

# Wegen met behulp van trillende snaren\*

**Beschreven wordt het principe en de mechanische uitvoering van een "massameetdoos", waarmee de verhouding van een onbekende massa tot een bekende massa wordt omgezet in een verhouding van de frequentie van twee trillende snaren.**

**Deze frequentieverhouding is langs elektronische weg gemakkelijk te presenteren als weegresultaat of anderszins te verwerken, zoals bij een weegschaal die met de gekozen prijs per gewicht het meetresultaat omzet in het te betalen bedrag.**

## Inleiding

Het wegen is meestal één van vele hulpmiddelen om een bepaald doel te bereiken. Dit komt heel duidelijk bij "industriële wegen" naar voren als stortgoed of vloeistof moet worden gedoseerd of doorlopend moet worden bemonsterd op het gewicht om een proces te sturen.

Naast nauwkeurig en betrouwbaar functioneren wordt dus ook snelheid verlangd. Als praktische maat voor de snelheid van een weeginrichting geldt het aantal betrouwbare metingen per minuut.

De tijdsduur van het feitelijke wegen wordt bepaald door de trillingstijd van het systeem. Moderne weegsystemen onderscheiden zich vooral door de manier waarop deze trillingstijd is teruggedrongen. Mogelijk zijn tweehonderd wegingen per minuut, zodat de capaciteit van een installatie in feite wordt bepaald door het transportmechanisme voor het weggoed, zoals bijvoor-

beeld doseerinstallaties. Dit kon nooit worden bereikt met behulp van conventionele weegconstructies met een pendulumsysteem dat onder invloed van de last uitwijkt en daarna "inspeelt". Om sneller te kunnen wegen kwamen de weinig "meegevende" of "harde" meesystemen in gebruik. Het signaal wordt dan bijvoorbeeld gegeven door een piezoëlektrisch kristal, een inductie-



*Figuur 1 Berkel universele weegschaal, type DS-1. De weging geschiedt met behulp van de besproken standaard "massameetdoos"*

\* Redactionele bewerking van een lezing gehouden ter gelegenheid van het 85-jarig bestaan van de Leidse Instrumentmakerschool door de heer C. Langerak, destijds medewerker ontwikkelingsafdeling Van Berkel Nederland BV.

Het is vermeldenswaard dat op een "Fijnmechanische dag" in 1967 Dr. M. Gallo, van het ingenieursbureau Wirth Gallo en Co. te Zurich, een lezing hield over "Een nieuw elektrodynamisch weegprincipe" waarvan het verslag in *Mikroniek* nr. 11/12 1967 is geplaatst. Hoewel constructief veranderd, is de deugdelijkheid en de grote toepasbaarheid van het principe bewezen in talrijke typen van wegwerktuigen.

Wij bedanken de heren T. Verhagen en H.P. Diebels van Van Berkel voor hun mondelinge toelichting en hulp bij het bewerken. In het bijzonder de heer Diebels, afdeling Ontwikkeling Van Berkel, die bij zijn enthousiaste uitleg het principe en de uitvoering van de beschreven massameetdoos liet zien als momenteel het beste compromis in steeds voortgaande ontwikkelingen.

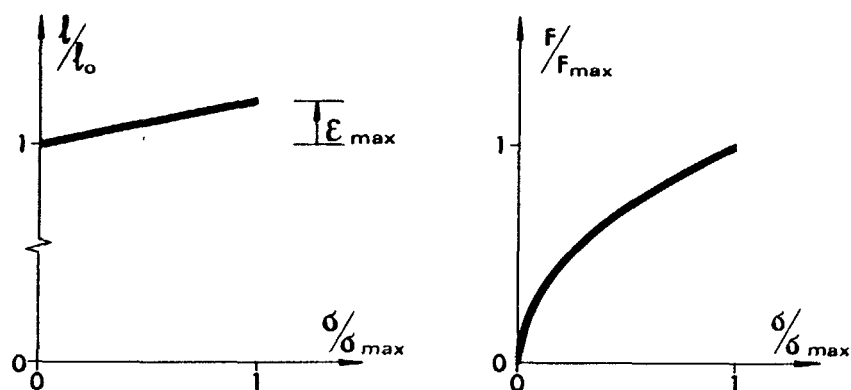
ve verplaatsingsopnemer, of met behulp van stugge elastische elementen met rekstrookjes die de vervorming meten. Van deze laatste – ook wel loadcellen genoemd – zijn thans diverse typen in de handel verkrijgbaar.

Er zijn andere "wegarme" dynamometers (dynamometer betekend krachtmeter) bekend, zoals de dynamometer waarbij de kracht ten gevolge van de last – het gewicht – elektrodynamisch wordt gecompenseerd met behulp van een spoel die in een vast magneetveld beweegt en waar een stroom doorvloeit die een maat is voor het te meten gewicht. Het signaal is groot en het systeem is betrouwbaarder omdat gemeten wordt volgens het principe van de "vaste evenwichtstand", zoals bij de klassieke balans.

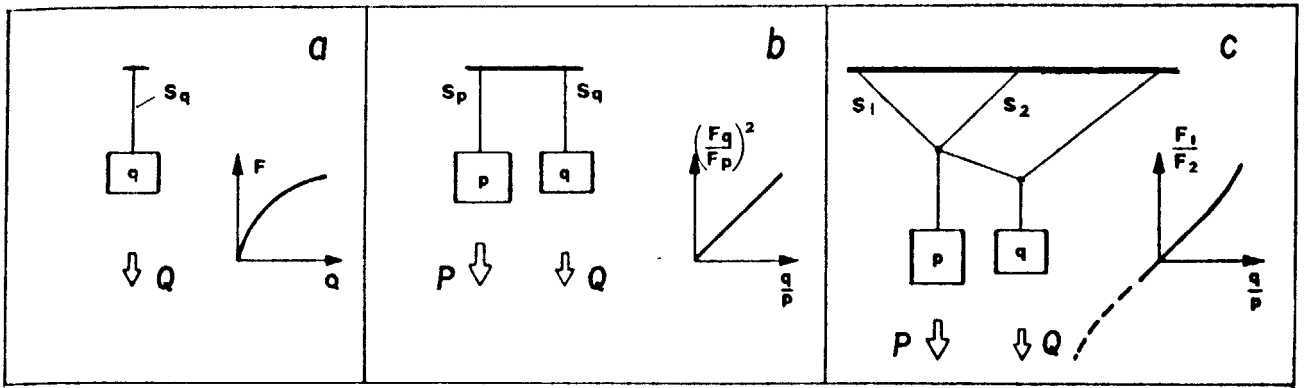
Bij het te beschrijven weegprincipe van Van Berkel wordt ook een groter uitgangssignaal verkregen, en wel door gebruik te maken van het verband tussen de frequentie van een trillende snaar en de kracht waarmee de snaar wordt gespannen. Met toenemende belasting neemt de eigenfrequentie van een trillende snaar toe en deze belasting-analoge eigenfrequentie wordt gemeten.

