

Lengtemeting

Citation for published version (APA):

Koning, J. (1970). *Lengtemeting*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1970

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

LENGTEMETING

OPENBARE LES

GEGEVEN BIJ DE AANVAARDING VAN
HET AMBT VAN LECTOR IN DE
WERKTUIGKUNDIGE MEETTECHNIEK
AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL
TE EINDHOVEN

OP VRIJDAG 20 FEBRUARI 1970
DOOR

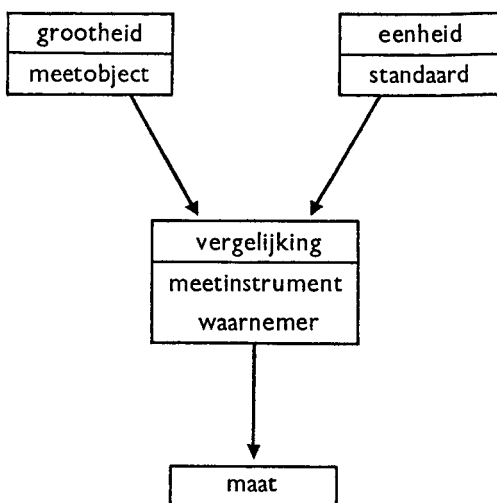
DRS. J. KONING

Waarde toeoorders,

De vraag waarover deze openbare les zal gaan was uiteraard onderwerp van uitgebreide overweging. Ik geef er de voorkeur aan te spreken over mijn vakgebied: lengtemeting. Wat lengtemeting is kan voorlopig als bekend verondersteld worden. Waarom lengtemeting speciale aandacht zou moeten ondervinden bij de beoefenaars van de werktuigbouwkunde is de meesten Uwer ook bekend. Bij het vervaardigen van werktuigbouwkundige produkten is de maat immers een van de voornaamste kwaliteitsbepalende factoren. Wil men uitwisselbaar fabriceren, dan dienen nauwe toleranties aangehouden te worden; de eisen gesteld aan de meetmiddelen en in nog sterkere mate aan de instrumenten waarmee die meetmiddelen worden gecontroleerd, zijn zeer hoog.

In het algemeen worden de metingen door specialisten verricht. De werktuigkundige moet met deze specialisten op redelijk niveau van gedachten kunnen wisselen; bij de opzet van een produktieproces moet hij hun mogelijkheden kunnen schatten en bij onderzoekswerk zal het meten soms een integrerend deel van zijn eigen werk zijn. Ik wil daar op deze plaats en tijd niet verder op in gaan, en de meettechniek als gegeven beschouwen.

Het is misschien nuttig als we ons eerst afvragen, wat nu eigenlijk meten is. Ik zou dat willen doen aan de hand van een schema – hetzelfde schema waarmee ook het college lengtemeting begint. We stellen ons voor, dat we een werkstuk hebben, het meetobject, waarvan we een grootte, b.v. een lengte, willen bepalen. Dat betekent dat we die grootte uitdrukken in een eenheid. De eenheid verschijnt in de praktijk in de vorm van een standaard, waarin die eenheid is gematerialiseerd. Het meten is nu het vergelijken van twee materiële objecten, het meetobject en de standaard. Het vergelijken gebeurt met behulp van een meetinstrument door een waarnemer. Het resultaat van deze vergelijking – dat dus zegt hoe vaak de standaard op het meetobject begrepen is – is de maat. Het meetresultaat is formeel dimensieloos; de maat van het werkstuk is het produkt van dat dimensieloze getal met de eenheid.

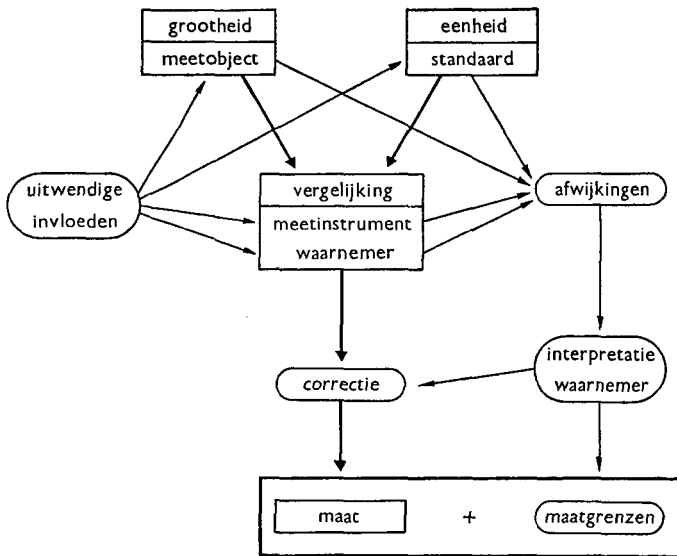


Deze voorstelling van zaken is formeel juist, maar onvolledig. In de praktijk zal in het meetproces door uitwendige invloeden worden ingegrepen; in de lengtemeting is vooral de temperatuur een gevreesde vijand. Door oncontroleerbare oorzaken wordt namelijk steeds warmte in en uit onze meetopstelling getransporteerd; de temperatuurvariaties die daarvan het gevolg zijn, doen ons werkstuk uitzetten en inkrimpen. Ook onderdelen van het meetinstrument zullen van afmeting veranderen. De invloed van de temperatuur op de waarnemer is niet direct duidelijk, maar het is zeker dat ook hij door bepaalde externe factoren te beïnvloeden is. Last but not least ondergaat ook de standaard de invloed van de temperatuur.

