Scriptie FMT 2004 Klus

TU/e technische universiteit eindhoven

Proefopstelling Microkanaal-koeling

Datum :
5 januari 2004

Afstudeerrichting :
Fijnmechanische Techniek

Examinandus :
B.H.L. Kluskens

Examinator :
Dhr. J. Gerritsen

Afdelingshoofd :
Prof. Dr. Ir. A.A. van Steenhoven

Bedrijfsbegeleider :
Dr. Ir. A.J.H. Frijns

Bedrijf :
Technische Universiteit Eindhoven

Plaats :
Eindhoven

Mediatheek HvU
0300 523 8510

Inhoudsopgave

1. INLEIDING 3

1.1 BEDRIJF 4
1.2 ORGANISATIE 5
1.3 EISENPAKKET 6

2 MEETMETHODE 7

2.1 PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV) 7
2.2 PROEFOPSTELLING MET PIV 8

3 CONCEPTEN 9

4 TRANSPARANTE BOVENPLAAT 18

4.1 BEVESTIGING VAN DE BOVENPLAAT AAN DE ONDERPLAAT 18
4.2 GLASDIKTE BEPALING 20
4.2.1 Belasting 20
4.2.2 Doorbuiging 21

5 VERVAARDIGINGSTECHNIEKEN VOOR DE ONDERPLAAT 24

5.1 LASER SNIJDEN 25
5.2 SPUITGIETEN VAN MICROCOMPONENTEN 26
5.3 FREZEN 27
5.4 DRAADVONKEN 28
5.5 WATERSTRAAL SNIJDEN 29
5.6 ETSTECHNIEK 30
5.6.1 KOH etsen 30
5.6.2 DRIE 30

6 POMP 32

7 SAMENSTELLEN VAN DE OPLOSSING 33

8 CONCEPT UITWERKING 35

9 BRONVERMELDING 38

9.1 LITERATUUR 38
9.2 GERAADPLEEGDE LITERATUUR 38

10 SYMBOLEN EN AFKORTINGEN 40

10.1 SYMBOLEN 40
10.2 AFKORTINGEN 41

11 DANKBETUIGING 42

12 BIJLAGEN 43

1. Inleiding

Mechanische en elektronische componenten worden steeds kleiner. Omdat de meeste componenten warmte produceren, is het van belang dat deze goed gekoeld worden om zo de levensduur te kunnen verlengen. Bij het ontwerpen van micro-elektronische systemen bijvoorbeeld, is het van cruciaal belang dat de thermische eigenschappen van dunne films en composieten, de effecten van nano-warmtebronnen en kortstondige warmtestromen bekeken worden. De macroscopische modellen voor warmteoverdracht, zijn echter niet goed genoeg meer om deze koelmechanismen te beschrijven.
Binnen de groep Energie Technologie wordt de warmteoverdracht tussen de wanden van de microsystemen en de koelvloeistof bestudeert door middel van moleculaire dynamica en Monte Carlo technieken. Gebruikmakend van deze technieken worden de eigenschappen, die op moleculair niveau gevonden zijn, vertaald naar microscopische materiaaleigenschappen en warmte-overdrachtscoëfficiënten, zodat bijvoorbeeld het temperatuurverloop dicht bij de wanden beschreven kan worden en daarmee de koelprestatie bestudeerd kan worden.
Koeltechnieken gebaseerd op het verdampen van een vloeistof in microkanalen, worden ook bestudeerd. Experimenten met micro-elektronica koeling worden verricht in nauwe samenwerking met Philips Research.
In het kader van dit onderzoek is een proefopstelling nodig waarmee de (numerieke) modellen gevalideerd kunnen worden. In deze opstelling stroomt water door microkanalen (doorsnede ca. 100 x 200 micrometer), terwijl aan één zijde van de opstelling een voorgeschreven hoeveelheid warmte toegevoerd wordt. De stroomsnelheid moet regelbaar zijn, waarbij tevens een periodieke fluctuatie voorgeschreven moet kunnen worden. Zowel bij de in- als de uitlaat worden de drukken en temperaturen gemeten. Tevens moet de opstelling optisch toegankelijk zijn i.v.m. snelheidsmetingen door middel van lasers (bijv. voor Particle Image Velocimetry). De nadruk ligt op het ontwerp van de microkanalen en de fabricage technieken ervan.

1.1 Bedrijf

Het project wordt uitgevoerd in de groep Energie Technologie van de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven.
De Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) verzorgt ingenieurs-, ontwerpers- en lerarenopleidingen en postacademische cursussen. Het onderwijs stoelt op de eigen onderzoeksactiviteiten en is ontwerpgericht. Docenten en studenten gebruiken moderne informatie- en communicatiemiddelen.

De TU/e geeft leiding aan vooraanstaande Nederlandse onderzoekscholen en -instituten en heeft een sterke positie in internationale netwerken. Voor technologie-intensieve bedrijven is de TU/e een natuurlijke partner.

Profiel van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e)

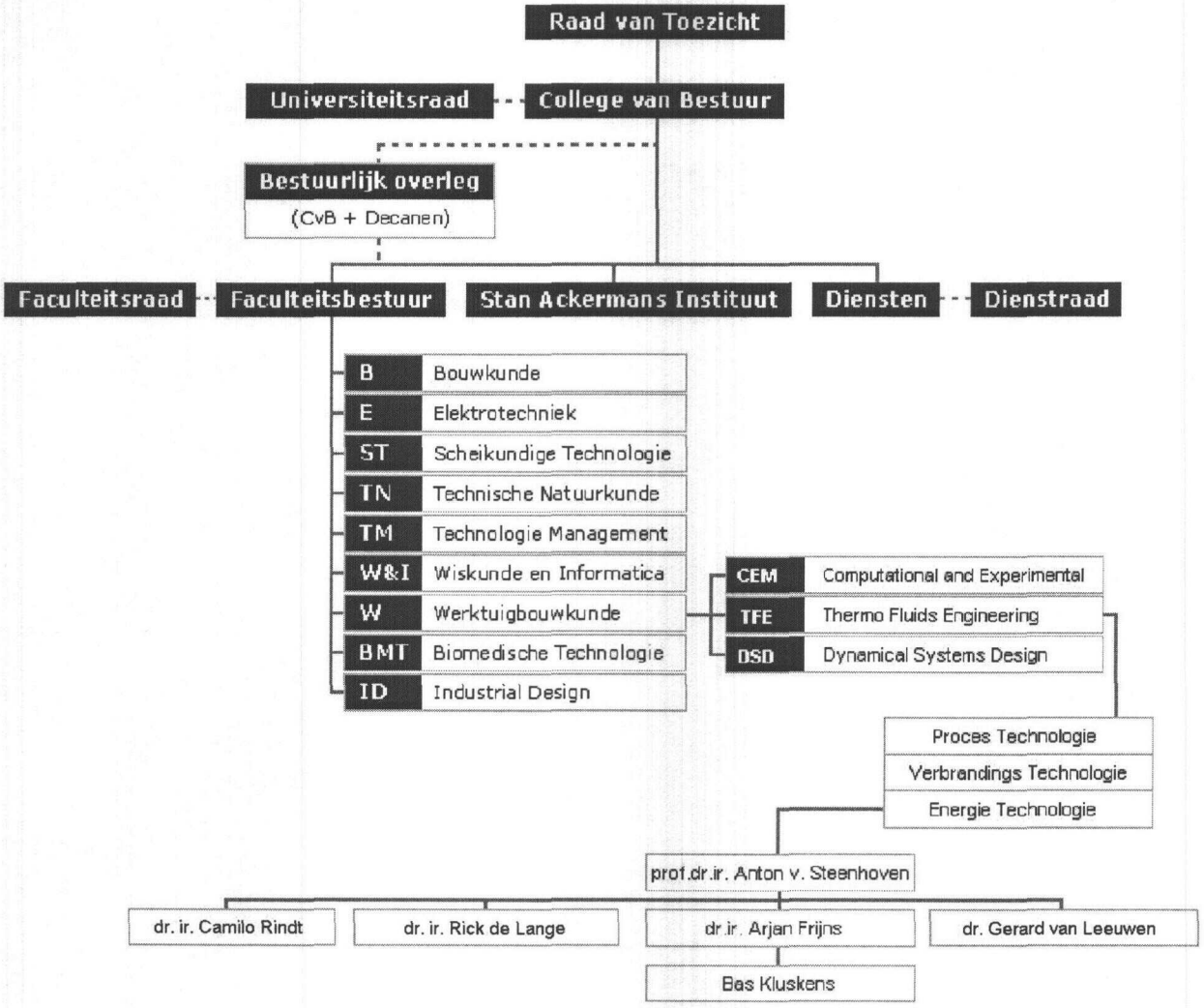
- universiteit: onderwijs en onderzoek in onderlinge verwevenheid
- focus op de ontwikkeling en het doen functioneren van technologie
- TU/e onderwijsmodel:
    - analyse en synthese: ontwerpen (vanaf het eerste jaar)
    - eerste en tweede fase en continue educatie
    - leren en werken: flexibiliteit in curricula, studiepaden en methoden
- internationaal
- kwaliteit onderwijs en onderzoek naar hoge externe, internationale maatstaven
- toetsbare doelstellingen ten behoeve van in- en externe verantwoording

De Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) legt zich toe op fundamenteel/strategisch technologisch onderzoek, dat relevant is voor industriële of andere toepassingen. Zij levert hierdoor een bijdrage aan het versterken van de concurrentiepositie van het bedrijfsleven en aan het oplossen van maatschappelijke vraagstukken.

De TU/e speelt nationaal en internationaal een vooraanstaande rol op met name de onderzoeksgebieden communicatietechnologie, materiaaltechnologie en katalyse. Bovendien wil de TU/e de biocomponent versterken.

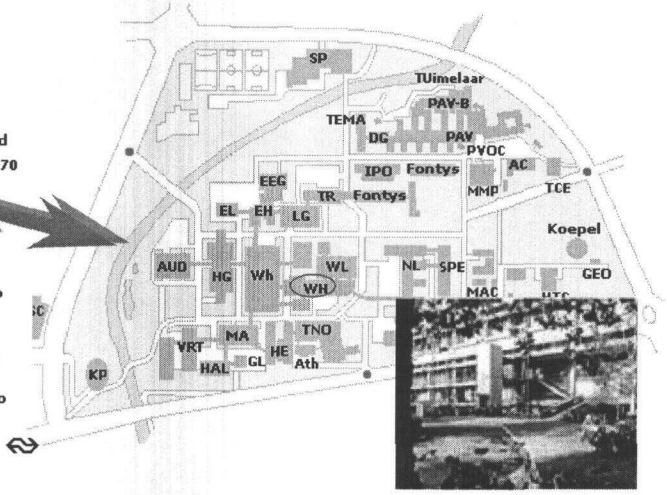
De TU/e heeft het voortouw in negen door de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen erkende onderzoekscholen, in twee van de zes Nederlandse toponderzoekscholen en één van de vier technologische topinstituten.

1.2 Organisatie



Postadres:
postbus 513
5600 MB Eindhoven

Bezoekadres:
Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven
www.energy.wtb.tue.nl



1.3 Eisenpakket

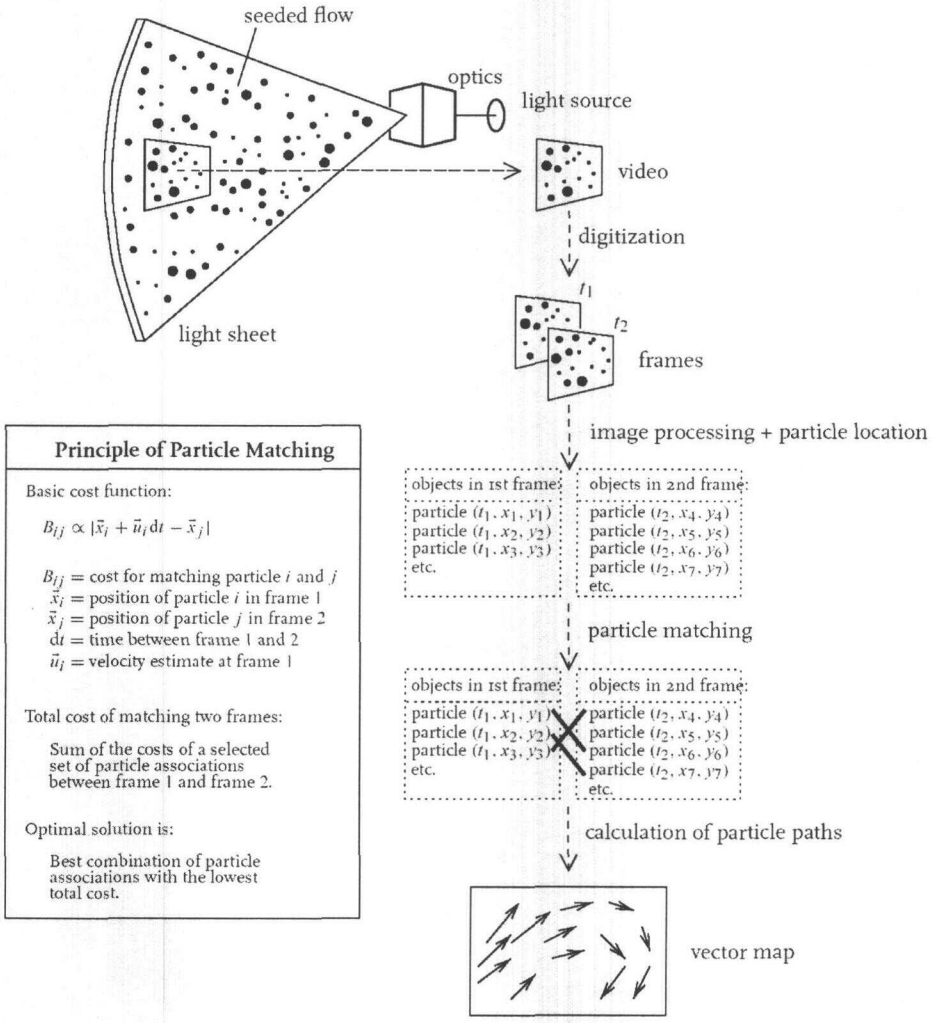
Er worden diverse eisen aan de opstelling gesteld:

- Het beschikbaar oppervlak voor het aanbrengen van microkanalen is: 1 cm x 2.5 cm.
- Afmetingen van kanalen: L x B x H = 2.5 cm x 100 μm x 200μm.
- 'Gladde' wanden die evenwijdig aan elkaar lopen.
- Regelbare snelheid van de vloeistof door de kanalen: v = 0 – 1 m/s (werkgebied meestal rond 0.01 – 0.1 m/s). Zowel stationaire als fluctuerende snelheden moeten voorgeschreven kunnen worden.
- Flowmeter behorende bij de voorgeschreven snelheid en het doorstroomoppervlak van de kanalen.
- Regelbare inlaattemperatuur van de vloeistof aan de instroomzijde. Bereik: T = 0-70 °C.
- Filter aan de instroomzijde voor deeltjes groter dan 10 μm.
- Regelbare warmtebron aan onderzijde van de kanalen: q" = 0 – 1500 W/cm^2
- Drukmetingen aan de instroom- en uitstroomzijde van de microkanalen. Het bereik van de meetsensoren: P = 0 – 4 bar.
- Drukverschil dat de opstelling moet kunnen weerstaan: $\Delta P \sim 3$ bar
- Temperatuurmetingen aan de instroom- en uitstroomzijde. Bereik T=0-200 °C.
- Temperatuurverschil dat de opstelling moet kunnen weerstaan: T=0-200°C.
- Kanalen moeten optisch toegankelijk zijn voor licht met golflengte 400 – 600 nm, van de bovenzijde i.v.m. snelheidsmetingen met behulp van PIV (Particle Image Velocimetry).
- Het deel met de microkanalen moet verwisselbaar zijn, zodat ook andere geometrieën getest kunnen worden.
- De positie van de microkanalen moet nauwkeurig vastgesteld kunnen worden ten behoeve van de PIV-metingen.
- Ontluchting in verband met het vullen van de opstelling.
- Alle onderdelen moeten corrosiebestendig zijn.
- Het warmteverlies door andere delen van de opstelling dan de microkanalen moet kleiner dan 5% bedragen.
- De afstand tussen de microkanalen en de lens van de microscoop is maximaal 3 mm.

