

Dr. D. DE JONG

Grenzen van Fijnmechanische Techniek



UITGEVERIJ WALTMAN - HIPPOLYTUSBUURT 4 - DELFT

Grenzen van Fijnmechanische Techniek

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING
VAN HET AMBT VAN BUITENGEWOON
HOOGLERAAR IN DE FIJNMECHANISCHE
TECHNIEK AAN DE TECHNISCHE HOGE-
SCHOOL TE DELFT OP WOENSDAG
20 DECEMBER 1961

DOOR

Dr. D. DE JONG



UITGEVERIJ WALTMAN - HIPPOLYTUSBUURT 4 - DELFT

*Mijne Heren Curatoren,
Mijne Heren Hoogleraren,
Dames en Heren Lectoren, Docenten en Leden van de
Wetenschappelijke Staf,
Leden van de Technische en Administratieve Staf,
Dames en Heren Studenten,
en voorts Gij allen, die door Uw aanwezigheid blijkt geeft
van Uw belangstelling,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Met de naam „Fijnmechanische Techniek” als onderdeel van de Werktuigbouwkunde wordt tot uitdrukking gebracht, dat het hier gaat om een vaardigheid in het produceren van mechanische zaken, waarop het predikaat „fijn” van toepassing is, enerzijds in de betekenis van „klein van afmetingen en van massa”, „aangepast aan slechts kleine krachten”, anderzijds in de zin van „nauwkeurig” en „gevoelig”.

Ik wil vanmiddag trachten deze naam wat meer inhoud te geven en enkele grenzen van fijnmechanische techniek voor u af te bakenen.

Nu is klein een relatief begrip; wat betekent bijvoorbeeld „klein van afmetingen”?

Men kan aan het ene eind van een lange tafel een kaart van ons melkwegstelsel neerleggen en aan het andere eind een foto van een groot molecuul. De object-afmetingen zijn 10^{21} en 10^{-8} meter, zodat een gebied van bijna 30 factoren tien omspannen wordt, 30 vakjes op de tafel.

Het gebied van de werktuigbouwkunde vormt daarvan een onderdeel; de grootste maat is van de orde van honderd meter, de kleinste van de orde van een duizendste millimeter, een mikron. Dit op zichzelf grote gebied beslaat slechts 9 vakjes op de tafel.

Men mag nu zeggen dat de machinebouw de 6 vakjes aan de melkwegzijde van de werktuigbouwkunde beslaat. De fijnmecha-

nische techniek strekt zich uit over 6 vakjes aan de molecuulzijde. Dat er dus 3 vakjes gemeenschappelijk zijn, betekent dat sommige fijnmechanische produkten als geheel even groot zijn als sommige machineonderdelen.

Hiermee is kwantitatief vastgelegd wat ik „klein” wil noemen. De bovenste grens is van de orde van een decimeter, al zijn er produkten groter dan een meter, die men fijnmechanisch zou willen noemen. Deze grens is dus bijzonder vaag.

Naar de andere zijde is de grens scherper. Sprekend over de kleinste afmetingen moet men denken aan dunne metaaldraden met een diameter van $10\text{ }\mu\text{m}$, waarvan er dus 5.000 tegelijk door het oog van een naald gaan; aan kwartsdraden met een diameter van $1\text{ }\mu\text{m}$; aan metaalfolies met een dikte van $5\text{ }\mu\text{m}$; aan spleten met een breedte van $10\text{ }\mu\text{m}$; aan draadafstanden van $5\text{ }\mu\text{m}$; aan gaten met een diameter tussen 50 en $5\text{ }\mu\text{m}$, het minimum afhankelijk van het materiaal; aan afrondingsstralen van $5\text{ }\mu\text{m}$.

Men kan op vele andere manieren trachten een overzicht te geven van het gebied van de fijnmechanische techniek om aldus grenzen af te bakenen. In verschillende publikaties is dit gedaan, en men heeft gepoogd eenvoudige formules te vinden. Deze pogingen zijn geen van alle volkomen geslaagd al hebben ze grote verdiensten op het punt van overzichtelijke rangschikking.

In een Duitse publikatie van het begin van dit jaar tracht KUHLENKAMP het gebied van de „Feinwerktechnik” binnen de werktuigbouwkunde af te bakenen ten opzichte van dat van de „Maschinentechnik” door een indeling te geven naar de produkten.

Als kenmerkend voor de produkten van de machinebouw noemt hij, dat deze machines energie omzetten of transporteren, en zo dienen ter versterking of vervanging van de menselijke lichaamskracht. Rendement is hierbij een richtinggevend begrip. De produkten van fijnmechanische techniek daarentegen transporteren een „Signalfluss”, ze verwerken informatie, en dienen ter vervanging van of als hulpmiddel voor de menselijke zintuigen. Nauwkeurigheid van de overdracht is hierbij een belangrijk aspect.

Voor een grote reeks produkten stemt deze indeling overeen met de gangbare opvattingen, in casu andere toonaangevende publikaties.

Tot fijnmechanische produkten mag men zo rekenen: meetinstrumenten, regelapparatuur, schakelaars, versterkers, apparatuur voor overdracht van tekens, van gesproken en geschreven woord en van beelden, dus op het gebied van telegrafie, telefonie, telex, radio, grammofoon, televisie, radar, enzovoorts; voorts fototoestellen, filmcamera's, projectoren, kijkers, microscopen; tenslotte schrijfmachines, boekhoud- en rekenmachines. Hierbij moet men niet alleen denken aan artikelen die gebruikt worden in de privé-sfeer, maar ook aan professionele uitvoeringen.