Het zal duidelijk zijn dat het resultaat van een meting nooit geheel juist kan zijn. Geen van de bij het meetproces betrokken voorwerpen is volmaakt, en de waarnemer is dat evenmin. Door de externe invloeden wordt het meetresultaat in ongunstige zin beïnvloed. Er treden dus afwijkingen op tussen de ware en de gemeten maat.

Deze afwijkingen kunnen geïnterpreteerd worden door de waarnemer, die daardoor dus een tweede taak gekregen heeft. Bij die interpretatie komt aan het licht dat de afwijkingen in twee groepen ingedeeld kunnen worden. Er zijn afwijkingen die constant zijn, in de zin dat bij een bepaalde afgelezen waarde van het meetinstrument

steeds eenzelfde afwijking behoort. Deze afwijkingen – die systematisch genoemd worden – kunnen gemakkelijk in rekening gebracht worden; men noemt dit corrigeren. Daarnaast zijn er afwijkingen die zich ogenschijnlijk volledig willekeurig gedragen, maar waarvan bij nader inzien blijkt dat ze vrijwel steeds binnen bepaalde grenzen blijven; daarbij komen dan grote afwijkingen zelden en de kleinere vaker voor. Deze afwijkingen – die toevallig genoemd worden – geven aanleiding tot maatgrenzen: men kan niet meer exact de maat van het werkstuk opgeven maar men kan wel de grenzen bepalen waartussen de maat van het object zich met grote waarschijnlijkheid bevindt.



Wat wij gewoonlijk aanduiden met onderwijs in de lengtemeting bestaat uit het nader detailleren van dit schema voor het meten van lengtematen en hoeken, bij uitbreiding ook van vormen – rechtheid, vlakheid, cilindriciteit, rondheid – en van de fijnstructuur van het oppervlak, de oppervlakteruwheid. Er valt natuurlijk niet aan te denken dat gehele gebied hier toe te lichten; ik zal de vrijheid nemen enkele onderwerpen te kiezen. In te gaan op meetproblemen die in de

praktijk geregeld voorkomen, en op de instrumenten die daarbij gebruikt worden, trekt mij niet aan. Velen Uwer zijn met deze zaken bekend, zij worden in vele boeken behandeld. Ik zou liever willen spreken over enkele randgebieden van het vak waar de hoogst bereikbare nauwkeurigheid wordt nagestreefd. Zoals zal blijken vormt dit deel van het vak de basis waarop de „dagelijkse” meettechniek stoelt.

Onder het motto „zonder standaard geen meting” wil ik eerst iets over de lengtestandaard zeggen. Binnen een eenhedenstelsel, dat de onderlinge relatie tussen verschillende eenheden vastlegt, kan men een klein aantal eenheden vrij kiezen; de andere eenheden worden dan daaruit afgeleid. De lengte-eenheid is een van de eenheden die men vrij mag kiezen; iedere keuze levert een ander – maar gelijkwaardig – stelsel op. De betekenis van de meter als lengte-eenheid en van het metriek stelsel waarvan de meest volledige versie het SI is, het internationaal stelsel van eenheden, is dan ook niet gelegen in de keuze van de lengtestandaard, maar in de decimale veelvoud en onderverdeling van de eenheden en in de goed-gedefinieerde standaarden¹). Daarmede werd een – althans op het vaste land van Europa heersende – uiterst verwarde situatie doorbroken. In Nederland was aan het einde van de 18e eeuw een ontstellend aantal verschillende voetmaten in gebruik. Wijlen de heer Zevenboom – de bekende historicus op dit gebied – heeft daarmee een dik boek gevuld²).

De poging om het metriek stelsel vast te leggen door natuurlijke standaarden: de meter als een deel van de lengte van een aardmeridiaan en het kilogram als de massa van één kubieke decimeter water van 0°C is mislukt en vrijwel direct opgegeven. De meter is vastgelegd door een als tussenstandaard bedoelde mètre provisoire, waaruit de mètre des archives is afgeleid; de massa-eenheid is via een dm³ water van 4°C – de temperatuur van 0°C was om experimentele redenen verlaten – vastgelegd door een cilindrisch stuk platina. Dit zijn de standaarden van lengte en massa van 1799.

De volgende stap in de ontwikkeling van de lengtestandaard is de platina-iridium standaard van 1889, die beheerd wordt door een internationaal instituut, het Bureau International des Poids et Mesures. Voor ons is interessant hoe men getracht heeft de lengte van de meter vast te leggen en welke voorzorgen men heeft genomen om verandering van deze lengte te voorkomen. Men heeft een streepstandaard gekozen, waarbij de lengte is vastgelegd door de afstand

tussen twee strepen, omdat voor het microscopisch waarnemen van deze strepen de lineaal niet hoeft te worden aangeraakt en men heeft de lineaal vervaardigd van een platina-iridium legering – een legering van twee zeer edele metalen – waardoor chemische aantasting welhaast uitgesloten is. De afmetingen van de ter zelfder tijd vervaardigde nationale standaarden – bestemd voor de tot de „meterconventie” toegetreden landen – was toen bekend tot op $0,1 \mu\text{m}$, dat is $0,0001 \text{ mm}$ en de uitzettingscoëfficiënten, die het mogelijk maken de lengte bij verschillende temperaturen te berekenen, zijn ook met zeer grote nauwkeurigheid bepaald. Dit is dus de standaard van 1889.