2 Meetmethode

2.1 Particle Image Velocimetry (PIV)

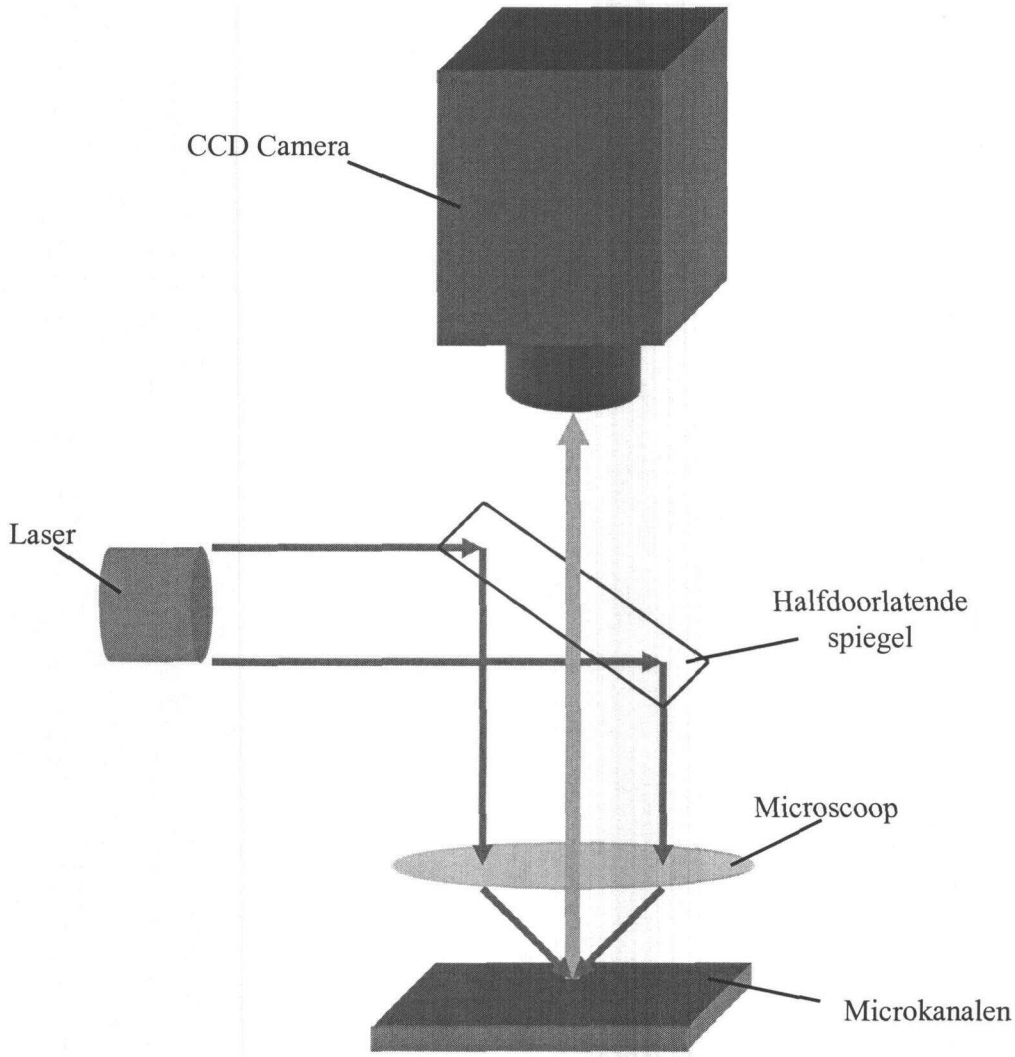
Particle Image Velocimetry (PIV) wordt gebruikt om stroomsnelheden in de kanaaltjes te meten. Dit wordt uitgevoerd door fluorescerende polystyrene deeltjes met een diameter van 0,78 μm aan de stroming toe te voegen (hoe kleiner deze deeltjes zijn, hoe beter ze de stroming volgen) en een doorsnede van de stroming te belichten met een dun laserlichtvlak. De fluorescerende laag absorbeert licht met een golflengte van 480nm (blauw) en zendt licht terug met een golflengte van 520nm (groen). Er wordt nu twee keer kort na elkaar een opname gemaakt. Met behulp van correlatietechnieken wordt de verplaatsing van de deeltjes tussen de twee opeenvolgende belichtingen bepaald (*zie Fig. 2.1*). De positie van de aanwezige deeltjes in de stroming worden vastgelegd met een CCD camera. Omdat de tijd tussen de belichtingen en de beeldvergroting bekend zijn, kan de gemeten verplaatsing direct worden vertaald in de snelheid. Op deze manier kan in één opname de snelheid van honderden of zelfs duizenden punten tegelijkertijd worden gemeten. PIV is een ideale meettechniek om metingen uit te voeren aan de ruimtelijke structuur van turbulente stromingen, en met name aan coherente structuren. De gebruikte laser is een Argon-YAG laser.



Figuur 2.1: schematische weergave van een PIV meting. Ref. [1]

2.2 Proefopstelling met PIV

Hier is schematisch weergegeven, hoe de proefopstelling er, ten behoeve van PIV-metingen, ongeveer uit komt te zien. De laserbundel komt links binnen en wordt naar beneden gestuurd door de spiegel. De bundel wordt door de lens van de microscoop gefocust op de fluorescerende deeltjes in de microkanalen. Deze deeltjes zenden hierna licht terug naar de lens van de microscoop en gaat zo door de halfdoorlatende spiegel de CCD camera in. De CCD camera is een Kodak ES1.0 met 30 frames/s en een resolutie van 1009 x 1018 pixels, 10 bits.

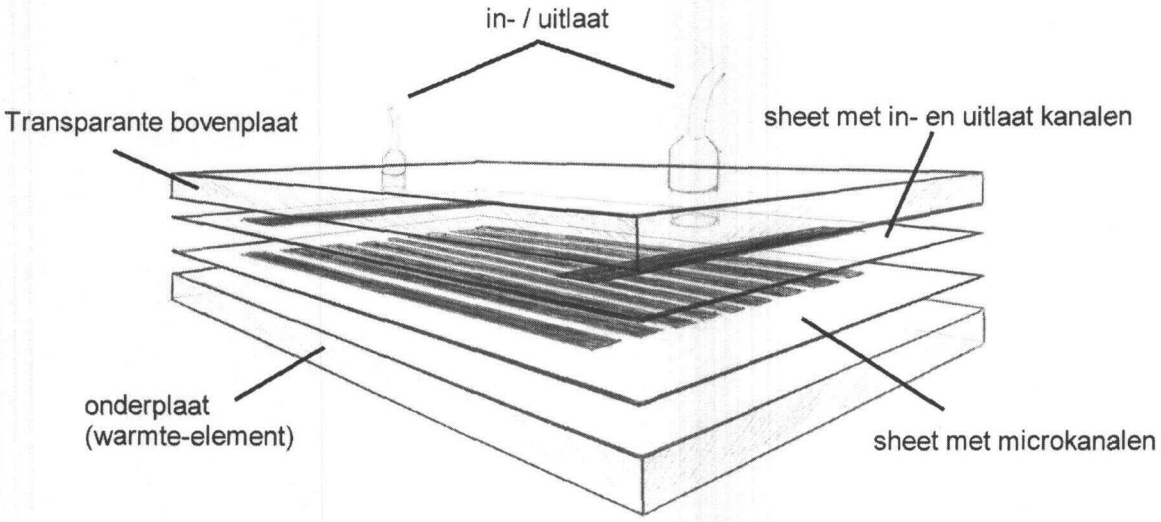


Figuur 2.2: schematische weergave van de proefopstelling t.b.v. PIV.

Om PIV-metingen mogelijk te maken, moet uiteraard de bovenplaat optisch toegankelijk zijn.

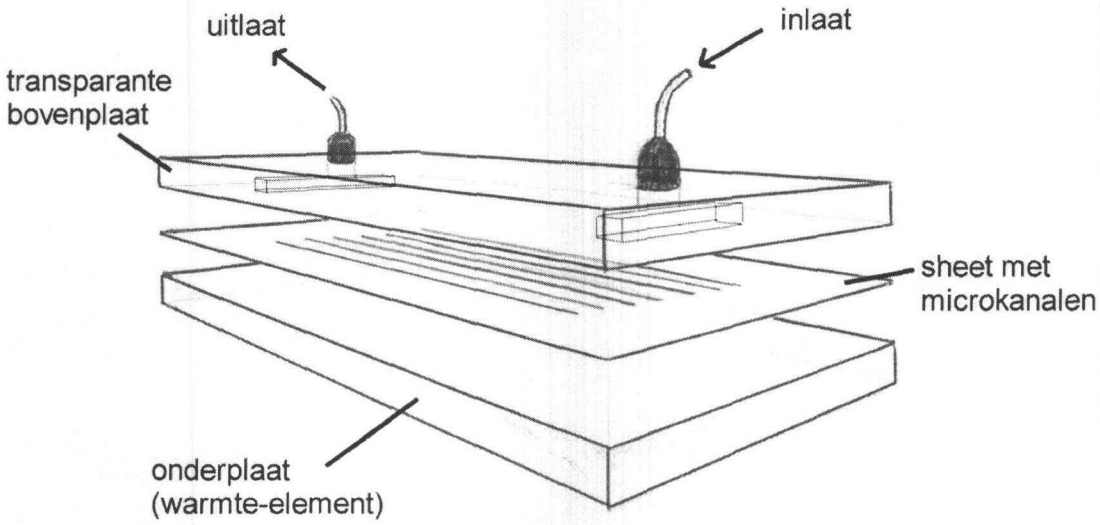
3 Concepten

In dit hoofdstuk wordt een aantal concepten voor de proefopstelling gepresenteerd en worden de voor- en nadelen op een rij gezet.



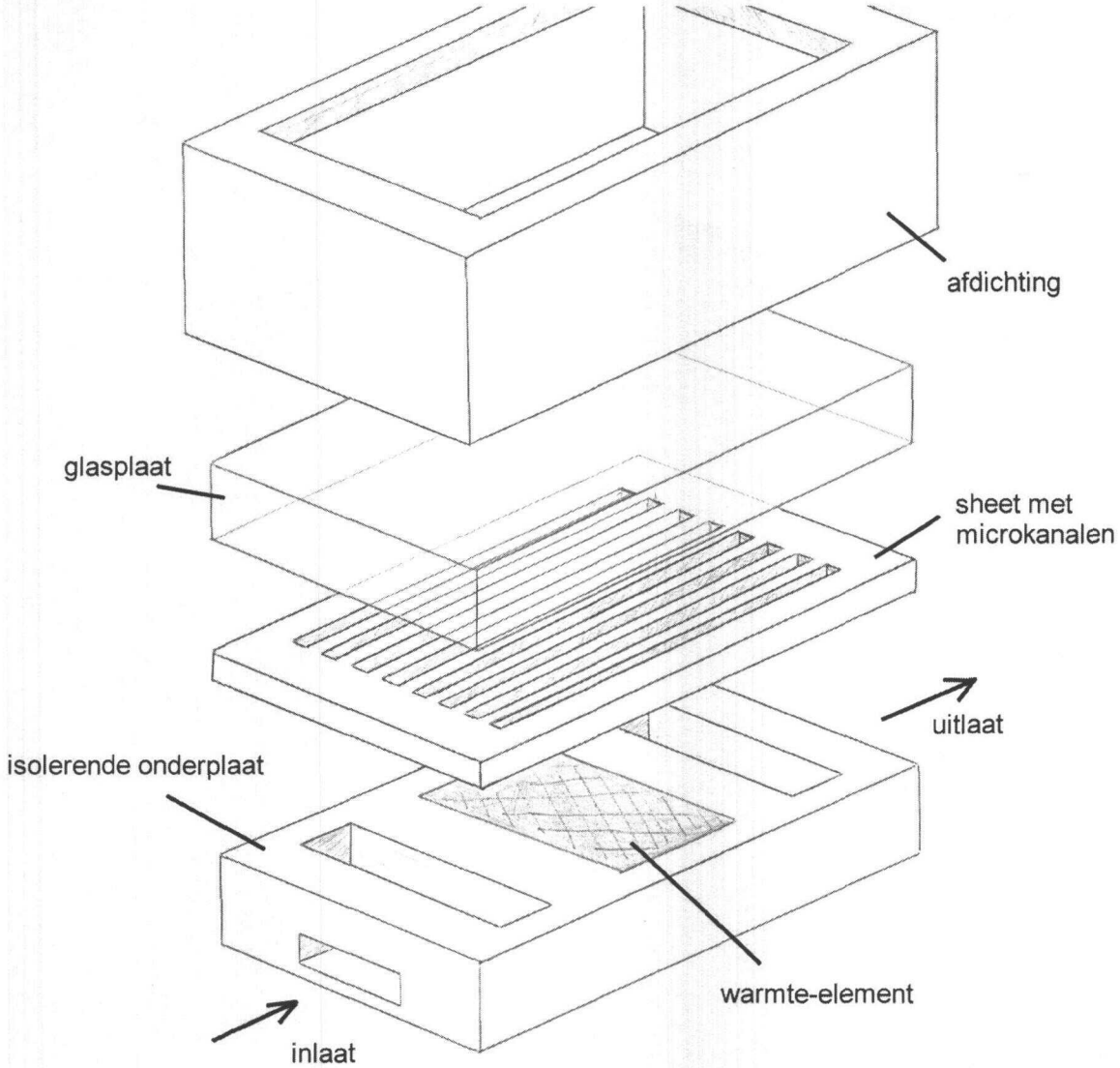
Figuur 3.1: conceptschets met twee sheets tussen de boven en onderplaat. Één voor aan- en afvoer van het water en één met microkanalen.

1. Bij dit eerste concept is de onderplaat het warmte-element en de bovenplaat transparant met de in- en uitlaat. Deze zijn aan de bovenplaat gemonteerd zodat er alleen koeling in de kanalen plaatsvindt en niet bij het warmte-element. Er zijn twee verschillende lagen (sheets) aangebracht. De bovenste, is de sheet met de in- en uitlaat. Deze mag dikker zijn dan de hoogte van één kanaal, maar moet transparant zijn. Uit de onderste sheet zijn de microkanalen gehaald. Als alle vlakken goed vlak zijn en een lage oppervlakteruwheid hebben, kunnen ze tegen elkaar aan geplaatst worden en stroomt het water via de inlaat van de bovenplaat naar binnen door de bovenste sheet heen in de microkanalen. De scheet met microkanalen is echter zeer dun en erg teder, dus niet gemakkelijk te hanteren. Ook is deze gevoelig voor stofdeeltjes in de buitenlucht en niet gemakkelijk te reinigen. De 'tussenwanden' zijn boven en onder los, waardoor het mogelijk is dat ze onder hoge druk kunnen verschuiven of kantelen. Door al deze onderdelen, kan het problemen geven om het geheel waterdicht te krijgen.



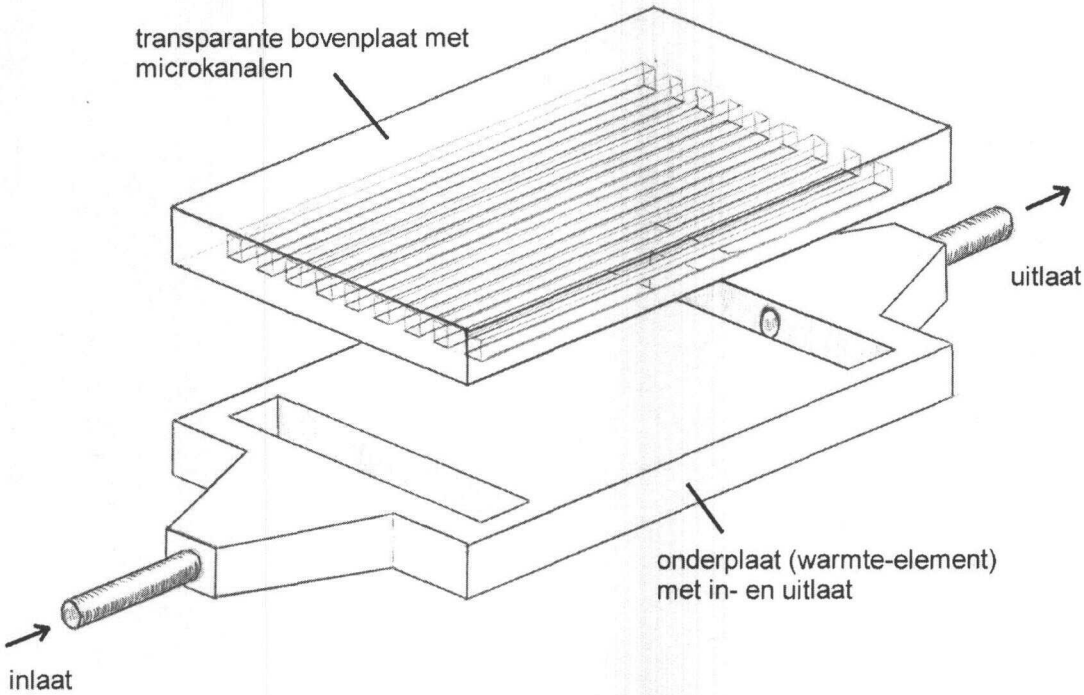
Figuur 3.2: conceptschets met één sheet en aan- en afvoer door de bovenplaat.

2. Ook hier, in het tweede concept, is de onderplaat tevens het warmte-element. De belichting valt van bovenaf binnen, waardoor de bovenplaat transparant moet zijn. Deze plaat heeft een in- en uitlaat waardoor het water kan stromen. Door sleuven in de bovenplaat te maken, is de bovenste sheet van concept één overbodig. Om het geheel zo universeel mogelijk te houden is er een sheet tussen beide platen gelegd, waarin de microkanalen zich bevinden. Deze sheet is zo dik als de hoogte van de kanalen moeten worden. Om een andere structuur van de kanalen te gebruiken, hoeft alleen de sheet vervangen te worden. Het nadeel hier is dat de in- en uitlaat zich aan de bovenzijde in het glas bevinden. Om deze gaten te creëren is geen groot probleem, maar het vervaardigen van de sleuven in het glas zal moeilijker zijn en het glas verzwakken. Bovendien kan het de optische kwaliteit van de bovenplaat verstoren.



