezen zijn, ook bij *hooge* frequentie een goede isolatie te verkrijgen, bestaat hierin, dat het te ondersteunen lichaam met veeren aan een tweede lichaam bevestigd is, welk tweede lichaam weer met veeren en vloeistofdempers aan den grond is verbonden. Hierbij wordt bij hooge frequenties een zeer goede isolatie verkregen. Wel moeten wij bij het aanloopen der machine twee resonantiegebieden doorlopen, doch de demping kan zóó gekozen worden, dat ook *dan* de uitslagen niet te groot worden.

Wij hebben gezien, dat bij afwezigheid van demping de isolatie slecht is, wanneer de frequentie der storende krachten samenvalt met één van de eigentrillingsgetallen van het lichaam. Deze eigentrillingsgetallen zijn *laag*. Is de frequentie der storende krachten hoog, dan kan zij gelijk worden aan één van de eigentrillingsgetallen van de veeren *zelf*. De eigentrillingsgetallen van de veeren zijn n.l. hoog, doordat de massa der veeren klein is. Ook bij hooge frequentie der storende krachten kan dus de isolatie slecht worden. Hierbij helpt uitwendige demping niet meer, omdat het trillen van het middelste gedeelte van de veer t.o.z. van de uiteinden niet gedempt wordt, zoodat in een dergelijk geval veeren met inwendige demping gebruikt *moeten* worden. Geluidstrillingen, (waarvan de frequentie altijd hoog is) worden dus door een stalen veer *slecht* geïsoleerd, door een veer uit een dempend materiaal als rubber, kurk of vilt *goed*.

Resumeerend kunnen wij vaststellen, dat bij actieve isolatie, waarbij de frequentie der storende krachten bekend is, over het algemeen demping niet noodig en vaak schadelijk is. Noodzakelijk is demping, wanneer de machine lang in het resonantiegebied moet werken. *Inwendige* demping van de veeren is noodig, wanneer de frequentie der storende krachten hoog is.

Bij *passieve* isolatie kennen wij meestal de frequentie der storende krachten niet, zoodat daar demping, hetzij in- of uitwendig bijna altijd noodzakelijk is.

Als bijzonder geval van passieve isolatie wil ik met U de veering van voertuigen bespreken, meer speciaal die van automobielen. Bij een goed geveerden auto moet de buitenkant van den band steeds in contact met den weg blijven, terwijl de carrosserie in verticalen zin zoo weinig mogelijk moet bewegen. Zien wij even af van de veering van de banden, dan moet de onderkant van de wagenveer zich bewegen volgens een kromme, die evenwijdig met den weg verloopt. Is de weg hobbelig, dan beweegt deze onderkant zich op en neer. De *carrosserie* moet in verticalen zin zoo veel mogelijk stilstaan. De uitrekking en samendrukking van de veer wordt dus bepaald door de grootte van de hobbels van den weg. Ten gevolge van deze uitrekkingen en samendrukkingen zullen in de veer veerkrachten ontstaan, die daarmee evenredig zijn, en die aan de carrosserie versnellingen

geven. Willen wij deze versnellingen klein houden, dan moeten wij de veerkrachten klein houden, wat, wanneer de grootte der hobbels gegeven is, er op neer komt, dat wij *slappe* veeren moeten aanbrengen.

Nu kan de frequentie der hobbels alle mogelijke waarden aannemen. Zijn de hobbels bijv. 5 m lang en de rijsnelheid is 5 m/sec of 18 km/h, dan is deze frequentie 1/sec, is de lengte der hobbels 0,5 m bij een rijsnelheid van 25 m/sec of 90 km/h, dan is de frequentie 50/sec. Het zal dus altijd voorkomen, dat de frequentie der hobbels gelijk is aan één van de eigentrillingsgetallen van den auto, in welk geval door resonantie zeer groote verticale bewegingen van de carrosserie zullen ontstaan. Om dit te verhinderen is een sterke demping noodzakelijk, welke demping meestal in den vorm van vloeistofdemping wordt aangebracht. Een groot bezwaar hiervan is, dat bij groote hobbelfrequentie de isolatie belangrijk slechter wordt, waardoor het rijden met een auto, waarbij de dempers voor een lage hobbelfrequentie goed zijn ingesteld, bij hooge frequentie zeer onaangenaam kan zijn. Gelukkig zijn tusschen weg en passagier nog twee ongedempte veeren geschakeld, n.l. de luchtbanden en de veerende kussens. Belangrijke verbetering zou kunnen worden verkregen met verstelbare dempers. Eenige jaren geleden is dit wel toegepast, doch later heeft men deze instelling weer verlaten. De bediening door den bestuurder eischt onder het rijden een deel zijner aandacht op, wat aan de veiligheid op den weg niet ten goede komt. Bovendien volgen de verschillende hobbelfrequenties elkaar vaak zoo snel op, dat een voldoende snelle en juiste instelling practisch onmogelijk is.

6. Demping van trillingen.

Wanneer de trilling van een lichaam zelf bezwaren oplevert en het niet mogelijk is de storende krachten voldoende te verminderen, of de eigentrillingsgetallen zoo te veranderen, dat resonantie niet voor kan komen, dan moeten wij, om de trillingsuitslagen binnen toelaatbare grenzen te houden, de trilling *demp*en. Ik wil deze demping allereerst onderscheiden in de volgende rubrieken:

- a. Absolute demping.
- b. Relatieve demping.
- c. Demping met een hulpmassa.

a. Absolute demping.

Wanneer wij de trilling van een lichaam willen dempen, dan wordt de beste demping verkregen, wanneer wij een demper aanbrengen tusschen het lichaam en een ander lichaam met zeer groote massa, dat zelf niet trilt. In dat geval zullen *geen* trillingverwekkende krachten via den demper op het lichaam worden uitgeoefend. Wij noemen deze demping „absolute demping”.

b. Relatieve demping.

Is absolute demping niet te verwezenlijken, dan kunnen wij den demper aanbrengen tusschen het lichaam, waarvan de trillingen gedempt moeten worden en het lichaam, dat de trillingen veroorzaakt. Nu zullen *wel* trillingverwekkende krachten via den demper overgebracht worden. Deze demping noemen we „relatieve demping”.

c. Demping met een hulpmassa.

Er zijn gevallen en wel zeer vele gevallen, dat *noch* absolute, *noch* relatieve demping doeltreffend is. In dergelijke gevallen bevestigen wij een hulpmassa via een demper aan het lichaam, waarvan wij de trillingen willen dempen, en passen bijna altijd naast den demper nog een veer toe. Is de hulpmassa groot, dan is onafhankelijk van de stijfheid van de veer een goede demping mogelijk. Zijn er evenwel bezwaren tegen een zware hulpmassa, dan moeten er andere maatregelen genomen worden. Deze bestaan hieruit, dat de veerende verbinding tusschen lichaam en hulpmassa juist zoo elastisch gemaakt wordt, dat het eigentrillingsgetal van de hulpmassa met veer gelijk of ongeveer gelijk gemaakt wordt aan dat eigen-

trillingsgetal van het lichaam, dat samenvalt met de frequentie der storende krachten. Bij dat trillingsgetal n.l. zijn, ten gevolge van resonantie, groote trillingsuitslagen te verwachten. Zijn er meer van deze gevaarlijke frequenties, dan moet voor elk een hulpmassa met veer en demper aangebracht worden. De gunstigste waarde van de demping moet in elk geval afzonderlijk berekend worden. Meestal wordt deze demping klein gehouden, zoodat de hulpmassa groote uitslagen kan krijgen, waarbij het lichaam zelf maar kleine trillingen uitvoert. Een combinatie van hulpmassa, veer en demper noemen wij een „afgestemde trillingsdemper”. Ze worden toegepast tot het dempen van torsietrillingen van krukassen. Gebruiken wij als materiaal voor de veer rubber, dan heeft de veer inwendige demping en is een extra demper overbodig. Dit leidt tot een eenvoudige constructie, die meer en meer toegepast wordt. Ook de Frahmische slingertank, welke dient om de scheepsslingeringen te dempen, is een afgestemde trillingsdemper. De Frahmische slingertank bestaat uit twee reservoirs, één aan stuurboord en één aan bakboord, verbonden door een buis aan den onderkant en een buis met regelkraan aan den bovenkant. Het geheel is gedeeltelijk met water gevuld. De eigenslingertijd van het water moet gelijk zijn aan dien van het schip. De regelkraan in de bovenste verbindingbuis, de luchtleiding, dient om de meest effectieve demping in te stellen.

Ten tweede kunnen wij de demping onderscheiden naar de dempingskarakteristiek. De demping kan geleverd worden door een demper, die alleen tot taak heeft en ook alleen in staat is om de dempende krachten te leveren. Constante krachten, welke b.v. geleverd worden door het gewicht van het lichaam, waarvan wij de trillingen willen dempen, kunnen door zoo'n demper *niet* opgenomen worden. Naast den demper moet dan een veer worden aangebracht.

De demping kan echter ook geleverd worden door de inwendige wrijving (hysteresis) van het materiaal van de veer. In dit geval zijn dus demper en veer in één apparaat vereenigd. Een dergelijken demper noemen wij: „*hysteresis-demper*”.