Onder meetinstrumenten vallen instrumenten voor lengte- en afstandmeting, weegtoestellen, drukmeters, elektrische meetinstrumenten en de meettoestellen voor meting van allerlei andere fysische en chemische grootheden, die bij onderzoek en kwaliteitscontrole worden gebruikt.

Deze indeling gaf mij de gelegenheid u een kleine opsomming te geven van produkten waarover het hier gaat. De bezwaren, die men tegen deze indeling kan inbrengen, maken het mij mogelijk daaraan nog enkele toe te voegen.

Textielmachines en chemische werktuigen om enkele te noemen zal men terecht niet onderbrengen bij de fijnmechanische techniek, maar sommige onderdelen zal men daar stellig bij rekenen. Voor verfijnde montagegereedschappen en chirurgisch gereedschap geldt hetzelfde.

Bij elektrische en elektronische onderdelen zoals: kleine weerstanden, condensatoren, kristaldiodeën, transistoren en radio-buizen zou men nog kunnen discussiëren over de vraag of zij voor transport van energie dan wel voor informatietransport dienen en deze vraag is minder eenvoudig te beantwoorden dan men zou denken. Zij behoren echter stellig tot het gebied van de fijnmechanische techniek en vormen daarin met hun miljar-den stuks per jaar zelfs een zeer belangrijk onderdeel.

Uurwerken, in het bijzonder horloges, kwamen in de opsomming niet voor. Zij beslaan echter eveneens een erkend gebied van de fijnmechanische techniek, evenzeer belangrijk met een jaarproduktie in de orde van 100 miljoen stuks.

Men zou ze kunnen onderbrengen bij de rubriek meetinstrumenten. Misschien is er echter een reden voor het ontbreken van de kleine uurwerken in de opsomming van KUHLENKAMP en wel deze, dat hij ze heeft beschouwd als twijfelgeval. In een publikatie van vijf jaar geleden heeft KEIL betoogd dat de horlogefabricage

niet meer thuis hoort in de „Feinmechanik”, omdat de laatste te veel verschuift naar de machinebouw. Samen met de fabricage van fijnere meetinstrumenten zou een afzonderlijke richting moeten ontstaan, gezien de grote nauwkeurigheid die van deze produkten gevraagd wordt. Voor het standpunt van KEIL krijgt men wel begrip, als men de stemmen beluistert die ook huishoudelijke apparaten, ventilatoren, elektrisch handgereedschap en de kleinste verbrandingsmotoren tot de fijnmechanische techniek gerekend willen zien.

Ik zal geen partij kiezen, als niet vast staat welk doel met een begrenzing wordt beoogd. Ik wilde slechts laten uitkomen dat deze begrenzing naar produkt punt van discussie is.

Het zal duidelijk zijn dat een opsomming van produkten, gezien de veelsoortigheid daarvan, geen uitgangspunt kan zijn voor de opleiding van ingenieurs in het vak fijnmechanische techniek.

Veeleer moet men dit uitgangspunt zoeken in de fabricage-technieken en constructieprincipes, voorzover deze afwijken van die in de machinebouw of daarop een aanvulling zijn. De opleiding zal daarbij niet in de eerste plaats gericht moeten zijn op het instrumentmaken zelf, het vervaardigen van fijnmechanische produkten van een bepaald type; dit is het werk van instrumentmakers. Voor het ontwerpen van een instrument ten behoeve van een onderzoek zal een ingenieur natuurlijk moeten weten aan welke grenzen een instrumentmaker gebonden is, maar in de meeste gevallen zal hij dat het beste van zijn instrumentmaker zelf kunnen leren. Wel doet hij goed, zich op de hoogte te stellen van typische onderdelen en constructieprincipes, die in de instrumentenbouw worden toegepast.

Een veel breder werkterrein vindt de ingenieur in de industriële fijnmechanische techniek, die gericht is op serie- of massafabricage.

De opleiding moet dan eerder gericht zijn op kennis en beheersing van typische bewerkingsmethoden en fabricagetechnieken en typische onderdelen en constructieprincipes.

Het zou mij te ver voeren ook maar een globaal overzicht te geven van wat men in dit opzicht tot de fijnmechanische techniek moet rekenen, temeer omdat ook hierbij geen scherpe grenzen te trekken zijn.

Uit een dergelijk overzicht zou blijken, dat lang niet in alle gevallen van typische technieken etc. kan worden gesproken,

omdat deze technieken ook in andere, soms ver verwijderde, vakgebieden worden gevonden of tenminste in principe elders bekend zijn, en alleen maar geperfectioneerd of aangepast aan kleine afmetingen.

Zo zijn sommige bewerkingsmethoden, die door de oude ambachtslieden werden toegepast, zoals verbinden door buigen of solderen, en die door de moderne machinebouw zijn verworpen, in de fijnmechanische techniek blijven voortleven en zelfs tot geheel nieuw leven gekomen.

Er zouden echter ook verscheidene voorbeelden zijn aan te wijzen die kenmerkend zijn voor dit vak. Enkele daarvan zal ik kort bespreken.

Een zeer moderne bewerkingsmethode, die binnen het gebied van de fijnmechanische techniek is ontstaan, is die met behulp van een elektronenstraal.

Deze techniek berust allereerst op het feit dat een bundel elektronen in vacuo kan worden samengeknepen tot een diameter van enkele mikrons, nauwkeurig kan worden afgebogen en gericht, en snel kan worden onderdrukt en weer vrijgegeven.