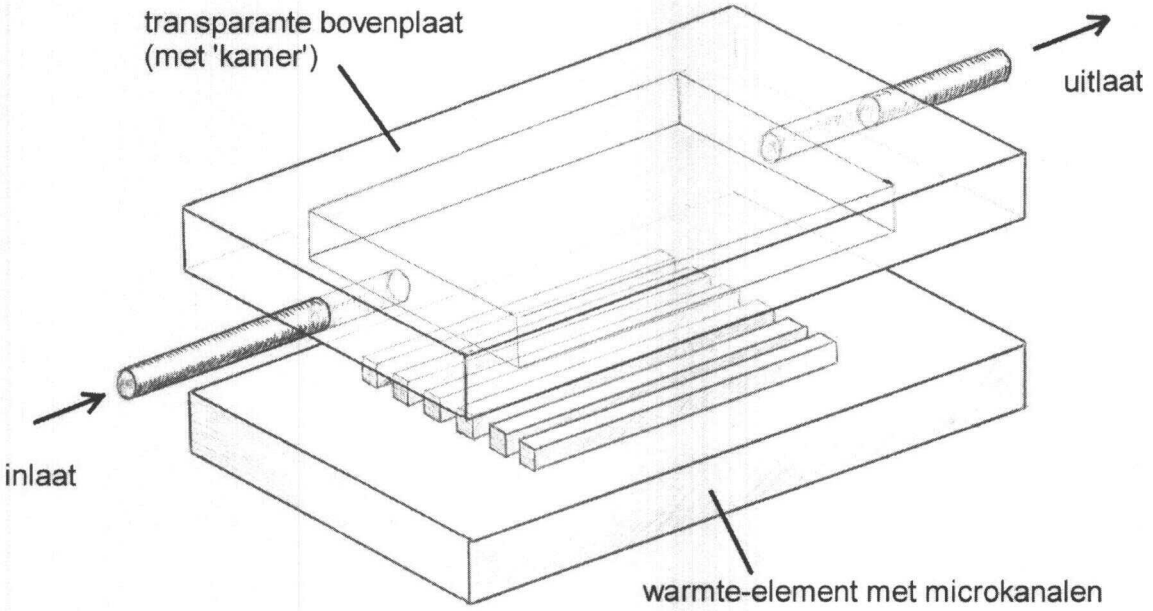
Figuur 3.3: conceptschets waarbij de vloeistof via de onderzijde de microkanalen instroomt.

3. In dit derde concept stroomt de vloeistof via de onderzijde de microkanalen in. De onderplaat is van kunststof. In deze kunststof onderplaat zit een warmte-element. Het kunststof isoleert en zorgt dus voor een warmteoverdracht naar boven. Omdat de in- en uitlaat in de onderplaat nu niet tegen het warmte-element aankomen, vindt hierdoor geen ongewenste koeling plaats. Op deze onderplaat komt een sheet met daarin de microkanalen. Deze sheet is vervangbaar en wordt op zijn plaats gehouden door het aandrukken van de vlakke glasplaat en de afdichting. Door de afdichting is het glas verwisselbaar. Ook hier bestaat de kans op vervuiling of beschadiging van de microkanalen bij het openen of verwisselen. Bovendien kunnen de 'tussenwanden' nog steeds verschuiven of kantelen.



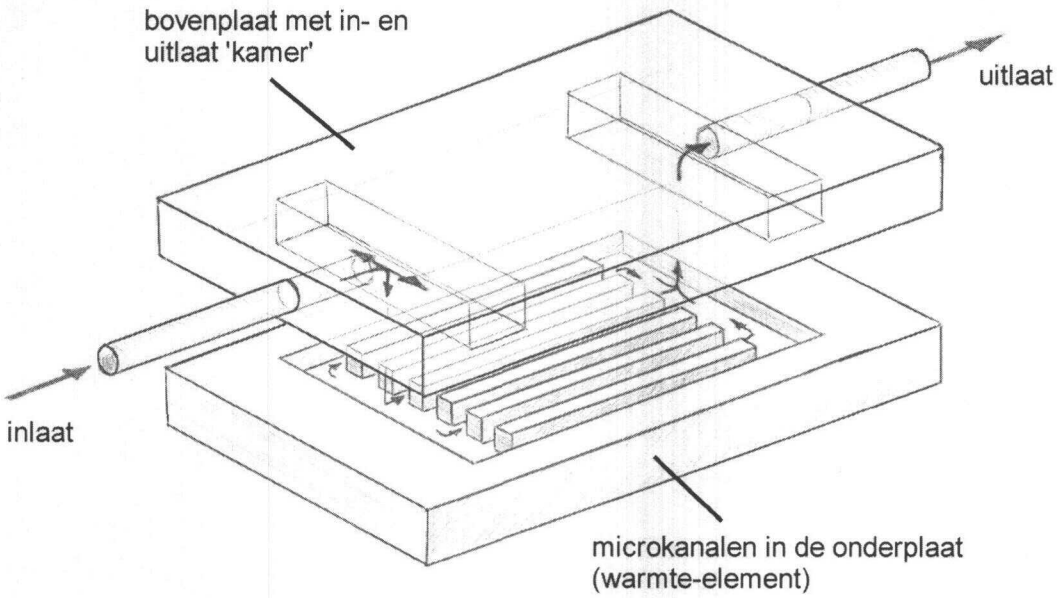
Figuur 3.4: conceptschets waarbij de microkanalen in de glasplaat zitten.

4. In tegenstelling tot de vorige concepten, zit in dit concept geen sheet meer tussen de onder- en bovenplaat. In de onderplaat zijn de in- en uitlaat aangebracht. In de transparante bovenplaat bevinden zich de microkanalen. Hierdoor is er ook belichting vanaf de zijkant mogelijk. Als nu een andere kanaalstructuur aangebracht moet worden, zal de bovenplaat iedere keer vervangen moeten worden. Het warmte-element wordt niet alleen door de kanalen gekoeld, maar ook bij het intreden van het water bij de inlaat. Doordat de 'koelribben' in de bovenplaat zitten en niet op het warmte-element, geleiden deze minder warmte. Een belangrijk nadeel van dit concept is, dat er microkanalen in de glasplaat gemaakt moeten worden. Het is lastig om deze voldoende nauwkeurig te vervaardigen. Bovendien kan de optische kwaliteit van de bovenplaat verstoord worden.



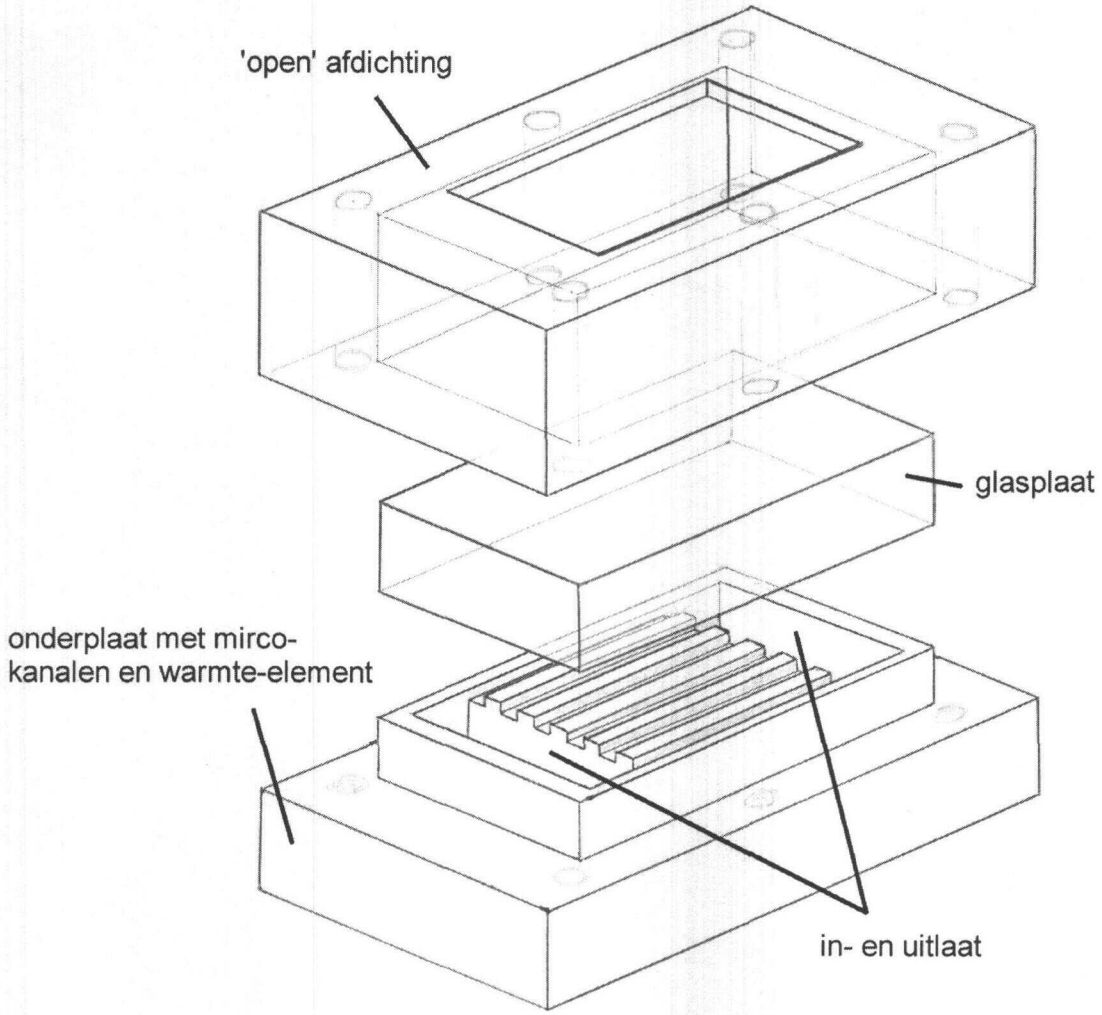
Figuur 3.5: conceptschets met de wanden van de microkanalen op de onderplaat.

5. De 'tussenwanden' tussen de microkanalen zijn bevestigd op het warmte-element, hierdoor zitten ze vast aan één zijde en kunnen ze niet verschuiven. Door de 'kamer' in de transparante bovenplaat, kan het water rechtdoor stromen. Maar zo bestaat wel de kans dat de stroomsnelheid in de buitenste kanalen langzamer is dan in het midden. Een ander groot nadeel is, dat het water over de wanden heen kan stromen in plaats van erdoorheen. Doordat er een 'kamer' in de bovenplaat moet worden gemaakt, zal de optische kwaliteit achteruit gaan. Een groot voordeel is, dat de warmtegeleiding aan 3 zijden van de kanalen plaatsvindt.



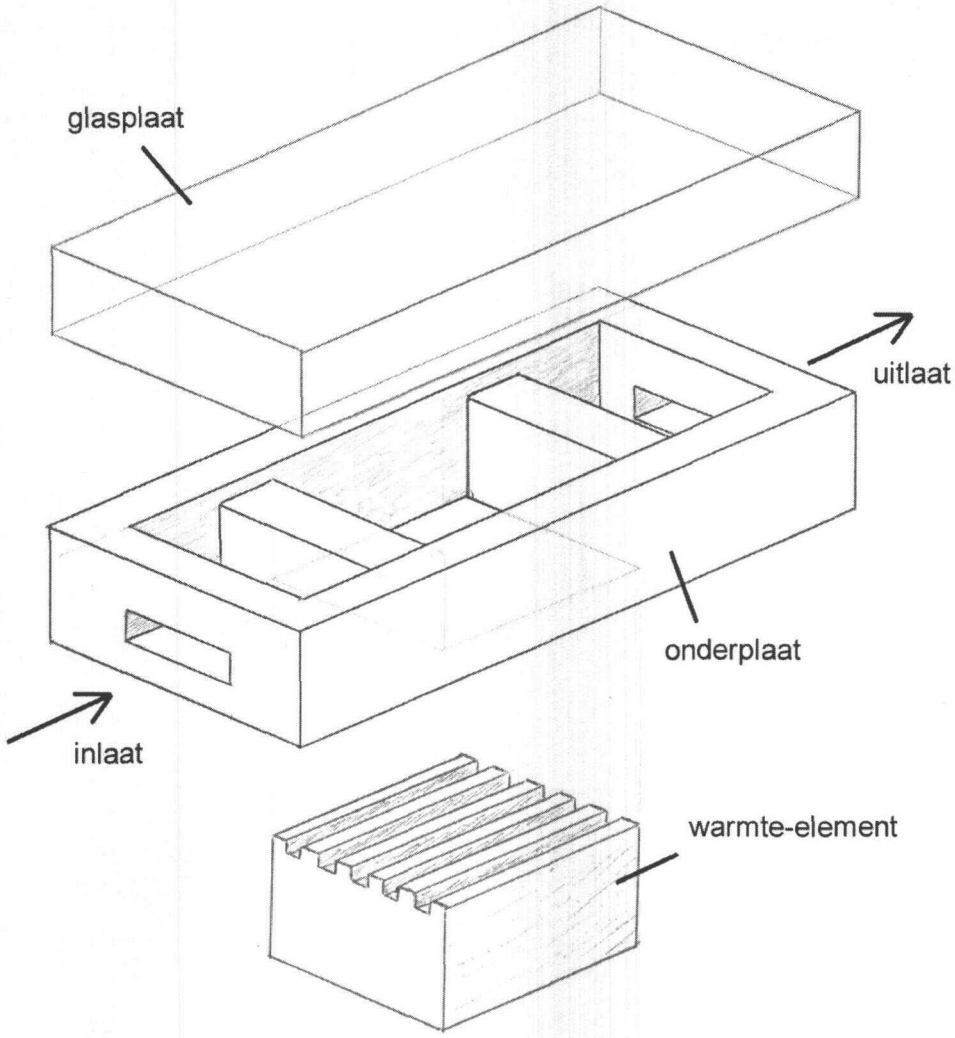
Figuur 3.6: conceptschets met microkanalen in de onderplaat.

6. In de onderplaat zijn de microkanalen aangebracht. De bovenplaat is bij de in- en uitlaat voorzien van een kleine 'kamer'. Doordat het water bij instroming meteen in deze 'kamer' komt, wordt het water beter verdeeld over de verschillende kanalen. Deze manier is bijna hetzelfde als de vorige, maar hier is de manier van instroming anders. Bovendien blijft de optische kwaliteit van de bovenplaat ter hoogte van de microkanalen intact. Ter hoogte van de sleuven zal echter het glas verzwakt zijn en gaat de optische kwaliteit achteruit.



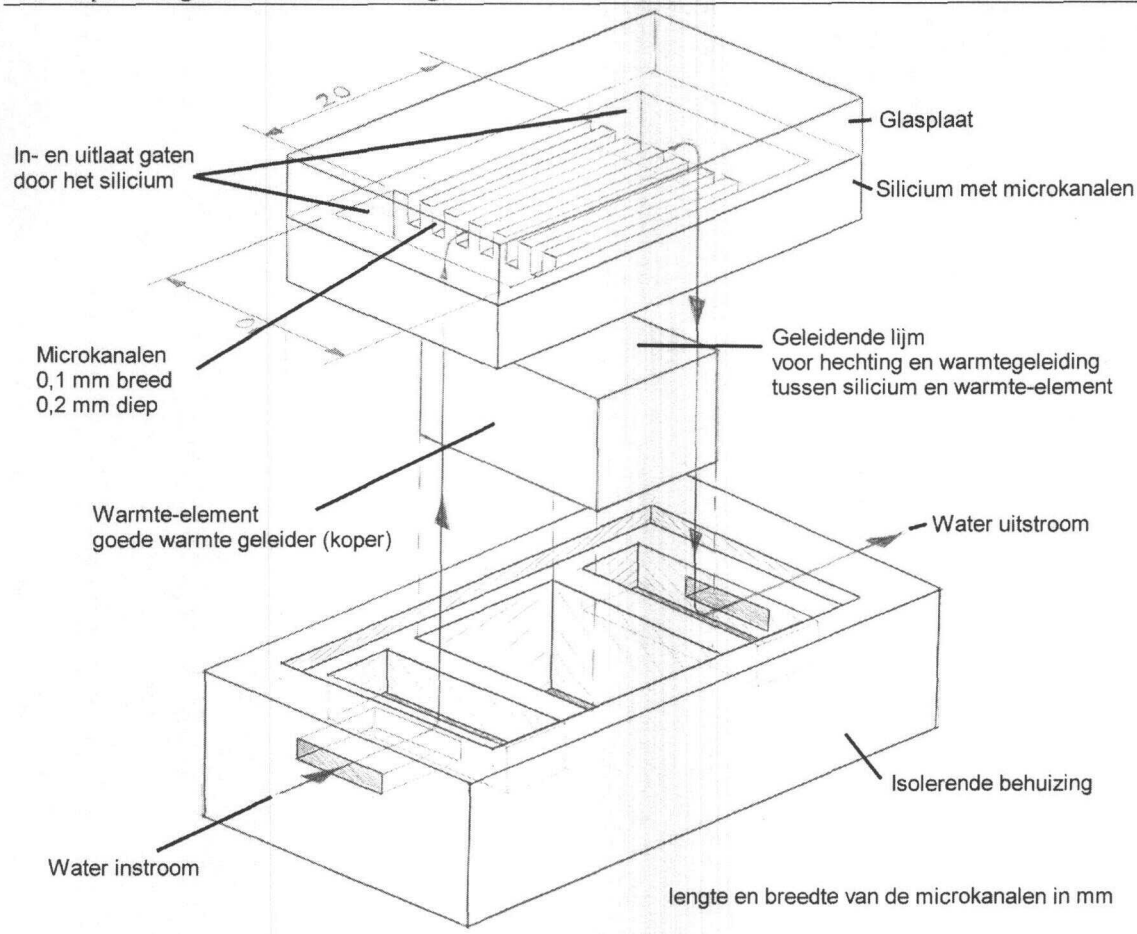
Figuur 3.7: geen bewerking aan de glasplaat en aan- en afvoer aan de onderzijde.