Wij spreken derhalve nu nog over:

- a. Wrijvingsdempers.
- b. Vloeistofdempers.
- c. Luchtdempers.
- d. Hysteresisdempers.

a. *Wrijvingsdempers*: Bij wrijvingsdempers wordt de dempende kracht opgewekt door de wrijving van twee niet-gesmeerde oppervlakken, die zich ten gevolge van de trilling ten opzichte van elkaar bewegen. Wrijvingsdempers werden vroeger veel, maar nu toch ook nog in sommige gevallen, gebruikt voor de demping van de veering van auto's. Trouwens elke bladveer, welke uit meerdere bladen bestaat, fungeert als wrijvingsdemper, daar de verschillende bladen bij de veering t.o.z. van elkaar verschuiven. Een groot bezwaar van de wrijvingsdempers, wanneer deze bij isolatie van trillingen gebruikt worden, is, dat de deelen pas *dan* t.o.z. van elkaar gaan bewegen, wanneer de statische wrijvingskracht overschreden wordt. Wisselende krachten, die kleiner zijn, worden dus in haar volle grootte doorgeleid, zoodat daarvoor de isolatie te niet is gedaan. Een voordeel van de wrijvingsdempers bestaat hierin, dat de demping bij hoogere frequenties *niet* toeneemt, zooals bij de vloeistofdempers het geval is. Een tweede voordeel is, dat ze *eenvoudig, goedkoop* en *bedrijfszeker* zijn. Vooral de laatste eigenschap zal er wel belangrijk toe hebben bijgedragen, dat voor de dempers, die ten doel hebben de torsietrillingen van krukassen te dempen, vaak wrijvingsdempers worden gebruikt. Op één van de uiteinden van de krukas, liefst aan dat einde, waar het vlieg wiel niet zit, wordt een massa draaibaar op de as bevestigd. De draaiing t.o.z. van de as wordt tegengewerkt door wrijvingsplaten, die met een instelbare kracht op elkaar worden gedrukt. Gaat de krukas trillen, en worden de hoekversnellingen van de massa ten gevolge daar-

van zóó groot, dat het moment van de wrijvingskrachten onvoldoende is om het benodigde moment voor de versnelling van de extra massa te leveren, dan slijpt de verbinding en treedt de demper in werking. Kleine trillingen worden dus niet gedempt, groote wel. Bij een krukas behoeft dit geen bezwaar op te leveren, daar kleine trillingen geen groote spanningen zullen opwekken, zoodat ze *ongevaarlijk* zijn. Wil de demper de groote trillingen voldoende afdempen, dan moet het traagheidsmoment van de extra massa tamelijk groot zijn.

Als derde voorbeeld van wrijvingsdemping zal ik U iets mededeelen over het verminderen van hinderlijke trillingen van tandwielen.

Tandwielen kunnen soms, ten gevolge van de wisselende tanddrukken, in trilling geraten. De frequentie van deze trillingen kan dan in het gebied der geluids-frequentie liggen. De tandwielen geven een gierend of fluitend geluid, welk geluid zeer onaangenaam aandoet. Bij de trilling wordt de tandkrans in meerdere bochten gebogen. Zouden wij nu de tandkrans dikker maken, dan zou dit slechts ten gevolge hebben, dat de toon hooger werd, doordat de stijfheid verhoogd werd. Brengen wij echter de verdikking aan in den vorm van een lossen ring, die met een kleine krimpmaat in de krans gekrompen is, dan kan bij een juiste aanlegdruk een sterke demping optreden. Vormde de ring met de tandkrans één geheel, dan zouden bij de trilling in het scheidingsvlak schuifspanningen optreden. Kiezen wij den aanlegdruk juist zoo groot, dat deze schuifspanningen grooter zijn dan de aanlegdruk, vermenigvuldigd met den wrijvingscoëfficiënt, dan treedt glijding op, en wordt arbeid in warmte omgezet, waardoor de trilling gedempt wordt. Het zoo behandelde tandwiel zal niet meer, wanneer wij er een klap op geven, een helderen toon geven, maar een geluid als een gebarsten klok. Hetzelfde verschijnsel doet zich voor bij een treinwiel, waarvan de opgekrompen band los is gaan zitten en bij elk stuk metaal, waar een scheur in zit. De wrijving, die ontstaat wanneer de kanten van de scheur zich langs elkaar bewegen, veroorzaakt de dempingskrachten, die de door een klap ingeleide trilling snel afdempen.

b. *Vloeistofdempers.*

Bij vloeistofdempers wordt de dempingskracht verkregen, door de twee deelen, die t.o.z. van elkaar bewegen, te koppelen aan een zuiger en een cylinder. De cylinder is gevuld met een vloeistof, bijv. olie, glycerine of water. De twee zijden van den cylinder zijn verbonden met een omloopkanaal met regelkraan. Het verschil in kracht aan beide zijden van den zuiger is evenredig met het drukverlies in de regelkraan, welk drukverlies weer evenredig is met de doorstroomsnelheid. De dempingskracht, door een vloeistofdemper geleverd, is dus evenredig met de relatieve snelheid van haar twee hoofddeelen (zuiger en cylinder) t.o.z. van elkaar. Bij kleine trillingsuitslagen, waarbij de snelheden dus ook klein zijn, is de dempingskracht klein, bij groote uitslagen van dezelfde frequentie groot. Dit is een waardevolle eigenschap, omdat de demping eens en vooral voor alle uitslagen juist ingesteld kan worden. Een bezwaar van de vloeistofdempers bestaat daarin, dat bij eenzelfde trillingsuitslag de dempingskracht evenredig is met de frequentie, zoodat hoogfrequentie-trillingen veel sterker gedempt worden dan laagfrequentie-trillingen. Bij hoogfrequente trillingen wordt een demper, die voor laagfrequente trillingen op de juiste demping is ingesteld, een bijna starre verbinding tusschen de twee deelen, waartusschen hij is aangebracht. Vloeistofdempers zijn dus uiterst geschikt, wanneer de frequentie der trillingen niet te veel verandert; verandert deze frequentie wel veel, dan zijn ze minder geschikt. Bijzonder op hun plaats zijn ze in instrumenten om de slingering van de naald snel tot rust te brengen. Is deze eenmaal tot rust gekomen, dan brengt de demper geen kracht meer over, zoodat de aanwijzing van het instrument door den demper niet beïnvloed wordt.

Zooals reeds in § 5 is besproken, worden bij de veering

van automobielen bijna altijd vloeistofdempers gebruikt, hoewel ze daar, omdat de frequentie der storende krachten zeer sterk wisselt, niet op hun plaats zijn. Een betere oplossing is, voor zoover mij bekend, echter nog niet gevonden.

Het bezwaar, dat de dempingskracht afhankelijk is van de viscositeit van de vloeistof, welke weer van de temperatuur afhangt, wordt ondervangen door de doorstroomopening automatisch in te stellen, welke instelling geschiedt door een temperatuurgevoelig apparaat, bijv. door een bimetaalstrook. Het verdient *toch* aanbeveling een vloeistof te kiezen, waarvan de viscositeit niet te sterk met de temperatuur verandert. Glycerine is daarom beter dan olie.

Als voorbeeld van vloeistofdemping met hulpmassa noem ik U nog de demping van torsietrillingen van krukassen. Ook hier brengen wij, evenals bij de dempers met wrijvingsdemping, een vrij draaibare hulpmassa op één uiteinde van de as aan, welke hulpmassa via een vloeistofdemper aan de as gekoppeld wordt. Deze constructie is wél ingewikkelder dan de wrijvingsdemping, maar met een 20 % minder traagheidsmoment wordt hetzelfde effect bereikt. Een zeer *grote* verbetering wordt verkregen, wanneer de hulpmassa, behalve via den vloeistofdemper, ook nog met veeren aan de as is gekoppeld. Wij krijgen dan den zoeven behandelde „afgestemde trillingsdemper.”

c. Luchtdempers.

Het enige verschil tusschen luchtdempers en vloeistofdempers bestaat hierin, dat de lucht samendrukbaar is. Is de regelkraan geheel afgesloten, dan werkt de demper als een veer, terwijl de vloeistofdemper met afgesloten regelkraan een volkomen starre verbinding vormt. Een luchtdemper is dus op te vatten als een vloeistofdemper, in serie geschakeld met een veer. Dit heeft het voordeel, dat bij hoge frequenties, waarbij de zuivere vloeistofdemper star zou worden, de veer deze starheid vermindert, zoodat niet, wanneer de demper gebruikt wordt bij isolatie van trillingen, de isolatie bij hogere frequenties slechter wordt.

d. Hysteresisdempers.

Hebben wij voor trillingsisolatie een veer en een demper noodig, dan ligt het voor de hand deze twee functies in één onderdeel te vereenigen. Dit is mogelijk, door voor de veer een materiaal te kiezen, dat tegelijkertijd elastisch en dempend is. Is het de bedoeling ook kleine trillingen zoo veel mogelijk weg te werken, dan moet eveneens bij kleine vervormingen het materiaal van de veer dependende eigenschappen vertoonen. De materiaaldemping komt tot stand, doordat bij *belasting* en *ontlasting* het verband tusschen kracht en rek verschillend is. Hierdoor ontstaat in het kracht-rek-diagram een hysteresislus. Het oppervlak van de hysteresislus is gelijk aan den verloren gegane arbeid en is dus een maat voor de hysteresisdemping. Bij de meeste metalen is het oppervlak van de hysteresislus, dus ook de dempingsarbeid, bij kleine spanningsvariëaties klein. Bij andere materialen, zooals rubber, kurk, vilt, is reeds bij kleine spanningsvariëaties een behoorlijke hysteresislus aanwezig. De procentueele demping, dat is de verhouding van den verloren arbeid tot den aangewende arbeid, verandert bij deze materialen slechts weinig bij toename van de amplitude der spanningen. Ook is de demping niet sterk afhankelijk van de frequentie. In alle genoemde gevallen, waarbij vloeistofdemping bezwaren opleverde, omdat de demping bij hogere frequenties te groot werd, kunnen dus met voordeel veeren van dempend materiaal gebruikt worden. Of het altijd mogelijk is, de relatieve demping door juiste materiaalkeuze hoog genoeg op te voeren, is een vraag, die ik niet kan beantwoorden. Ik laat de beantwoording gaarne aan de volgende sprekers over.

Willen wij bij een metalen veer de hysteresisdemping nuttig gebruiken, dan moeten wij daarvoor een metaal gebruiken, dat bij een spanningswisseling, waarbij het materiaal nog niet vermoeid wordt, voldoende demping heeft. Vele taacie materialen, zooals bijv. zacht koolstofstaal, bezitten deze eigenschap. Dergelijke materialen kunnen, zonder te bezwijken, zooveel arbeid in warmte omzetten, dat de temperatuur 100° à 200° boven de omgevingstemperatuur stijgt. Zelf heb ik een staaf uit staal 37 met een wisselend wringmoment belast, waarbij het aantal wisselingen 25 per sec bedroeg. De staaf liep blauw aan, ten gevolge van den in warmte omgezetten hysteresisarbeid en was na 15 miljoen wisselingen nog niet bezweken. OTTO FÖPPL heeft indertijd in het Wöhler-Instituut een dergelijke proef genomen. Het materiaal was daar na 500 miljoen belastingswisselingen nog intact.