De hierop geconstrueerde bewerkingsmachines vertonen gelijkenis met een televisietoestel en met een elektronenmicroscop. Zij onderscheiden zich daarvan doordat op een klein oppervlak een bijzonder groot vermogen wordt geconcentreerd, zodat een dichtheid wordt bereikt van 10 megawatt per mm^2 . De temperatuur van het werkstuk kan daarbij plaatselijk over een oppervlak van enkele vierkante mikrons in een tienmiljoenste seconde tot 6.000°C stijgen, waarbij directe verdamping optreedt.

De bewerkingen boren, frezen en snijden zijn op deze wijze uitvoerbaar bij stilstaand werkstuk, terwijl met bijzondere voordelen ook lassen mogelijk is. Praktisch alle materialen kunnen bewerkt worden, dus ook de anders moeilijk of niet bewerkbare, zoals brossen of harde metalen, en keramisch materiaal, ferrieten en edelsteen.

Gaten kunnen worden geboord met een diameter van $10\ \mu\text{m}$ en een diepte/diameter-verhouding van tenminste $20 : 1$, terwijl een gatdiameter van $3\ \mu\text{m}$ mogelijk wordt geacht.

Spleten kunnen gefreesd worden met een breedte van minder dan $10\ \mu\text{m}$, door een materiaaldikte van enkele tiende millimeters; groeven met een groefdiepte van minder dan één mikron.

De bestuurbaarheid van de praktisch traagheidsloze elektronenstraal biedt uiterst elegante mogelijkheden van automatische besturing en programmering, gepaard aan zeer korte bewerkingstijden in de orde van seconden. Voor het bewerken naar sjablonen is zelfs een miniatuur televisietechniek ontwikkeld.

Deze bewerkingsmachines zijn kostbaar en nog zeldzaam. Zij bieden echter fascinerende mogelijkheden en bepalen op dit moment wel de uiterste grens van het mogelijke, zowel op het punt van kleine afmetingen als van materiaalbeheersing. Het is te verwachten dat ook in ons land spoedig de gelegenheid zal bestaan daarmee ervaring op te doen.

Een aantal kenmerkende fabricagemaatregelen, die soms nodig zijn, zoals klimaatregeling, stofwering, in het bijzonder de strijd tegen ijzerstof met magnetische matten en magnetische bezems moet ik laten rusten.

Een enkel voorbeeld van typische constructieprincipes wil ik nog bespreken.

Het vermijden van al te nauwe toleranties is het probleem van iedere constructeur, in het bijzonder dan, wanneer bij het samenvoegen van onderdelen, ruimte of speling kan overblijven. In fijnmechanische constructies gaat het daarbij om spelingen, die men in de machinebouw niet meer speling zou noemen of die men met instelbare passtukken zou wegwerken.

Wanneer men nu te doen heeft met kleine massa's en kleine krachten, dan bestaat de mogelijkheid in de reeks onderdelen een verend element op te nemen, dat de som van alle maatafwijkingen opvangt. Bij de onderdelenfabricage kan men dan de toleranties verruimen, bij de montage wordt de speling weggewerkt.

Ditzelfde kan in andere gevallen ook gedaan worden door de onderdelen in een montagemal nauwkeurig op hun plaats te brengen en dan pas aan elkaar te bevestigen. Hiervoor lenen zich een aantal fijnmechanische verbindingen goed, zoals die met lijm, kit, giethars of soldeer, waarmee de nog aanwezige „ruimte” wordt opgevuld, of de verbindingen door puntlassen, buigen, wringen of stuiken, waarbij het verbindingspunt door de mal wordt bepaald.

STABE heeft deze methoden gekenmerkt als „grob tolerant fer-

tigen, feintolerant montieren". Men moet dit niet opvatten als toverspreuk, die vertaald mag worden met „ook met onderdelen die niet deugen maakt de montage wel iets goeds". Veelal zullen die onderdelen met slechts kleine speling in een montagemaal moeten passen, en is de netto winst dit, dat men nauwe toleranties heeft verlegd naar waar ze gemakkelijk vallen.

Het vermijden van nauwe toleranties bij beweegbare onderdelen wordt mogelijk gemaakt door het principe van de zogenaamde kinematische constructies te volgen. Volgens dit principe wordt vermeden, dat de positie van onderdelen bij montage hetzij onvoldoende bepaald, hetzij overbepaald wordt. Bij juiste toepassing van het principe kan men van een bewegend deel, ondanks zeer ruime fabricagetoleranties, zeker zijn dat het niet zal rammelen en niet zal vastlopen.

De eenvoudigste toepassing van dit principe is de stoel met drie poten, die op elke vloer stevig staat en niet wiebelt; evenzo het fotografisch statief; een meer gecompliceerde toepassing, de slede van een optische bank die rust op drie kogels; voorts sommige kinematisch juist geconstrueerde diepte-instellingen van microscopen, die geen dode gang vertonen.

Kinematische constructies vindt men vooral in toestellen en opstellingen, die voor experimenten en dus een betrekkelijk korte levensduur zijn ontworpen, en verder, in apparaten en instrumenten, als geleidingen en instelmiddelen die hetzij niet zwaar belast, hetzij niet frequent gebruikt worden. Deze constructies hebben de moeilijkheid dat ze bij een gegeven belasting betrekkelijk veel ruimte vergen, en wegens kleine contactoppervlakken en daarmee verbonden grote oppervlaktekrachten sterk aan slijtage onderhevig zijn en slecht bestand tegen overbelasting. Vele constructeurs prefereren andere constructies, met nauwe toleranties op de koop toe, boven zuiver kinematische constructies en vermijden alleen al te zware zonden tegen de principes ervan. Het is wel zeker dat op deze wijze goede mogelijkheden ongebruikt blijven.