7. Bij dit concept is het van belang dat de glasplaat blijft zoals hij is, er vinden dus geen blijvende veranderingen aan plaats, hierdoor blijven de (optische) eigenschappen van de glasplaat beter. Om de glasplaat op de kanalen te drukken, is er een 'open' afdichting bedacht. Aan de bovenzijde is een opening voor belichting en aan de zijkant is deze gesloten zodat er geen ongewenste stralen uit de opstelling 'kaatsen'. De onderplaat bestaat uit een warmte-element met daarin de microkanalen en de in- en uitlaat. De onderplaat bestaat uit één stuk zodat er nergens water naast de microkanalen kan vloeien. Omdat het water bij de in- en uitlaat al langs het warmte-element stroomt, koelt deze al af en het water wordt opgewarmd. Ook bij het vervangen van de microkanalen, moet er en nieuwe onderplaat vervaardigd worden.



Figuur 3.8: conceptschets met een geïsoleerd warmte-element met microkanalen en aan- en afvoer aan de zijkant.

8. In dit concept zitten de microkanalen in het warmte-element. Het voordeel is, dat de 'wanden' aan de onderzijde vast zitten aan het warmte-element. Zo kunnen ze zich niet verplaatsen. De aan- en afvoer gaat door de isolerende onderplaat. Hierdoor gaat de warmteafvoer door de microkanalen. Doordat de microkanalen en het warmte-element uit één geheel bestaan, is de warmtegeleiding optimaal. Bij het vervangen van de microkanalen, hoeft de onderplaat niet vervangen te worden. Dit ontwerp legt sterke beperkingen op, aan het materiaal voor de microkanalen. Het moet immers ook als warmte-element kunnen dienen.



Figuur 3.9: conceptschets met optimale hechting tussen glasplaat en (silicium) microkanalen.

9. De microkanalen zijn gemaakt van silicium. Voor en achter de kanalen zitten de in- en uitlaat gaten. Deze gaan door het silicium plaatje heen. De kanalen worden aan de bovenzijde afgesloten door een glasplaat. Zo stroomt het water door het inlaat gat naar binnen, door de kanalen naar achteren en door de uitlaat naar buiten. Doordat er alleen warmtewisseling mag plaatsvinden in de microkanalen, is de behuizing van een isolerend materiaal gemaakt en stroomt het water door de kamers van de behuizing en komt zo niet in aanraking met het warmte-element. Glas is een slechte warmtegeleider dus is er weinig warmteverlies door het glas. (*Zie bijlage 1*)
   Ook bevinden de in- en uitlaat zich aan de zijkant, zodat er aan de bovenzijde voldoende optische mogelijkheden zijn.
   De silicium microkanalen en de glasplaat kunnen gedeeltelijk of helemaal in de behuizing geplaatst worden zodat het geheel gemakkelijk hanteerbaar is en minder kwetsbaar. Bovendien kunnen de onder- en bovenplaat zeer goed aan elkaar worden bevestigd, zoals verderop in het verslag wordt beschreven.
   En dunne film als warmtebron aan de onderzijde van het silicium, kan niet voldoende warmte opleveren om de microkanalen zodanig te verwarmen, dat er een optimaal resultaat verkregen kan worden. Daarom zal er een warmte-element onder de microkanalen worden bevestigd, dat door middel van een geleidende lijm aan de microkanalen wordt bevestigd.
   De temperaturen en drukken kunnen gemeten worden in de in- en uitlaat. Het temperatuurverloop, kan gemeten worden door middel van een infrarood meting. Omdat dit ontwerp de meeste voordelen en de minste nadelen heeft, zal dit verder worden uitgewerkt.

4 Transparante bovenplaat

Voor de materiaal keuze van de transparante bovenplaat, zijn er twee mogelijke materialen die aan deze eis kunnen voldoen. Het kan een kunststofplaat of een glasplaat zijn.

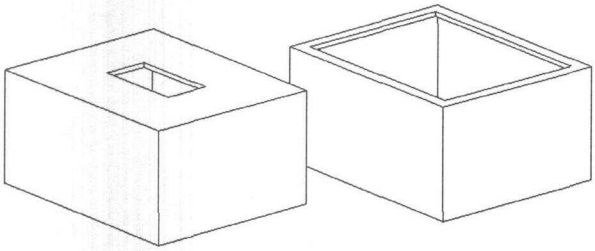
Deze plaat moet bestand zijn tegen:

- krassen
- hoge temperaturen
- doorbuiging
- optisch goed toegankelijk

Glas heeft betere eigenschappen dan kunststof. Het is dus beter bestand tegen de hiervoor genoemde punten. Vandaar er gekozen is voor een glasplaat en geen kunststofplaat.

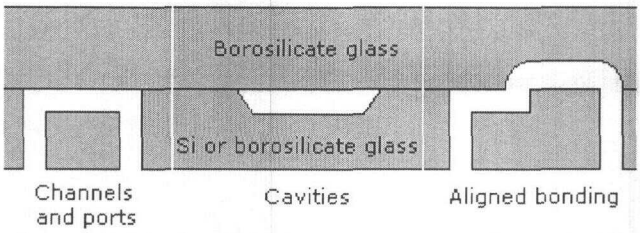
4.1 Bevestiging van de bovenplaat aan de onderplaat

Door een dikke glasplaat te kiezen, is de kans dat het glas vervormt of scheurt minimaal. Het nadeel van deze dikke glasplaat is, dat er minder licht doorheen gaat, maar vooral, dat de microscoop niet dicht bij de microkanalen kan komen.
Een afdichting met klein 'venster' kan een oplossing zijn van dit probleem. (Zie *Fig. 4.1*) Hierbij drukt een afdichting, waarin een 'venster' zit, de glasplaat tegen de onderplaat. Hoe kleine dit 'venster' is, hoe dunner de glasplaat kan zijn. Maar de voorkeur gaat uit naar een proefopstelling waarbij veel kanalen bekeken kunnen worden. Dus moet het 'venster' redelijk groot blijven.
Een andere mogelijkheid kan een verschuifbaar venster zijn, zo kan het venster op de desbetreffende positie gepositioneerd worden.
Door een puntbelasting is het altijd mogelijk dat er water van het ene in het andere kanaal kan stromen. Het is dus gewenst dat er een bevestiging is tussen de 'muren' van de microkanalen en de glasplaat. Dit kan door lijmen, maar dit kan problemen opleveren. Bijvoorbeeld dat er lijm in de kanalen komt of dat er het tussen de kanalen niet allemaal even goed hecht, zodat er toch water door kan.

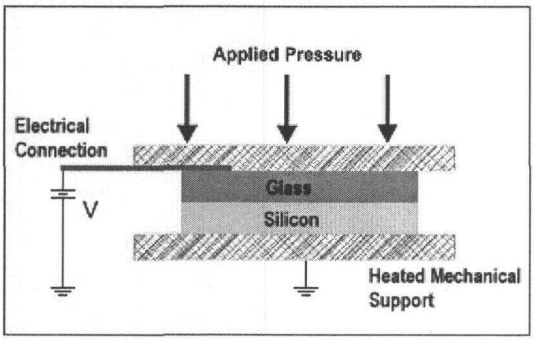


Figuur 4.1: links een klein en rechts een groot venster in de afdichting.

Een oplossing hiervoor is anodisch bonden. Waarbij de glasplaat aan de silicium microkanalen 'versmelt' (*zie Fig. 4.2*).
Deze microkanalen moeten dan echter wel van silicium gemaakt zijn. Een elektrostatisch bondingsproces, dat een adhesie vrije methode is, zorgt ervoor dat er een permanente verbinding tussen glas en silicium is. Onderstaande figuur laat voorbeelden zien van microkanalen tussen anodisch gebonden platen van glas aan glas of glas aan silicium.

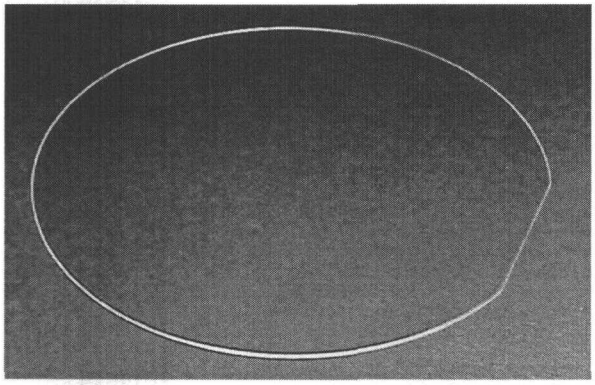


Figuur 4.2: microkanalen tussen twee platen. Ref. [2]



Figuur 4.3: bonding van glas aan silicium onder druk, hoge temperatuur en spanning. (Ref. www.sensorsmag.com)

Het glas dat gebruikt wordt om te bonden, is een wafer van Pyrex (*zie Fig. 4.4*).
Het bonden van het glas aan silicium gebeurt met een temperatuur van rond de 400 °C. Temperaturen boven de 500 °C kan de glas/silicium combinatie niet weerstaan. De eventueel optredende temperatuurverschillen kan het wel weerstaan.



Figuur 4.4: Pyrex glazen wafer.

Pyrex (Borosilicaat 7740) is een handelsmerk van Corning. Het is een product dat wereldwijd als laboratoria en commercieel glas toegepast wordt, door zijn robuustheid, verwerkbaarheid en lage kosten. Pyrex wort toegepast om onder andere, reageerbuisjes, flacons, trechters, afsluitkranen en nog veel meer gebruikelijke laboratoria en huishoudelijke artikelen, te maken.

4.2 Glasdikte bepaling

Het is van groot belang dat het glas licht doorlaat.
Hoe dunner de glazen wafer is, hoe meer licht erdoorheen gaat en hoe dichter de microscoop bij de microkanalen kan komen. Het moet natuurlijk de druk kunnen weerstaan, en het mag ook niet teveel vervormen vanwege de optica. Deze twee aspecten worden hieronder verder bekeken.

4.2.1 Belasting

Een belangrijke eis waaraan de glasplaat moet voldoen is, dat het glas niet mag breken. Het moet dus de maximale druk kunnen weerstaan.

Als zich voor en na de microkanalen 2 kamers bevinden van 10 bij 5 mm en de kanalen een afmeting hebben van 20 mm x 100 μm (L x B), dan kan het totaal oppervlak tegen de boven- en onderzijde berekend worden.

Oppervlak van twee kamers:

$$A_{kamers} = n_{kamers} \cdot l \cdot b$$

$$A_{kamers} = 20 \cdot 5 \cdot 10 = 1000\ mm^2 = 1 \cdot 10^{-4}\ m^2$$

Oppervlak van één kanaal:

$$A_{kanaal} = L \cdot B$$

$$A_{kanaal} = 0{,}02 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-6}\ m^2$$

Voor 20 kanalen is dit:

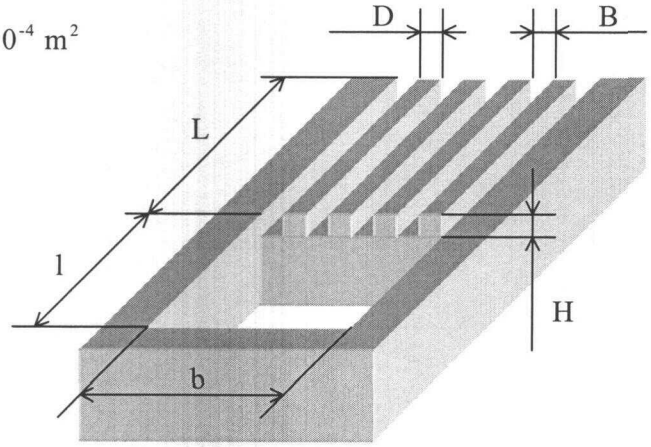
$$A_{kanalen} = n_{kanalen} \cdot A_{kanaal}$$

$$A_{kanalen} = 20 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-5} m^2$$

totaaloppervlak:

$$A_{totaal} = A_{kamers} + A_{kanalen}$$

$$A_{totaal} = 1 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-5} = 1{,}4 \cdot 10^{-4} m^2$$



Figuur 4.5: schematische weergave met afmetingen van de microkanalen met de

Als er een maximale druk van P = 3 bar (300 kN/m²) in de kamers en kanalen komt te staan en er een omgevingsdruk is van 1 bar, kan de kracht naar de boven- en onderkant berekend worden:

$$F = P \cdot A_{totaal}$$

$$F = 200 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-4} = 0{,}028kN = 28N$$

Voor 40 kanalen is dit 36 N

De constructie zal dus zo ontworpen moeten worden dat deze bestendig is tegen een belasting van 36 N

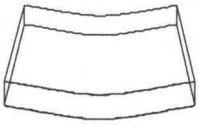
4.2.2 Doorbuiging

Naast de maximale druk die de glasplaat moet kunnen weerstaan, mag het glas niet te ver doorbuigen. Dit in verband met de optische eigenschappen.
Op een eenvoudige manier wordt er een afschatting gemaakt van de maximale doorbuiging van de glasplaat.

Als de glasplaat links en rechts is ingeklemd en er staat een gelijkmatige belasting q over, dan kan de maximale doorbuigen bepaalt worden. De lengte L_{plaat} van de plaat is 30 mm, de breedte B_{plaat} 10 mm en de dikte D_{plaat} is 0,5 mm. Voor het bepalen van de maximale doorbuiging v_{max} moet eerst het kwadratisch oppervlaktemoment I bepaald worden met de volgende formule *Ref. [3]*.

$$I = \tfrac{1}{12} \cdot B_{plaat} \cdot D_{plaat}^{\ 3}$$

$$I = \tfrac{1}{12} \cdot 10 \cdot 0{,}5^3 = 0{,}104\text{mm}^4$$

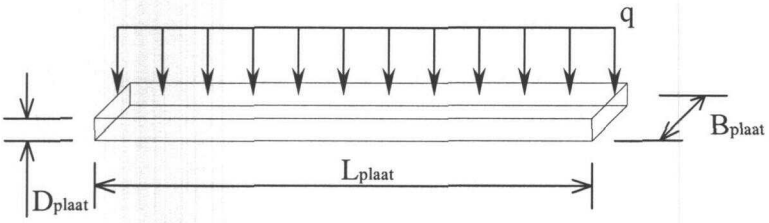


Figuur 4.6: belasting over de lengte van een glasplaat, die links en rechts is ingeklemd.

Nu I vast staat, kan de maximale doorbuiging bepaald worden met de volgende formule.

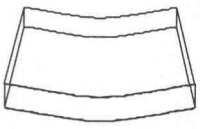
$$v_{max} = \frac{-5 \cdot q \cdot L_{plaat}^{\ 4}}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$v_{max} = \frac{-5 \cdot \frac{36}{30} \cdot 30^4}{384 \cdot 82000 \cdot 0{,}104} = -1{,}482\text{mm}$$



Figuur 4.7: gelijkmatige belasting over de lengte van de glasplaat met dimensies.

Nu wordt de maximale doorbuiging nog een keer bepaald, maar hier is de glasplaat een kwartslag gedraaid. De breedte B_{plaat} is nu 30 mm en de lengte L_{plaat} 10 mm.



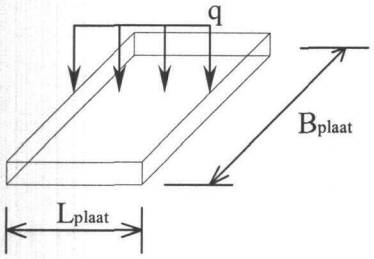
Figuur 4.8: belasting over de breedte van een glasplaat, die links en rechts is ingeklemd.

$$I = \tfrac{1}{12} \cdot B_{plaat} \cdot D_{plaat}^{\ 3}$$

$$I = \tfrac{1}{12} \cdot 30 \cdot 0{,}5^3 = 0{,}313\text{mm}^4$$

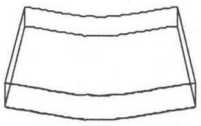
$$v_{max} = \frac{-5 \cdot q \cdot L_{plaat}^{\ 4}}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$v_{max} = \frac{-5 \cdot \frac{36}{10} \cdot 10^4}{384 \cdot 82000 \cdot 0{,}313} = -0{,}018\text{mm}$$



Figuur 4.9: gelijkmatige belasting over de breedte van de glasplaat met dimensies.

