

Configurable Slit Unit voor Canarische telescoop

Op het Canarische Eiland La Palma is op dit moment 's werelds grootste spiegeltelescoop in aanbouw, de 'Grand Telescopio de Canarias' (GTC) met een diameter van 10,4 meter. Janssen Precision Engineering is betrokken bij de ontwikkeling van instrumentatie voor de GTC. Afgelopen twee jaar is gewerkt aan de ontwikkeling van een specifiek en uiterst compact aandrijf- en meetsysteem voor cryogene en vacuümtoepassingen. Uiteindelijk heeft dit geleid tot de realisatie van een demonstratiemodel voor de Configurable Slit Unit voor het infraroodinstrument van de GTC.

• *Norbert Meijs & Maurice Teuwen* •

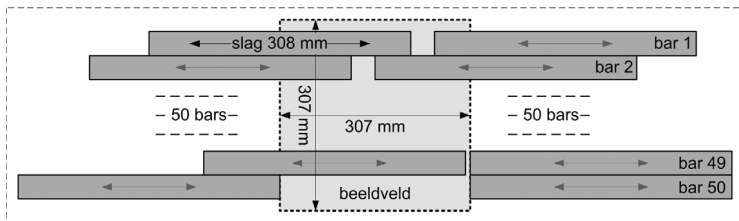
De nieuwe generatie extreem grote spiegeltelescopen is van vrij recente datum. Het concept om de primaire spiegel van een optische telescoop samen te stellen uit meerdere spiegelsegmenten, heeft de doorbraak betekend in deze. De GTC op La Palma (zie Afbeelding 1) maakt deel uit van deze nieuwe generatie. Door de baanbrekende optische gevoeligheid en resolutie die met deze telescoop gerealiseerd zullen worden, kunnen wetenschappers beter processen bestuderen die ten grondslag liggen aan de vorming van sterren, stelsels en het heelal. Het belangrijkste onderzoeksdoel van de GTC zal zijn het verkrijgen en bestuderen van spectra in het NIR (Near-InfraRed, 0,9-2,5 μm) golflengtegebied. Daarom zal de telescoop worden uitgerust met een NIR multi-objectspectrograaf. Om achtergrondruis te minimaliseren, heersen binnenin dit instrument vacuüm (10^{-6} mbar) en cryogene (77 K) condities.



Afbeelding 1. Grand Telescopio de Canarias in aanbouw.

Configurable Slit Unit

Een van de meest complexe onderdelen van de spectrograaf is de Configurable Slit Unit (CSU). Dit is een instelbaar masker dat zich bevindt in het intredeveld (307 x 307 mm) van de spectrograaf. Het masker bestaat uit honderd staven (bars) die willekeurig in het beeldveld gepositioneerd kunnen worden (zie Afbeelding 2). De ruimte die overblijft tussen twee tegenover elkaar gepositioneerde staven wordt een slit (oftewel spleet) genoemd. De slits worden gebruikt als masker tijdens spectrografische opnamen. Omdat er meerdere slits verdeeld over het gehele beeldveld gemaakt kunnen worden, spreekt men van een multi-objectspectrograaf. Op deze manier kunnen meerdere sterren tegelijkertijd worden bekeken. De configuratie van slits wordt een aantal keren per nacht gewijzigd.



Afbeelding 2. Concept-layout voor de CSU.

Globaal gelden de volgende specificaties voor het masker.

- Aantal bars: 100 (2 x 50)
- Slag per bar: 307 mm
- Positionauwkeurigheid bar: $< 20 \mu\text{m}$
- Snelheid bar: $> 1 \text{ mm / s}$
- Steek bar - bar: $307 \text{ mm / 50} \sim 6 \text{ mm}$
- Omgevingscondities: $10^{-6} \text{ mbar}, 77 \text{ K} (-196 \text{ }^\circ\text{C})$

Janssen Precision Engineering (JPE), gevestigd bij Maastricht-Airport, raakte eind 2003 betrokken bij de ontwikkeling van de CSU. Uitgedaagd door de extreme specificaties ontwikkelde het op eigen initiatief een concept voor het nauwkeurig positioneren van de bars onder de geldende cryogene en vacuümomgevingscondities. Het concept werd uitgewerkt tot een prototype, dat de basis vormde voor een verdere samenwerking met het 'Instituto de Astrofísica de Canarias'.