Het is daarom gewenst dat meer aandacht dan tot nu toe wordt besteed aan de dimensionering van kinematische constructies als functie van de belasting, en aan het bestuderen van gemengde constructies.

Met opzet heb ik deze enkele voorbeelden zo gekozen, dat daarin niet alleen de mogelijkheden maar ook de grenzen van fijnmechanische techniek naar voren kwamen.

Tot nu toe heb ik echter voornamelijk gesproken over mechanische aspecten.

Uit de opsomming van produkten in de aanvang trekt men evenwel gemakkelijk de conclusie, dat er een intensief grensverkeer moet bestaan tussen fijnmechanische techniek en een aantal andere vakgebieden, zoals optica, aero- en hydro-dynamica, vacuümtechniek, chemie, elektrotechniek en algemene meettechniek, hetgeen consequenties heeft voor de opleiding.

Het is goed speciaal de aandacht te vestigen op het steeds nauwere verband dat er is ontstaan met de elektrotechniek.

Vele elektrische toestellen zijn in feite fijnmechanische produkten, maar eisen van de constructeur bekendheid met de problemen van kleine elektromotoren, spoelen, kleine batterijen, elektrische isolatie en warmte-ontwikkeling. Andere oorspronkelijk zuiver mechanische produkten zijn geëlektrificeerd: elektrische schrijfmachines, camera's met foto-elektrische belichtingsregeling, horloges met batterijvoeding zijn slechts voorbeelden. Een bijzondere groep van toenemend belang wordt gevormd door de elektrische meetinstrumenten, regelaars en servomechanismen.

Het zal duidelijk zijn dat het onderwijs met dit aspect rekening moet houden en naast de mechanische componenten vooral ook de elektrische voldoende aandacht moet schenken.

Het is aantrekkelijk enkele van de tot nu toe behandelde gezichtspunten te illustreren met de bespreking van een eenvoudig elektrisch meetinstrument, dat dient om elektrische stroom te meten: de direct aanwijzende draaispoelmeter, waarvan ik de werking bekend onderstel.

De draaispoelmeter is een serieprodukt; de wereldproductie ligt naar schatting tussen 3 en 4 miljoen stuks per jaar. Er is echter een grote verscheidenheid van constructie en formaat. Bovendien levert elke fabrikant een ruime serie meetgebieden. Een normaal assortiment bestaat bijvoorbeeld uit 40 formaten en 50 meetgebieden. Dit en de specifieke eisen van nauwkeurigheid en gevoeligheid, die men aan het produkt stelt, maken dat de fabricage maar zeer ten dele kan worden gemechaniseerd.

De meeste draaispoelmeters vindt men als onderdeel van scha-

kelborden en panelen of van elektrische toestellen; een ander groot deel als transportabele instrumenten, meestal met een groter aantal meetgebieden.

De afmetingen variëren tussen enkele centimeters en enkele decimeters. De nauwkeurigheid ligt tussen 1 en 5 %. Ook worden precisie-instrumenten vervaardigd met een grotere nauwkeurigheid tot zelfs 0,05 %, maar daarbij gaat het om relatief kleine aantallen.

Naast deze professionele instrumenten heeft men dan nog de kleine draaispoelsystemen, die, vooral ten behoeve van de amateurfotografie, worden gebruikt in belichtingsmeters en automatische camera's. De afmetingen van het meetmechanisme zijn daarbij van de orde van 1 cm; de meetnauwkeurigheid is ongeveer 10 %. De jaarproductie ligt naar schatting tussen 1 en 2 miljoen stuks.

Bij de volgende beschouwingen heb ik een professioneel instrument van gemiddeld formaat op het oog, met hoofdafmetingen van ongeveer 10 cm.

De belangrijkste bouwelementen van het meetmechanisme zijn: de permanente magneet, de draaispoel en de spiraalveren, de laatste met afmetingen van millimeters, de eerste van centimeters.

Het is niet mijn bedoeling deze elementen stuk voor stuk te behandelen. Zo kan ik niet ingaan op de verschillende moderne magneetconstructies, die zijn ontstaan na de ontwikkeling van nieuwe krachtige magneetmaterialen en die belangrijk afwijken van de hoefijzermagneet uit de leerboeken. De belangrijkste stap is daarbij wel de overgang naar de kernmagneet in verschillende vormen, waarbij de constructie volgens Wouda wel de meest vooruitstrevende is.

De constructie van de draaispoeltjes is na ruim 70 jaar nog nauwelijks veranderd. Deze spoeltjes worden machinaal gewikkeld, meestal van koperdraad met een diameter tussen 20 en 200 μm . De wikkelmachines hebben bijzondere voorzieningen voor deze zeer dunne en breekbare draden, en laten bovendien een snelle verwisseling van draaddiameter toe om aan de grote verscheidenheid van meetgebieden tegemoet te komen. De vorm van de spoeltjes is meestal rechthoekig, aangepast aan de magneetvorm. De spoeltjes kunnen op een raampje gewikkeld, maar

ook vrijdragend zijn; in beide gevallen wordt met lak of lijm de nodige stijfheid verkregen.