De eerste situatie kan optreden als de glasplaat niet met de wanden tussen de microkanalen is bevestigd. De tweede situatie lijkt het meeste op de werkelijkheid omdat, als de glasplaat tussen de twee langste zijden is ingeklemd, geeft deze de meeste steun en dus de minste doorbuiging. Voor de optische toegankelijkheid, is het niet van belang om te kijken naar de doorbuiging van de glasplaat boven de in- en uitlaat, maar boven één microkanaal. In de volgende situatie is de glasplaat met de tussenwanden verbonden en wordt de maximale doorbuiging van het stuk glas boven één microkanaal bepaald. Als het glas links en rechts is ingeklemd en er staat een gelijkmatige belasting q over, dan kan de maximale doorbuigen bepaalt worden. De lengte L_{plaat} is 20 mm, de breedte B_{plaat} 100 μm en de dikte D_{plaat} is 0,5 mm. Voor het bepalen van de maximale doorbuiging v_{max} moet eerst het kwadratisch oppervlaktemoment I bepaald worden.



Figuur 4.10: belasting over de breedte van een glasplaat, die links en rechts is ingeklemd.

$$I = \tfrac{1}{12} \cdot L_{kanaal} \cdot D_{kanaal}^{\ 3}$$

$$I = \tfrac{1}{12} \cdot 20 \cdot 0{,}5^3 = 0{,}208\text{mm}^4$$

Om de verdeelde belasting q te bepalen moet eerst de kracht F berekend worden.

Het oppervlak van één kanaal

$A_{kanaal} = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2$ *(zie pagina 20)*

De kracht over één kanaal

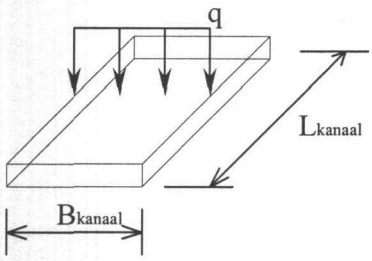
$$F = P \cdot A_{kanaal}$$

$$F = 200 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0{,}0004\text{kN} = 0{,}4\text{N}$$

De verdeelde belasting

$$v_{max} = \frac{-5 \cdot q \cdot B_{kanaal}^{\ 4}}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$v_{max} = \frac{-5 \cdot \frac{0{,}4}{0{,}1} \cdot 0{,}1^4}{384 \cdot 82000 \cdot 0{,}208} = -3{,}049 \cdot 10^{-10}\,\text{mm}$$



Figuur 4.11: gelijkmatige belasting over de breedte van de glasplaat met dimensies.

Deze afgeschatte doorbuiging is voldoende klein dat het de PIV-meting niet teveel verstoort. Doordat de glasplaat wel met de tussenwanden verbonden is, wordt de doorbuiging sterk verminderd. Dit geeft dus aan, dat de optische eigenschappen duidelijk beter zijn als de glasplaat op zoveel mogelijk plaatsen aan de onderplaat bevestigd is.

Er is ook een mogelijkheid om de glasplaat dikte *d* te berekenen. Hier is er vanuit gegaan dat over het glas een afdichting zit, met daarin een venster van 20 mm breed en 30 mm lang. Ook is er dus geen andere ondersteuning dan aan de randen van het venster. Dus de druk staat over het hele oppervlak.
Dit kan met de onderstaande formule (*zie bijlage 2 dikten*), waarbij het lengte : breedte verhoudingsgetal (met de daarbij behorende factor α) van belang is. Deze factor is te vinden in (*tabel 4.1*).
Interne technici stelde een veiligheidsfactor *S* van 4 voor. Dit is de meest voorkomende veiligheidsfactor voor glas.
De buigbreeksterkte σ is gegeven (*zie bijlage 2 fysische eigenschappen*).

$$d = \alpha \cdot B_{plaat} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot S}{\sigma}}$$

$$d = 0{,}720 \cdot 20 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \cdot 4}{70 \cdot 10^6}} = 1{,}539\text{mm}$$

Deze glasplaatdikte is te dik. Zo blijkt de verbinding tussen glasplaat en tussenwanden wederom voor een goede oplossing waarbij hij niet breekt.

Lengte / Breedte	α
1,0	0,535
1,2	0,613
1,4	0,673
1,6	0,720
1,8	0,754
2,0	0,780
3,0	0,854
4,0	0,860
5,0	0,864
>5,0	0,865

Tabel 4.1: factor afhankelijk van het verhoudingsgetal Lengte : Breedte

Bij de bevestiging tussen de glasplaat en de tussenwanden is het meest kritische deel, het glas boven de in- en uitlaat. Deze berekening kan voor dit deel nog een keer bekeken worden.

$$d = \alpha \cdot B_{plaat} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot S}{\sigma}}$$

$$d = 0{,}780 \cdot 5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \cdot 4}{70 \cdot 10^6}} = 0{,}417\text{mm}$$

Als de glasplaat een dikte heeft van 0,5 mm is dit dus uitstekend en zal niet breken.

5 Vervaardigingstechnieken voor de onderplaat

Nu de geometrie er is en de afmetingen voor de microkanalen bepaald zijn, kan er gekeken worden, op welke manier de microkanalen vervaardigd kunnen worden.
Hier volgen een aantal fabricagetechnieken.

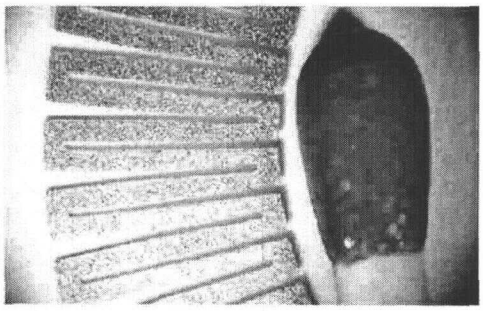
Omdat de microkanalen erg klein zijn, moet er bekeken worden, welke vervaardigingstechnieken van toepassing kunnen zijn.
Dit kunnen technieken zijn waarbij verspaand wordt, maar ook verdampt, opgelost of 'weggeslagen'.

1. Laser snijden
2. Spuitgieten van microcomponenten
3. Frezen
4. Draadvonken
5. Waterstralen
6. Etstechniek

5.1 laser snijden

Laser snijden is een bewerkingstechniek waarbij gebruik wordt gemaakt van een laser. Een gefocusseerde laserbundel 'brandt' het materiaal weg, hierdoor is het mogelijk door een metalen sheet heen te snijden.
Een snijbreedte van 45 μm en een tolerantie tot 10 μm zijn mogelijk. De oppervlakteruwheid R_a is minimaal 1μm.

Om een beeld te geven van de precisie van deze bewerking is een klepveer naast een lucifer afgebeeld in de volgende figuur.

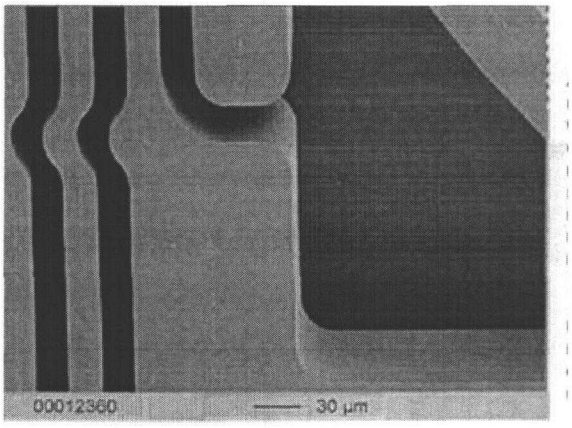


Figuur 5.1: laser gesneden klepveer. Ref. [4]

Bij dit product is de bewerking uitgevoerd door de gehele diepte van het materiaal. Als het nodig is om bijvoorbeeld een kanaal van 200 μm diep te snijden treden er problemen op zoals geen scherpe hoeken onder in het kanaal. Omdat in het eisenpakket gesteld wordt dat de kanaalwanden evenwijdig moeten lopen is laser snijden een mindere optie voor het vervaardigen van de kanalen.

5.2 Spuitgieten van microcomponenten

Spuitgieten van microcomponenten is een techniek van spuitgieten waarbij polymeren, metalen en ceramiek als grondstof gebruikt kunnen worden voor het vervaardigen van precisiecomponenten. Het granulaat wordt gesmolten en geïnjecteerd onder hoge druk en temperatuur in een verhitte mal. Na afkoeling opent de mal en het product is gereed.
De nauwkeurigheden die behaald kunnen worden met dit proces is afhankelijk van het gebruikte materiaal en de nauwkeurigheid van de mal. De oppervlakteruwheid $R_a < 50$ nm. Minimale openingsbreedte van de kanalen is 20 μm bij een hoogte 120 μm. Een voorbeeld hiervan is te zien in de volgende figuur.

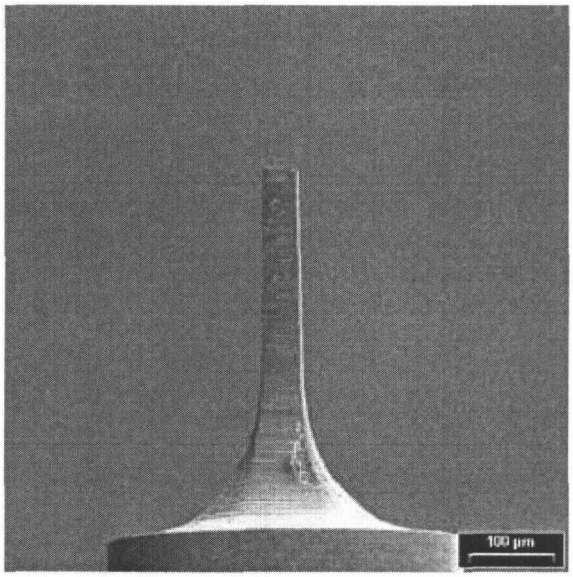


Figuur 5.2: gespuitgiette kunststofvorm (PMMA) voor een mircospoel. Ref. [5]

Spuitgieten wordt meestal alleen gebruikt voor massaproductie omdat het vervaardigen van de mal kostbaar is. In de huidige situatie zijn er maar enkele onderplaten nodig dat sluit spuitgieten dus uit.

5.3 Frezen

Frezen is een verspanende bewerking waarbij met een frees materiaal verwijderd wordt. Met een microfrees kan een kanaal worden gefreesd van minimaal 50 μm breed. De oppervlakteruwheid is minimaal 1 μm. Een dergelijke frees is afgebeeld in de volgende figuur.

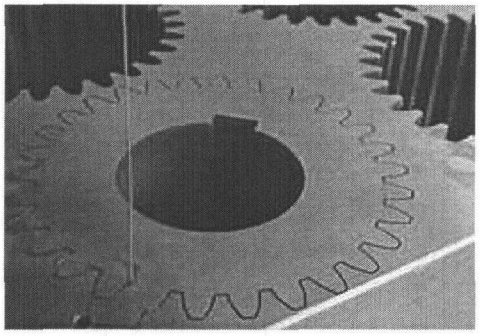


Figuur 5.3: hardmetalen frees voor het vervaardigen van kanalen met een breedte van 50 μm. Ref. [5]

Het voordeel van deze bewerking is, dat de onderplaat uit één materiaal blok gemaakt kan worden en dit voor een betere geleiding zorgt. Nadeel is dat de hoeken onder in de kanalen niet scherp zijn. Bij dunwandig frezen van kanalen worden de wanden verdrukt door de frees waardoor de kanaalbreedte varieert, daarom wordt de nauwkeurig van de kanalen niet gewaarborgd.

5.4 Draadvonken

Draadvonken is een proces waarbij een draad van minimaal 50 µm onder elektronische spanning door het metaal vonkt. De vonken die hierbij vrijkomen 'slaan' het metaal weg en zorgen voor kleine 'putjes'.
De sleuven die hierdoor ontstaan zijn 100 µm breed met een oppervlakteruwheid van R_a 0,16 µm. Het onderstaande figuur laat een gedraadvonkt product zien.

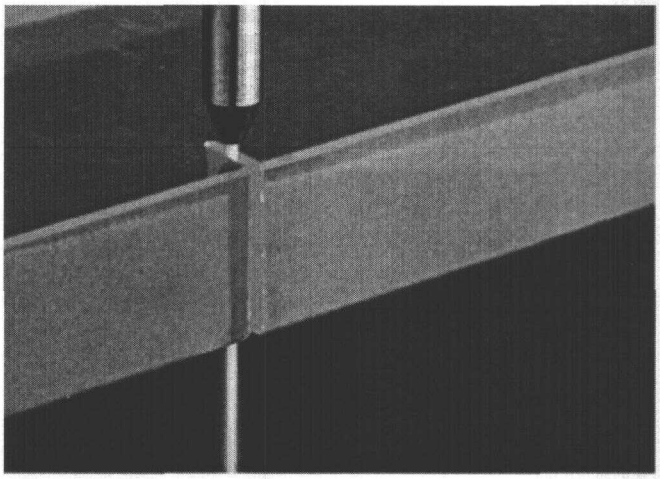


Figuur 5.4: het draadvonken van een hardmetalen tandwiel met een sleufbreedte van 100 µm.

Nadeel is dat de producten uit een metalen plaat gevonkt worden, kuststoffen of andere materialen komen dus niet in aanmerking voor dit proces. Een ander nadeel is dat de bewerking uitgevoerd wordt door de gehele diepte van het materiaal. Er kunnen dus geen kanalen met een bepaalde diepte gevonkt worden, daarom komt deze bewerking niet in aanmerking.

5.5 Waterstraal snijden

Hoge-druk waterstralen kan gebruikt worden voor het snijden van bijna alle materialen. De sleuf die ontstaat is 100 – 1300 μm breed. Zo min mogelijk materiaalverlies en minimale proceskrachten zijn enkele voordelen van deze techniek. De volgende figuur geeft dit proces weer.



Figuur 5.6: waterstraal snijden van een kunststof plaatsje met een waterstraal van 100 μm breed.

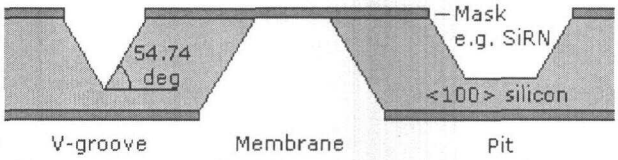
Nadeel is dat de bewerking uitgevoerd wordt door de gehele diepte van het materiaal. Er kunnen dus geen kanalen met een bepaalde diepte gestraald worden, daarom komt deze bewerking niet in aanmerking.

5.6 Etstechniek

Etsen is een bewerkingstechniek waarbij materiaal door een chemische en/of een fysische reactie verwijderd wordt. Hieronder worden twee etstechnieken belicht; KOH etsen en DRIE etsen.

5.6.1 KOH etsen

KOH is een etsvloeistof waarmee nat geëtst kan worden. Door de chemische reactie, die ontstaat bij het in contact komen van de etsvloeistof en het te silicium, lost het silicium op en wordt hierdoor verwijderd. Onderstaande figuur toont voorbeelden van deze etstechniek.

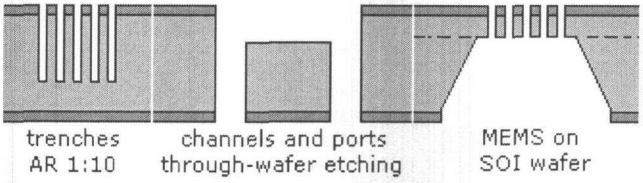


Figuur 5.7: voorbeelden van natetsen. Ref. [2]

Nadeel is echter dat de kanalen, door de kristalstructuur van het silicium, schuin aflopende wanden krijgen. De oppervlakteruwheid $R_a \leq 20$ nm.

5.6.2 DRIE

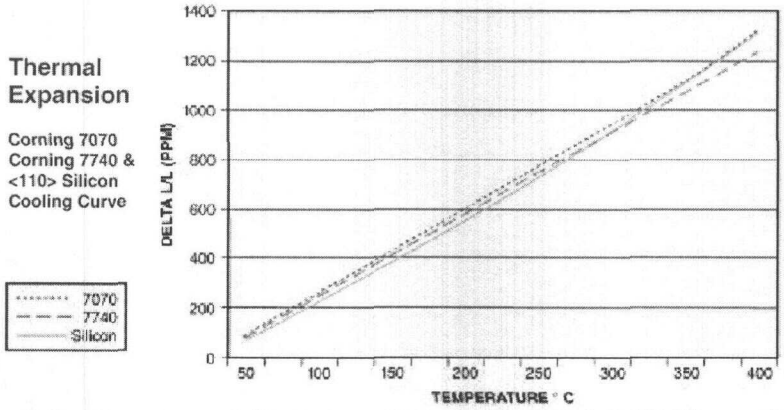
DRIE etsen (*Deep Reactive Ion Etching)* is een droogets techniek. Dit wil zeggen dat geladen deeltjes energie krijgen. Deze energie wordt gebruikt om materiaal weg te halen (kapot te maken) op plaatsen waar het gewenst is. Er komt geen vloeistof aan te pas. En er hoeft nu geen rekening gehouden te worden met de kristalstructuur van de silicium wafer. Voordeel is dat er gaten gemaakt kunnen worden, die loodrecht naar benen gaan met aan de wanden in op de bodem een oppervlakteruwheid $R_a < 50$ nm. De volgende figuur toont voorbeelden van deze drooggeëtste loodrechte kanalen.