Dit verband is fysisch goed bepaald, onafhankelijk van vocht en stof en zeer gevoelig voor een verandering van de belasting – denk aan het stemmen van een snaarinstrument.

In figuur 2 is links een elastische krachtmeter aangegeven met de karakteristieke lengte  $l_0$  waarbij slechts een kleine elastische rek  $\epsilon$  wordt gemeten, bijvoor-



*Figuur 2 Links: de lineaire karakteristiek van een elastische krachtmeter. Rechts: de niet-lineaire karakteristiek van het verband frequentie-spankracht bij een trillende snaar.*



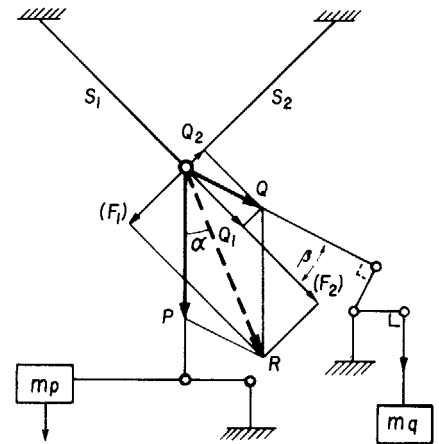
Figuur 3 a de frequentie van de snaar  $S_q$  is een functie van de trekkracht b de frequentieverhouding van twee identieke snaren is een functie van de massaverhouding  $q/p$  c is constructief- en regeltechnisch een betere uitvoering van b, de onbekende massa verhoogt de spankracht in  $S_1$  en verlaagt deze in  $S_2$

beeld met behulp van rekstrookjes. Rechts is te zien dat bij een gelijk verschil in trekspanning, van 0 tot  $\sigma_{max}$ , de trillingsfrequentie van een snaar verandert over een groot gebied, van 0 tot  $F_{max}$ . Het zal blijken dat volgens dit principe een "massameetdoos" kan worden gemaakt die praktisch onafhankelijk is van omgevingstemperatuur, uitwendige trillingen, scheefstand tot 5% verdraagt, een kleine weegtijd heeft en door het aanbrengen van extra hefboomen toepasbaar is voor zwaardere gewichten. De massameetdoos blijkt bijzonder geschikt als inbouw eenheid bij weegschalen voor industriële toepassing. Echter, in plaats van de vrijwel lineaire karakteristiek van de rekmetser - Wet van Hooke - heeft het verband van de frequentie van een snaar en zijn spankracht een niet-lineaire karakteristiek.

**Uitwerking van het principe**

In figuur 3a wordt de trillende snaar gevormd door een metalen draad  $S_q$  bevestigd aan een vast frame en op trek belast door het gewicht  $Q$  van de te meten massa  $q$ . Als de snaar wordt aangelagen dan trilt deze transversaal, bij voorbeeld met de grondfrequentie  $F$  - dat is de eerste mode van de mogelijke trillingen. In de grondfrequentie heeft het middendeel de grootste amplitude, zoals is getekend in figuur 5 links.  $F$  is met grote benadering evenredig aan de wortel uit de op de snaar uitgeoefende spankracht  $Q$ . Zijn lengte  $l$ , doorsnede  $A$  en soortelijke massa  $\rho$  zijn constanten. In formulevorm:  $F = n/2l \sqrt{Q/A/\rho}$  met  $n=1$  voor de grondfrequentie - eerste mode. De frequentie verandert dus niet lineair met de belasting. Deze opstelling kan wezenlijk worden verbeterd door het gebruiken van twee

identieke snaren, zie figuur 3b, en een van de snaren,  $S_q$ , te belasten met het veranderlijke gewicht  $Q$  van de te meten massa  $q$  en de andere snaar,  $S_p$ , te belasten met het constante gewicht  $P$  van een referentiemassa  $p$ . De verhouding van  $Q$  en  $P$  levert een massaverhouding op omdat de versnelling van de zwaartekracht wegvalt. Om daaruit de onbekende massa  $q$  af te leiden kan men de verhouding van de twee snaarfrequenties kwadrateren,  $F_q^2/F_p^2$ . Deze gekwadrateerde frequentieverhouding is evenredig aan de gezochte verhouding van de twee massa's,  $q/p$ . Het voordeel van deze verhouding is dat de temperatuurinvloed gering is, maar het nadeel dat bepaalde fouten worden gekwadrateerd, De constructie van zo'n meetsysteem is echter niet aantrekkelijk en de verwerking van het signaal is gecompliceerder. Praktischer is de in figuur 3c aangegeven constructie. De twee snaren  $S_1$  en  $S_2$  worden door het gewicht  $P$  van de referentiemassa in gelijke mate voorgespannen, terwijl het gewicht  $Q$  van de te meten massa, in een bepaalde verhouding, de snaar  $S_1$  verder belast en tegelijkertijd de snaar  $S_2$  gedeeltelijk ontlast. Dit is uitgewerkt in het vectordiagram van de krachten  $P$  en  $Q$  in figuur 4, waarin de ontbondenen  $Q_1$  en  $Q_2$  van de kracht  $Q$  zijn aangegeven. Het blijkt nu dat als de hoek  $\beta$ , waaronder de kracht  $Q$  aangrijpt, zodanig is gekozen dat de ontbondenen  $Q_1$  op de snaar  $S_1$  driemaal zo groot is als de ontbondenen  $Q_2$  op de snaar  $S_2$ , de verhouding van de twee snaarfrequenties,  $F_1/F_2$ , in een bepaald gebied een lineaire functie is van de verhouding van de twee massa's,  $m_q/m_p$ . Indien de belasting van nul tot maximum in het gebied van het buigpunt wordt gekozen, zie de karakteristiek in