Aandrijfconcept 'inertial piezo drive'

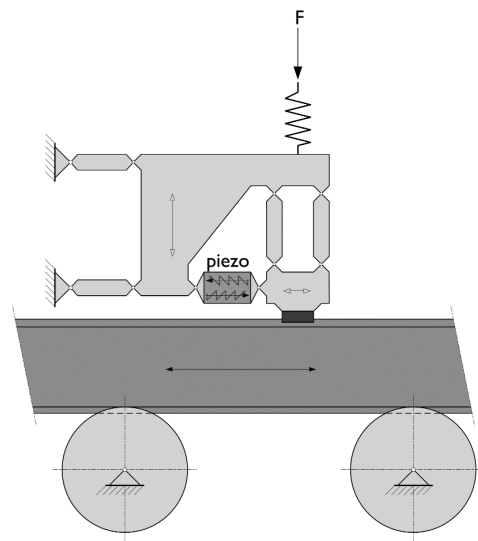
De gegeven randvoorwaarden wat betreft omgevingscondities beperken de keuzemogelijkheden voor een geschikt actuatorprincipe drastisch. Daarbij komt de beperkt beschikbare inbouwruimte, opgelegd door 6 mm steek tussen twee opeenvolgende bars. Bovendien geldt de eis dat de actuator

absoluut geen energie mag dissiperen tijdens stilstand; elke warmtebron binnen de cryostaat zou een afwijking kunnen veroorzaken op de extreem gevoelige infrarooddetector. Tot slot is natuurlijk ook de kostprijs een belangrijke factor, aangezien in totaal honderd individuele actuatoren noodzakelijk zijn.

Er is gekozen om een piëzo te gebruiken als elementaire bouwsteen voor het realiseren van de actuator. Piëzo's zijn uitermate geschikt binnen deze applicatie vanwege een combinatie van eigenschappen: vacuümcompatibel, minimale uitgassing; cryo-compatibel; en extreem lage dissipatie.

Om het aantal piëzo-actuators te beperken is bewust gezocht naar een concept met slechts één piëzo per bewegende bar. Hierbij is gebruik gemaakt van het zogenaamde 'inertial drive' concept. Afbeelding 3 toont het actuatorconcept.

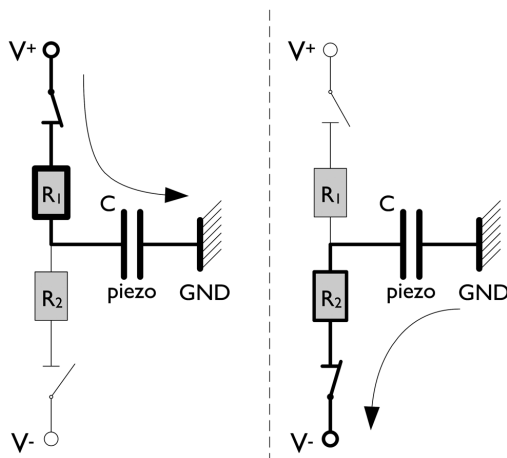
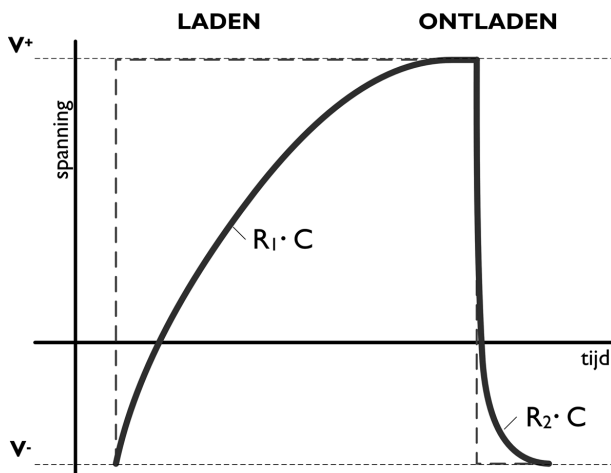
De piëzo is opgenomen in een mechanisme dat met voorspankracht F tegen de bar wordt gedrukt. Dit mechanisme vormt, samen met twee referentiewielen, tevens de geleiding van de bar. Door nu geleidelijk de spanning over de piëzo op te voeren zal deze langzaam verlengen. De optredende versnellingskracht kan door het frictiecontact worden overgedragen op de bar, welke een gelijke verplaatsing zal maken. Wordt nu de piëzo abrupt ontladen, dan zal de optredende versnelling zo groot zijn, dat de bijbehorende versnellingskracht niet kan worden overgedragen van actuator naar bar; de bar blijft op inertie nagenoeg stilstaan terwijl de actuator over de volle slag terugslipt. Door deze cyclus te herhalen kan een netto-beweging gerealiseerd worden.