Figuur 5.8: voorbeelden van droogetsen. Ref. [2]

Om nu de onderplaat te vervaardigen, is het mogelijk om de kanalen droog te etsen en de in- en uitlaat gaten nat te etsen.
Het is echter ook mogelijk om de kanalen en de in- en uitlaat beiden nat te etsen.

Zoals uit de eerste hoofdstukken al is gebleken, hebben silicium microkanalen de voorkeur, omdat deze via anodisch bonden aan de bovenplaat bevestigd kunnen worden. Hierdoor wordt de doorbuiging van de bovenplaat sterk gereduceerd en kan de glasplaat dunner worden. Doordat het silicium en het glas ongeveer dezelfde uitzettingcoëfficiënt hebben ontstaan er geen problemen bij temperatuur veranderingen (zie *Fig. 5.9*). De etstechniek is het meest geschikt om microkanalen in silicium te maken. Omdat het oppervlak voor warmtewisseling het grootste is bij kanalen met een rechthoekige i.p.v. een driehoekige doorsnede, is er gekozen voor droog etsen.



Figuur 5.9: uitzettingscoëfficiënt van Pyrex glas (7070 & 7740) en silicium. Ref. [6]

6 Pomp

Tenslotte is er een pomp nodig om de vloeistof door de microkanalen te pompen. Een eis is dat de pomp de drukval aan moet kunnen en het gewenste debiet bij deze druk moet kunnen verpompen.

Als er 20 kanalen ($n_{kanalen}$) zijn van 100 μm x 200 μm (B x H) en de snelheid van het water in 1 kanaal bedraagt v = 0,2 m/s dan is de debiet (Φ) waarmee de pomp moet pompen:

$$\Phi = n_{kanalen} \cdot B \cdot H \cdot v$$

$$\Phi = 20 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}2 = 0{,}8 \cdot 10^{-7}\ m^3/s = 0{,}08\,cm^3/s$$

voor 40 kanalen is dit: $0{,}16\,cm^3/s$

Hoe breed zijn de tussenwanden bij 20 kanalen van 100 μm breed over een totale breedte van 1 cm? (bij 20 kanalen zijn er 19 tussenwanden)

De totale breedte van een *n* aantal kanalen.

$$B_n = B \cdot n_{kanalen}$$

$$B_n = 20 \cdot 0{,}1 = 2\,mm$$

De totale dikte van een *n* aantal tussenwanden.

$$D_n = b - B_n$$

$$D_n = 10 - 2 = 8\,mm$$

De dikte van één tussenwand.

$$D = \frac{D_n}{n_{tussenw}}$$

$$D = \frac{8}{19} = 0{,}421\,mm$$

In deze tabel is te zien wat er verandert als het aantal microkanalen toeneemt.

H (mm)	B (mm)	$n_{kanalen}$	b (mm)	v (m/s)	D (mm)	Φ (cm³/s)
0,2	0,1	20	10	0,2	0,421053	0,08
0,2	0,1	30	10	0,2	0,241379	0,12
0,2	0,1	40	10	0,2	0,153846	0,16

Tabel 6.1: microkanaal afmetingen en aantallen met bijbehorende snelheden en debiet.

7 Samenstellen van de oplossing

Er zijn veel verschillende fabricage technieken, waarmee de microkanalen vervaardigd kunnen worden. Er is gekozen voor het fabriceren van microkanalen door middel van etstechnieken, omdat de kanalen erg maatvast vervaardigd worden met een zeer kleine oppervlakteruwheid. Bovendien kan het glas aan de microkanalen verbonden worden door middel van bonding. Dit heeft als voordeel dat de het glas vrij dun kan zijn, zonder dat er enige vervorming of scheurvorming plaatsvindt. Hierdoor is het mogelijk om met de microscoop dicht bij de microkanalen te komen. Bovendien kan er geen water over de kanalen heen gaan. Het warmte-element (blok) kan, voor een goede warmteoverdracht, door middel van een geleidende pasta aan de onderplaat bevestigd worden. Dit geheel kan nu in de behuizing geklemd worden. Afdichtringen tussen de onderplaat en de behuizing voorkomen lekkage. (*zie Fig. 7.1 op de volgende pagina*)

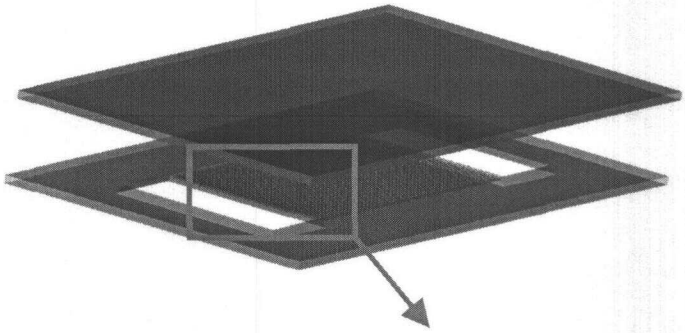
In het onderstaande overzicht zijn de keuzes die bij het ontwerpen naar voren zijn gekomen weergegeven.

Functie	Oplossing 1	Oplossing 2	Oplossing 3	Oplossing 4	Oplossing 5	Oplossing 6
Fabricage v/d microkanalen	Frezen	Draadvonken	Etsen	Waterstralen	Spuitgieten	Laser snijden
Glasplaat / microkanalen bevestiging	Lijmen	Uit 1 stuk maken	Anodisch bonden	Solderen	Lassen	Klemmen
Microkanalen / behuizing bevestiging	Lijmen	Uit 1 stuk maken	Anodisch bonden	Klemmen	Lassen	Solderen
Verwarmen	Spiraal	Opdampen	Blok			
Positie in- en uitlaatstuk	Boven onderplaat	Onder onderplaat	Boven glasplaat	Voor / achter	Links / rechts	Combinatie
Waterdicht houden	Bevestigingsmethode	Materiaal keuze	Afdichtring	Pakking		
Druk weerstaan	Dikke glasplaat groot venster	Dunne glasplaat klein venster	Dunne glasplaat groot venster			
Warmte-element onderplaat bevestiging	Klemmen	Uit 1 stuk maken	Anodisch bonden	Lijmen met geleidende pasta	Lassen	Solderen

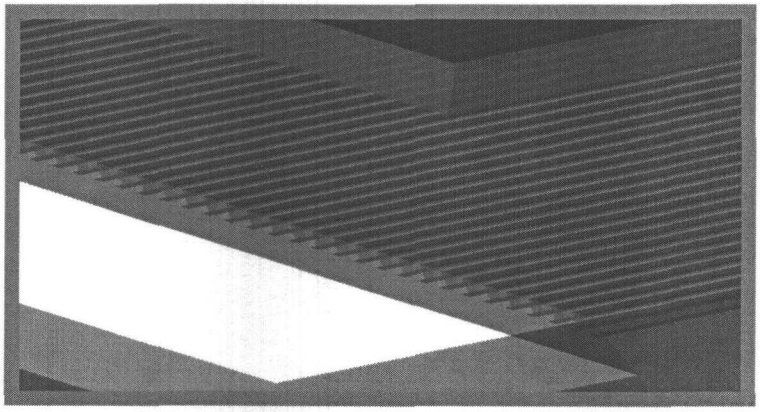
Figuur 7.1: een overzicht van de gekozen oplossingen. De lijn geeft aan welk pad doorlopen is.

8 Concept uitwerking

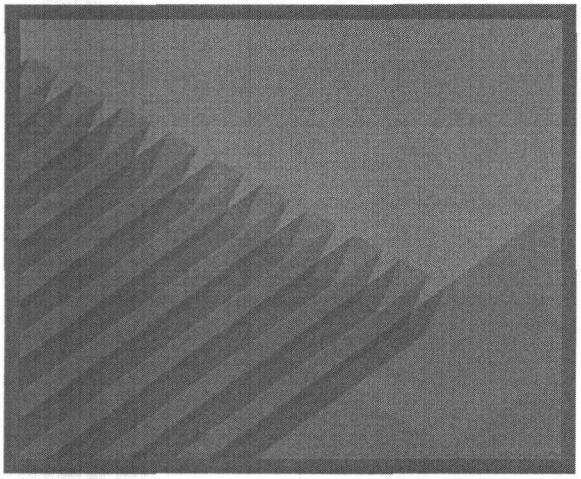
Hier zijn enkele driedimensionale detail tekeningen weergegeven ter verduidelijking van het uiteindelijke ontwerp. Voor werktekeningen *zie bijlage 3.*

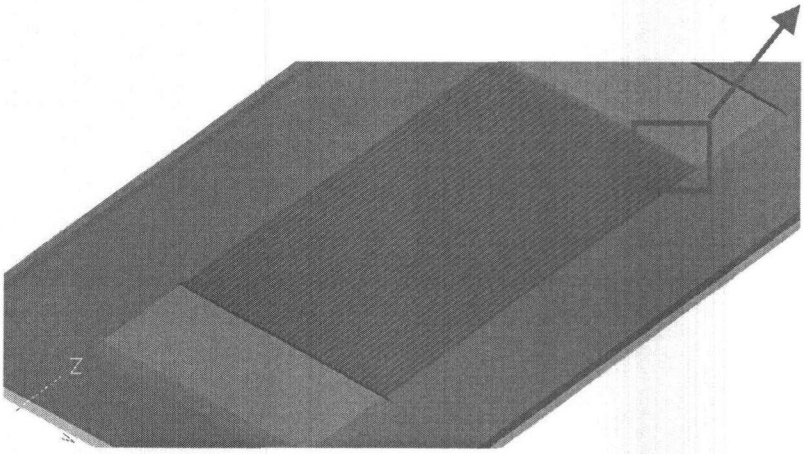


Links: *exploded-view van de glasplaat en de onderplaat met microkanalen.*
Onder: *detail van de microkanalen.*

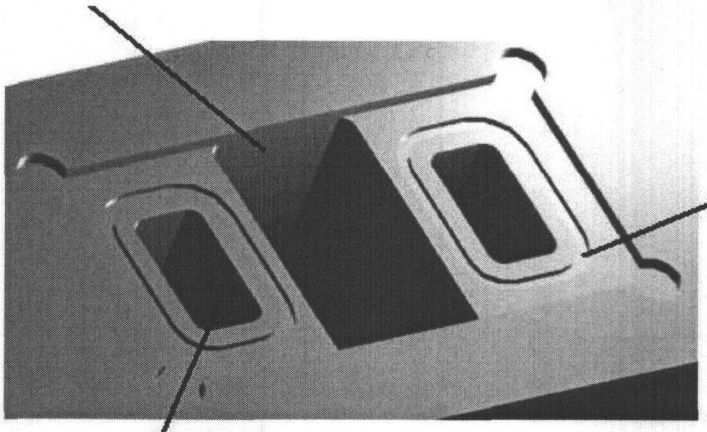


Rechts: *door de glasplaat heen, zijn de tussenwanden van de microkanalen duidelijk herkenbaar.*

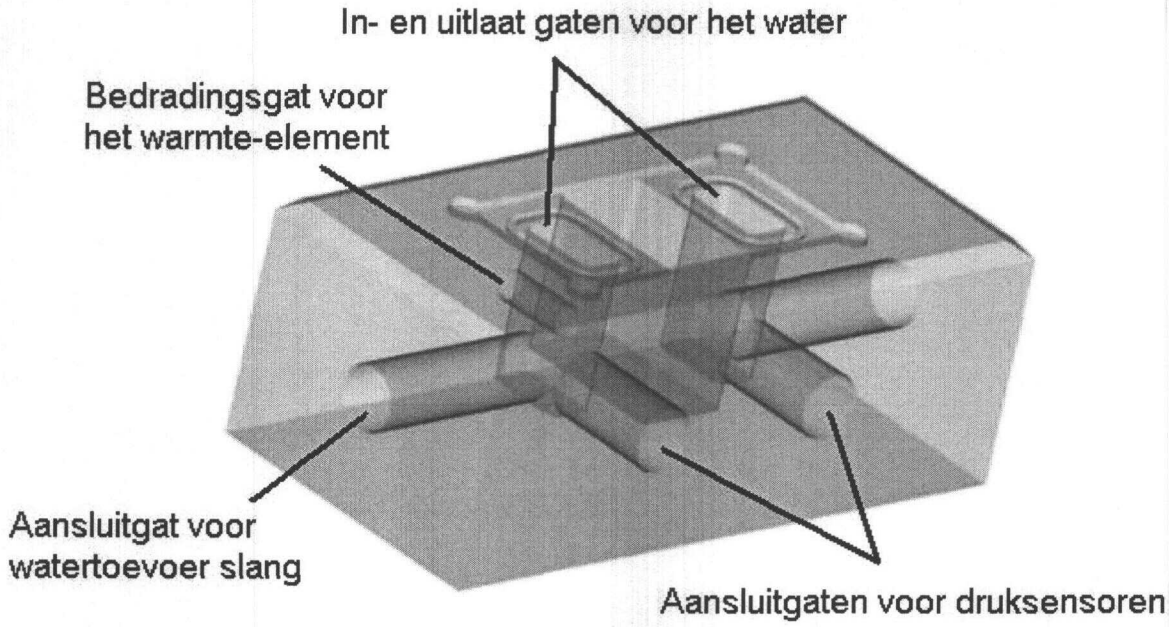




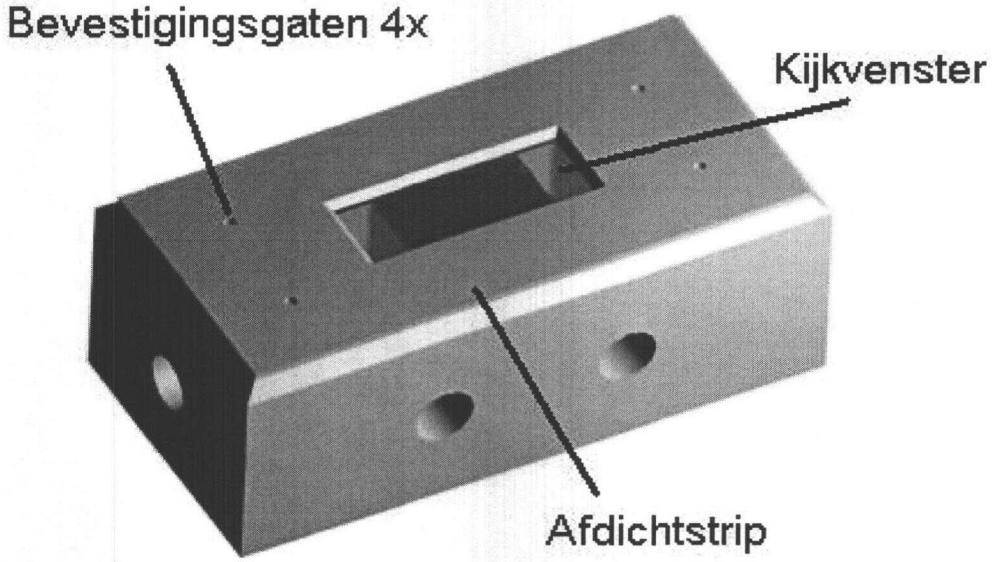
Links: *De microkanalen met links en rechts de in en uitlaat. Boven op de microkanalen is de glasplaat d.m.v. anodisch bonden bevestigd.*



Boven: *in deze rechthoek wordt de onderplaat met vaste glasplaat gemonteerd. In de groeven komen afdichtringen om lekkage tussen de behuizing en de onderplaat te verkomen.*



Boven: *voor de verduidelijking een transparante behuizing.*
Onder: *door middel van vier M1,5 schroeven kan de afdichtstrip tegen de behuizing aan geschroefd worden en zorgt zo voor een goede opsluiting van de onderplaat tegen de behuizing. In de afdichtstrip zit een venster waardoor met behulp van een microscoop naar binnen gekeken kan worden.*



Bronvermelding

8.1 Literatuur

[1] Dictaat Fysische Meetmethoden 4P580
prof. dr. ir. A.A. van Steenhoven
dr. K.R.A.M. Schreel
TU/e Eindhoven, 2000

[2] LioniX BV
www.lionixbv.nl

[3] Sterkteleer voor Technici.
Russel C. Hibbeler
Academic Service, Schoonhoven, 1999

[4] www.raytech.be

[5] http://hikwww1.fzk.de/pmt/

[6] www.corning.com

8.2 Geraadpleegde literatuur

Methodisch Ontwerpen
J.C.F. de Beer
Academic Service, Ulvenhout, 1997

Technische Informatie voor werktuigbouwkundigen
Educatieve Partners Nederland bv, Culemburg, 1993

Roloff / Matek Machineonderdelen
Wilhelm Matek
Dieter Muhs
Herbert Wittel
Manfred Becker
Dieter Janasch
Academic Service, Schoonhoven, 2000