Figuur 4 Krachtverdeling over de beide meetsnaren, alleen de verhouding van  $F_2$  en  $F_1$  bepaalt de hoek  $\alpha$ . De weegkarakteristiek wordt bepaald door de verhouding  $Q_1/Q_2$

figuur 3c, is de functie lineair. Bij een iets grotere of kleinere verhouding dan van  $Q_1/Q_2 = -3$  verandert de curve omdat de plaats van dit buigpunt verschuift. Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt bij het compenseren van andere a-lineariteiten in het totale systeem. Andere keuzes van de verhouding  $Q_1/Q_2$  zijn zinloos tot onmogelijk. Een optimaal gejusteerd snarensysteem heeft een grootste lineariteitsfout van 0,2 promille wanneer de toegevoegde spankracht  $Q_1$  op de eerste snaar ongeveer een tiende deel is van zijn voorspanning. De hoeken  $\alpha$  en  $\beta$  in het diagram veranderen niet bij het scheefstellen van de weegschaal - de verhouding van  $F_1$  en  $F_2$  blijft constant. Dit betekent dat het systeem in principe ongevoelig is voor kantelen. Hoewel ook andere effecten meetellen is een scheefstand van 5 op 100 cm mogelijk en is er geen waterpas vereist.

**De trillende snaar**

Bij de zogenaamde "ideale" snaar

wordt de frequentie  $F$  bepaald door de reeds gegeven betrekking.

$$F = n/2l \cdot \sqrt{Q/A \cdot \rho}$$

Als hierin de snaar lengte onder het wortelteken wordt gebracht ontstaat de voor ons doel overzichtelijkere vorm.

$$F = n/2 \cdot \sqrt{Q/l \cdot M}$$

waarin  $M$  de totale massa A.l. $\rho$  van de snaar is.

Omdat de trekkracht  $Q$  en de snaarmassa  $M$  temperatuurafhankelijk zijn blijkt uit het tweede lid dat de temperatuurafhankelijkheid van de frequentie wordt bepaald door de lengte van de snaar

De twee meetsnaren zijn identiek en op gelijke temperatuur en omdat het de verhouding van hun frequenties betreft, vallen de snaarlengten weg. In principe is hierdoor het systeem niet temperatuurafhankelijk

De gegeven formule geldt voor een volledig slappe snaar. Echter, de feitelijke snaar is niet slap en daardoor komt er onder het wortelteken een extra term bij met de dimensie van een kracht de knikkracht van de snaar.

Dat betekent dat in de verhouding van de twee frequenties de lengte  $l$  en de E-modulus van het snaarmateriaal wel voorkomen, dus niet tegen elkaar wegvallen, waardoor er een temperatuurafhankelijkheid ontstaat

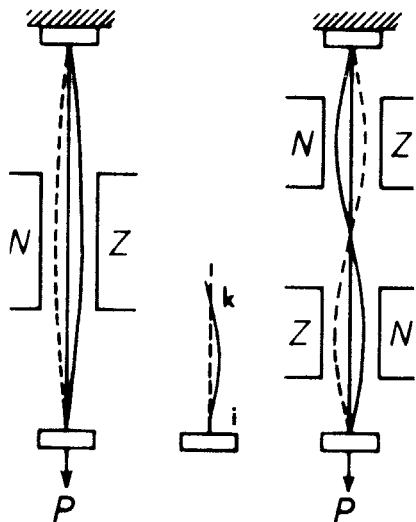
Door het aanbrengen van een tegenkracht ter grootte van deze knikkracht kan de snaar weer beschouwd worden als een slappe snaar en gelden bovengaande formules weer. Deze tegenkracht wordt aangebracht door de twee veren 20 en 21 in figuur 8.

De "snaar" is uitgevoerd in de vorm van een band met een rechthoekige doorsnede van  $0,36 \times 0,10$  mm om te bevorderen dat het trillen steeds plaats vindt in het vlak van de minste stijfheid. Hierbij is het van belang dat de snaarafmetingen zodanig zijn gekozen dat de frequenties in de stijve richting niet liggen in het gebied van de meetfrequenties in de slappe richting.

Van deze "snaar" wordt niet de grond- of eerste-orde trilling maar de tweede-orde trilling gebruikt, dat wil zeggen een trilling met twee buiken, dus met  $n=2$  in de formule; zie figuur 5 rechts. Hiermede is bereikt dat er voldoende snaarlengte is om de invloed van het inklemmen te verminderen en de frequentie van het meetgebied in de buurt van 15 kHz ligt om geluidsirritatie te voorkomen

In de beschreven uitvoering zijn de parameters zodanig gekozen dat de meetfrequenties van de voorgespannen snaren in een band liggen tussen de 15 en 17 kHz.

Nog opgemerkt wordt dat bij een snaar



Figuur 5 Links grondtrilling. Rechts, de gebruikte trilling van de tweede orde. Midden vervorming bij de inklemming en vrijheid bij een knoop

die in een hogere mode trilt een knoop in feite een ideaal inklem punt is: zie punt  $k$  in tegenstelling tot punt  $i$  in figuur 5.

Als laatste wordt de externe invloed van de luchtweerstand vermeld. Niettegenstaande het kleine oppervlak kan de demping van de snaar door deze - veranderlijke - invloed niet worden verwaarloosd. Deze demping heeft een negatieve invloed op de kwaliteitsfactor van de trilling - het betekent energieverlies dat moet worden toegevoegd door de oscillator.

### Uitvoering

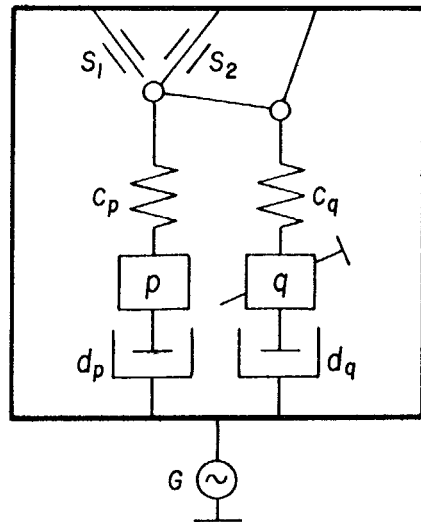
Een rustig opgesteld meetsysteem zal na het opplaatsen van een gewicht na 0,3 seconde door middel van drie metingen met een duur van 100 ms de juiste massaverhouding  $p/q$  weergeven

Bij uitwendige verticale stoortrillingen ontstaan op de massa's  $p$  en  $q$  traagheidskrachten. Voor een foutloze meting moeten de op het snarensysteem werkende krachten, zoals de twee storende traagheidskrachten, in dezelfde verhouding staan als de twee statische gewichten  $P$  en  $Q$ .