Wel moet voor een goede vormgeving van de veer gezorgd worden. De grootste in eenig punt optredende spanning is n.l. een maat voor het breukgevaar. Deze grootste spanning moet dus beneden de vermoeidheidsgrens liggen. Treedt nu de grootste spanning slechts in een klein deel van de veer op en is de spanning in alle andere deelen belangrijk kleiner, dan zal de spanning in die andere deelen belangrijk onder de vermoeidheidsgrens moeten blijven. Maar dan is de dempingsarbeid ook zeer gering. Alleen in het punt van de hoogste spanning is de dempingsarbeid per volume-eenheid groot, maar het volume van dit deel is weer klein, zoodat de totale demping te klein zal uitvallen. Willen wij een voldoende demping verkrijgen, dan moeten wij er dus voor zorgen, dat de spanning in een groot deel van de veer even groot en overal elders kleiner is. Bestaat de veer uit een rechte ronde staaf, die op wringing belast wordt, dan moet de diameter over een groot deel constant zijn. De uiteinden, waar extra spanningen ten gevolge van de bevestiging optreden, moeten *zooveel* dikker gemaakt worden, dat de spanning daar zeker beneden die in het middelste stuk blijft. De overgang naar de dikkere uiteinden moet vloeiend verlopen. Zouden wij n.l. bij den overgang van het dunne op het dikke stuk een kleinen afrondingsstraal toepassen, dan zouden daar ter plaatse de spanningen veel grooter worden dan in het middelste stuk, wat blijkens het voorgaande vermeden moet worden. Ook draairillen en slijpklassen geven aanleiding tot ongewenschte plaatselijke spanningsverhoogingen. Voor een goede bewerking moet dus zorg gedragen worden.

Bij *die* trillingen van scheepsmachines, waarbij de schroef trilt t.o.z. van de machine, kan de genoemde dempingsmethode goed toegepast worden. Eenige stukken van de tunnelas moeten daarvoor dunner uitgevoerd worden, om de spanning zoo hoog te maken, dat voldoende demping verkregen wordt. Bij krukassen is deze dempingsmethode niet goed uitvoerbaar, omdat ten gevolge van de vele plaatselijke spanningsverhoogingen de spanning in het grootste gedeelte van de as klein gehouden moet worden.

Ik hoop U in deze beknopte uiteenzetting een overzicht gegeven te hebben van het groote gebied van trillingen en trillingsdemping. Welke methode in een bepaald geval gekozen moet worden om hinderlijke trillingen te bestrijden, hangt behalve van de opgesomde vóór- en nadelen nog van vele andere overwegingen af, zooals de kosten, het gewicht, de beschikbare ruimte en de bedrijfszekerheid. Wij moeten daarbij het vraagstuk niet noodeloos gecompliceerd en moeilijk maken en de meest geraffineerde methode toepassen, om de trillingen tot het uiterste te beperken, als een matige verkleining voldoende is. Als overal in de techniek geldt ook hier het streven naar economie en trachte men steeds de vraag te beantwoorden: „Hoe kunnen met zoo eenvoudig mogelijke middelen de onaangename gevolgen eener trilling juist zoover verkleind worden als strikt noodzakelijk is?”

Trillingbestrijding door middel van kurk

door

N. J. VISSER.

Het trilvrij opstellen van Dieselmotoren door middel van kurk, en de ervaring, hiermede opgedaan. Het resultaat van proeven met kurkschijven. Geconcludeerd wordt, dat kurk geschikt is voor het isoleren van trillingen bij Dieselmotoren, wanneer voldoende rekenschap wordt gegeven van de eisen, die een trilvrije opstelling stelt, en wanneer de elastische eigenschappen van kurk ten volle benut worden.

Wanneer in het volgende gesproken wordt over het bestrijden van trillingen, dan wordt in de allereerste plaats gedacht aan het trilvrij opstellen van Dieselmotoren. Dit behoort tot de moeilijkste vraagstukken van de trillingsbestrijding en het is daarom niet zo heel erg deze beperking te maken.

Is men in staat „Dieselmotoren” in iedere omstandigheid trilvrij op te stellen, dan heeft men het met het bestrijden van trillingen al aardig ver gebracht.

Voor enige tijd trof ik in een Engels tijdschrift een advertentie van trillingsdempers aan. Naast de vele deugden, die één voor één werden opgesomd, prijkte een foto van een trilvrij opgestelde Dieselmotor.

Deze foto was voor mij teleurstellend, want weergegeven was een 8-cylinder motor, waarvan aangenomen kon worden, dat alle vrije krachten en momenten deugdelijk gebalanceerd waren. Buitendien was de motor compact samengebouwd met een generator, zodat het fluctuerend kippmoment slechts gering kon zijn.

Had de prent een 4- of 3-cylinder weergegeven, die b.v. afzonderlijk van het arbeidswerktuig of de werktuigen was opgesteld, dan was zij mijns inziens veel meer zeggend geweest.

Het trilvrij opstellen van een Dieselmotor is niet altijd hetzelfde probleem. Er moet een principieel onderscheid gemaakt worden tussen motoren, die wel en motoren die geen vrije krachten en koppels hebben. Beide gevallen kunnen storingen door trillingen teweegbrengen.

Zijn er geen vrije krachten en koppels voorhanden, dan kunnen deze alleen veroorzaakt worden door: ten eerste vormveranderingen van het motorframe of ten tweede door de stoten in de kussenblokspelingen, detonaties enz., die vrije trillingen opwekken van hoge frequenties. Deze hoogfrequente trillingen planten zich voort door het motorlichaam en worden aan de omgeving afgegeven.

Geheel anders is het geval met een ongebalanceerde motor; behalve de genoemde triloorzaken, die ook hier aanwezig kunnen zijn, hebben wij in de eerste plaats te maken met grote krachten van meestal zeer lage frequentie.

De frequentie is hoogstens 1 of 2 maal het toerental, omdat vrije krachten hoger dan de 2e orde door haar kleinheid zelden storend zijn.

Hoe moeilijk het kan zijn bij aanwezigheid van zulke vrije krachten en momenten een afdoende isolering te vinden, levert het volgende voorbeeld:

„Wij moesten eens een 2-cylinder motor opstellen in een kleine provincie-stad, waar bodembewegingen veel overlast konden veroorzaken.

De motor was geen snelloper; hij deed niet meer dan 300 toeren, maar had grote vrije krachten en momenten

van de 1e en 2e orde, bovendien een groot wisselend kippmoment, doordat hij met een riem een drijfwerk moest aandrijven.

Aan drie firma's van trildempers hebben wij advies gevraagd. Twee hebben ons bericht, er geen goede oplossing voor te hebben en de derde heeft niets meer van zich laten horen.

Gelukkig draait de motor toch en levert geen storende trillingen, maar dat is meer geluk dan wijsheid. Wij hebben n.l., met de ons ten dienste staande gegevens, zo goed mogelijk de bodem-elasticiteit vastgesteld en daarna de afmetingen en het gewicht van het fundatieblok zo bepaald, dat naar ons beste weten geen bodemresonantie kon optreden. En dat is gelukt, maar weinig bevredigend waren toch de negatieve adviezen inzake de trildempers.

Vele in de handel gebrachte trilisolatiematerialen hebben een meer of minder goed effect, wanneer hoogfrequente trillingen met geringe energie gedempt moeten worden. Dezelfde materialen blijven in gebreke, wanneer het er om gaat, grote krachten met een lage frequentie, b.v. gelijk aan het toerental, af te dempen.

U begrijpt nu wellicht, waarom de vermelde reclameprent mij een gevoel van onbevredigdheid gaf.

De oorzaak, waarom de meeste stoffen slechts effect hebben in het geval van hoogfrequente trillingen, is te zoeken in het feit, dat de elasticiteit meestal gering is. Daarbij komt dan nog, dat ook de manier, waarop het isolerende materiaal onder de motor wordt gebracht, de elasticiteit niet voldoende uitnut. Door de te geringe elasticiteit komt de eigenfrequentie van de motor op het isolerend materiaal hoger te liggen dan de periode, die de vrije krachten en koppels opdrukken.

Hebben wij b.v. te doen met een motor van 500 omw. per min en een vrije kracht van de 1e orde, dus ook 500 per min en ligt het eigenfrequentie motor-isolatiemateriaal b.v. op 1000 per min, dan wordt het systeem in het z.g. onder-kritische gebied geïmpulseerd.

Het onder-kritische gebied is het gebied, waarin de opgedrongen frequentie n_K kleiner is dan de eigenfrequentie n_ϵ . In dit gebied overheerst de elastische weerstand van het isolatiemateriaal.

Wordt de opgedrongen frequentie $n_{K=0}$, dan is de uitslag van het trilsysteem gelijk aan de statische indrukking van het isolatiemateriaal onder invloed van de impulserende kracht (zie fig. 1).

Neemt de opgedrongen frequentie n_K toe, dan wordt de uitslag steeds groter tot hij voor $n_K = n_\epsilon$ of $\frac{n_K}{n_\epsilon} = 1$ een maximum bereikt.

Impulseren van een isolerende stof in het onder-kritische gebied levert steeds een vergroting van de uitslag, wat

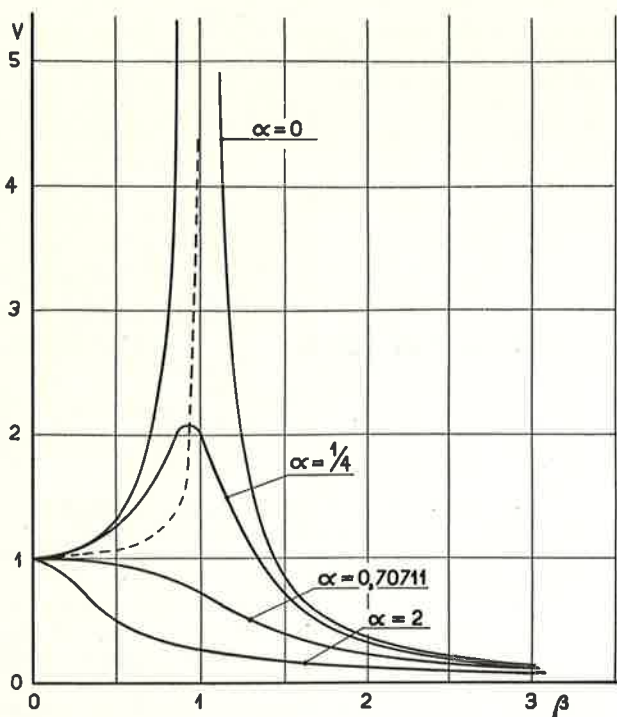


Fig. 1. V = dynamische vergroting.

$$\beta = \frac{n_k}{n_e}$$

α = dempingscoëfficiënt.