Omstreeks het begin van deze eeuw wordt het experimenteel mogelijk materiële objecten te vergelijken met de golflengte van licht. Het mag bekend verondersteld worden dat licht zich als een golfverschijnsel aan ons voordoet, en dat voor lichtbronnen die een lijnspectrum uitzenden, de golflengte een onveranderlijke waarde heeft. Voor zichtbaar licht is die golflengte iets minder dan $0,001 \text{ mm}$.

Door zeer nauwkeurige metingen is echter gebleken dat de golflengte niet zo constant is als men wel zou wensen. De lichtbronnen, waarvan de spectraallijnen als lengtestandaard in aanmerking komen, zijn alle gasontlading: gassen onder lage druk die tot lichten gebracht worden door doorgang van elektrische stroom. Welnu, verandering van de waarde van de gasdruk en van de elektrische stroomsterkte hebben geringe, maar niet te verwaarlozen, veranderingen van de uitgezonden golflengte ten gevolge. Een tweede moeilijkheid is gelegen in het feit dat een spectraallijn niet één golflengte heeft, maar a.h.w. een groot aantal zéér dicht bij elkaar gelegen golflengten, een golflengtegebiedje. Dat golflengtegebiedje noemt men de lijnbreedte. Bij de meting gebruikt men dan „automatisch” de gemiddelde golflengte, maar het spreekt welhaast vanzelf dat dat midden bij een brede lijn minder nauwkeurig vast ligt dan bij een smalle lijn. Voor nauwkeurige lengtemeting is dus het gebruik van een zeer smalle spectraallijn gewenst.

In 1960 kon een bepaalde golflengte als primaire lengtestandaard worden aangewezen, omdat Engelhard een zeer smalle spectraallijn had gevonden, waarvan de beïnvloeding door de druk en de stroomsterkte in de gasontlading nauwkeurig bekend was³⁾⁴⁾. Daardoor kan de juiste waarde van de golflengte berekend worden als die druk en die stroomsterkte bekend zijn. Het is de oranje-rode spectraallijn van het kryptonisotoop met massagetal 86. De juiste waarde van de golf-

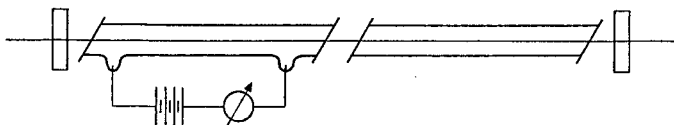
lengte – hij wordt in acht decimalen opgegeven – zal ik U niet geven. Wel wil ik nu al opmerken dat de golflengte zoals wij die in onze instrumenten meten, nog beïnvloed wordt door de toestand van de atmosferische lucht; ik kom daar later op terug. Dit is dus de standaard van 1960, die nog steeds geldig is.

Men kan zich nu afvragen wat de verdere ontwikkeling zal zijn, en daarover zijn uiteraard alleen speculaties mogelijk; het ligt voor de hand om daarbij te denken aan de z.g. lasers. Ik zou daarom nader willen ingaan op de eigenschappen van zo'n laser en wel meer speciaal van de gaslaser. Men kan een laser voorstellen als een combinatie van een gasontladingslamp met een zeer smal filter. Het filter wordt gevormd door een z.g. fabry-perot-interferometer, die bestaat uit twee zeer goed reflecterende spiegels die nauwkeurig evenwijdig zijn opgesteld; de gasontladingsbuis bevindt zich tussen deze spiegels. Door een soort optische terugkoppeling tussen de gasontlading en het filter wordt bewerkt dat slechts een klein aantal zeer smalle lijnen – liggende binnen de door de gasontlading uitgezonden spectraallijn – wordt uitgezonden. Wat is nu het resultaat? We hebben de beschikking gekregen over zeer smalle spectraallijnen, wat gunstig is voor de meetnauwkeurigheid, maar we weten alleen dat die lijnen ergens in het oorspronkelijk uitgezonden gebiedje van spectraallijnen – de brede lijn – liggen. Waar precies, dat hangt af van het filter, want de golflengte die wordt doorgelaten, wordt bepaald door de afstand van de spiegels.

Lasers met een grote lengte zenden veel lijnen uit. De gemiddelde golflengte komt dan wel *ongeveer* overeen met het gemiddelde van de golflengte van de oorspronkelijke spectraallijn, maar goede lengtestandaarden zijn deze lasers niet.