Dit is voor langzame stoortrillingen van de bodem, langzaam ten opzichte van de resonantiefrequentie van de complete weegschaal, altijd het geval. De massa  $q$  en de voorspanmassa  $p$  trillen dan in fase ten opzichte van elkaar

Over het gehele weegbereik en voor het brede spectrum van de optredende stoortrillingen blijkt deze evenredigheid slechts bij benadering te verwezenlijken.

Zonder speciale maatregelen leiden de stoortfrequenties, vooral groter dan 20



Figuur 6 Uitwendige trillingen worden vermindert met behulp van elastische "serie-elementen" en visceuze "shunts".

Hz, tot afwijkingen van de juiste meetwaarde. De massa's  $q$  en  $p$  trillen niet meer in fase.

Met behulp van een veer en een visceus dempingsysteem in elk van de kanalen kunnen de twee storende traagheidskrachten worden afgeleid naar het frame. In figuur 6 is dit aangegeven door  $c_p$  en  $d_p$  en door  $c_q$  en  $d_q$ , de omringing geeft het frame van de weegschaal aan

De fout door uitwendige trillingen is daardoor praktisch tot nul terug te brengen, ondanks dat een van de massa's, de massa  $q$ , elke waarde in het meetgebied kan hebben

Tussen de demping- en veerparameters moet een compromis worden getroffen dat wordt bepaald door de gehele weeginrichting. Om flexibiliteit in weegschaltypen en weegbereik te bereiken met een gestandaardiseerde massameetdoos, is alleen de demping van de referentiemassa ondergebracht in de meetdoos en de aangepaste demping met veer elders in de constructie van de weegschalen opgenomen

Gekozen is voor een overkritische demping. Dit betekent een langere inspeeltijd, dus lagere weegsnelheid ten opzichte van een weegschaal zonder demping en geen bodemtrillingen.

De keuze voor een overkritische demping heeft toch geleid tot een extreem hard weegsysteem met een meettijd van 100 ms ondanks de kunstmatig aangebrachte zakking van  $\sim 0,5$  mm van het plateau onder vollast.

Deze standaard-massameetdoos, beschreven wordt het type ED-60, is berekend voor een drukkracht van 30 N of 60 N die naar keuze wordt verdeeld in 3000 of 6000 stappen

Met dezelfde massameetdoos en dezelfde elektrische voeding/oscillator kan dan met behulp van verschillende, gestandaardiseerde hefboomen een reeks industrieweegschalen worden samengesteld met weegvermogens van 3000 gram tot 3000 kilogram; bijvoorbeeld de plateau-weegschaal type DS-1 van figuur 1, met een capaciteit van 3 kg en een aflezing van 1 g

**Constructie**

De massameetdoos is inderdaad een doos, ~ 12 x 8,5 x 3,5 cm, met deksel. De messingen doos met een wanddikte van 3 mm vormt een starre basis waarin constructie-onderdelen zijn vastgeschroefd, zie figuur 7

Figuur 8 toont schematisch het verband tussen deze onderdelen.

De snaren  $S_1$  en  $S_2$  worden respectievelijk belast door het gewicht van de referentiemassa  $p$  via het "referentiekanaal P" en door het gewicht van de te meten massa  $q$  via het "lastkanaal Q"

Elke snaar passeert twee tegengesteld gerichte magnetische velden

In figuur 8 zijn afzonderlijke magneten geschetst maar in figuur 7 is te onderscheiden dat in de uitvoering de velden zich bevinden tussen twee poolschoenen en één ankerplaat en in stand worden gehouden door één stukje permanent-magnetisch materiaal,  $M_1$  en  $M_2$

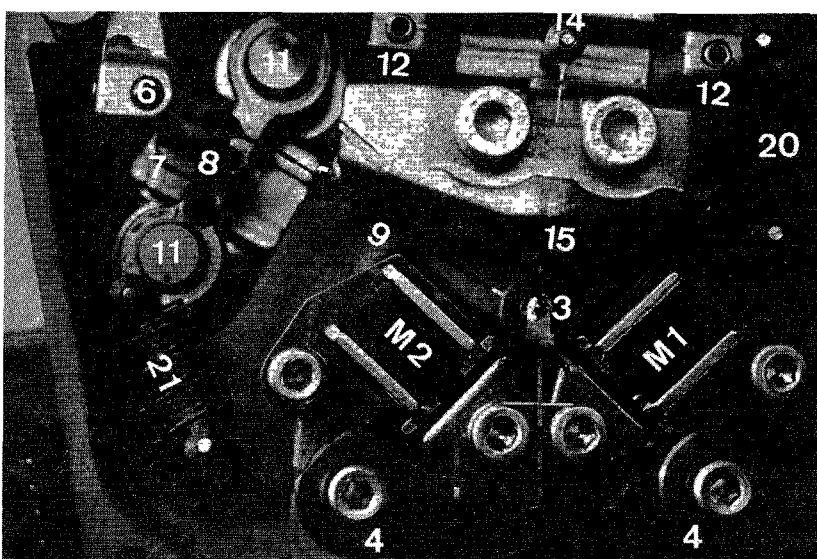
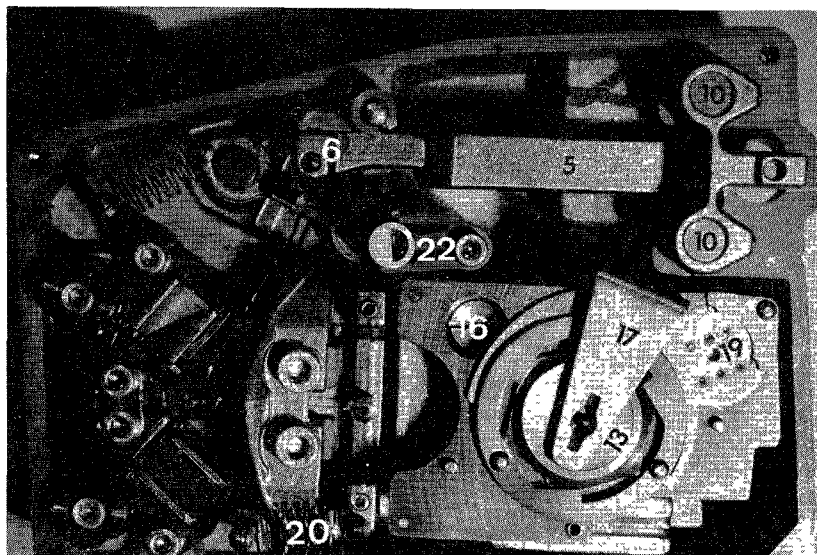
Een snaar wordt in trilling gebracht door een wisselstroom die door de snaar loopt waarbij, volgens de wet van Lorenz, onder invloed van de twee tegengesteld gerichte velden twee buiken ontstaan in het verticale vlak

Elke snaar vormt met drie weerstanden een brugschakeling waarvan het signaal wordt versterkt. Het is een ongedempt systeem waarin de snaar met zijn resonantiefrequentie gaat trillen. Een begrenzingsschakelaar is nodig om te voorkomen dat de snaar tot een te grote amplitude zou opslingeren.