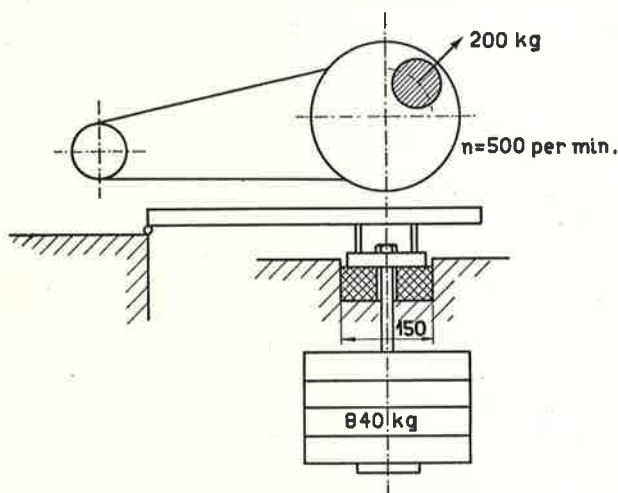


Fig. 2. Proefopstelling kurkschijf.

voor een trisolatie het tegendeel is van wat gewenst wordt.

Ook de aanwezigheid van demping verandert hieraan in principe niets. Ze kan alleen de vergroting van de statische uitslag verminderen.

De demping heeft evenwel nog een andere invloed. Ze vermindert niet alleen de uitslag, maar ook de frequentie, waarbij het systeem de maximum uitslag bereikt. Een merkbare verschuiving treedt evenwel pas op, wanneer de demping groot wordt. Bereikt ze een bepaalde waarde, dan wordt de eigenfrequentie zelfs nul.

Het onder-kritische gebied bestaat dan niet meer.

Wordt de demping nog groter, dan wordt de eigenfrequentie imaginair en het systeem ten slotte z.g. aperiodisch, d.w.z. het is niet meer in trilling te brengen. Een impuls zal slechts een direct in de evenwichtsstand terugkerende beweging ten gevolge hebben.

De elasticiteit van vele z.g. isolatiestoffen is meestal zo klein, dat de aanwezige vrije krachten ver onder de eigenfrequentie impulseren. Dat de demping daarbij zo groot zou zijn, dat ze de eigenfrequentie voldoende zou kunnen verschuiven, is zeker de vraag.

Men krijgt eerder de indruk, dat men de motor evengoed direct op de fundatie had kunnen zetten.

Willen wij werkelijk een *trisolatie* bewerkstelligen, dan moet de opgedrongen frequentie hoger liggen dan de eigenfrequentie, m.a.w. wij moeten in het boven-kritische gebied impulseren.

Wanneer n.l. de motor impuleert met een frequentie groter dan de eigenfrequentie van het systeem, overheerst niet meer de elastische weerstand maar de traagheid van de aanwezige massa's.

Het gehele systeem wordt trager en trager naarmate de verhouding $\frac{n_k}{n_e}$ groter wordt dan 1.

Een gevolg van dit trager en trager worden is, dat de uitslag op een ogenblik kleiner wordt dan de statische uitslag, en dit is juist wat gewenst wordt.

Het is daarom een ideaal voor enthousiaste trillingsbestrijders.

zo ver mogelijk boven de eigenfrequentie te impulseren.

Bij opgedrongen trillingen van hoge frequentie, kan men zeker een grote afstand bereiken. Maar voor een opgedrongen frequentie van 500 per min is het reeds moeilijk de eigenfrequentie de helft te doen zijn van de opgedrongen frequentie, dus 250 per min.

Het naar omlaag brengen van de eigenfrequentie kan bereikt worden door het isolatie-materiaal elastischer te maken.

Maken wij het isolatie-materiaal te week, dan wordt het door het motorgewicht te veel samengeperst en verliest een groot deel van zijn elasticiteit; daardoor zijn wij in de mate van elasticiteit begrensd. Wanneer hierdoor de opgedrongen frequentie niet genoeg kan verschillen van de eigenfrequentie, blijft er een grote beweging.

Gelukkig komt de aanwezigheid van demping ons dan te hulp, die er nu voor kan zorgen, dat de nog resterende bewegingsenergie niet afgeleverd wordt aan de bodem, waar ze overlast kan veroorzaken, maar omgezet wordt in warmte, die geen kwaad kan doen.

Zoeken wij dus een isolatiemateriaal, dan moet deze stof allereerst zo elastisch mogelijk zijn, maar ook een aanzienlijke inpersing kunnen verdragen, zonder te veel van die elasticiteit te verliezen; en ten derde kan het zeer nuttig zijn, wanneer ze dan nog een grote demping bezit.

Aan deze voorwaarden voldoet kurk in menig opzicht. Onder de verschillende materialen, die in de loop van de tijd voor tril-isolatie werden toegepast, is kurk daarom geen onbekende, waarschijnlijk ook omdat ze goedkoop, eenvoudig aan te brengen en tegen vele invloeden bestand is.

Ondanks dit alles schijnt aan een systematisch onderzoek van kurk als materiaal voor het isoleren van trillingen weinig gedaan.

Het beste, wat ik kon ontdekken, is een artikel van Dipl.-Ing. W. GERB in de *Schweizerische Bauzeitung* van 29 April 1933. Het allerbelangrijkste van dit artikel is mijns inziens, dat *eigenfrequenties* van platen natuurkurk opgegeven worden voor verschillende speciale belastingen.

De frequenties worden hierin berekend volgens het formuletje:

$$n_e = 9.55 \sqrt{\frac{g}{f}} = \frac{300}{\sqrt{f}}$$

waarin f de doorzakking van het isolatiemateriaal bij een bepaalde spec. belasting voorstelt. De spec. belasting wordt veroorzaakt door het gewicht van de motor en f is dus afhankelijk, zowel van de elasticiteit van de kurk als van het belastende gewicht; ze drukt beide uit.

Bij een gegeven gewicht en spec. belasting is f en dus de eigenfrequentie alleen te beïnvloeden door de kurklaag dikker te maken.

Dat doet „GERB” dan ook en hij vindt voor natuurkurk van 60 mm dikte en een spec. belasting van 0,33—1,66 kg/cm² eigenfrequenties, die variëren van 1235—780 p. min. Voor kurk van 120 mm dikte worden zelfs eigenfrequenties van 435 p. min. aangegeven bij 1,66 kg/cm² belasting.

Het laatste frequentie-getal was bijzonder laag en lokte aan om een proef te nemen.

Er deed zich een gelegenheid voor, toen het aangebrachte isolatiemateriaal onder twee hulpmotoren aan boord van een schip onvoldoende bleek te zijn.

De bedoelde motoren waren 2 cylindrs en hadden een toerental van 900 p. min. Impulserend werkten vrije krachten van de 2e orde, dus 1800 p. min. Deze krachten werden aan de fundatie opgedrongen en kwamen als ongewenste indringers te gast in de salons.

Besloten werd een proef met kurk te doen. Wilden wij de impulsen voldoende isoleren, dan moest de eigenfrequentie minstens op 900 p. min gebracht worden.

Dit lukte door de spec. belasting tot $2,66 \text{ kg/cm}^2$ op te voeren. In plaats van in platen werd de kurk aangebracht in blokken van $20 \times 7 \text{ cm}$ en 60 mm hoogte. Hierdoor kon de gewenste spec. bel. bereikt worden.

De blokken waren aangebracht op de plaatsen van de bevestigingsbouten. Gezorgd werd, dat ook tussen boutkop en flens een dergelijk kurkblok aanwezig was. Het motorlichaam had dus geen enkele metallieke verbinding meer met de fundatie, en dit werd zover mogelijk door gevoerd, door alle toe- en afvoerleidingen elastisch te koppelen.

Alleen de uitlaatpijp vereiste een te ingrijpende wijziging en werd daarom niet veranderd. Gelukkig was ze voorzien van enige flinke bochten en daardoor vrij elastisch.

Bij het proefdraaien bleken de indringers buiten de deur gezet en iedereen was tevreden.

Maar nadat de motor een 14 dagen gedraaid had, begon het lieve leven weer. Bij een onderzoek bleken de kurkblokken zover ingezakt, dat er metalliek contact tot stand was gekomen tussen de fundatie, het motorframe en een ijzeren band, welke het kurkblok bij elkander hield.

Na het onderbrengen van houten vulstukken, tussen motorframe-kurk en kurk-fundatie, liep de motor weer even storingsvrij als daarvoor. De kurk was belangrijk samengedrukt en zat nu geheel opgesloten in de ijzeren band.

Het sterk nazakken van de kurk was een verschijnsel, waaraan wij niet direct gedacht hadden. Het allermerkwaardigste was, dat de kurk schijnbaar niets van haar elasticiteit had ingeboet.

Door „GERB” wordt nadrukkelijk geadviseerd alleen *natuurkurk* te gebruiken. Volgens hem is iedere andere vorm, waarin kurk gebracht wordt, riskant.

Nu wilde het geval, dat natuurkurk niet snel genoeg was te verkrijgen geweest en de firma, waar wij de kurk van betrokken, ons ijverig geperste kurkblokken had aanbevolen, waarvoor wij ten slotte gezwicht waren.

Ik kon mij nu niet anders voorstellen, dan dat de afzonderlijke kurkdeeltjes steeds meer in en op elkander gedrukt werden, met als gevolg een vermindering van volume, terwijl de enkele kurkblokjes hun elasticiteit behielden.

Om hier nu wat meer van te weten te komen, zijn wij begonnen in bescheiden vorm proeven met kurk te nemen.

Deze proeven hadden dus allereerst ten doel het inzakken van de kurk onder invloed van een wisselende belasting na te gaan.

Uitgegaan werd van een concreet geval, n.l. een motor, die 500 toeren zou lopen. De 1e orde krachten hebben dan een frequentie van 500 p. min, de 2e orde krachten van 1000 p. min.

De eigenfrequentie van het systeem moest dus op 250 à 300 p. min gebracht worden. Dit kon volgens „GERB” bereikt worden door de kurkdikte groot te maken, maar ook door de spec. belasting op te voeren. Hoe hoog wij mochten gaan, was ons onbekend.

Om de vereiste indrukking te verkrijgen, werd de geperste kurk op 5 kg/cm^2 belast. De indrukking was aan een stuk proefkurk met behulp van een statische belasting gevonden.