Korte lasers zenden maar één lijn uit; deze ligt ergens in de oorspronkelijke spectraallijn, maar we weten niet waar; als lengtestandaard is een dergelijke laser onbruikbaar. Men kan zo'n korte laser stabiliseren door langs piezoëlektrische weg de lengte zodanig te beïnvloeden, dat de uitgezonden lijn samenvalt met het maximum van de oorspronkelijke spectraallijn. Een dergelijke gestabiliseerde laser is een redelijke secundaire standaard, maar de golflengte is veel minder constant dan van de primaire standaard, de golflengte van de oranje-rode krypton-lijn. Dat wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de laser een gasmengsel bevat waarvan de partiële drukken vrij hoog en niet nauwkeurig bekend zijn. De golflengte is reproduceerbaar tot op 1 op tien miljoen⁵).

Geen van de boven beschreven soorten lasers kan dus in aanmerking komen om de kryptonstandaard te vervangen. In het begin van 1969 hebben Hanes en Baird echter een speciale laser beschreven, die betere perspectieven biedt⁶⁾. Bij deze laser bevinden zich tussen de spiegels van het fabry-perot-filter twee buizen.



De linkse is de normale gasontladingsbuis die met een mengsel van helium en neon is gevuld, de rechter bevat jodiumdamp met een druk van ca. 0,05 millibar. Het licht in een aantal zeer smalle golflengtegebiedjes wordt door de jodiumdamp geabsorbeerd. Door langs piezoëlektrische weg een van de spiegels te verplaatsen, kan men deze gebiedjes opzoeken, een ervan uitkiezen, en daarmee de spiegelpositie automatisch regelen. De wezenlijke verschillen met de normale gestabiliseerde lasers zijn dat de absorptielijnen smal zijn, dat in de absorptiebuis geen elektrische lading aanwezig is en dat de druk constant en bekend is. Op grond van door Hanes en Baird verrichte voorlopige proeven is een reproduceerbaarheid van de orde van 1 op 1 miljard te verwachten. Het lijkt een redelijke speculatie dat hiermede de richting is aangegeven, waarin de volgende primaire standaard zou kunnen worden gevonden. Tot zover over de standaard.

Uit het voorgaande zou men de conclusie kunnen trekken dat niets ons belet om met zeer hoge nauwkeurigheid lengtemetingen te verrichten. Immers, er zijn lichtbronnen met zeer goed bekende golflengte en de methoden van de interferometrie leren ons hoe we daarmee de lengte van een materieel object kunnen bepalen. Maar van vrijwel geen enkel voorwerp is de vorm en de oppervlaktekwaliteit goed genoeg voor directe toepassing van interferentiële methoden. Hoogstens kan de positie van de bewegende delen van meetinstrumenten met behulp van interferometrie bepaald worden. We zullen daarvan later een voorbeeld bespreken.

In het algemeen zal men tussenstandaarden toepassen, secundaire standaarden die door specialisten interferentieel gekalibreerd worden. Deze secundaire standaarden kunnen in de praktische meettechniek gebruikt en in instrumenten ingebouwd worden. Deze procedure brengt ongetwijfeld een verlies van nauwkeurigheid mede, maar

heeft voordelen in verband met het probleem dat ik nu zou willen aansnijden en dat het grootste probleem is bij de praktische realisatie van zeer nauwkeurige lengtemeting, n.l. de temperatuurinvloed.

Bij stijgende temperatuur worden vrijwel alle materialen langer; voor staal is de lengtevermeerdering ongeveer $1/100.000$ per graad. Ook de golflengte van spectraallijnen wordt langer, omdat we die gewoonlijk in lucht meten. De golflengte in vacuüm is constant, de golflengte in lucht is kleiner en wordt gevonden door die in vacuüm te delen door de brekingsindex. Deze is ongeveer evenredig met de dichtheid van de lucht, die o.a. weer van de temperatuur afhangt. De golflengte in lucht wordt per graad ongeveer $1/1000.000$ langer; de invloed is dus veel kleiner dan voor de normale materialen geldt.

Omdat we een voorwerp nooit bij dezelfde temperatuur meten als waarbij het later gebruikt wordt, wordt de kennis van de temperatuur belangrijk. In de dagelijkse praktijk vergelijkt men een te meten voorwerp met een instrument waarvan de ingebouwde standaard zoveel mogelijk dezelfde uitzettingscoëfficiënt heeft als het te meten object. Daardoor bereikt men dat in hoofdzaak een afwijking ontstaat door een verschil in temperatuur tussen voorwerp en instrument. Temperatuurverschillen nu zijn vrij gemakkelijk nauwkeurig te meten. Zou men echter de meting rechtstreeks met een golflengtestandaard uitvoeren, dan zou men niet kunnen volstaan met het bepalen van een temperatuurverschil maar zou men de echte temperatuur moeten kennen.

Indien men wat nader op deze problemen ingaat dan blijkt dat men de temperatuur ongeveer tienmaal nauwkeuriger moet kennen wanneer men van golflengtestandaarden gebruik maakt. Wenst men een secundaire standaard van 1 meter lengte te kalibreren met een onnauwkeurigheid van ten hoogste $0,0001$ mm – wat een zware doch niet onredelijke eis is – dan moet de temperatuur nauwkeuriger dan op $0,01$ graad bekend zijn. Wenst men deze nauwkeurigheid bij meting met een metalen secundaire standaard te bereiken, dan moet weliswaar het temperatuurverschil eveneens op $0,01$ graad bekend zijn, maar de echte temperatuur slechts op $0,1$ graad.