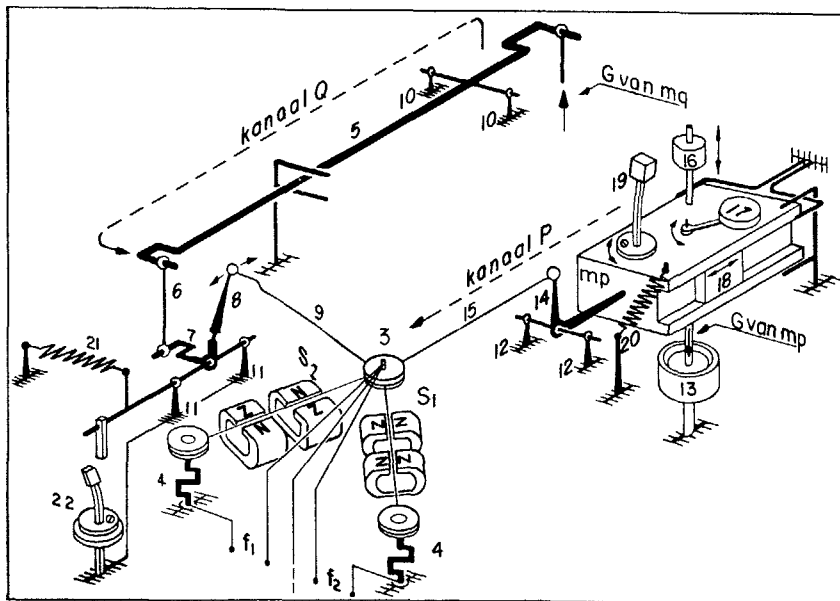
De frequentie wordt bepaald door het aantal nul-doorgangen per tijdseenheid te tellen. Alle schakelingen zijn gemonteerd op een kleine printplaat bevestigd tegen de onderkant van de doos.

De stroom wordt aan de snaren toegevoegd via het knooppunt van de snarenster 3 en de respectievelijke spankopen 4 die geïsoleerd vastgeschroefd zijn aan de bodem

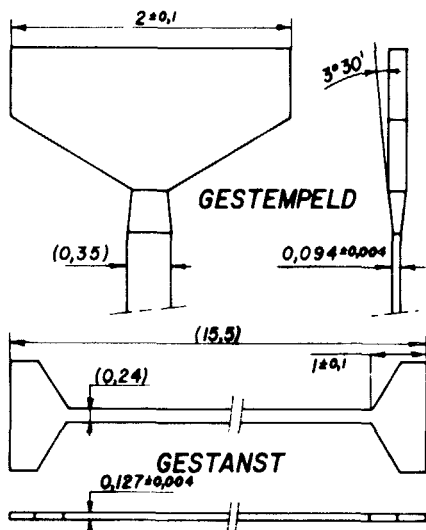
In figuur 7 is te onderscheiden dat er naar het knooppunt drie elektrische verbindingen lopen waarvan in figuur 8 duidelijk wordt dat de middelste geleider is verbonden met het nulvoltage-niveau en de twee anderen met de "senselijnen" waarmee de elektrische spanning over de snaar wordt gemeten, die vervolgens wordt versterkt.



Figuur 7 Boven geopende massameetdoos op praktisch ware grootte met rechtsboven het punt waar het meetsysteem in verbinding staat met de - varierende - weegschaalconstructie. Onder het gedeelte met de meetsnaren



Figuur 8 De constructie van de massameetdoos schematisch voorgesteld



Figuur 9 Snaar Onder: gestanst Boven, na-geperst

Belangrijk is dat de snaren zich zoveel mogelijk identiek zullen gedragen. Om dit te bereiken hebben zij de vorm zoals getekend in figuur 9. Na het stansen uit berylliumkoperen plaat wordt het bandgedeelte dunner geperst en gekalibreerd alvorens te harden.

De gevormde overgang van band naar kopgedeelte geeft een goed gedefinieerd inklemmingspunt.

Figuur 10 boven toont de gemonteerde snarenster. Met behulp van een mal worden de twee snaren en de twee trekbanden volgens strenge voorschriften tezamen geniet; zie figuur 10 onder. Het nieten geschiedt zodanig dat er na enige plastische vervorming nog iets ruimte overblijft tussen het middendeel a en de drukring b, zodat er zekerheid bestaat dat de inklemming kwalitatief goed is.

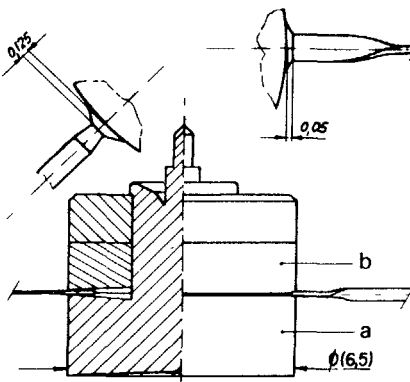
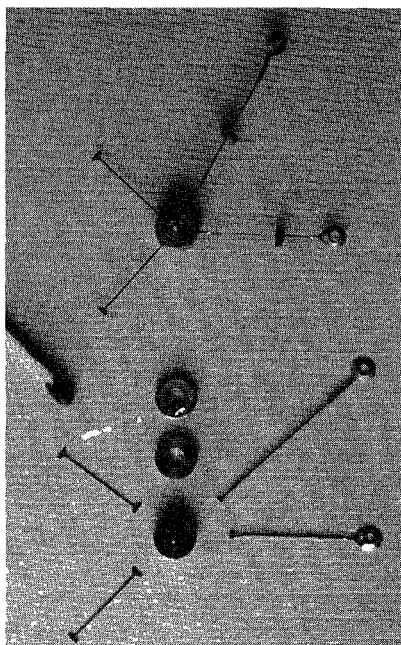
Het dunne gedeelte op het middendeel dient voor het vast solderen van de elektrische aansluiting.