Het bleek, dat wij de kurk een dikte moesten geven van 80 mm. De indrukking bij een spec. belasting van 5 kg/cm^2 was 20 mm, dus

$$n_{\epsilon} = \frac{300}{\sqrt{2}} = 210 \text{ p. min.}$$

De doorzakingslijn bleek een grote hysteresische lus te bezitten. De kurk kwam zeer snel op 70 mm terug om vervolgens langzaam verder uit te zetten.

Maar zelfs indien wij een effectieve elastische doorzakking van slechts 10 mm aannamen, moest nog een eigenfrequentie van

$$n_{\kappa} = \frac{300}{\sqrt{1}} = 300 \text{ p. min}$$

aanwezig zijn.

Een proefstuk van 1500 mm ϕ en 80 mm hoogte werd met een gewicht van 840 kg statisch belast (zie fig. 2).

De speciale belasting was dus 5 kg/cm^2 .

De dynamische belasting werd aangebracht met behulp van een excentrisch aangedreven massa.

De excentrische massa gaf een roterende centrifugaalkracht van 200 kg bij $n = 500 \text{ p. min}$. De verticale component kwam overeen met de berekende vrije kracht van de 1e orde per kurkstuk onder de onderstelde motor.

De eerste reactie van het aldus belaste kurkblok was een zeer heftige beweging. De uitslagen van het 840 kg zware gewicht waren groot en een snelle blijvende doorzakking duidelijk waarneembaar. Na ongeveer 15 min draaien werd de beweging plotseling zeer klein en hield de doorzakking op.

Dit verschijnsel heb ik herhaalde malen waargenomen.

De kurk was samengeperst tot ongeveer 40 mm en maakte een verrassend weke indruk. Men kon ze met de vinger indrukken, wat oorspronkelijk niet het geval was.

Volgens informatie bij mensen, die dagelijks kurk verwerken, is dit verschijnsel voor kurk heel normaal en wordt ook benut. Champagnekurken b.v. worden voor het gebruik gerold, waardoor ze een grote weekheid en soepelheid krijgen.

U kunt de proef nemen met een grote fleskurk. Wanneer men een dergelijke kurk flink met een zware hamer slaat, wordt ze in de richting, waarin geslagen wordt, week.

Over het algemeen kan men een dergelijke kurk oorspronkelijk slechts met moeite met de vinger indrukken. Het merkwaardige is, dat de verhoogde elasticiteit slechts optreedt in de richting, waarin geslagen wordt. In de andere richtingen blijft ze stug.

Een verklaring voor dit verschijnsel kon ik niet voldoende verkrijgen. Wel wist een bioloog mij te vertellen, dat onder de microscoop duidelijk bleek hoe de celwandjes, waaruit het kurkvees bestaat, in de belastingsrichting gekraakt worden. Wat de celwanden hun oorspronkelijke stugheid geeft, was daarmee nog niet duidelijk.

Hoe het zij, deze eigenschap van kurk is een zeer gelukkige.

Als vergelijking en ook omdat alle hoop op deze soepelwording gevestigd was, werd op dezelfde manier een proef met natuurkurk genomen. Hiervoor werden 3 schijven van z.g. „champagnekurk” tot 80 mm dikte opgestapeld.

De statische doorzakking gaf 9 mm, na enige tijd draaien werd de doorzakking 16 mm. Brengt men in rekening, dat de blijvende doorzakking niet zo groot kon zijn als voor de geperste kurk, dan was hier een heel aardige overeenstemming.

De beweging bleef evenwel groot, zodat aangenomen moest worden, dat de demping minder was. Er was dus alle reden om aan te nemen, dat bij geperste kurk deze grotere demping veroorzaakt werd door de wrijving van de enkele deeltjes over elkander.

Dit werd nog bevestigd door een proef, die met de geperste kurk werd genomen.

De schijf werd enige tijd in olie gedompeld, ongeveer 48 uur. Het bleek toen, dat de demping grotendeels weg was. Het kon niet anders of de binnendringende olie verminderde de wrijving tussen de enkele deeltjes.

Water had een minder, maar toch soortgelijk effect. Het deed bovendien de kurk sterk zwellen. De onder de motoren aangebrachte kurkstukken moeten dus afgeschermd worden tegen olie en water. Dit is gelukkig eenvoudig te bereiken.

De demping van de geperste kurkschijf bleek zo groot, dat van een eigenfrequentie niets te bespeuren viel. Ook een slag met een zware hamer bracht slechts een aperiodyse beweging tot stand.

Het resultaat van dit onderzoek was, dat de voorstanders van geperste kurk gelijk kregen. Het bezwaar van „GERB” blijft evenwel gelden. Er dient nauwkeurig op gelet wat voor kurk verwerkt wordt en hoe ze verwerkt wordt, en het is natuurlijk de moeilijkheid, dit aan de kurkleveranciers duidelijk te maken.

Er moet op gelet worden, dat de enkele kurkdeeltjes niet te klein zijn, zeker niet kleiner dan 4 à 5 mm. Worden ze te klein, dan verliest het blok zijn elasticiteit en de schijven laten zich inéénpersen tot pannekoeken van 16 à 17 mm dikte, die een bordpapier-aanzien verkrijgen en zeer stug zijn.

Verder moet zo weinig mogelijk bindmiddel gebruikt worden. Te veel bindmiddel bevordert de blijvende doorzakking.

Volgens informatie bij de fabrikanten kan men de kurkdeeltjes op 2 manieren fabriceren. De goedkoopste manier is een snijproces. De kurkdeeltjes blijven dan evenwel hard. Beter is de kurk te malen; hierdoor worden de enkele stukjes soepel en de schorsdelen schijnen beter verwijderd te kunnen worden.

Het persen van de kurk moet zó gebeuren, dat de stukken een bepaald gewicht bij een zeker volume krijgen. Het gewicht van de proefschijf was ongeveer 160 g. Gebleken is, dat het gewicht niet te laag moet zijn; daarom werd later het gewicht op minstens 260 g gebracht.

Ten slotte is kurk een natuurproduct en aan wisselingen in kwaliteit onderhevig. Ook daarop dient gelet.

Ik heb U hiermede een en ander van mijn ervaringen met kurk verteld.

Uit het laatste zou men misschien de conclusie willen trekken, dat het met kurk toch nog niet zo gemakkelijk is in ieder geval een gunstige isolatie te krijgen.

Ik geloof eerder, dat het een kwestie is van wat meer aandacht schenken aan dingen, die niet zo ingewikkeld zijn.

Doet men dit, dan schijnt het mij mogelijk in vele gevallen op een eenvoudige en goedkope manier een trillingsvrije opstelling van Dieselmotoren te verkrijgen.

In vele opzichten zijn de beschreven proeven met kurk onvolledig. Het zou zeer interessant zijn de groote van de demping en de invloed op de eigenfrequentie nader te bestuderen.

De proef-installatie dient hiervoor verbeterd en uitgebreid te worden. Wanneer dit mocht gebeuren, hoop ik nog eens betere en meer uitgebreide gegevens te kunnen verstrekken.

Trillingsbestrijding door middel van rubber

door

ir. C. W. KOSTEN.

Het elastisch gedrag van rubber voor vervormingen van 70 % compressie tot 100 % rek en voor afschuivingen tot $\pm 30^\circ$. Het geheele elastische gedrag kan worden vastgelegd door één enkele materiaalconstante S , d.i. de kracht per cm^2 oorspronkelijk oppervlak voor 25 % rek. Een eenvoudig rekenschema wordt gegeven voor de bepaling van de relatieve compressie (e.g. rek) en de veerconstante in den belasten toestand voor cilindrische veeren en van den glijdingsmodulus. De voordeelen, welke rubber biedt boven andere materialen voor fundeeringen.

1. Inleiding.

Rubber als materiaal voor demping en isolatie van mechanische trillingen is niets nieuws. Dat deze toepassing van rubber tot nu toe echter nog geen grooten omvang heeft aangenomen, kan worden geweten aan een samenloop van omstandigheden. Eenerzijds het onbegrensde aantal variëteiten in rubber, waarover de rubberfabrikanten geen gegevens verschaffen, met welke in technische kringen gerekend kan worden bij het ontwerpen, anderzijds het gemis aan kennis van het elastische gedrag van rubber bij de constructeurs. In deze omstandigheden kwam het de Rubber-Stichting wenschelijk voor te trachten den weg van den constructeur naar de rubber te vergemakkelijken, waartoe een grondig onderzoek naar de trillingseigenschappen van rubber werd verricht. Het verheugt ons ten zeerste U hedenmiddag het een en ander over de resultaten van dit onderzoek te kunnen mededeelen. Tevens zal ter sprake komen, hoe met rubber gerekend kan worden, hoe het het meest economisch wordt toegepast, en wat de voordeelen zijn van rubber boven andere materialen.

Ten onrechte wordt rubber in den tegenwoordigen tijd nog aangezien als een ontechnisch materiaal. In de laatste jaren heeft de rubberindustrie enorme vorderingen gemaakt. Rubbersoorten in verschillende hardheden kunnen worden gemaakt, die praktisch ideaal elastisch zijn, in zooverre dat zij geenszins plastisch zijn, en waarvan de duurzaamheid zoo groot is, dat stukken ter dikte van enkele centimeters bijna onbepekten levensduur hebben, b.v. 10 à 20 jaar, zonder dat de eigenschappen in belangrijke mate zijn veranderd. Het alom gevreesde verouderingsverschijnsel van rubber is voor technische toepassingen dan ook van ondergeschikt belang. Dit is n.l. niet meer dan een oppervlakte-oxydatie, die dunne rubberartikelen van slechte kwaliteit in betrekkelijk korten tijd kan schaden, echter op dickere stukken geen invloed heeft. Dit neemt echter niet weg, dat er voldoende aandacht aan moet worden besteed. Men moet voor zoo'n doel een hoogwaardige rubbersoort gebruiken, door een deskundig vakman uit de beste grondstoffen ge vulcaniseerd.

De beste introductie van rubber is wel de toepassing in de automobieltechniek. Deze toch heeft haar vooruitgang voor een niet onbelangrijk deel aan rubber te danken, niet slechts door de rubberbanden, doch tevens door ophanging van den motor in rubber en zeer vele andere toepassingen van rubber.