We dienen ons nu als nevenactiviteit met nauwkeurige temperatuurbepalings bezig te houden. Een onverwacht probleem treedt op als we ons afvragen wat we bedoelen met 20°C , de temperatuur waarbij volgens afspraak de lengte wordt geacht gemeten te zijn.

Theoretisch wordt de temperatuur gedefinieerd door thermodynamische relaties. In ons geval betekent dit, dat we de temperatuur kunnen berekenen uit de drukverandering die een constant volume van een ideaal gas vertoont.

In werkelijkheid is het gasvolume niet constant, en gedraagt het gas zich niet ideaal. Daarvoor kan gecorrigeerd worden maar dat maakt het hanteren van een gasthermometer zo gecompliceerd dat dit instrument voor ons doel niet in aanmerking komt. In de praktijk benadert men de (theoretische) thermodynamische temperatuurschaal met behulp van weerstandthermometers, d.w.z. thermometers die berusten op de verandering van de elektrische weerstand met de temperatuur. Deze benadering noemt men de internationale praktische temperatuurschaal. De schaal die tot 1968 in gebruik was (IPTS 1948) wijkt bij 20 graden ca. 0,01 graad af van de thermodynamische. Omstreeks de jaarwisseling 1968-1969 is de schaal IPTS 1968 ingevoerd, waarbij dit verschil is opgeheven. Dat betekent dat tussen lengtemetingen voor en na deze datum een discrepantie van één op tien miljoen kan optreden. In de temperatuurschaal IPTS 1968 is de temperatuur van 20° t.g.v. de onbekendheid van de ijkpunten waardoor deze schaal bepaald is, niet nauwkeuriger dan op 0,002 graad bepaald; gasthermometrische metingen geven – zelfs als men de experimentele complicaties kan overwinnen – geen grotere nauwkeurigheid⁷⁾.

De conclusie moet dus in mineur zijn: aan de temperatuurmeting moet zeer veel zorg besteed worden; de onnauwkeurigheid van de temperatuurmeting zal in zeer veel gevallen de in de lengtemeting bereikbare nauwkeurigheid volledig bepalen. In concreto is een lengtemeting met een nauwkeurigheid van 1 : 10⁸ aan normale materiële objecten *niet* uitvoerbaar.

Tot zover over de temperatuurmeting.

De maatvoering bij ontwerp en vervaardiging wordt voor alle materiële objecten beheerst door het begrip tolerantie. Het voorschrijven en het trachten te vervaardigen van een absolute maat is zinloos; de onvolmaaktheid van ieder vervaardigingsproces en van ieder instelorganisme van een machine en van ieder meetinstrument brengt afwijkingen van de verlangde maat mede.

De uitweg is duidelijk. Bij het ontwerp moet op functionele gronden een tolerantie bepaald worden, d.w.z. grenzen waarbuiten de maat zich niet mag bevinden, omdat dit nadelige invloed op de functie heeft.

Bij de voorbereiding van de vervaardiging moet de produktietechniek inzicht geven in de wijze waarop en de kosten waartegen bepaalde toleranties gerealiseerd kunnen worden. Ten slotte dient door meting tijdens en na de fabricage vastgesteld te worden of de gestelde grenzen al dan niet zijn overschreden. Daarbij treedt de moeilijkheid op dat – zoals zojuist al is aangeduid – ook de meetinstrumenten onvolmaakt zijn. Enerzijds mag men niet toelaten dat de maat wezenlijk buiten het tolerantiegebied zal liggen, anderzijds mag men niet voorzichtigheids-halve te ver binnen de grenzen blijven – dan zou er geen speelruimte voor de produktietechnicus overblijven. Daarom dient men aan het instrument hoge eisen te stellen; men neemt vaak als norm dat de meetonzekerheid door het instrument veroorzaakt niet meer dan $1/10$ van het tolerantiegebied mag bedragen.

Dat alles mag bekend verondersteld worden en ik heb het slechts aangeroerd om twee consequenties te bespreken.

Ten eerste is het duidelijk dat het werk van de constructeur, van de produktietechnicus en van de meetspecialist samenhangt, en dat betekent dat optimale resultaten alleen bereikt kunnen worden door samenwerken. Voor samenwerken is nodig dat de partners inzicht hebben in elkaars werk en in deze zin zien wij onze voornaamste onderwijstaak op het gebied van de lengtemeting: de toekomstige ingenieur inzicht geven in de mogelijkheden van het gebruikelijke instrumentarium, in de moeilijkheden van de uitvoering van de metingen en in de methode van interpretatie van de afwijkingen zoals ik die in het schema heb aangeduid. Daarmede is echter slechts de mogelijkheid voor samenwerking gegeven. Hoewel ik mij geen oordeel over de gang van zaken in de praktijk wil aanmatigen, krijg ik toch soms de indruk dat ook daar niet steeds duidelijk is dat men ontwerpen, maken en meten met voordeel als één samenhangend geheel zou kunnen zien.

De tweede consequentie is dat de toleranties, die geaccepteerd kunnen worden bij de bouw van lengtemeetinstrumenten, kleiner zijn dan die in welk ander gebied der werktuigbouwkunde dan ook. Dat volgt noodzakelijk uit de opgave de produkten van de werktuigbouwkunde te meten met een onnauwkeurigheid die kleiner en liefst véél kleiner is dan de toleranties die voor die produkten gelden.