Afbeelding 3. 'Inertial piezo drive' actuatorconcept.

Elektrisch kan deze cyclus als volgt worden beschouwd. In elektrisch opzicht gedraagt een piëzo zich als een capaciteit. De snelheid van laden en ontladen is evenredig aan de RC-tijd van het equivalente netwerk waarin de piëzo is opgenomen. Op basis van het elektrische schema uit Afbeelding 4 is een versterker gerealiseerd voor het aansturen van de piëzo. Het ontwerp van de actuator kenmerkt zich door de volgende eigenschappen:

- eenvoudig, elementair; dit is in het bijzonder van belang met het oog op kosten en levensduur;
- krachtgesloten, spelingsvrij ontwerp; dit is in het bijzonder van belang voor de overgang van kamertemperatuur (montage) naar cryogene temperatuur (gebruik), een grote temperatuurtransitie die een ontwerp vergt dat uitzettingsverschillen kan opvangen;
- per definitie vrij van dissipatie tijdens stilstaan.



Afbeelding 4. Elektrisch schema van de piëzo-aansturing.

Capacitief positiemeetsysteem

Om een nauwkeurige positionering van de bars te kunnen realiseren, is positiemeting per bar noodzakelijk. De keuze van dit meetsysteem is opnieuw beperkt door de geldende randvoorwaarden op het gebied van omgevingscondities, beperkte inbouwruimte en kostprijs.

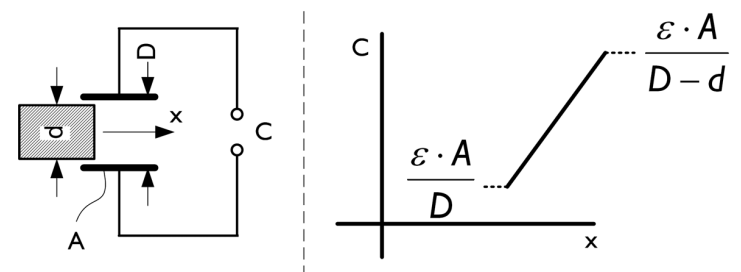
Er is gekozen voor het capacitief meetprincipe. Doorslaggevende kenmerken bij de keuze van dit meetprincipe zijn:

- de te meten grootte (capaciteit) wordt niet beïnvloed door de omgevingscondities (vacuüm, cryogene temperatuur);
- de daadwerkelijke sensor bestaat uit niet meer dan twee tegenover elkaar gelegen geleiders, waardoor:
 - de sensor eenvoudig vacuümcompatibel te realiseren is;
 - er een relatief grote mate van vrijheid bestaat in de vormgeving van de sensor door de benodigde condensatorplaten uit te voeren als opgedampte geleider op een keramische drager.

De gangbare methode voor het meten van verplaatsingen met behulp van een capacitief meetsysteem is het meten van de capaciteit tussen twee geleidende oppervlakken. De gemeten capaciteit is daarbij omgekeerd evenredig met de variabele afstand tussen de geleidende oppervlakken. Het bijbehorende bereik is echter typisch ≤ 1 mm en daarom niet geschikt voor het meten van bewegingen tot 307 mm.

Daarom is een alternatieve toepassing van dit meetprincipe ontwikkeld. De twee geleidende oppervlakken worden op een vaste afstand van elkaar geplaatst. Door nu een geleider tussen de geleidende oppervlakken in te bewegen zal de gemeten capaciteit toenemen. Dit principe wordt geïllustreerd in Afbeelding 5.

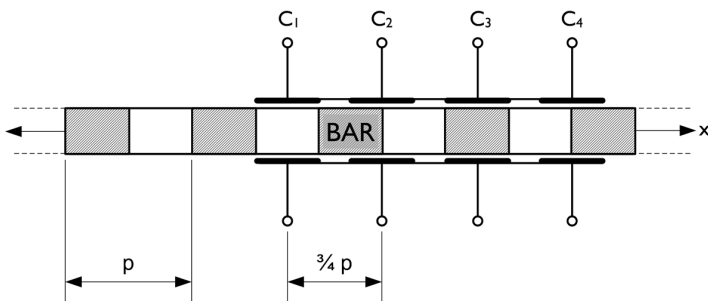
De gemeten variatie in capaciteit is nu enerzijds afhankelijk van de verplaatsing x en anderzijds begrensd door de verhouding tussen de afstand D en de afstand $D-d$. Merk op dat een dwarsverplaatsing van de geleider tussen de platen ($\perp x$) geen invloed heeft op de gemeten capaciteit!