Binas (Informatieboek vwo-havo voor het onderwijs in de natuurwetenschappen)
NVON-commissie
Wolters-Noordhoff bv, Groningen, 1992

Glas
Pieterman Hardglas

Glas:
www.berliner-glas.de
www.technicalglass.com
www.laseroptik.de
www.schott.com
www.solgel.com
www.edmundoptics.com
www.corning.com

Wafer Bondings
www.evgroup.com
www.lionixbv.nl
www.mpi-halle.mpg.de
www.sensorsmag.com

Microkanalen
www.technion.ac.il
www.physicstoday.org
www.greiner-bio-one.co.jp
www.ca.sandia.gov
http://microtechnology.teknologisk.dk
www.iis.u-tokyo.ac.jp

Microfabricage:
www.technet.pnl.gov/dme/micro/
http://hikwww1.fzk.de/pmt/
www.memagazine.org/
www.ee.ualberta.ca

Lasersnijden:
www.raytech.be
www.p-c-s.be

Draadvonken
www.hoekvonkerosie.nl
www.draadvonk.nl/draadvonken.htm

Materialen:
www.cee.hw.ac.uk
www.microchem.com

9 Symbolen en afkortingen

9.1 Symbolen

L	Lengte microkanaal	m
B	Breedte microkanaal	m
H	Hoogtemicrokanaal	m
D	Tussenwand dikte	
v	snelheid	m/s
T	Temperatuur	°C
P	Druk	bar
ΔP	Drukverschil	bar
q"	Warmtestroomdichtheid	W/m^2
λ	Warmtegeleidingcoëfficiënt	W/m·K
A_{kamers}	Oppervlakte van de kamers	m^2
n_{kamers}	Aantal kamers	
l	kamer lengte	m
b	kamer breedte	m
A_{kanaal}	oppervlakte van één kanaal	m^2
$A_{kanalen}$	oppervlakte van de kanalen	m^2
$n_{kanalen}$	aantal kanalen	
A_{totaal}	Totaaloppervlak	m^2
F	kracht	N
q	Verdeelde belasting	N/m
I	Kwadratisch oppervlaktemoment	m^4
v_{max}	maximale doorbuiging	m
E	Elasticiteitsmodulus	Pa
B_{plaat}	Plaat breedte	m
L_{plaat}	Plaat lengte	m
D_{plaat}	Plaat dikte	m
σ	buigbreeksterkte	N/m^2
d	berekende glasplaat dikte	m
S	veiligheidsfactor	
α	factor afhankelijk van het verhoudingsgetal lengte breedte	
Φ	Debiet	m^3/s
B_n	Totale breedte van de kanalen	m
D_n	Totale dikte van de tussenwanden	m
$n_{tussenw}$	Aantal tussenwanden	

9.2 Afkortingen

PIV	Particle Image Velocimetry
CCD	Charge Coupled Device
PMMA	polymethylmethacrylaat
RVS	Roestvast staal
MEMS	micro elektronica mechanische systemen
SOI	Silicon-op-isolator technologie
FS	Front side
BS	Back side
CR	Clean room
DRIE	Deep Reactive Ion Etching

10 Dankbetuiging

Bij deze wil ik Dhr. T.A.M. Jansen bedanken voor het contact binnen de groep Energietechnologie van de TU Eindhoven en voor al zijn hulp.
Verder wil ik prof. dr. ir. A.A. van Steenhoven bedanken voor het verkrijgen van deze opdracht en dr. ir. A.J.H. Frijns voor de begeleiding tijdens mijn afstudeer periode.

Ook bedank ik ir. R.J.L.J. de Regt, die het mogelijk maakte om een kijkje te nemen bij MESA+.

Verder gaat mijn dank uit naar alle betrokken medewerkers van de Gemeenschappelijke Technische Dienst, LioniX BV, Philips Research en Energie Technologie.

11 Bijlagen

Bijlage 1

De warmtegeleidingcoëfficiënt λ bij 20 graden Celsius:

- Koper : 390 W/(m·K)
- Silicium : 157 W/(m·K)
- Pyrex glas bijv. : 1,1 W/(m·K)

Bijlage 2

merken fysische eigenschappen toepassingen

TABEL I

Merknaam	Toepassing	Glassoort	Chemische samenstelling
SILINORM®	kan overal worden toegepast waar geen sprake is van verhoogde druk, temperatuur of chemische aantasting	natronkalksilikaatglas	72 % siliciumoxyde 15 % natriumoxyde 9 % calciumoxyde 3 % magnesiumoxyde 1 % aluminiumoxyde
SILIDUR®	wordt toegepast bij verhoogde temperatuur en/of druk, zonder dat er sprake is van chemische aantasting	thermisch voorgespannen natronkalksilikaatglas	
BORONORM®	voor toepassing bij verhoogde temperaturen en waarbij chemische aantasting kan optreden	borosilikaatglas	80 % siliciumoxyde 4 % natriumoxyde 14 % boriumoxyde 2 % aluminiumoxyde
BORODUR®	is sterker dan BORONORM®, en tevens bestand tegen grote temperatuurverschillen over het glas	thermisch voorgespannen borosilikaatglas	
VYCOR®	wordt toegepast bij temperaturen tussen 500 en 1200° C	96 % silicumglas	96 % siliciumoxyde 3 % boriumoxyde
FIRENORM®	voor het observeren van verbrandingsprocessen	blauw borosilikaatglas	als BORONORM®

TABEL II

	Symbool	SILINORM®	SILIDUR®	BORONORM® FIRENORM®	BORODUR®	VYCOR®
Lineaire uitzettingskoëfficiënt tussen 20-300°C, m/m°C	α	90.10^{-7}	90.10^{-7}	32.10^{-7}	32.10^{-7}	8.10^{-7}
Soortelijke massa kg/m³	ρ	$2{,}50.10^{3}$	$2{,}50.10^{3}$	$2{,}23.10^{3}$	$2{,}23.10^{3}$	$2{,}18.10^{3}$
Konstante van Poisson	μ	0,25	0,25	0,20	0,20	0,19
Elasticiteitsmodulus N/m²	E	7.10^{10}	7.10^{10}	$6{,}4.10^{10}$	$6{,}4.10^{10}$	$6{,}7.10^{10}$
Ontlaattemperatuur in °C	T_a	510	510	565	565	1020
Max. toelaatbaar temp. verschil over het glas, °C *a)* bij glasdikte 6 mm	δ	40	200	100	250	900
bij glasdikte 15 mm		30	150	80	225	—
Max. gebruikstemperatuur, °C	T_m	470	270 *c)*	500	300	900 kontinu 1200 interm.
Gem. buigbreeksterkte bij 20° C, N/m²	σ_b	70.10^{6}	18.10^{7}	70.10^{6}	16.10^{7}	70.10^{6}
trekspanning aanbevolen voor gebruik bij sterkteberekeningen bij 20° C, N/m² *b)*	$\bar{\sigma}$	8.10^{6}	6.10^{7}	8.10^{6}	4.10^{7}	7.10^{6}

a) De waarden δ (° C) zijn bepaald door de monsters na verwarming in een oven onder te dompelen in water.

b) Voor trekspanningen toe te passen bij sterkteberekeningen bij temperaturen boven 20° C zie tabel III.

c) Wanneer het glas in aanraking komt met water en stoom, ligt deze waarde op 150° C in verband met aantasting van het oppervlak.

TABEL III

Trekspanningen boven 20° C voor sterkteberekeningen

Glassoort	Gebruikstemp.	Trekspanning in N/m² bij glasdikte 5 mm	10 mm	20 mm	30 mm
SILINORM®	100°C.	$6{,}50.10^{6}$	$5{,}50.10^{6}$	$3{,}50.10^{6}$	$1{,}00.10^{6}$
SILIDUR®	100°C.	$5{,}85.10^{7}$	$5{,}75.10^{7}$	$5{,}55.10^{7}$	$5{,}30.10^{7}$
	250°C.	$5{,}50.10^{7}$	$5{,}00.10^{7}$	$4{,}20.10^{7}$	$3{,}60.10^{7}$
BORONORM®	100°C.	$7{,}50.10^{6}$	$7{,}10.10^{6}$	$6{,}40.10^{6}$	$5{,}80.10^{6}$
	250°C.	$6{,}40.10^{6}$	$5{,}10.10^{6}$	$2{,}70.10^{6}$	$0{,}80.10^{6}$
	400°C.	$4{,}70.10^{6}$	$1{,}50.10^{6}$	—	—
BORODUR®	100°C.	$3{,}96.10^{7}$	$3{,}90.10^{7}$	$3{,}84.10^{7}$	$3{,}78.10^{7}$
	200°C.	$3{,}87.10^{7}$	$3{,}77.10^{7}$	$3{,}60.10^{7}$	$3{,}42.10^{7}$
	300°C.	$3{,}80.10^{7}$	$3{,}60.10^{7}$	$3{,}28.10^{7}$	$2{,}96.10^{7}$
VYCOR®	100°C.	$6{,}90.10^{6}$	$6{,}80.10^{6}$	$6{,}60.10^{6}$	$6{,}50.10^{6}$
	250°C.	$6{,}60.10^{6}$	$6{,}30.10^{6}$	$5{,}80.10^{6}$	$5{,}30.10^{6}$
	400°C.	$6{,}20.10^{6}$	$5{,}50.10^{6}$	$4{,}30.10^{6}$	$3{,}50.10^{6}$
	600°C.	$5{,}80.10^{6}$	$4{,}80.10^{6}$	$3{,}10.10^{6}$	$2{,}70.10^{6}$

dikten

BEREKENINGSWIJZE BENODIGDE GLASDIKTE

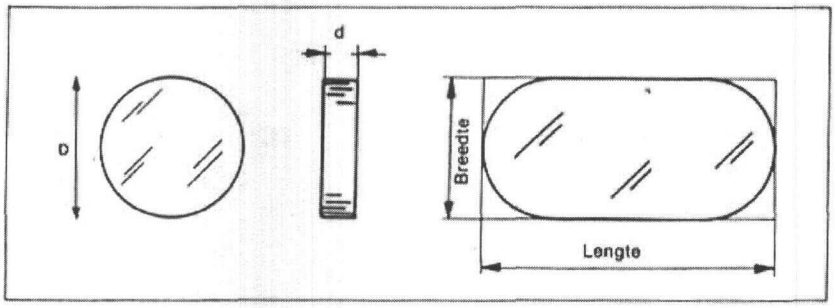
Als basis voor de glasdiktebereke-ningen wordt gebruik gemaakt van de formule van Timoshenko. Deze luidt voor

ronde kijkglazen:

$$d = 0.55\,D \sqrt{\frac{P.S}{\sigma}}$$

rechthoekige kijkglazen:

$$d = \alpha\,.B \sqrt{\frac{P.S}{\sigma}}$$



D = diameter kijkglas in mm

B = glasbreedte in mm

d = dikte kijkglas in mm
P = procesdruk in N/m²
σ = buigbreeksterkte in N/m²
S = veiligheidsfaktor

α = faktor afhankelijk van het verhoudingsgetal lengte : breedte

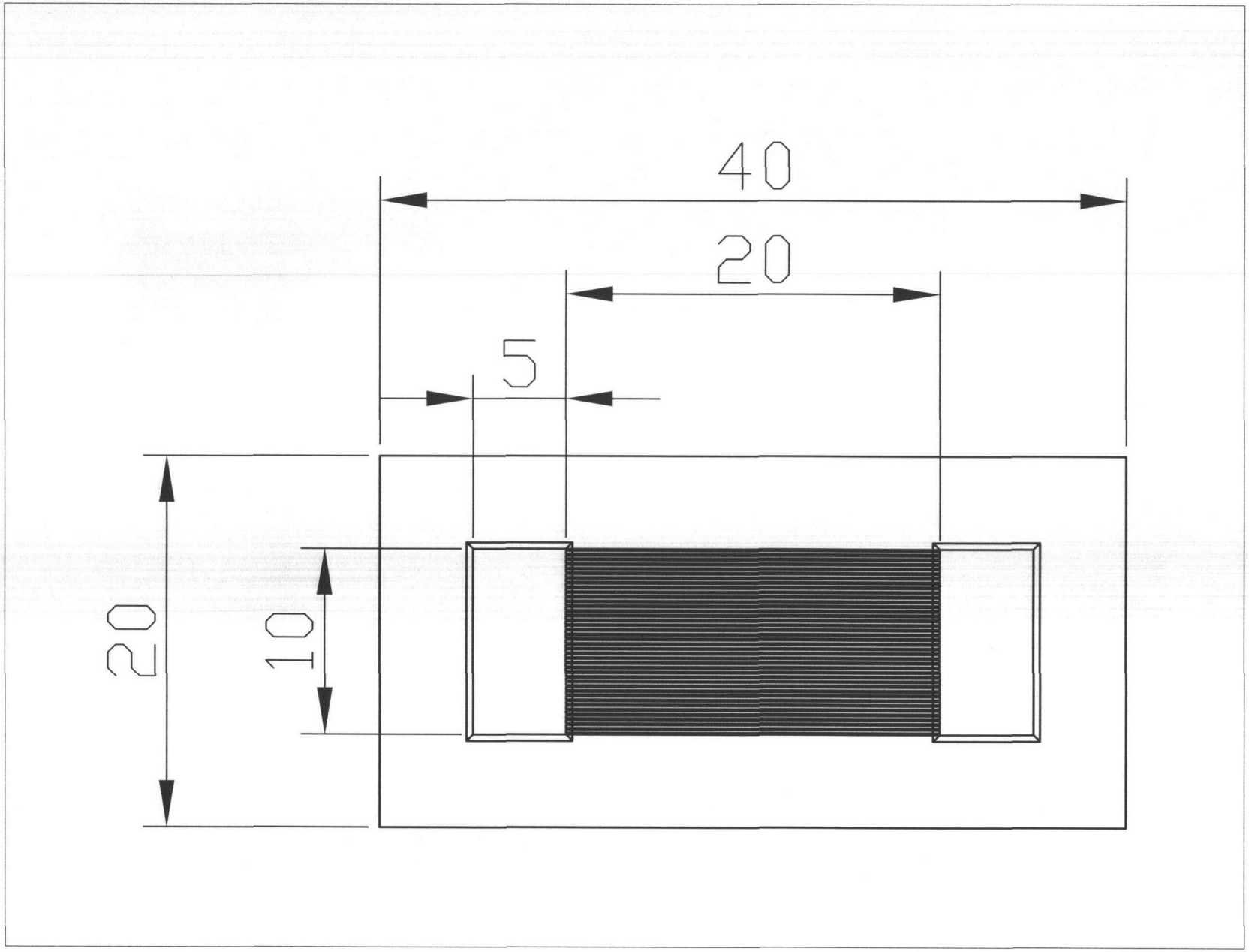
Lengte / Breedte	α
1.0	0.535
1.2	0.613
1.4	0.673
1.6	0.720
1.8	0.754
2.0	0.780
3.0	0.854
4.0	0.860
5.0	0.864
boven 5.0	0.865