In de laatste tijd is een constructie bekend geworden, waarbij de draaispoel met de techniek van gedrukte bedrading als spiraalvormige vlakke spoel is aangebracht aan twee kanten van een dunne cirkelvormige plaat. De vorm van de magneet is aan deze spoelvorm aangepast. Deze constructie leent zich goed voor grotere series. Het is met deze techniek echter niet mogelijk het equivalent van een spoeltje met veel windingen van dunne draad te vervaardigen. Ik kan de verleiding niet weerstaan op te merken dat het met een elektronenstraal-freesmachine mogelijk moet zijn zulke spoelen te produceren in een tempo van één per seconde, maar ik durf niet in ernst te beweren dat dit de prijs zou verlagen.

Een meetinstrument is bedoeld om ermee te meten. De gebruiker ervan heeft dan ook eigenlijk gelijk als hij zegt alleen belangstelling te hebben voor de wijzer en de schaal, en de rest als ballast te beschouwen. De fouten in het samenspel van wijzer en schaal vormen daarom terecht de hoofdschotel in menige specificatie.

In principe is de schaalverdeling van een draaispoelmeter lineair, hetgeen samenhangt met de regelmatigheid van het veld van de magneet. Het is echter moeilijk om kleine onregelmatigheden te vermijden, waardoor afwijkingen van de lineaire schaal van enkele procenten kunnen optreden.

Nu zijn er twee mogelijkheden om een vooraf gewenste nauwkeurigheid te bereiken. De ene mogelijkheid is, de magneet met zo nauwe toleranties te fabriceren, dat de vooraf klaargemaakte lineaire schaal geen correctie behoeft. Dit wordt gedaan bij schalen van gecompliceerd karakter, zoals van omschakelbare multimeters die een reeks meetgebieden bezitten. Daarbij worden de schalen in hun geheel gedrukt. De bereikte nauwkeurigheid is dan meestal niet beter dan 5 %, in gunstige gevallen 2,5 %.

De andere mogelijkheid is de magneet met ruime toleranties te fabriceren en de schaal als sluitstuk, als „verend element” in ruimere zin op te vatten. Met behulp van een regelbare stroombron en een precisie-instrument worden, na een afregeling op einduitslag, de hoofdpunten van de schaalverdeling afzonderlijk met de hand aangestreept en vervolgens in inkt getekend of ge-

stempeld, waarbij de tussenwaarden worden geïnterpoleerd. Alle kleine onregelmatigheden in het magneetveld worden zo dus opgevangen, een mechanisch-elektrische illustratie van „grob-tolerant fertigen, feintolerant montieren”. Op deze wijze wordt een nauwkeurigheid van 1%, maar ook van 0,1% bereikt.

Intussen zijn verschillende machines ontwikkeld om dit zogenaamde ijken te versnellen. Sommige machines maken het afstrepen overbodig en kunnen, nadat een ijkwaarde is ingesteld, een deelstreep direct stempelen.

Tot een belangrijke versnelling van de ijkprocedure voeren apparaten, die nauwkeurig een reeks stroomwaarden produceren als functie van een schakelaarstand, waarmee het aflezen van een precisie-instrument overbodig wordt. Deze apparaten moeten de grote verscheidenheid van meetgebieden en schaalverdelingen die in de praktijk voorkomen natuurlijk kunnen opvangen.

Een Amerikaans fabrikant heeft sinds kort een ijkmachine in bedrijf, die automatisch een reeks van bijvoorbeeld 100 ijkwaarden produceert, foto-elektrisch de wijzer van het te ijken instrument volgt, de 100 standen overbrengt op een film, en zo in ruim 1 minuut een volledige schaalverdeling aflevert. Deze film behoeft dan nog slechts op de schaal te worden bevestigd.

Blijkbaar is het vernauwen van de toleranties bij de magneet-fabricage duurder dan de \$ 15.000 die deze machine gekost heeft.

Van draaispoelmeters wordt geëist dat ze gevoelig zijn, d.w.z. dat ze voor het produceren van een aanwijzing slechts een klein meetvermogen mogen consumeren; ze moeten werken tegen een laag elektrisch salaris, dat meestal ligt tussen 1 en 100 μ W.

De geringe krachten, die dan optreden, moeten zo min mogelijk gestoord worden door het effect van lagerwrijving. De meerderheid van alle draaispoelmeters is daarom voorzien van de voor dit doel zeer gunstige droge taatslagering. Dit is de combinatie zonder olie van een kegelvormig geslepen hardstalen asje in een kom van edelsteen zoals safier of, bij lagere eisen, hardglas.

Deze lagering wordt gemonteerd met een zeer geringe axiale speling van ongeveer 50 μ m, die pas bij de eindmontage wordt ingesteld met een schroef waarin de lagersteen gevat is. Dit is dus een niet-kinematische constructie terwille van het wrijvingsminimum, dat hier belangrijker is dan het ontbreken van speling.

De punt van het gehard stalen asje, de taats, is niet scherp

maar eindigt in een boloppervlak met een kromtestraal van bijvoorbeeld $15\text{ }\mu\text{m}$. Dit boloppervlak moet glad zijn, maar wordt bij asjes van goede kwaliteit niet gepolijst, omdat daarbij amorf materiaal tussen de harde kristalvlakken zou worden gesmeerd, maar glad gemaakt met een elektrochemisch procédé.

De kwaliteit wordt gecontroleerd door de hardheid volgens Vickers op verschillende punten van het bolschijfje te bepalen, waarbij indrukkingen van ongeveer $2\text{ }\mu\text{m}$ lengte ontstaan.