2. Het elastisch gedrag van rubber.

Uit de algemeene theorie der trillingsisolatie volgt, dat men voor dit doel in principe elk veermateriaal kan gebruiken. De keuze van het materiaal wordt bepaald door tal van overwegingen. Ieder materiaal heeft zijn karakteristieke voor- en nadeelen. Alvorens hierop echter in te gaan, willen wij U iets in het algemeen vertellen over het elastisch gedrag van rubber.

Eerst zullen wij beschouwen:

a. Rubber onder druk en trek.

De allesbeheerschende eigenschap, die ons inziens helaas te weinig bekend is in technische kringen, is, dat rubber praktisch onsamendrukbaar is. De samendrukbaarheid van rubber is van de grootte-orde van die van water. Een massief stuk rubber ontleent dan ook bij eenzijdige compressie zijn zoogenaamde samendrukbaarheid praktisch geheel aan de mogelijkheid tot zijdelings uitwijken. Zachte rubber, die belet wordt in de zijdelingsche uitwijking, gedraagt zich dus volkomen star. Dit is het geval bij toepassing van een dunne rubbertusschenlaag tusschen staalplaten, hetgeen dus foutief is. Voorloopig zullen wij bekijken rubber, die zijdelings niet wordt gehinderd en wel in den vorm van een massieven cylinder, die in het geval van compressie vrij kan glijden ten opzichte van de drukplaten, b.v. door toepassing van smeermiddelen en in het geval van trek lang wordt gedacht in vergelijking tot den diameter. Analooq aan een stalen veer kunnen wij ook hier spreken van de veerconstante, dat is de kracht per eenheid van indrukking. Daar alle vervormingen geschieden bij constant volume, zal bij 50 % compressie behalve de hoogte, die tweemaal kleiner wordt, het drukoppervlak

tweemaal groter geworden zijn. De eenvoudigste onderstelling is, dat wij ons nog bevinden in het gebied, waarin de elastische eigenschappen der rubber niet afhangen van den spanningstoestand. Is dit waar, dan moeten wij dus bij 50 % compressie een viermaal grotere veerconstante vinden dan bij den onvervormden cylinder, n.l. een factor twee ten gevolge van de hoogtevermindering en een factor twee voor de oppervlaktevergroting. Inderdaad wordt dit experimenteel gevonden. Het niet-lineaire gedrag van rubber onder compressie is dus in hoofdzaak schijnbaar en te verklaren met een constanten elasticiteitsmodulus.

Bij trekbelasting treedt het omgekeerde op. Uitgaande van een constanten (intrinsieken) elasticiteitsmodulus zou men verwachten, dat de veerconstante zou afnemen met de verlenging, b.v. een factor 4 bij 100 % verlenging. Ook dit wordt door het experiment bevestigd, geheel tegen onze verwachting in. Wanneer wij ons echter door ons gevoel laten leiden, letten wij onwillekeurig op het gedrag bij groote rekken (100 %—700 % rek), waar de eenvoudige beschouwingen niet meer gelden ten gevolge van het optreden van een aanzienlijke „verstevinging”.

Gemakkelijk is dus in te zien, dat, wanneer men de vormveranderingen in aanmerking neemt en uitgaat van een constanten elasticiteitsmodulus, een niet-lineair verband wordt gevonden tusschen kracht en indrukking (uitrekking). De kromme, die bij de genoemde aannamen het verband tusschen kracht en indrukking (e.q. uitrekking) wel aangeeft, blijkt bij nadere bestudeering een hyperbool te zijn.

In fig. 1 is een tweetal van die hyperbolen geteekend. De getrokken hyperbool heeft betrekking op een zachte, de gestippelde op een tamelijk harde rubbersoort. Uitgezet is de relatieve compressie y (gedefinieerd als: hoogtevermindering, opgegeven als fractie van de totale beginhoogte) tegen de drukbelasting X . Daar X wordt gedefinieerd als de kracht per oppervlakteenheid van het oorspronkelijk oppervlak, is X op een constante na gelijk aan de drukkracht. De getrokken hyperbool gaat door het punt $y = -0,25$ bij $X = -2 \text{ kg/cm}^2$ en is door dit eene punt geheel vastgelegd. De gestippelde hyperbool ligt vast door het punt $y = -0,25$ bij $X = -8 \text{ kg/cm}^2$ en hangt samen met de getrokken hyperbool, doordat bij elke waarde van y de bijbehorende waarde van X der gestippelde curve viermaal groter is dan die der getrokken curve. Het moment is dus nu gunstig voor het invoeren van een materiaalconstante, waarvoor wij kiezen de trekspanning in kg/cm^2 oorspronkelijk oppervlak bij 25 % rek. Dit zullen wij in aansluiting aan de gebruikelijke rubberterminologie noemen de stramheid bij 25 % rek S . Zet men nu (zie fig. 2) alle hyperbolen uit als relatieve compressie y tegen de gereduceerde drukbelasting X/S , dan vallen alle hyperbolen samen. Wij komen dus tot de conclusie, dat er voor technische toepassingen slechts één enkele druk- en trek-kromme van rubber behoeft te worden gegeven, waaraan ten grondslag ligt één enkele materiaalconstante (S).

Aan de hand van fig. 2 kan dus onmiddellijk bij gegeven drukbelasting en rubbersoort (S) de relatieve compressie worden afgelezen. Voor trilling-isolatie doeleinden moet echter niet alleen de statische compressie bekend zijn. Nog belangrijker is de kennis van het elastisch gedrag der opstelling in den belasten toestand. Ook dit is eenvoudig uit de grafiek af te leiden. De grootte, die wij n.l. zoeken, is de veerconstante in den belasten toestand en deze veerconstante is op een geometrischen factor na (hoogte gedeeld door oppervlak der onbelaste rubberveer) gelijk aan dX/dy , hetgeen is te vinden uit de helling der druk-kromme in het bewuste punt der statische belasting. Om dit nog te vereenvoudigen, is in fig. 2 geteekend de lijn

$\sqrt{\frac{dX/dy}{S}}$ als functie van X/S . Deze lijn is berekend uit de hyperbool $y = f(X/S)$ en blijkt een rechte te zijn.

Het zal dus duidelijk zijn, dat wij met behulp van fig. 2 bij gegeven X en S af kunnen lezen de statische compressie y en kunnen berekenen de veerconstante in den belasten

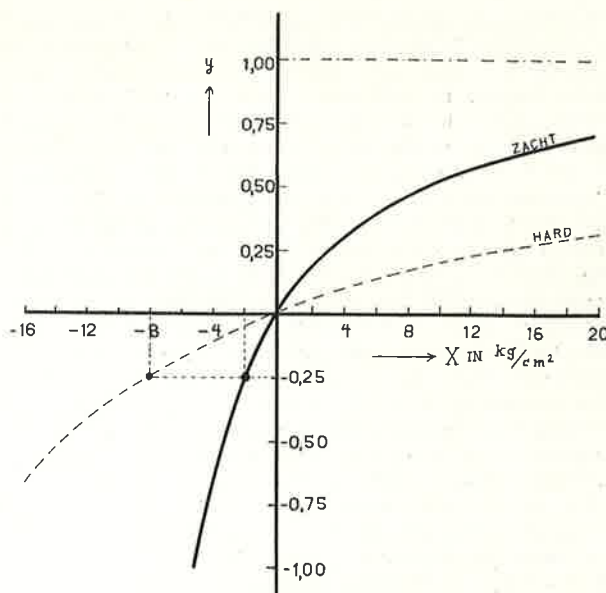


Fig. 1. Trek- en druk-kromme voor een zachte en een harde rubbersoort. y = relatieve compressie, X = drukkracht per cm^2 van het oorspronkelijk oppervlak in kg/cm^2 .

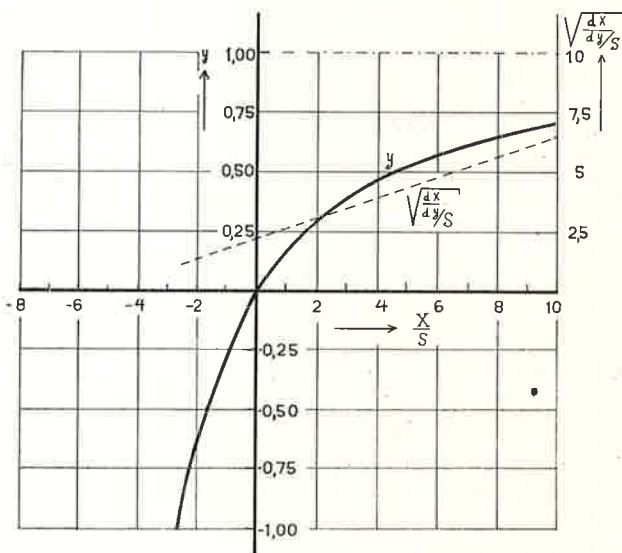


Fig. 2. Grafiek, waardoor het geheele elastische gedrag van rubber is bepaald voor elke rubbersoort, geldig van 70 % compressie tot ± 100 % rek. S is de kracht per cm^2 oorspronkelijk oppervlak in kg/cm^2 bij 25 % rek.

toestand. Bij het berekenen van de veerconstante moeten wij bedenken, dat rubber zich, vooral als het stramme mengsels betreft, dynamisch strammer gedraagt dan statisch. Fig. 3 brengt dit in beeld. Hebben wij een statische veerconstante berekend uit fig. 2, dan moet die worden vermenigvuldigd met $S_{\text{dyn}}/S_{\text{stat}}$ om de

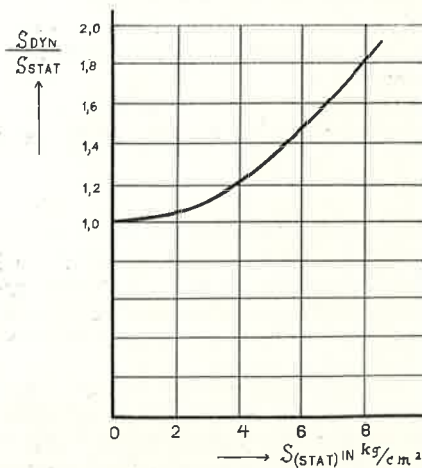


Fig. 3. Verband tusschen dynamische en statische stramheid.

constante te vinden. Deze verhouding S_{dyn}/S_{stat} kan uit fig. 3 bij elke S worden opgezocht. Erg belangrijk is deze correctie overigens niet, daar de meest praktische rubbersoorten liggen in het gebied S gelijk 2 tot 5 kg/cm². De correctiefactor is dan niet zoo groot, terwijl hij bij de berekening der resonantie-frequenties van een op rubber te stellen systeem slechts onder den wortel voorkomt.