Deze stelling zou ik willen gebruiken om dieper op het onderwerp instrumentenbouw in te gaan. De stelling is in zijn algemeenheid natuurlijk niet juist: indien methoden en technieken gevonden kunnen worden die het mogelijk maken om veel kleinere toleranties

aan te houden dan in de werktuigbouwkunde gebruikelijk is, dan zullen deze methoden en technieken ook in speciale gebieden van de werktuigbouwkunde in gebruik genomen worden. Dit betekent overigens alleen maar dat de meettechniek niet als een statisch vak gezien moet worden, maar als een vakgebied dat steeds in beweging is. Ik zou mij gaarne willen beroepen op een uitspraak van Charles Fabry*), die men zou kunnen vertalen als volgt: „Indien de meettechniek zich op haar plaats wil handhaven is er geen grens aan de nauwkeurigheid die zij moet nastreven en vaak zullen nieuwe methoden nodig zijn om de verlangde nauwkeurigheid steeds verder op te voeren”. Dit citaat zal waarschijnlijk van 1906 dateren, maar ook thans is het nog volledig waar.

In de praktijk heeft de meettechniek op twee punten een voor-sprong op de produktietechniek. Ten eerste is het vaak mogelijk het meetprobleem terug te brengen tot een eendimensionale meting, waardoor aan de mechanische inrichting wezenlijk lichtere eisen gesteld kunnen worden, en ten tweede wordt in de ruimte waarin de meting verricht wordt de temperatuur gewoonlijk zeer goed constant gehouden, althans beter dan mogelijk is in de ruimten voor de produktie. Bovendien kunnen de bij de meting op het werkstuk uitgeoefende krachten meestal verwaarloosbaar klein gemaakt worden, terwijl dat bij de conventionele bewerkingstechnieken zeker niet het geval is.

Nadat ik billijkheidshalve mijn stelling betreffende de zeer enge tolerantie bij het vervaardigen van meetinstrumenten aanzienlijk heb afgezwakt, zou ik niettemin willen vaststellen dat aan de resterende eisen toch niet met triviale middelen kan worden voldaan. Vrijwel zonder uitzondering bevatten lengtemeetinstrumenten materiële koppel-elementen in de vorm van meetstiften, hefboomen, geleidingen, sleden of meetwagens. Zij dienen te verzekeren dat er een eenduidig verband bestaat tussen een verplaatsing van het te meten object dan wel van bepaalde meetmiddelen en van de voor de meting nodige standaard. Aan deze koppel-elementen moet men uiteraard de eisen stellen van bekende en dus constante afmetingen, terwijl de positie zeer nauwkeurig ingesteld moet kunnen worden. Uit beide eisen

*) Si la metrologie veut se maintenir a sa place il n'y a pas de limite à la précision qu'elle doit chercher et de nouvelles méthodes sont souvent nécessaire pour pousser toujours plus loin la précision.
CHARLES FABRY.

volgt dat op deze elementen slechts zeer geringe krachten (minder dan 1N) uitgeoefend mogen worden, terwijl de speling liefst ver onder 1 μm moet zijn.

De instrumenten voor de lengtemeting kan men in twee groepen indelen:

- a) mechanische vergrotingsmechanismen zoals meetklokken en comparatoren die kleine afmetingen hebben en in grote series vervaardigd worden;
- b) meetmicroscopen en lengteteelbanken waarvan de afmeting tot enkele meters en de massa tot 1 ton kan gaan en die in enkelvoud of in zeer kleine series vervaardigd worden.

Als men meettechniek – en lengtemeting in het bijzonder – binnen een afdeling der werktuigbouwkunde wil bestuderen en onderwijzen dan zullen ook de bij uitstek werktuigbouwkundige problemen van de instrumentenbouw daartoe gerekend moeten worden. Daarbij ontstaan, zoals te verwachten is, raakvlakken en overlappingsgebieden met de fijnmechanische techniek. Als men zich op de afgrenzing van de fijnmechanische techniek bezint, zoals dat b.v. door De Jong is gedaan⁸⁾, dan blijkt dat we ons juist in een gebied bevinden waar de grenzen vervaagd zijn. Onze instrumenten zijn te groot en te zwaar en de seriegrootte is veel te klein. Dat betekent dus dat het „kleingoed” van de lengtemeting, de meetklokken en comparatoren, volgens de normale opvatting fijnmechanisch is, maar dat we voor de constructie van complete instrumenten in hoofdzaak op onszelf aangewezen zijn.

Hoe kan men zich de bouw van een groot meetinstrument voorstellen? Ik zou U dat graag aan een model willen laten zien; een dergelijke demonstratie levert op deze plaats echter aanzienlijke moeilijkheden op. Onze onvolprezen reproductie- en fotografische dienst heeft – na overleg, voorstel en tegenvoorstel – aangeboden deze demonstratie te realiseren in de vorm van een tekenfilmpje, waarvan in deze gedrukte tekst slechts enkele beelden kunnen worden weergegeven.