Aan het andere einde wordt de snaar ook ingeklemd, nu echter met behulp van de spankracht van een schroef.

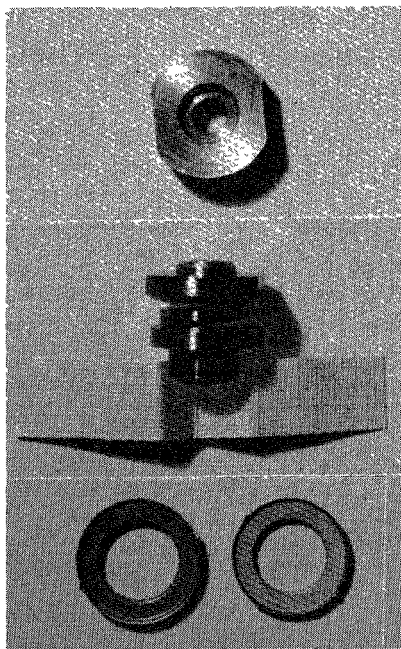
De kwaliteit van de inklemmingen is een van de factoren die de reproduceerbaarheid van het snarensysteem bepalen en daarmee de grens van het meetbereik. Onder belasting vindt op het randje van een inklemming altijd enige elastische uitstulping van de bandkop plaats en na ontlasting een vertraagde terugkeer. Is de inklemming niet goed dan ontstaat er onaantoonbare hysteresis.

De spankoppes dienen tevens als filter in het gebruikte frequentiegebied. Zij zijn bewust ontworpen als een massa-veersysteem met een lage resonantiefrequentie.

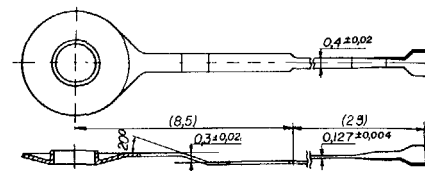
Deze frequentie mag niet in het gebied van de meetfrequentie liggen omdat



Figuur 10 Snarenster (3)



Figuur 11 Onderdelen spankop; het cilindrische middendeel is uitgevoerd als spierfilter voor stoortrillingen (4) Onder elektrische isolatieringen

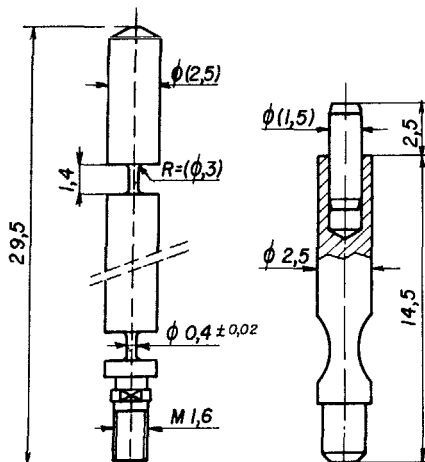


Figuur 12 Lastband (9)

dan trillingsenergie wordt overgedragen aan de spankoppes en dientengevolge de frequentiemeting van de snaar onjuist is.

De veerwerking wordt bereikt door het bovenelkaar aanbrengen van twee tegengesteld gerichte sleuven.

Het lastkanaal wordt gevormd door een hefboom 5, de scharnierstaaf 6 en een knie 7 met een buigstaaf 8 waaraan de lastband 9 is bevestigd. De lastband, afgebeeld in figuur 12, is in zijn stugge deel bij de buigstaaf 8 bajonetvormig gebogen. Tijdens het belasten zal de bajonet zich een weinig strekken en daarbij de werkzame armlengte van de kniehefboom 7 enigszins veranderen.



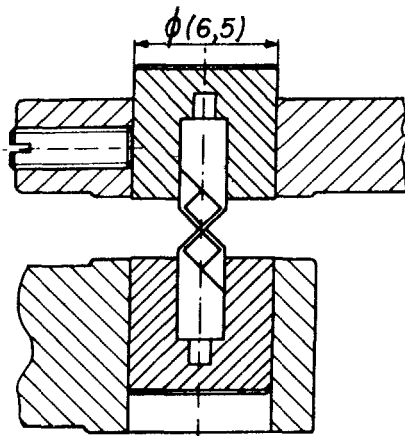
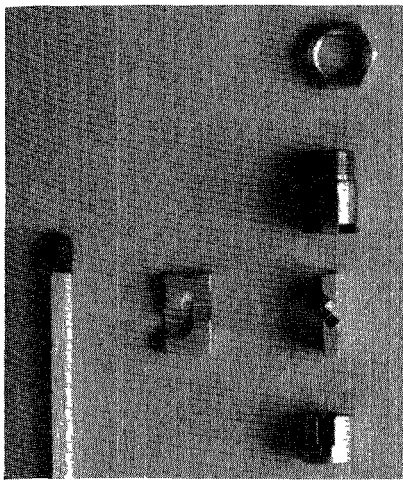
Figuur 13 Links veerscharnierstaaf (6) Rechts: buigstaaf met saffieren isolatiestift (8)

om kleine lineairiteitsfouten te compenseren.

Het instellen van de belangrijke hoek van aangrijping  $\beta$ , in het vectordiagram figuur 4, bij het justeren geschiedt door het nabuigen van de berylliumkoperen buigstaaf 8 in een vlak loodrecht op de richting van de lastband - in figuur 8 aangegeven met twee pijlen.

De buigstaaf, zie figuur 13 rechts, is voorzien van een ingeperste saffieren stift waar de lastband overheen wordt geperst en daardoor elektrisch is geïsoleerd.

Een veerscharnierstaaf 6, links getekend in figuur 13, zorgt voor een elastisch scharnierende krachtoverbrenging van de lasthefboom 5 naar de kniehefboom 7.



Figuur 14 Kruisveerscharnier met spantangen

De draaipunten 10 van de lasthefboom, 11 van de kniefhefboom en 12 van de referentiemassa zijn kruisveerscharnieren.