Afbeelding 5. Capacitief verplaatsingsmeetsysteem.

Het dynamische bereik (range / resolutie) van eenvoudige elektronica voor de meting van een capaciteit is typisch 10^3 à 10^4 . Uitgaande van een gewenste verplaatsingsmeetresolutie van typisch $5 \mu\text{m}$ kan hieruit worden afgeleid dat de afmeting van de sensor in de bewegingsrichting typisch ongeveer 5 mm moet zijn. Het gekozen meetprincipe kan eenvoudig worden toegepast als ‘eindloos’ verplaatsingsmeetsysteem. Daartoe zijn in de bar op gelijkmatige afstand sleuven aangebracht, zodat de capacatieve sensor afwisselend wel/niet gevuld wordt met de metalen (geleidende) bar als deze in lengterichting verplaatst wordt.

Om er tevens zeker van te zijn dat deze meetgevoeligheid niet afhankelijk is van de positie van de bar ten opzichte van de sensor, worden vier sensoren toegepast die op een afwijkende steek ten opzichte van de sleuven in de bar zijn geplaatst. Op deze manier worden tevens parasitaire capaciteiten vermeden en wordt bovendien de gevoeligheid van de sensor in het algemeen vergroot. Deze layout is te zien in Afbeelding 6.



Afbeelding 6. Eindloos capacitief meetsysteem.

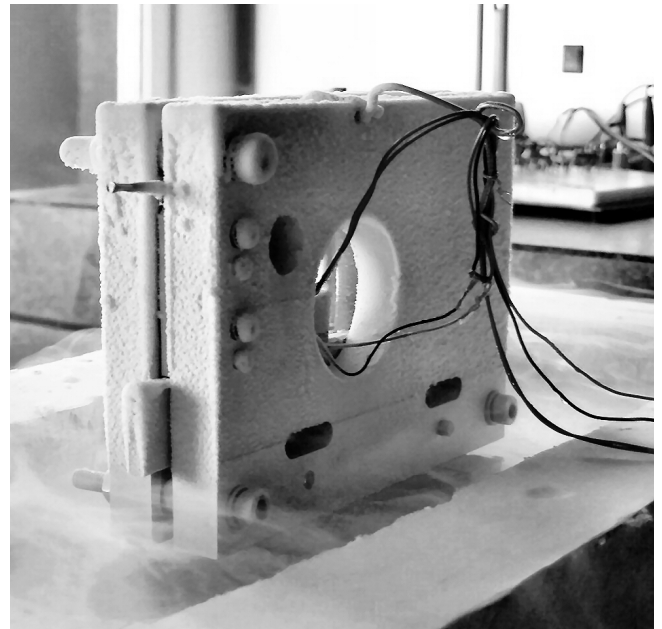
Prototype

Op basis van de gekozen principes voor aandrijven en positiemeten is een prototype gerealiseerd. Allereerst is de functionaliteit van beide principes geëvalueerd onder standaard atmosferische condities. Met name om het gedrag van de piëzo en het wrijvingsgedrag te evalueren, is daarna een test uitgevoerd bij cryogene temperatuur.

Hierbij is het prototype geplaatst in een geïsoleerde en afgesloten opstelling. Door de opstelling te ventileren met droge stikstof, wordt het aanwezige vocht (damp) verdreven. Na verloop van tijd is (van buiten de opstelling) vloeibare stikstof (77 K) op de bodem van de opstelling geïnjecteerd. De basis van het prototype zal nu via geleiding de temperatuur van de vloeibare stikstof aannemen. Afbeelding 7 toont het prototype na afronding van de uitgevoerde testen.

Bij het openen van de opstelling slaat het vocht uit de omgevingslucht aan als ijskristallen op de opstelling. Het succes-

vol aantonen van de functionaliteit onder cryogene omstandigheden is een uiterst belangrijke mijlpaal geweest voor de ontwikkeling van de CSU.