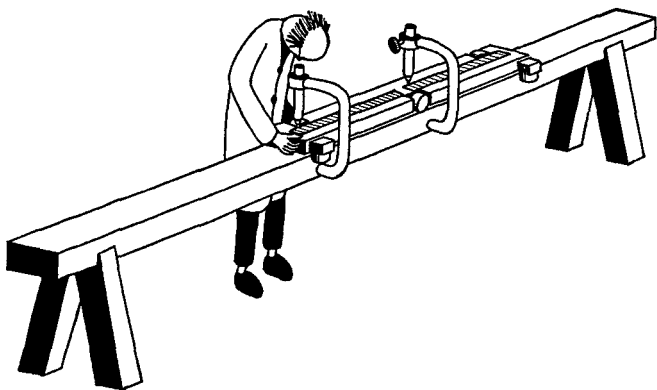
Laten we eens nagaan hoe men een instrument zou kunnen vervaardigen voor een eenvoudig probleem: het kalibreren van een lineaal, een secundaire standaard waarop de maat is vastgelegd door op regelmatige afstand aangebrachte strepen.

Als basis voor ons instrument denken we ons een balk – om de gedachten te bepalen ter lengte van vier meter. Om praktische

redenen is het nodig dat ons werkstuk – de te kalibreren lineaal – langs deze balk bewogen kan worden. Daarom brengen we op de balk een wagen aan die kan bestaan uit een rechthoekige plaat van $2\frac{1}{2}$ meter lengte, en die voorzien is van drie wielen. Gebruiken we hiervoor vier wielen, dan is de stand van de wagen onzeker; U heeft allen zeker wel eens het ongemak van een „wiebelende” tafel onderzonden. Als we de wagen op de balk plaatsen blijkt dat hij inderdaad vast staat en de verlangde beweging in de langsrichting van de balk kan maken. Helaas blijkt echter óók dat twee ongewenste bewegingen mogelijk zijn: de wagen kan zich zijdelings bewegen en de wagen kan een draaiende beweging uitvoeren. Om de geschetste moeilijkheid op te lossen, laten we ons stokpaardje, Equus kinematicus, opdraven. De denkwijze van „kinematical design” is heel eenvoudig: de beweging van een voorwerp kan worden vastgelegd door drie – onderling loodrechte – rechtlijnige bewegingen en door drie rotaties om onderling loodrechte assen. We spreken dan van zes vrijheidsgraden, en het blijkt dat door het aanbrengen van één goedgekozen steunpunt één vrijheidsgraad, één bewegingsmogelijkheid, kan worden onderdrukt. Dat betekent dus dat bij vijf steunpunten nog maar één bewegingsmogelijkheid is overgebleven, ons paardje heeft vijf pootjes nodig om netjes rechtuit te lopen. Aan onze wagen zullen we dus ook vijf wielen moeten aanbrengen. Als we dat gedaan hebben blijkt de wagen inderdaad aan onze eis – één rechtlijnige beweging – te voldoen.

Op de wagen kunnen we nu het te meten werkstuk leggen. Omdat we het werkstuk met een standaard moeten vergelijken, brengen we op de wagen ook nog een standaardlineaal aan. Voor de meting is nodig dat we de lineaalstrepen nauwkeurig kunnen waarnemen en daarom brengen we aan de balk twee microscopen aan, één links en één rechts. Nu hebben we alleen nog een waarnemer nodig.

De waarnemer kijkt in het linkermicroscop en verplaatst de wagen tot de eerste streep van het meetobject samenvalt met een merkteken in het gezichtsveld. Vervolgens begeeft hij zich naar het rechter microscop en stelt dat in op de eerste streep van de standaard. Hij gaat nu weer naar links, verplaatst de wagen tot de tweede streep zichtbaar wordt. Nu gaat hij naar rechts en ziet daar – als het meetobject foutloos is – de tweede streep van de standaard. Is de te meten lineaal niet foutloos, dan moet hij het merkteken van het tweede microscop verplaatsen. De afstand, waarover hij verplaatst heeft is de fout van de tweede streep.



Het meetprobleem is nu in principe opgelost, maar de praktijk is niet zo eenvoudig. Het komt maar al te vaak voor dat de waarnemer de beschreven wandeling – van links naar rechts en terug – meer dan 2000 maal moet verrichten om één lineaal volledig te kalibreren. Dat is uiteraard een zeer tijdrovende bezigheid en niet iedereen is tegen een dergelijke monotone taak opgewassen. Het gevaar is niet denkbeeldig dat de waarnemer tenslotte dienst weigert of – erger – zich aan de apparatuur vergrijpt.

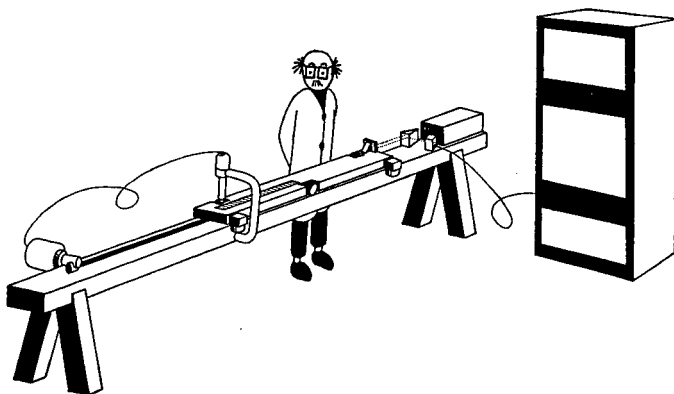
We worden dus nu geconfronteerd met het feit dat òf de waarnemer, òf ons instrument niet meer bruikbaar is en bovendien bevat de meetmethode ons niet meer zo goed. We zullen dus van de nood een deugd maken en het instrument gaan verbeteren.