Deze taatsjes worden door enkele gespecialiseerde bedrijven vervaardigd, die meestal ook horloge-onderdelen maken; ook asjes van horloges worden op de beschreven wijze op hardheid gecontroleerd.

Uit dit laatste blijkt dat het zelfs bij zeer kleine onderdelen niet nodig is de kwaliteit op zijn beloop te laten en dat ook dan een kwaliteitsmeting nog mogelijk is.

Ik heb het voorbeeld van de draaispoelmeter mede gekozen om te illustreren dat een constructeur soms voor hetzelfde ontwerp zowel thuis moet zijn in het gebied van de mikron als in het gebied van de decimeter. Bovendien demonstreert het het verband met de elektrotechniek en de meettechniek.

Tenslotte geeft dit voorbeeld mij de gelegenheid nog kort in te gaan op enkele aspecten, die betrekking hebben op meetinstrumenten als geheel.

Door stoten en schokken kan zo'n taatspuntje gemakkelijk worden beschadigd, hetgeen, zonder het instrument onbruikbaar te maken, toch leidt tot een vergrote lagerwrijving en een verminderde nauwkeurigheid.

Een bescherming van de taatspunt wordt verkregen met behulp van een verende lagering; de safiersteen wordt door een zwakke veer onder normale omstandigheden zo op zijn plaats gehouden, dat de axiale lagerspeling blijft bestaan, maar hij kan bij een stoot uitwijken, terwijl dan een robuuster deel van de as tegen een vaste aanslag de schok opvangt. Deze constructie is thans gebruikelijk in fotografische belichtingsmeters, waar men op schokken moet rekenen, maar wordt ook reeds in veel professionele draaispoelmeters toegepast.

Van deze laatste wordt namelijk in vele gevallen ook geëist

dat zij een zekere schokbestendigheid bezitten, hetgeen bij gevoelige instrumenten niet direct voor de hand ligt.

Deze eis van schokbestendigheid, en van robuustheid in het algemeen, is een eis die men meer en meer gaat stellen aan allerlei meetinstrumenten, en die samenhangt met het ruimere gebruik van instrumenten, ook onder ongunstige omstandigheden.

De grootste moeilijkheid is wel welke eisen men moet stellen.

Voor militaire toepassingen worden reeds lang op het punt van schokvastheid bijzonder zware eisen gesteld. Deze zijn niet kwantitatief vastgelegd, maar omschreven als beproeving met behulp van een schokmachine van nauwkeurig voorgeschreven afmetingen en eigenschappen. Deze methode heeft het voordeel dat de vraag, in hoeverre een dergelijke proef een majorant is voor de praktijk, een zaak is van de gebruiker. De fabrikant kan zich baseren op een welomschreven proef. Zijn instrument moet deze proef doorstaan. Wel stuit hij nog op een moeilijkheid.

Bij de beproeving van een aantal identieke prototypes kan hij namelijk de ervaring opdoen, dat sommige de proef doorstaan en andere niet. De oorzaak voor deze ervaring is, dat de schokmachines bij de welomschreven proef niet elke keer een schok van dezelfde zwaarte produceren. Om bij een ontwikkeling van schokbestendige instrumenten de vorderingen te kunnen beoordelen, moet men echter beschikken over een schokmachine die wel voldoende reproduceerbaar werkt, die men dus eventueel zelf moet vervaardigen en die tot taak heeft een krappe majorant te leveren voor de voorgeschreven proef, inclusief de daarbij optredende spreiding.

Bij de kwantitatieve beschrijving van een schokproef doen zich verschillende moeilijkheden voor. Er treden allerlei versnellingen, snelheden en verplaatsingen op, die niet voor het hele proefobject dezelfde zijn. Voor een globale indruk karakteriseert men een schokproef meestal met de maximaal optredende versnelling van het montagevlak en de duur van de schok.

Wanneer u mij toestaat in slordig Nederlands te spreken en daarbij de versnellingen uit te drukken in veelvouden van g , de versnelling van de zwaartekracht, dan geven de volgende getallen een indruk van de te stellen eisen.

Willen zij bestand zijn tegen normaal transport dan moeten instrumenten enkele schokken kunnen doorstaan van 20 g top-

waarde bij een schokduur van enkele milliseconden. Voor vrij ruwe behandeling en zwaar transport kan de eis luiden 150 g bij 1 msec.

De zwaarste militaire eisen gaan belangrijk hoger. Niettemin is het mogelijk gebleken eraan te voldoen en draaispoelmeters en andere typen elektrische schakelbordinstrumenten in serieproductie te vervaardigen, die schokken kunnen doorstaan van 600 g bij 1 msec. Daarbij wordt voldaan aan de eis dat de nauwkeurigheid van 1,5 % behouden blijft na 2 schokken in elk van de 3 hoofdrichtingen.

Bij een dergelijke ontwikkeling heeft men weinig houvast aan sterkteberekeningen, de juiste constructie moet hoofdzakelijk experimenteel worden vastgesteld.

De eis van robuustheid strekt zich ook uit over het effect van trillingen. Naast schokken treden in de praktijk dikwijls trillingen op die beschadigingen kunnen teweeg brengen of een instrument onbruikbaar maken.