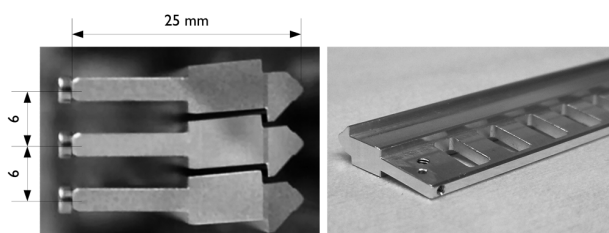
Afbeelding 7. Prototype na cryogene test.

Naar aanleiding van deze testen hebben JPE en het Instituto de Astrofísica de Canarias een gezamenlijk ‘Demonstration Programme’ opgezet, als tussenstap naar de uiteindelijke ontwikkeling van de CSU. Doel van het demonstratieprogramma is het uitontwikkelen van de gekozen concepten tot een volwaardig demonstratiemodel waarin alle technologische ontwikkelingen en risico’s zijn afgedekt.

Demonstration Programme: 6-bar prototype

Wat betreft hardware is de uitkomst van het demonstratieprogramma een op ware schaal gerealiseerd prototype gebaseerd op zes bars. Een van de grote uitdagingen in het mechanische ontwerp is de vormgeving en dimensionering van de bars geweest. Veel randvoorwaarden dienen tegelijkertijd te worden vervuld. Primair gelden optische eisen (oppervlak, geometrie), maar vanuit constructief oogpunt gelden bovendien thermische (materiaal)eisen, compatibiliteit met actuator en geleiding (geometrie), compatibiliteit met vacuüm (materiaal, oppervlak), compatibiliteit met het meetprincipe (geometrie en materiaal), stijfheid (E/ρ) tegen deformatie ten gevolge van gravitatie, maakbaarheid en kostprijs. Bovendien is de dikte van de bar in feite gegeven door de opgelegde steek van 6 mm tussen twee opeenvolgende bars.

Afbeelding 8 toont het uiteindelijke ontwerp van de bars. In de linkerzijde van deze afbeelding is het dwarsprofiel van de bars te zien; in de uiteindelijke toepassing zal het licht (in dit aanzicht) van de rechterzijde het instrument binnenvallen. Om dit licht zo goed mogelijk te kunnen blokkeren, overlappen de bars middels een labyrintconstructie. In de rechterzijde van de figuur is goed te zien dat de bar is uitgerust met sleuven ten behoeve van het meetsysteem.



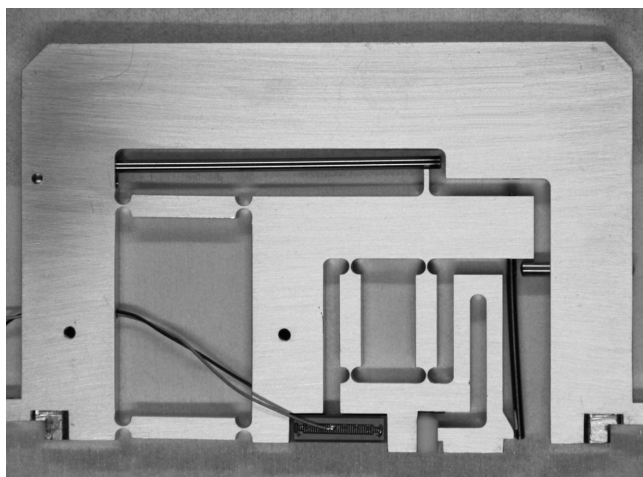
Afbeelding 8. Ontwerp van de bars.

Sensor in keramiek

De sensor is gerealiseerd in keramiek. Opedampte metalische vlakken vormen de actieve sensorprobes. Het meet-signaal wordt met een specifiek ontworpen meetsysteem uitgelezen, dat gebruik maakt van de 'active guarding' techniek. Dit betekent dat het capacitieve meet-signaal actief wordt teruggekoppeld op de shielding van de vacuümcompatibele, coaxiale meetkabel. Op deze manier wordt de capaciteit tussen kern en shielding geëlimineerd uit de meting en wordt tevens de gevoeligheid voor omgevingsstoringen beperkt. Door middel van een multiplexer worden de vier capaciteiten sequentieel uitgelezen. Vervolgens worden de meetsignalen middels een AD-converter gedigitaliseerd. Afbeelding 9 toont de sensor.