In de eerste plaats gaan we het waarnemen van de strepen van ons meetobject vergemakkelijken. We brengen daartoe op het microscoop een „kop” aan, die onder meer een fotocel bevat. Deze kan informatie geven over de plaats van de streep en wel in de vorm van een elektrisch signaal. Als we op het uiteinde van de balk een motor aanbrengen die met de wagen kan worden verbonden, en die reageert op het elektrisch signaal van het microscoop, dan kan het instrument zich zelfstandig op een streep instellen, als we die tenminste door een grof-instelling in het gezichtsveld van het microscoop gebracht hebben. De verplaatsing van de wagen komt nu nauwkeurig overeen met de afstand tussen de strepen.

Om de verplaatsing te meten gaan we nu gebruik maken van een laser. Zoals ik U heb uiteengezet is een gestabiliseerde laser voor sommige toepassingen een zeer geschikte secundaire standaard. Voor de meting hebben we dan nog een interferometer nodig die in ons geval voornamelijk bestaat uit een prisma volgens Kösters. Op de wagen wordt tenslotte een spiegel aangebracht.

Als de wagen naar links verplaatst wordt, legt het licht dat op die spiegel teruggekaatst wordt, een steeds langere weg af. Het is op deze plaats niet nodig op details in te gaan; het is voor ons voldoende te weten dat, nadat het teruggekaatste licht het Kösters-prisma gepasseerd is, wisselingen in de lichtintensiteit optreden die met fotocellen gemeten kunnen worden. Daarbij treedt een maximum op, telkens als de spiegel zich over een halve golflengte van het licht heeft verplaatst.

De lichtwisselingen kunnen in elektrische vorm aan elektronische hulpapparatuur worden toegevoerd. Een voor dit doel geschikte teller registreert één puls voor een verplaatsing van de wagen over ongeveer 79 nm, dat is afgerond 0,0001 mm. De gemeten afstanden kunnen in ponsband worden vastgelegd. Als we dit alles gedaan hebben, kunnen we het apparaat geheel automatisch laten werken.



Deze methode is héél aantrekkelijk en daarom hebben we het apparaat ook werkelijk gebouwd. Het instrument werkt inderdaad geheel automatisch; de waarnemer kan desgewenst op de goede werking toezien. Op een oscilloscoopscherm kan hij het uitgangssignaal van het fotoëlektrisch microscoop zien – iedere 2 seconden verschijnt daar een nieuwe streep. De aanwijzing van de teller wordt geponst – iedere 2 seconden wordt daar een getal van 8 cijfers vastgelegd. Met behulp van een door onze collega Touwen geschreven rekenprogramma kan het rekencentrum van onze T.H. de metingen in luttele seconden uitwerken en desgewenst in een grafiek vastleggen. De metingen zijn nauwkeurig tot op minder dan 0,0002 mm, de herleidbaarheid naar de primaire standaard is verzekerd op 1:10.000.000. Tot zover over ons instrument.

Ik heb getracht U een indruk te geven van mijn vak aan de hand van enkele uiteenliggende onderwerpen. De vraag of die ook met onderwijs iets te maken hebben zou ik willen beantwoorden door te constateren dat ook aan deze schijnbaar wat extreme gebieden studenten hebben medegewerkt in het kader van het keuzevak lengtemeting.

Ik dank U voor Uw aandacht.

Literatuur

- 1) Danloux-Dumesnils, M. Etude critique du système métrique
Gauthier - Villars, Paris 1962.
- 2) Zevenboom, K.M.C. Theorie over de ontwikkeling van de
Nederlandse voet- en ellematen.
N.V. Noordhollandse uitgevers mij.
Amsterdam 1964.
- 3) Engelhard, E. en R. Vieweg Über die neue Definition des Meters auf
Grund einer Lichtwellenlänge.
Zs. f. Angew. Ph. 13 (1961)-580.
- 4) Baird, K.M. en L.E. Howlett The international length standard.
Appl. Opt. 2 (1963)-455.
- 5) Mielenz, K.D., K.F. Nefflen, W.R.C. Rowley, D.C. Wilson en E. Engelhard Reproducibility of Helium-Neon laser
wavelength at 633 nm.
Appl. Opt. 7 (1968)-289.
- 6) Hanes, G.R. en K.M. Baird J₂-controlled He-Ne laser at 633 nm;
Preliminary wavelength.
Metrologia 5 (1969)-32.
- 7) — The international practical temperature
scale of 1968.
Metrologia 5 (1969)-35.
- 8) Jong, D. de Fine mechanics: the progress from craft
to science.
Trans. Soc. Instr. Techn.
September 1967 - p.113.
- 9) Pollard, A.F.C. The kinematical design of couplings in
instrument mechanisms.
Hilger en Watts. London, 1951.