Een continu aanhoudende trilling in de buurt van machines of op voertuigen, veroorzaakt bij toestellen met bewegende delen een bepaald soort slijtage van de lagers, die berust op oxydatie. Bij draaispoelmeters veroorzaakt deze „fretting corrosion” op den duur een vergrote lagerwrijving. In vele gevallen blijft dit bezwaar binnen aannemelijke grenzen. Hier zijn echter ondanks spanbandlagering nog niet alle moeilijkheden opgelost en ligt nog een gebied van onderzoek open.

Bij een meetinstrument kan verder door resonantie van de wijzer of een ander onderdeel een foutieve aanwijzing ontstaan. De resonantie kan ook beschadiging of afbreken van een onderdeel ten gevolge hebben. Door de resonantie-frequentie te verleggen kunnen deze bezwaren worden onderdrukt. Het is echter moeilijk zich voor alle gevallen zeker te stellen.

Ook hier kan de fabrikant zich verzekeren tegen de uiteenlopende eisen van de praktijk door te voldoen aan standaard-eisen, die een frequentiegebied voorschrijven waarbinnen geen resonanties van betekenis mogen optreden. Voor draaispoelmeters en dergelijke elektrische meetinstrumenten strekt zich dat gebied meestal uit van 10 tot 55 Hz en in sommige gevallen tot 500 Hz.

Om een indruk te geven welke eisen in andere gevallen aan

instrumenten worden gesteld vermeld ik de specificatie van de trilproef voor instrumentarium, dat ten behoeve van het ruimteonderzoek in raketkoppen en satellieten wordt ondergebracht. Bij het lanceren blijken behalve grote versnellingen van lange duur ook heftige trillingen binnen een groot frequentiegebied te kunnen optreden. Het bij de beproeving onderzochte frequentiegebied is 5 tot 2.000 Hz. De voorgeschreven amplitudo is voor mechanische apparatuur zoals bandrecorders bij 2.000 Hz $0,3\text{ }\mu\text{m}$, bij 50 Hz echter 0,5 mm en bij 5 Hz 50 mm; voor elektronische apparatuur het drievoudige daarvan.

Wanneer tijdens deze vrij schematische proef geen storing of beschadiging optreedt, is men echter nog niet zeker dat dit tijdens de vlucht ook niet zal geschieden. Daarom stelt men bij een nog geraffineerder onderzoek het object bloot aan trillingen waarin allerlei frequenties tegelijk voorkomen, zodat combinaties van resonanties kunnen optreden.

Het is duidelijk dat het voor een constructeur vrijwel niet mogelijk is, te voorzien welke invloed een dergelijk zogenaamd „wit geruis” op zijn constructie zal hebben; op dit punt bestaat nauwelijks ervaring. Ook hier moet experimenteel onderzoek de weg wijzen.

De mogelijkheid bestaat, dat ik u geschokt heb, door in het laatste deel van mijn beschouwingen meer te spreken over pogingen tot het vernielen van fijnmechanische produkten dan over het vervaardigen ervan.

U hebt zich echter niet van mij afgewend zoals enkele oudere chefs, die kwamen kijken naar onze eerste schokproeven. Zij hadden geleerd instrumenten met liefde te behandelen en konden dit opzettelijk vernielen van hun werkstukken niet aanzien. Zij hebben zich afgevraagd of een ontwikkelingsafdeling die zoiets bedenkt en een directie die het toelaat, wel voor hun taak berekend zijn.

Deze pogingen tot vernieling zijn echter vaak het beste hulpmiddel om de grenzen van de eigen fijnmechanische techniek te verkennen. Ze te ondernemen eist meestal een verandering van instelling, die enige moeite kost.

Ik wil echter gaarne besluiten met enkele constructieve gedachten.

Het was niet mogelijk in dit korte bestek meer dan een enkel facet van fijnmechanische techniek te belichten. Het is een vak met vele facetten en een snelle ontwikkeling in allerlei richtingen.

Fijnmechanische techniek wordt in ons land op verscheidene plaatsen beoefend. Er is een vrij groot aantal fijnmechanische bedrijven en gespecialiseerde afdelingen van bedrijven in Nederland, die tesamen een grote verscheidenheid van produkten fabriceren. In deze bedrijven zullen de toekomstige ingenieurs met belangstelling voor fijnmechanische techniek wellicht later hun werkkring vinden.

Stellig is in deze bedrijven in de loop der jaren een grote hoeveelheid ervaring en produktievaardigheid verzameld, die weliswaar in de eerste plaats betrekking heeft op het eigen produkt, maar die veelal ook algemene aspecten zal bezitten, die voor andere bedrijven van belang kunnen zijn, nu nog afgezien van de directe concurrent.

Veelal heeft de gelegenheid ontbroken deze ervaring te publiceren of mee te delen. Een Nederlandse vereniging en een tijdschrift bieden nu die gelegenheid. Daarmee is niet gezegd dat contacten op ruimere schaal niet nodig zouden zijn.

Natuurlijk bestaat er ook een begrijpelijke schroom allerlei „know-how” zomaar ter beschikking te stellen.

Ik doe ten behoeve van het onderwijs een beroep op onze fijnmechanische industrieën deze schroom te laten varen en mededeelzaam te zijn aangaande opgeloste, en desgewenst ook onopgeloste, problemen. Hier behoeven geen grenzen te zijn.

Het onderwijs in dit vak zal gebaat zijn met levende bedrijfservaring. Dan zullen stellig de bedrijven gebaat zijn met het onderwijs.

Aan Hare Majesteit de Koningin betuig ik bij de aanvaarding van dit ambt gaarne mijn eerbiedige dank voor Haar besluit, mij te benoemen tot buitengewoon hoogleraar aan deze Technische Hogeschool.