Voorwaarde voor de tot nu toe gehouden beschouwingen was, dat de rubber niet werd gehinderd in haar zijdelingse uitwijking. In de praktijk zal men echter zeer zeker gebruik willen maken van de mogelijkheid tot vastvulcaniseeren der rubber om zodoende een stevige verbinding te krijgen tusschen de verschillende onderdeelen zoowel voor druk als voor trek. De beschouwingen zijn echter direct van toepassing op een vastge vulcaniseerden cylinder door toepassing van het regeltje, dat een vastge vulcaniseerde cylinder met hoogte h en diameter σ moet worden gerekend te hebben een effectieve (d.i. volledig samendrukbare) hoogte gelijk aan $h_{eff} = h - \frac{1}{8} \sigma$.

Dit regeltje geldt voor $h/\sigma > \frac{1}{4}$ en komt eigenlijk neer op de aanname, dat bij de vastge vulcaniseerde uiteinden een laagje ter dikte van $\frac{1}{16} \sigma$ wordt verhinderd zijdelings uit te wijken en derhalve bij berekening der samendrukbaarheid van de totale hoogte moet worden afgetrokken.

Behalve met grafieken, kan ook direct in formules worden gerekend, hetgeen zeer eenvoudig is, doch niet zoo overzichtelijk. De allesomvattende hyperbool heeft tot vergelijking:

$$\frac{X}{S} y - 1,07 \frac{X}{S} + 5,28 y = 0.$$

De in deze vergelijking voorkomende coëfficiënt 1,07 zou eigenlijk gelijk de eenheid moeten zijn, als het niet-lineaire gedrag van rubber zijn oorzaak geheel en al vond in de vormveranderingen. Een geringe afwijking is dus nog te bespeuren. Uit bovenstaande vergelijking volgt zeer eenvoudig de statische compressie als:

$$y = \frac{1,07}{1 + \frac{5,28}{X} S}$$

en de statische veerconstante als:

$$s = \frac{0_0}{h_0} \frac{dX}{dy} = \frac{0_0}{h_0} \frac{(X/S + 5,28)^2}{5,65} S.$$

De berekening van de dynamische veerconstante geschiedt hieruit vervolgens weer met behulp van fig. 3.

b. Rubber onder afschuiving.

Tot nu toe bekeken wij het gedrag van rubber onder druk of rek. Het gedrag bij afschuiving is veel eenvoudiger, immers de stof heeft bij afschuiving niet de neiging van volume te veranderen, zoodat wij geen rekening behoeven te houden met vormveranderingen. Daar rubber in hoogte mate onsamendrukbaar is, is de constante van Poisson $m = 2$, waardoor de glijdingsmodulus G eenvoudig wordt berekend als

$$G = \frac{1}{3} E,$$

of uitgerekend in onze materiaalconstante S :

$$G = 1,65 S.$$

3. Iets over het ontwerpen van een rubberfundering.

Een algemeen schema hiervoor is moeilijk te geven, daar elk geval zijn bijzonderheden heeft, waarmee in een algemeen schema geen rekening kan worden gehouden. Een wijze van berekening, welke in vele gevallen dienstig kan zijn, is de volgende.

Als gegevens hebben wij de massa en traagheidsmomenten der machine en de stoorfrequenties. Men kiest nu categorisch tusschen druk- of trekveeren enerzijds en afschuifveeren anderzijds. Het berekenen van afschuifveeren zal doorgaans niet moeilijk zijn. Kiest men drukveeren, dan is de volgende stap, dat, uitgaande van de

laagste stoorfrequentie, de ligging der resonantiefrequenties ongeveer wordt gekozen, b.v. resonanties driemaal lager dan de laagste stoorfrequentie. De statische inveering f ligt hiermede tevens vast. Deze wordt n.l. berekend uit $f = g/\omega_0^2$, waarin g de versnelling der zwaartekracht is en ω_0 de hoekfrequentie der resonantie. Deze formule geldt eigenlijk slechts voor veeren met een constante veerconstante, is echter ruimschoots nauwkeurig genoeg voor oriënteerende berekeningen met rubberveeren. Al naar de grootte van f kiest men nu de beginhoogte h_0 , waardoor de statische compressie y vastligt. Hierbij is te bedenken, dat y kleiner moet zijn dan 0,2 of hoogstens 0,25. Dit wordt enerzijds gedaan om plastische vervormingen te ontgaan, anderzijds is dit bij hooge veeren ($h/\sigma = 1$) voorgeschreven, omdat anders de veerconstante in horizontale richting te klein wordt. Voor compressie boven $y = 0,3$ à $0,4$ wordt een veer van $h/\sigma = 1$ zelfs labiel. Men zou dit knikken kunnen noemen. Uit y volgt verder X/S met behulp van fig. 2. Gezien h_0 en y kiest men σ_0 , mede in verband met de stabiliteit in horizontale richting. Meestentijds zal de verhouding h_0/σ_0 $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ kunnen zijn. Lagere h_0/σ_0 geeft onpractisch stijve veeren, die gemakkelijker op andere manieren kunnen worden verkregen. Vervolgens wordt S gekozen. De rubbersoorten, die ons inziens het meest in aanmerking komen, hebben een stramheid van 2 tot 5 kg/cm². Hoogere S zal worden gekozen als men een vrij sterk gedempt trillingsstelsel wil maken. Tevens krijgt men dan echter een groot verschil tusschen S_{dyn} en S_{stat} (= S) (zie fig. 3), terwijl doorgaans de plastische verschijnselen toenemen met de stramheid. Uit X/S en S volgt X , waaruit verder in combinatie met σ_0 de massabelasting per veer is te berekenen, dus ook het aantal veeren.

TABEL 1.

Verband tusschen stramheid bij 25 % rek S en enkele hardheidsmaten.

S in kg/cm ²	Hardheid		
	Shore-Duro- meter, type A	Schopper kogel, 10 mm σ	Pursey en Jones $\frac{1}{4}$ " kogel
2	31	150	160
4	44	98	107
6	55	68	74
8	63	52	57
10	68	43	47

Om het vervaardigen van rubber van de juiste stramheid te vergemakkelijken, geven wij in bovenstaande tabel nog het verband tusschen de stramheid en enkele der in de industrie meest gebruikte hardheidsmeters. Daar dit verband niet streng geldt, mag de hardheid slechts worden gebruikt als ruw oriëntatiemiddel. De stramheid blijft uiteindelijk de grootheid, waarop moet worden gelet.

Nogmaals willen wij er met nadruk op wijzen, dat het vervaardigen der bedoelde voorwerpen op deskundige wijze moet geschieden. Het kan slechts goede resultaten opleveren, wanneer een hoogwaardige rubbersoort door een deskundig vakman met zorg wordt ge vulcaniseerd.

Om deze moeilijkheden te vermijden, brengen de meeste groote rubberfabrieken trillingsdempers in den handel. De Continental Werke te Hannover b.v. brengen rubber drukveeren, vastge vulcaniseerd aan metalen flenzen in den handel. De fabriek vraagt de machinegegevens op en levert daarnaar de veeren. Een ander voorbeeld zijn de afschuifveeren, door GOODRICH vervaardigd. De noodige gegevens hiervan worden verstrekt, zoodat voor elke toepassing de gewenschte veeren kunnen worden uitgezocht. Het voordeel is, dat zij in een betrekkelijk willekeurige lengte zijn aan te brengen, zoodat bij eventuele onvoorziene omstandigheden de ondersteuning gemakkelijk iets kan worden gewijzigd.

4. Voordeelen van rubber, vergelijking met andere materialen.

Zooals wij reeds opmerkten, zal de keuze van het isolatiemateriaal worden bepaald door de karakteristieke voor- en nadeelen van elk materiaal, waarop wij in het kort nog even zullen ingaan.

Puntsgewijs komen wij tot de volgende conclusies:

A. Rubber contra poreuze materialen, zooals kurk, vilt e.d.

1°. Voor elke rubbersoort kan de materiaalconstante S worden verstrekt, die als grondslag kan dienen voor technische berekeningen. Een eenmaal ontworpen voorwerp zal zijn eigenschappen behouden, mits niet overbelast. Vilt en kurk leenen zich slechter voor het technisch ontwerpen. Ook zijn de eigenschappen van kurk en vilt niet onveranderlijk met den tijd.

2°. Rubber heeft niet te veel inwendige wrijving, zooals vilt en kurk. Te veel demping schaadt n.l. de isolatie. Is veel demping echter toch vereischt, dan is sponsrubber het aangewezen materiaal, daar het zich zeer goed leent voor berekening en ontwerpen en evenveel inwendige wrijving heeft als andere poreuze stoffen.

3°. Rubber kan uiterst stevig aan metaal worden vastge Vulcaniseerd. Kurk en vilt zijn niet bevestigbaar.

B. Rubber contra stalen spiraalveeren.

4°. Rubberveeren hebben gemiddeld een lager soortelijk gewicht en een hooger elasticiteitsmodulus dan stalen veeren. Hierdoor zijn rubberveeren kleiner en lichter dan gelijkwaardige stalen veeren.

5°. Gezien het vorige punt, kunnen rubberveeren goedkoper zijn dan stalen veeren, daar de prijs per kg voor beide materialen ongeveer even groot is.

6°. Stalen veeren zijn practisch wrijvingsloos; rubberveeren hebben wel inwendige wrijving. Een maat voor de inwendige wrijving is de zogenaamde verlieshoek, welke voor staal is $0,00^\circ$, voor rubber $\pm 1^\circ$, welk bedrag toeneemt met de stramtheid tot $\pm 7^\circ$, voor sponsrubber $10^\circ-20^\circ$. Deze wrijving is voordelig bij het gedrag der opstelling in de buurt van resonantie, terwijl het de isolatie bij hoge frequenties niet schaadt, daar de wrijvingsconstante omgekeerd evenredig met de frequentie afneemt, integendeel (zie punt 8).

7°. Olie dempers naast stalen veeren geven wel het gewenschte effect bij lage frequenties, zijn echter uiterst slecht bij hoge frequenties, daar de wrijvingsconstante voor hoge frequenties nog zelfs belangrijk toeneemt.