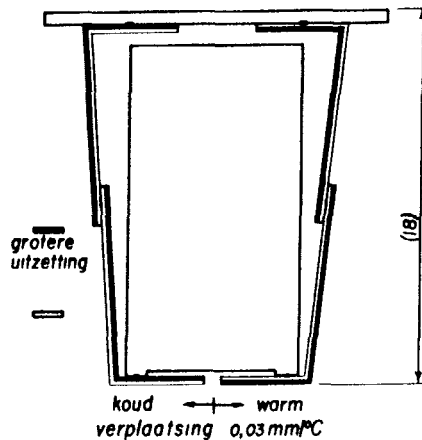
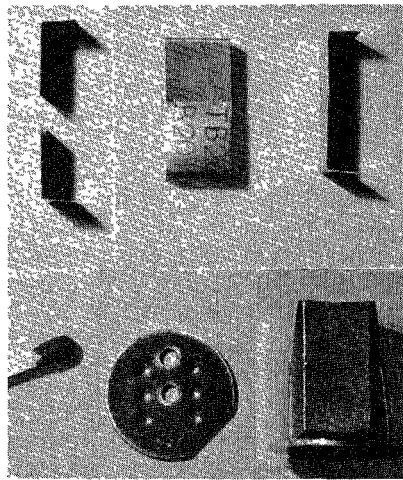
De kruisveerscharnieren, vervaardigd van berylliumkoper, zijn 6 mm breed, 2 mm dik en 10 mm hoog; zij worden vastgezet met behulp van uitwendig zwak-conische spantangen, zie figuur 14.

In figuur 7 zijn de koppen te zien van de spantangen voor de verticale kruisveerpennen 10 en 11

Het referentiekanaal P wordt gevormd door een massa met demper 13, de knie 14 en de voorspanband 15; de band ligt in het vlak van de snaren

De voorspanband is uitgevoerd zoals de lastband 9, behalve dat het eigenlijke bandgedeelte 90° is gedraaid zodat bij het justeren van de band in het horizontale vlak geen grote krachten op het sterpunt worden uitgeoefend

Om de eigenfrequentie van de voorspanband te verlagen is een rubberen schijfje eromheen gemonteerd; dit gebeurt ook bij de lastband, is echter in figuur 7 niet aanwezig



Figuur 15 Temperatuurcompensator (19)

De voorspanband 15 loopt vrij door een op de bodem van de doos vastgeschroefd klemblok dat één zijde klemt van de horizontale kruisveerscharnieren 12. Hun andere zijde wordt geklemd door een juk dat tevens het horizontale deel van de knie 14 vormt

Het verticale deel is uitgevoerd als "buigstaaf" eveneens met een saffieren pen om de voorspanband geïsoleerd te kunnen bevestigen

Aan de andere zijde van het juk is de referentiemassa zodanig bevestigd, dat het mogelijk is het meetbereik grof in te stellen met behulp van het gewicht 18; dit beïnvloedt dus de stijfheid van de meetkarakteristiek.

Het gewicht 17 dient als fijninstelling voor dit meetbereik; in de bovenste foto van figuur 7 is dit de taps-uitlopende lip van de ring om de demping 13

Het zwaartepunt van de totale referentiemassa kan gebracht worden in het horizontale vlak door zijn scharnieren 12-12 met behulp van het justergewicht 16 te verschuiven

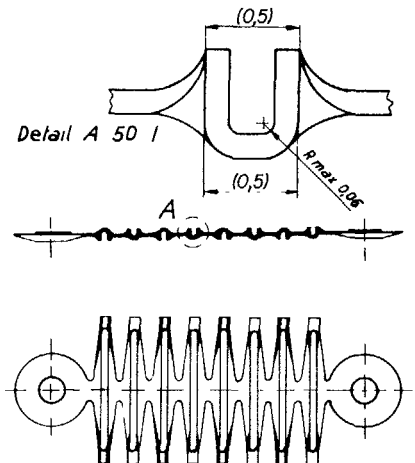
De dempingsinrichting is ondergebracht in een grote boring die door het referentieblok loopt. De uitvoering is

zodanig dat de dempingskrachten zoveel mogelijk aangrijpen in het horizontale vlak door de scharnieren en storende koppels op het referentieblok worden tegengegaan.

De invloed van de temperatuur, in het bijzonder op de snaren, wordt gecompenseerd door het justergewicht 19 dat is opgebouwd met behulp van twee paar bimetalen strips, die het gewicht horizontaal verplaatsen; zie figuur 15. Het geheel is achter in het referentieblok geplaatst; door draaien om een verticale as is de invloed van de gewichtsverplaatsing tijdens verandering van de temperatuur in te stellen. Een tweede temperatuurcompensator 22 beïnvloedt het lastkanaal en dient voor nulcompensatie. De constructie is zodanig dat er een instelbaar, temperatuurafhankelijk hefboomkoppel op de knie 7 werkt

In de bovenste foto van figuur 7 is links van het getal 22 de kop te zien van een cilindervormig onderdeel met een halvevemaanvormige opening. Hierin is een naar beneden stekende, bimetalen strip gepuntlast met aan het einde een stukje weekijzer. Het geheel is verticaal draaibaar in te stellen ten opzichte van een stukje permanent magnetisch materiaal bevestigd aan de knie 7.

De compensatie voor de stijfheid van de meetsnaren wordt tot slot behandeld. Deze geschiedt door het instellen van een drukkracht op de snaren met behulp



Figuur 16 Compensatieveer voor de stijfheid van de meetsnaren (20, 21)

van een trekkracht van de veren 20 en 21, die wordt "afgetrokken" van de kracht die door het referentieblok op de last wordt uitgeoefend.

Deze veren, zie figuur 16, zijn door hun vormgeving stijf in het verticale vlak; ze zijn vervaardigd van "Thermolast" een materiaal dat op "Invar" lijkt en waarvan de elasticiteitsmodulus bij de gebruikstemperaturen weinig verandert.



Om het meetsysteem te beveiligen tegen te grote uitslagen, bij voorbeeld door schokken, is de beweging van het referentieblok en de hefboom 5 beperkt door aanslagen. Dit is in figuur 8 schematisch aangegeven met draadconstructies. In de daar aangegeven richtingen geschiedt dit in de doos met behulp van aanslagschroeven, zij zijn echter niet te zien in figuur 7.