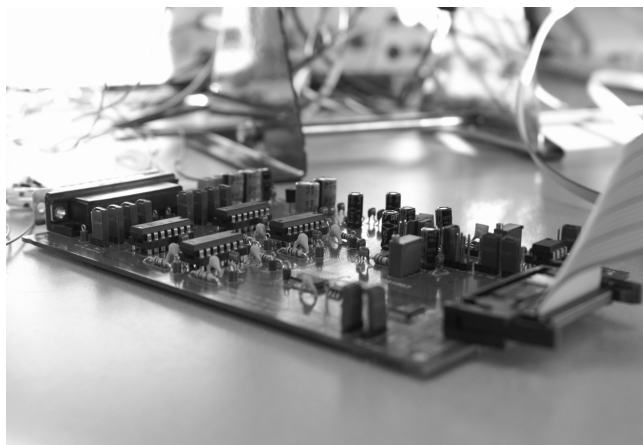


Afbeelding 9. De capacitieve sensor.



Afbeelding 10. Het actuormechanisme.

Het actuormechanisme is gerealiseerd als monolithisch ontwerp in aluminium; zie Afbeelding 10. De twee rechtgeleidingen binnen het mechanisme zijn gerealiseerd door middel van gatscharnieren. De piëzo wordt mechanisch voorgespannen binnen het mechanisme middels een draadveer. Een tweede draadveer realiseert de voorspanning van de actuator richting de bar. Voor de positionering van de bar is terugkoppeling van het meetsysteem noodzakelijk. Het aansturen van de piëzo en het meten van de positie wordt uitgevoerd door een 32-bits microcontroller. De signalen van de vier capaciteiten, ingelezen door middel van de AD-converter, dienen gecombineerd te worden tot een lineair meet-signaal. Hiervoor is een interpolatie-algoritme ontwikkeld, dat posities binnen de steek van de sleuven in de bar bepaalt. Dit algoritme is gebaseerd op een look-up table,



Afbeelding 11. Het meetsysteem voor uitlezen en digitaliseren van het meet-signaal.

verkregen door kalibratie van de bar. De microcontroller is verder voorzien van een interface voor een hogere besturingslaag. In deze laag, voorzien van een grafische user interface, kunnen homing- en positiecommando's ingevoerd worden. Zie Afbeelding 11 voor het meetsysteem.

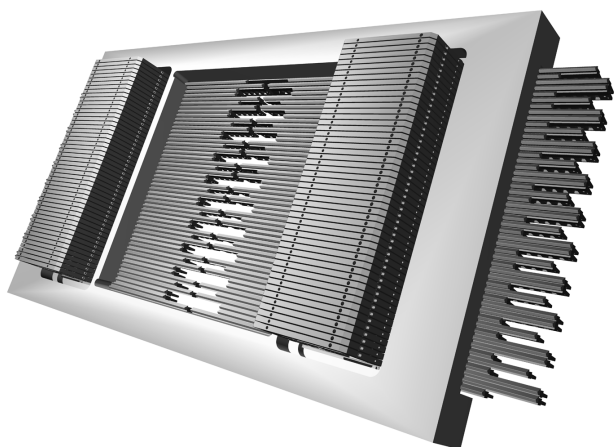
Toekomst

De recente oplevering van het 6-bar CSU-prototype door JPE aan het Instituto de Astrofísica de Canarias markeert niet het feitelijke einde van het demonstratieprogramma. Hoewel alle technologische ontwikkelingen voor de realisatie van de uiteindelijke CSU zijn uitgewerkt en aangetoond, dienen afrondende validaties onder cryogene

vacuümcondities te worden voltooid. Daarna zal een gezamenlijk project worden gedefinieerd voor de uitwerking en realisatie van het definitieve instrument met 100 bars; zie Afbeelding 12. In de loop van 2006 zullen ook de eerste optische validaties van de gehele GTC worden uitgevoerd. De opgedane ervaring in het ontwerpen van instrumenten voor gebruik in cryogene toepassingen is voor JPE een aanvulling op de aanwezige expertise in de ontwikkeling van vacuümapplicaties en precisiemechatronische systemen.

Auteursnoot

Norbert Meijs is freelance tekstschrijver te Cadier & Keer en Maurice Teuwen is projectleider CSU bij JPE.



Afbeelding 12. Ontwerp van Configurable Slit Unit met 100 bars, 100 actuatoren en 100 sensoren (307 x 307 mm beeldveld).

Informatie

Janssen Precision Engineering
Huub Janssen, directeur
Tel. 043 - 358 57 77
www.jpe.nl