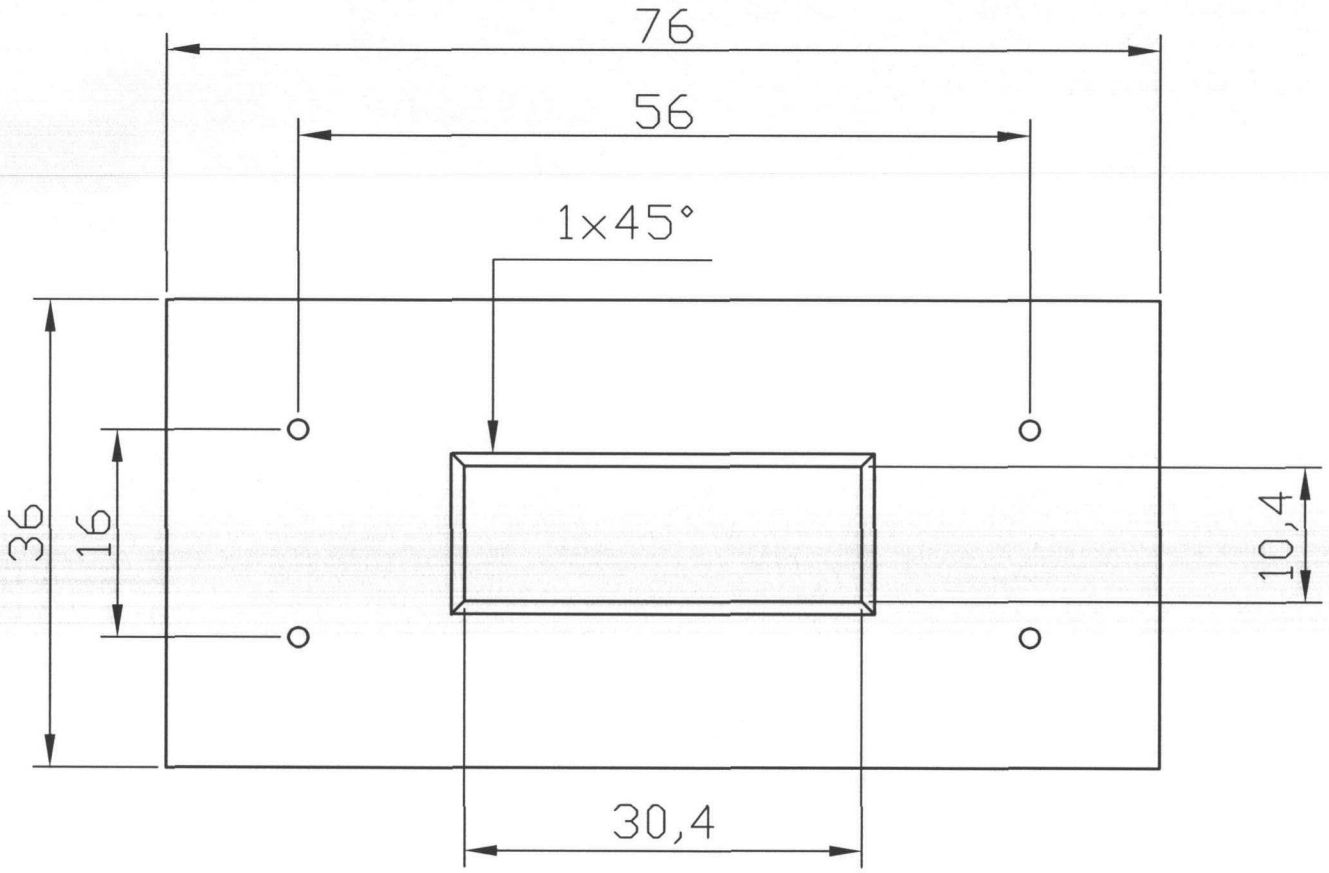
TABEL V

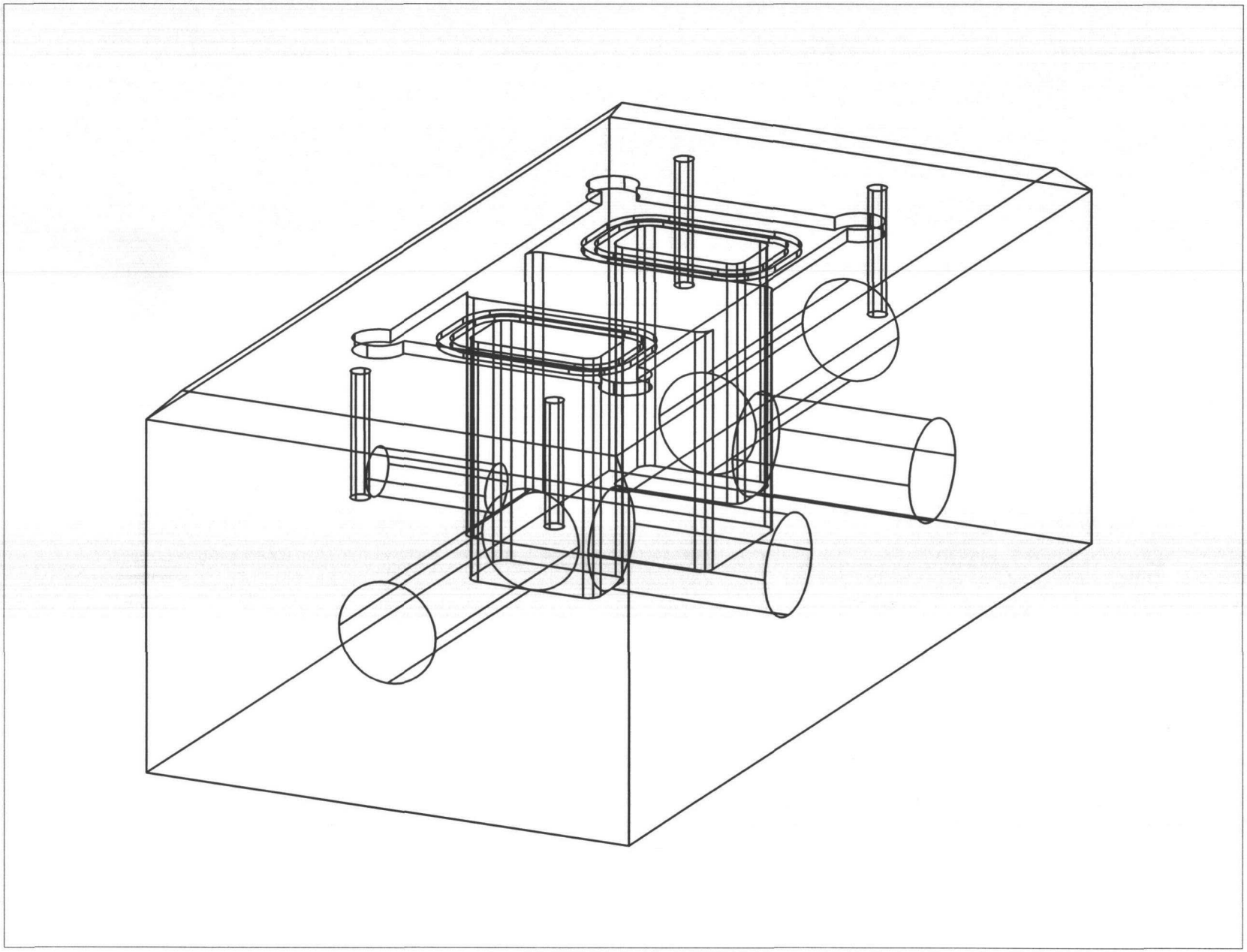
TABEL VOOR HET VERBAND TUSSEN DE VERSCHILLENDE DRUKEENHEDEN

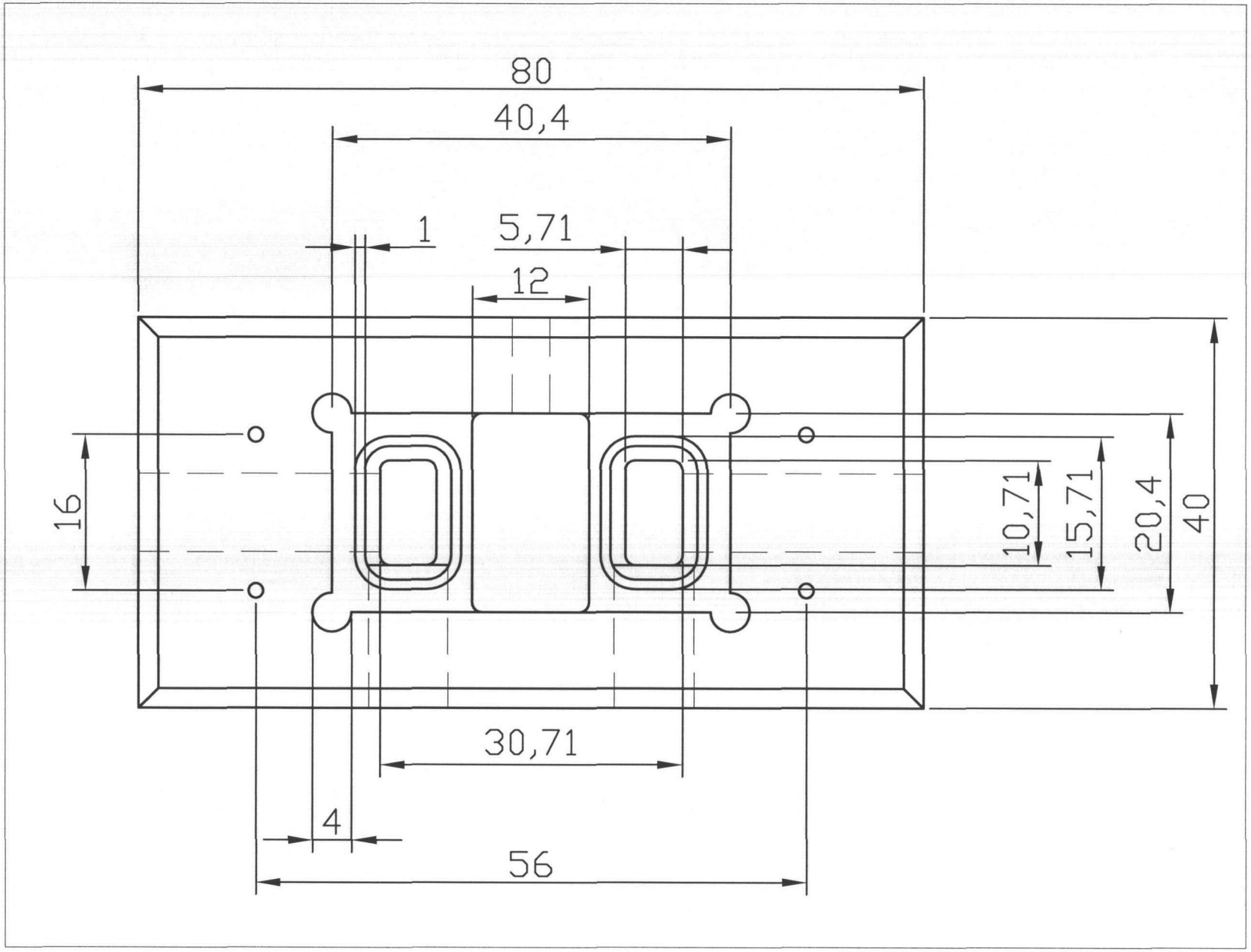
	kgf/cm²	atm	N/m²	bar	psi
1 kgf/cm²	1	0,968	$0{,}981.10^{5}$	0,981	14,22
1 atm	1,033	1	$1{,}014.10^{5}$	1,014	14,70
1 N/m²	$1{,}02.10^{5}$	$0{,}987.10^{5}$	1	10^{5}	$14{,}5.10^{5}$
1 bar	1,02	0,987	10^{5}	1	14,5
1 psi	0,0703	0,068	$6{,}9.10^{3}$	0,069	1

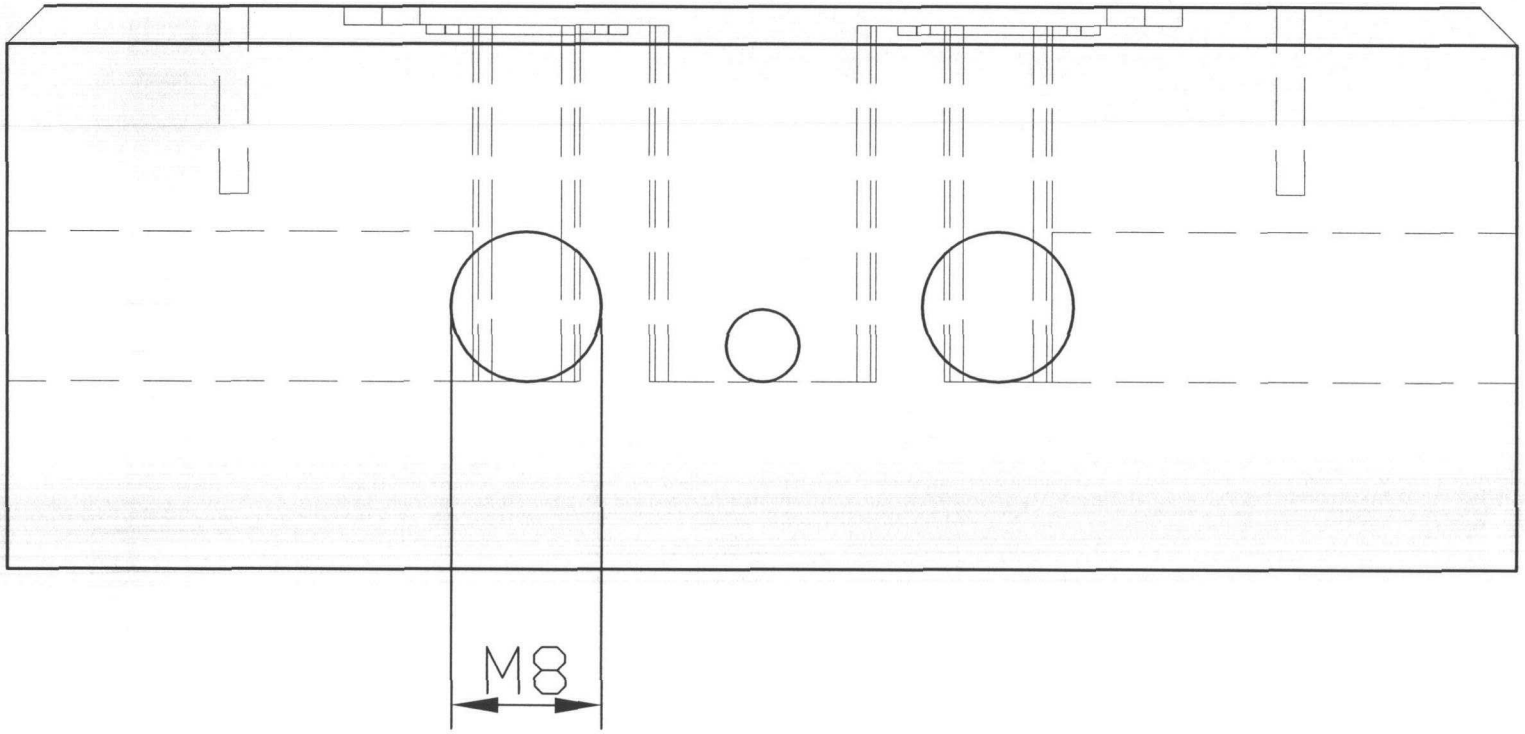
Bijlage 3

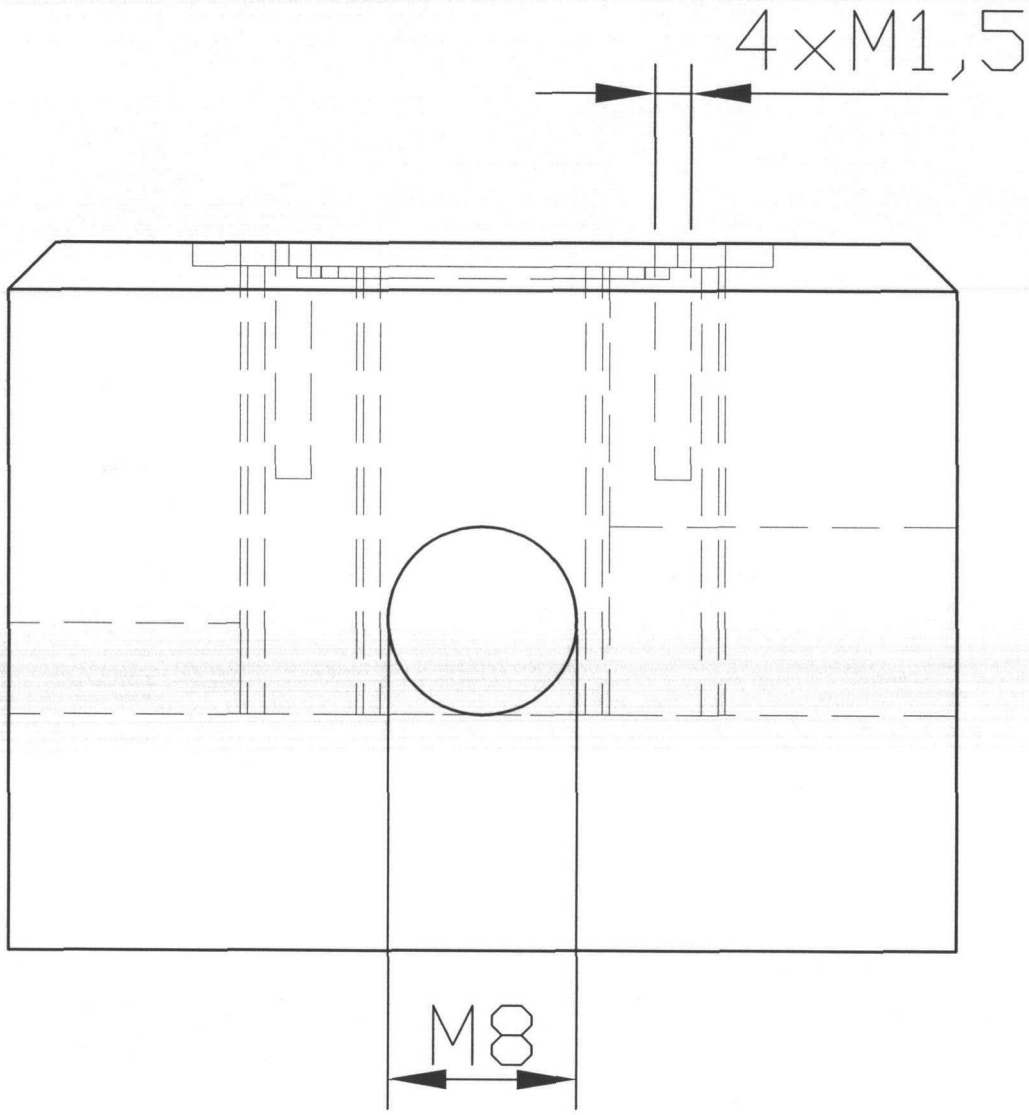

40
20
5
20
10


76
56
1×45°
36
16
10,4
30,4




80
40,4
1
5,71
12
16
10,71
15,71
20,4
40
30,71
4
56


M8


4xM1,5
M8