De ingestelde bewegingsbeperking voor de hefboom 5 is iets groter dan nodig is voor het ingebouwde "meegeven" van 0,3 mm onder de vollast van drie kilogram, maar ligt ruim binnen de elasticiteitsgrenzen van het meetsysteem. Op een dergelijke manier is ook de weegconstructie beschermd en bij

transport behoeven weegschalen met een massameetdoos in het algemeen niet te worden gearreterd. Terugkijkend, blijken de meeste van de getroffen mechanische maatregelen nodig te zijn voor het "rechtrekken" van de weegcurve, dus de evenredigheid van de kracht met de frequentie van de snaren.

Mechanische justage zoals beschreven is echter manafhankelijk en het justeren door middel van buigen is geen ideale methode.

Het "rechtrekken" geschiedt sinds kort met behulp van elektronica door middel van een polynoombenadering. Het lijkt duur, maar ook duur is het wanneer men de constante afwijkingen laat voor wat

zij zijn en de schaalverdeling zou aanpassen.

Tot op heden bezitten de nauwkeurige d.w.z. weegschalen met een nauwkeurigheid van 1 op  $10^5$  - en betrouwbare weegschalen een elektro-mechanisch meetsysteem.

Dit geldt ook voor de huidige plateauweegschaal voor PTT-kantoren waar de beschreven "massameetdoos" is ingebouwd. De belasting van deze weegschaal gaat tot 30 kg en voorzien is in een digitale aflezing. Van 0 tot 3 kg kan afgelezen worden in stappen van 1 gram, van 3 tot 15 kg in stappen van 5 gram en ten slotte van 15 tot 30 kg in stappen van 10 gram. De nauwkeurigheid/reproduceerbaarheid is 1 op  $5 \cdot 10^4$ .

## Halfgeleider met hoge prestaties

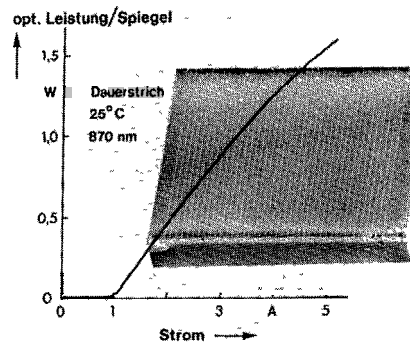
In de researchlaboratoria van Siemens AG is het gelukt halfgeleiderlaserarrays te ontwikkelen met een zeer hoog optisch uitgangsvermogen en goede coherentie-eigenschappen. Hiermee zijn voor de laserdiode, naast de optische communicatietechniek, nieuwe toepassingen mogelijk, die tot nu toe door een te gering vermogen niet mogelijk waren.

De nieuwe hoogvermogen-laserdiodearrays, die nu verkrijgbaar zijn, bieden een optisch vermogen van meer dan 1,5 Watt per array, bij een golflengte van  $\lambda = 0,88 \mu\text{m}$ . De stralingskarakteristiek van een array past zich in principe aan de applicaties aan. De totale elektro-optische werkingsgraad van het array ligt boven de 30%.

Traditioneel geconstrueerde laserdiodes staan zelden een uitgangsvermogen toe van meer dan 50 mW, omdat de spiegels bij dit vermogen beschadigen. Met laser-arrays zijn veel hogere optische vermogens realiseerbaar, omdat de werkingsgraad van de afzonderlijke diodes en daarmee van de array, aanzienlijk gunstiger is. De thermische belasting van de spiegels is daarom geringer dan bij de afzonderlijke diode. De arrays bestaan uit tot 40, op een substraat geïntegreerde, afzonderlijke laserdiodes, met een onderlinge afstand van 8-10  $\mu\text{m}$ . Deze zijn optisch met elkaar verbonden. De diodes worden met behulp van Metal-Organic-Vapor-Phase-Epitaxy (MO VPE) gefabriceerd, in een proces dat een uiterst ge-

lijkmatische toename van halfgeleiderlagen op gallium-arsenide toelaat, waardoor een hoge kwaliteit van de array (vooral een zeer grote gelijkmatigheid van de afzonderlijke diodes) mogelijk is.

In het researchlaboratorium worden zowel laserarrays met een conventionele dubbele hetero-structuur (DH) als met "Multiple-Quantum-Well"-structuur gefabriceerd. Bij de MQW-arrays bestaat de actieve zone met een dikte van circa 75 nm uit een rij extreem dunne lagen, met verschillende bandafstanden, waardoor de optische koppeling tussen de laserstroken extra wordt verbeterd.



Door de optische en elektrische koppeling wordt in de eerste plaats een vermindering van de drempelstroom gerealiseerd. In het lab konden met MQW-arrays waarden worden bereikt van 22 mA per strook (bij 400  $\mu\text{m}$  resonatorlengte) tegenover 100 mA voor een afzonderlijke oxyde-strook laser. Hiermee is verbonden een stijging van het differentiele rendement tot 0,55 W/A per spiegeloppervlak.

Een dergelijke MQW-array met 10 stroken levert maximaal 0,86 W continuvermogen per spiegeloppervlak bij een totaal rendement van 36%. Een 40 strooks array levert continuvermogen tot 1,65 W per spiegel bij een totaal rendement van 33%.

De optische koppeling heeft er in de tweede plaats voor gezorgd dat afzonderlijke lasers in een array oscilleren met een starre tegenovergestelde fase. Hierdoor wordt, zoals bekend van phased-array-antennes uit het microgolfbereik, een sterk ruimtelijke stralendeling bewerkstelligd.

Monolithisch fasegekoppelde laserarrays uit Ga-Al-As bieden nieuwe toepassingsmogelijkheden, zoals bijvoorbeeld de ontsteking van hoogvermogen thyristoren via glasvezel. Op deze wijze wordt snel omschakelen van de thyristoren en parallelbedrijf mogelijk. Andere voorbeelden zijn de actieve verdeling van informatie naar verscheidene glasvezels, het pompen van vastestoflasers zoals YAG (yttrium-aluminium-granaat) of frequentieverdeling met behulp van niet-lineaire kristallen. Eenvoudige en betrouwbare coherente blauwe lichtbronnen, bijvoorbeeld voor de meettechniek, zijn in principe realiseerbaar.

Laser-array chips met 8, 10 of 12 stroken/chip met DH-structuur zijn verkrijgbaar voor experimentele doeleinden. Voor toepassingen die een bepaalde geometrische rangschikking van de array vereisen, kunnen aangepaste uitvoeringen worden geleverd met betrouwbare warmte-afvoer.