8°. Stalen veeren laten geluids-frequenties door ten gevolge van de eigenfrequenties der veeren. Deze liggen bij staal lager als gevolg van het in punt 4 vermelde en zijn veel schadelijker dan bij rubber bij gebrek aan eenige inwendige wrijving. Voor een experimenteel bewijs verwijzen wij naar een artikel van MEYER en KEIDEL (*Zeitsch. Techn. Phys.* 18, 299 (1937)), waaraan wij fig. 4 en 5 ontleenden.

Fig. 4 geeft de isolatie weer van een systeem massa-rubber. Uitgezet is minus de isolatie in decibels tegen de frequentie in trillingen per seconde. Duidelijk is de negatieve isolatie in het resonantiegebied (± 100 Hz), waarna een sterke toename in isolatie te constateeren is. In fig. 4b is de nadeelige invloed van de laagste eigenfrequentie nog juist zichtbaar. Fig. 5 geeft een tweetal krommen, opgenomen aan spiraalveeren. Zeer duidelijk is de funeste invloed der eigenfrequenties, welke invloed dus de isolatie bij acoustische frequenties grootendeels te niet doet. (Met een demonstratie werd dit punt nog toegelicht. Een motortje drijft een drijf-fasje aan, waaraan zich twee excentriekjes bevinden met gelijke excentriciteit. Aan de excentrieken hangen resp. een stalen veer met een gewicht van ongeveer 1 kg en een rubberstrookje met een evengroot gewicht. De veerconstante der beide veeren is ongeveer dezelfde, zoodat de verticale resonantiefrequentie voor beide dezelfde is. In het bovenkritische gebied blijft het

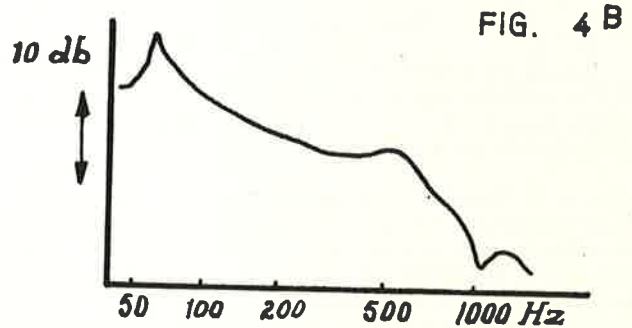
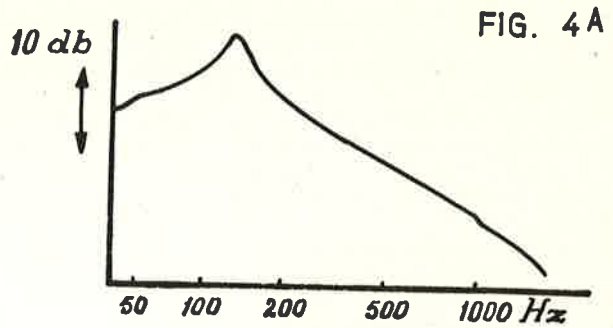


Fig. 4. Isolatie door rubber. Practisch geen nadeelige invloed door eigenfrequenties. Vergelijk fig. 5.

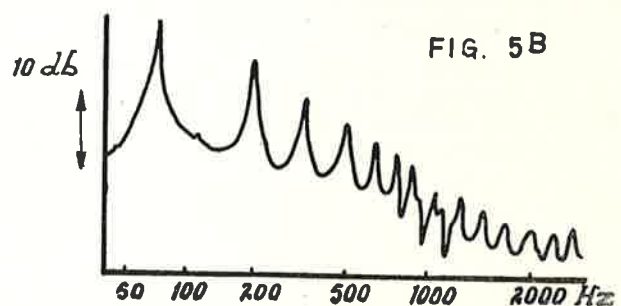
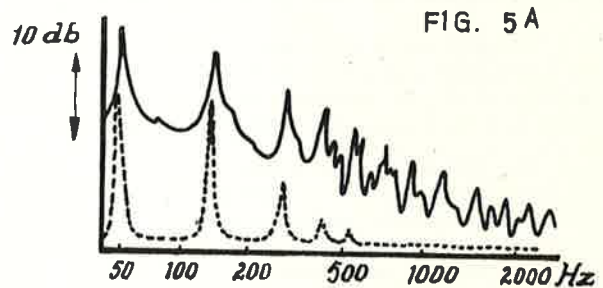


Fig. 5. Isolatie door spiraalveeren. De isolatie wordt zeer sterk geschaad door de eigenfrequenties der veeren.

rubbersysteem doorlopend rustig, terwijl het staalsysteem enkele resonanties vertoont. Een resonantie bij ± 3000 r.p.m. is zeer sterk en legt het gewicht een trilling op van de grootte-orde van 1 mm. De hiervoor noodige massa-krachten blijken bij berekening van de grootte-orde van 10 kg te zijn.)

5. Enkele bijzondere gevallen van isolatie.

Wij willen niet eindigen zonder althans enkele andere isolatiegevallen genoemd te hebben, waarbij rubber goede diensten kan bewijzen.

Rubber leent zich uitstekend als schokdemper of buffer.

Gebruikt men hierbij rubber onder druk, dan is de kromme drukkromme van rubber zeer welkom, immers hierdoor is de buffer slap voor kleine stooten en evenredig stijver voor groote stooten.

Verder noemen wij nog elastische koppelingen, waardoor nauwkeurige centreering overbodig is en isolatie optreedt, en watergesmeerde rubberkussenblokken, die behalve te isoleeren, het voordeel hebben niet aan slijtage onderhevig te zijn.

Zonder hierop in te gaan, willen wij ten slotte nog wijzen op het aantrekkelijke van rubber op trek belast. Het is eenvoudig te berekenen, dat een rubberveer bij 100 % rek, wat betreft de veerconstante, gelijkwaardig is met een spiraalveer, die bij tweemaal groter verlenging denzelfden last draagt.

Research Afdeling der Rubber-Stichting, Delft.

Beraadslaging.

Ir. A. H. DE KLERCK merkt op, dat de toegepaste isolatietheorie slechts opgaat, als de bodem oneindig star is, en vraagt in hoeverre de beschouwingen dienen te worden gewijzigd, als men deze aanname niet maakt.

Ir. C. W. KOSTEN: Inderdaad ligt deze aanname aan de meeste beschouwingen ten grondslag. Onvoorziene omstandigheden zijn dan ook in trillingsisolatie-gevallen niet met 100 % zekerheid uit te sluiten. Wel kan eenigszins met de gesteldheid der fundeering in ieder geval rekening worden gehouden, b.v. kan uit de ligging der resonanties van een betonvloer het een en ander worden beslist omtrent den invloed op de isolatie. Echter is doorgaans de bodemstijfheid zóó groot, dat deze invloed zeer klein is.

N. J. VISSER voert tegen het 1e bezwaar tegen kurk aan, dat wel degelijk met kurk gerekend zal kunnen worden en dat het ook nog te betwijfelen is, in hoeverre de houdbaarheid van kurk ten achter staat bij rubber.

Ir. C. W. KOSTEN geeft in principe den heer VISSER gelijk, doch constateert, dat op beide punten, berekenbaarheid en houdbaarheid, rubber momenteel er gunstiger voorstaat dan kurk en dat het zeer de vraag is of in dezen toestand verandering zal komen.

Ir. F. BESANÇON: zonder in te gaan op het hoe of waarom, deelt spreker mede, dat de Duitsche marine bij geïsoleerd opgestelde scheepsmachines oliedempers toepaste, hetgeen pleit voor oliedempers.

Ir. C. W. KOSTEN wil dit niet tegenspreken, hetgeen niets toe- of afdoet aan de voordeelen van rubber en de nadeelen van oliedempers. Dat oliedempers op schepen tot bevredigende resultaten leiden, vindt echter eerder

zijn oorzaak in de uiterste laag gestelde isolatie-eischen, dan wel in de voortreffelijke eigenschappen van oliedempers.

N.N. vraagt of de stramheid een grootheid is, die rubberfabrikanten kennen en desverlangd ook opgeven en of iets in het algemeen is te zeggen over de maximaal toelaatbare statische belasting.

Ir. C. W. KOSTEN: De stramheid is een in rubberkringen algemeen gebruikte grootheid. Doorgaans werkt men echter met stramheden bij 400 %, 500 % of 600 % rek. Zeer zeker zullen rubberfabrikanten genegen zijn ook de stramheid bij 25 % rek op te geven. Aangaande de toelaatbare belasting kan worden gezegd, dat die afhangt van de soort rubber en dat eerder kan worden gesproken van een toelaatbare vervorming. Voor rubber onder druk kan men hiervoor gevoelig opgeven relatieve compressie 0,2 à 0,25; bij afschuiving hangt het mede af van de hechting der grenslagen, welke echter doorgaans zoo groot is, dat ook hier een zekere afschuifhoek als grens kan worden opgegeven, die van de grootte-orde is van 30°. In de meeste gevallen, en zeker bij rubber onder druk, wordt de limiet echter niet bepaald door breukgevaar, doch komt voort uit den wensch, de plastische verschijnselen zeer klein te houden.

Ir. J. G. DE VOOGD vraagt naar de houdbaarheid van rubber, hierbij speciaal met het oog op verhoogde temperaturen (machinekamers) en oliebestendigheid.

Ir. C. W. KOSTEN: Rubber dient te worden beschermd tegen afdruipe olie, wordt echter niet geschaad door een „olieachtige” omgeving, dus niet door oliedamp. De houdbaarheid van rubber daalt met toenemende temperatuur. Voor verhoogde temperaturen bestaan echter de z.g. hittebestendige rubbersoorten, die zelfs bij machinekamertemperatuur een hoogen levensduur hebben.

Ir. R. REITSEMA vraagt, of de gegeven beschouwingen ook gelden voor synthetische rubbers.

Ir. C. W. KOSTEN kan hierop momenteel geen volledig uitsluitsel geven. In principe gelden de beschouwingen zeker. Echter wijken synthetische rubbers doorgaans meer af van het ideaal elastische, waardoor het toepassen der beschouwingen minder streng is.

P. N. G. VAN DER LEEDEN vraagt ten slotte, of de binnenlandsche rubberfabrieken een evengoed product kunnen leveren als de buitenlandsche.

Ir. C. W. KOSTEN beantwoordt deze vraag bevestigend.