Mijne Heren Curatoren,

Voor uw voordracht die geleid heeft tot mijn benoeming, ben ik U zeer erkentelijk en ik dank U voor het vertrouwen dat U in

mij hebt gesteld. Ik geef U de verzekering dat ik mij tot het uiterste zal inspannen om deze nieuwe leerstoel voor Fijnmechanische Techniek te zetten op drie stevige poten: onderwijs, onderzoek en ondernemingsgeest.

Mijne Heren Hoogleraren van deze Technische Hogeschool,

Het is voor mij een eer in Uw midden te worden opgenomen. Ik beschouw het als een voorrecht zo, met kleine zaken, misschien een bijdrage te mogen leveren aan de bloei van deze Hogeschool.

Mijne Heren Hoogleraren van de Afdeling der Werktuigbouwkunde,

Nog slechts kort ben ik in Uw kring opgenomen, maar het is reeds lang genoeg om getroffen te zijn door de collegiale en vriendschappelijke sfeer, gericht op samenwerking, die de Afdeling kenmerkt. Ik ben U dankbaar voor Uw reeds ruimschoots gebleken bereidheid mij met raad en daad bij te staan. Die zal ik nog dikwijls nodig hebben.

Ik zal mij gelukkig voelen, wanneer zou blijken, dat ik op mijn beurt ook U op den duur van dienst kan zijn.

Hooggeleerde Verhagen,

Reeds gedurende een reeks van jaren hebben wij zo nu en dan samengewerkt en wel aan een object der elektrotechniek. Uw deskundigheid op het gebied van de meettechniek en Uw scherpzinnigheid heb ik altijd bewonderd en ik heb veel van U geleerd. Uw vriendschap en hulpvaardigheid heb ik steeds op hoge prijs gesteld.

Het zou mij genoegen doen wanneer zich in de toekomst nog vele gelegenheden tot samenwerking zouden voordoen.

Hooggeleerde Muller,

Het is nog maar kort geleden dat wij elkander leerden kennen. Wij staan tegelijkertijd voor dezelfde problemen, U in Eindhoven en ik in Delft. Overeenkomsten en verschillen zijn juist van dien aard, dat ik mij zou verheugen wanneer wij regelmatig contact zouden hebben.

Mijne Heren Commissarissen en Directeuren van de N.V. NIEAF,

Dat U mij toestemming hebt verleend deze tweede taak te aanvaarden naast mijn werkzaamheden voor ons bedrijf, stel ik op hoge prijs.

In het bijzonder dank ik U voor de hartelijke belangstelling die U ter gelegenheid van mijn benoeming hebt getoond.

Zeergeleerde Wouda,

Dat ik mij afzonderlijk tot U richt, is omdat ik U als een van mijn leermeesters voor dit vakgebied beschouw. Het moge U voldoening schenken, dat stellig veel van wat ik van U en in het door U geleide bedrijf geleerd heb, ten goede zal komen aan het onderwijs aan toekomstige ingenieurs.

Dames en Heren,

Niet dikwijls doet zich de gelegenheid voor om hen te bedanken van wie men iets geleerd heeft. Herhaaldelijk realiseer ik mij hoeveel ik geleerd heb van allen met wie ik in het nabije en verdere verleden heb mogen samenwerken; van superieuren: als student, als werknemer, als fabrikant en leverancier; van collega's: in werkgroep, in technische discussies, in commissies; van medewerkers: als chef, door kritisch en aandachtig te luisteren naar hun ervaringen en ideeën. Het doet mij genoegen dat eens te kunnen zeggen en mijn erkentelijkheid uit te spreken.

En om volledig te zijn zou ik daar ook in willen betrekken allen die als auteur van boek, publikatie of voordracht zich de moeite hebben getroost hun ervaringen en inzichten overzichtelijk te rangschikken en mede te delen.

Dames en Heren Studenten,

U hebt uit het voorafgaande enigszins kunnen afleiden welk vlees U in de kuip hebt. Daarmee hebt U een voorsprong op mij, want ik ken U nog nauwelijks, zelfs niet als studentengemeenschap, aangezien ik niet in Delft heb gestudeerd. Ik ben verlangend met U in contact te komen.

Dit geldt in het bijzonder voor diegenen onder U die het plan hebben zich bezig te houden met fijnmechanische techniek en instrumentenbouw. Misschien zal de stijl van een van oorsprong fysicus anders zijn dan U gewend bent; misschien ontmoet U hiaten in mijn werktuigkundige kennis; wij zullen stellig veel van elkaar kunnen leren.

In de namen van uw verenigingen heb ik gezien dat U belangstelling hebt voor historische figuren. U weet dus, dat terwijl Tubalkaïn zijn bedrijf als smid en loodgieter uitoefende, zijn broer Jubal zich aan de muziek wijdde. Voordat het echter zover was, heeft deze Jubal zijn instrumenten stellig zelf moeten bedenken en vervaardigen, waarbij hij *dus* reeds vroeg de fijnmechanische techniek met de fysica beoefende. Het is dus al een oud vak en het is van het begin af met voldoening voor de constructeur en tot vreugde van de mensheid beoefend.

Het vak is ingewikkelder geworden en het duurt wat langer voordat men aan de muziek toe is. Toch zit die oude mogelijkheid er nog in. Ik wens U toe dat U het op de oude manier zult beoefenen, tot voldoening voor Uzelf, tot vreugde en geluk van de mensheid en tot eer van de Schepper.

Ik heb gezegd.