

Laserafstandmeter voor Satelliet Geodesie

H. Visser en B.A. v.d. Zwan

TNO-TPD, Postbus 155, 2600 AD Delft

Inleiding

Geodesie is de wetenschap die zich o.a. bezighoudt met de bewegingen van de aardkust. Deze bewegingen zijn in de orde van grootte van enkele millimeters tot centimeters per jaar. Om deze bewegingen goed in kaart te brengen is het noodzakelijk om ook afstanden van tienduizenden kilometers tussen plaatsen op aarde te bepalen met een zelfde nauwkeurigheid van circa 1 cm. De satelliet laserafstand meter techniek biedt deze mogelijkheid.

Een satelliet Laser Afstand Meter (LAM) bestaat uit.

- een pulslaser
- een telescoop
- een detector
- een nauwkeurig tijdmeetsysteem
- meerdere satellieten uitgerust met retroreflectors

Het meetprincipe is eenvoudig. op een zeker tijdstip wordt een laserpuls van enkele milli-Joules weggeschoten naar een met één of meerdere retroreflectoren uitgeruste satelliet. De retroreflector op de satelliet kaatst de puls terug naar de LAM waar het tijdstip van terugkeer van de puls (vaak 1 photon) nauwkeurig wordt gemeten met behulp van een detector. Daar de snelheid

van het licht bekend is bepaalt de looptijd van de puls de afstand van de LAM t.o.v. de satelliet. Een correctie voor de afgelegde afstand in de atmosfeer is hierbij noodzakelijk maar deze kan goed gemodelleerd worden en is hoofdzakelijk afhankelijk van de nauwkeurig gemeten luchtdruk.

Over de hele aarde worden afstanden naar diverse satellieten door meerdere LAM stations gemeten. Hierdoor is er geleidelijk een netwerk ontstaan waaruit de afstand van bijvoorbeeld Amsterdam-Sidney bepaald kan worden met een nauwkeurigheid van circa 2 cm.

De volgende tabel geeft van een aantal satellieten waarop gemeten wordt met de gemiddelde hoogte van hun baan. Sommige zijn speciaal bedoeld voor geodetische doeleinden, anderen zijn uitgerust met een retroreflector zodat zij opgenomen kunnen worden in het net van geodesiemetingen waardoor de baan van de satelliet nauwkeurig bekend wordt. Ook op de maan zijn een aantal retroreflectoren geplaatst. Hierop wordt met laserafstandmeters hoofdzakelijk gemeten om fundamenteel onderzoek te doen o.a. naar gravitatie golven.

Naam satelliet	Afstand in km	Retroreflector diam. in cm	Doel van de afstandsmeting
Lageos	7 000	60	Geodetisch
Glonass	20.000	70	Geodetisch
ERS-2	780	10	Bepaling baan
Maan	384 000	100	Fundamenteel onderzoek

De LAM gemaakt door TNO

Daar een LAM een betrekkelijk kostbaar en complex instrument is hebben slechts een beperkt aantal landen de beschikking over een dergelijk instrument. Weinig van die landen bevinden zich op het zuidelijk halfrond waar dan ook een 'gat' ontstaan is in meetnet. Om dit gat te vullen laat het Duitse instituut voor geodesie een transportabel meetstation ontwikkelen waar diverse geodetische technieken gecombineerd gebruikt zullen worden. Dit station bestaat uit een vijftal 12 meter containers die met intervallen van ongeveer 1 jaar op diverse locaties op het zuidelijk halfrond metingen gaat verrichten. Een onderdeel hiervan is het laserafstandmetersysteem wat nu ontwikkeld en gebouwd wordt door TNO. Om te kunnen meten op diverse locaties met een verschillend klimaat zal deze LAM kunnen werken tussen -20°C en $+40^{\circ}\text{C}$. Het optisch gedeelte van de laser afstandmeter gebouwd door TNO bestaat uit

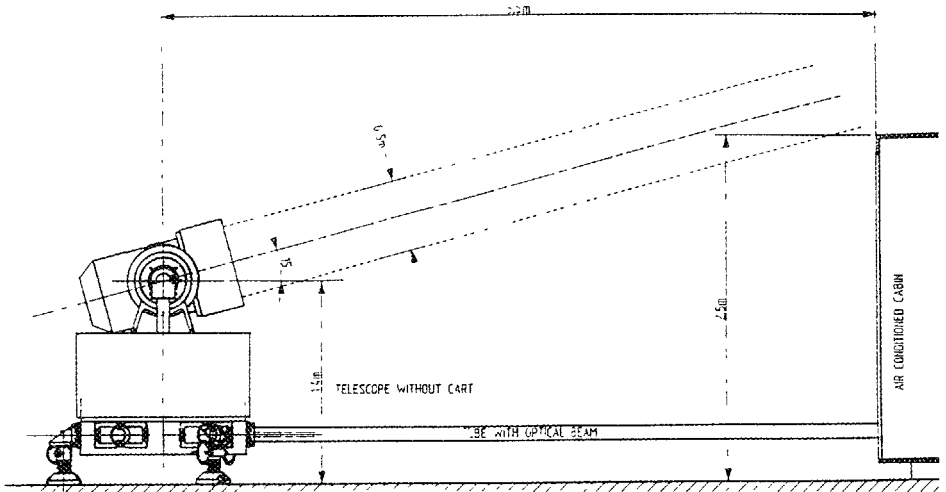
- Een Coudé telescoop in een elevatie over azimuth configuratie (horizontale mechanische as op verticale as)

- Een twee golflengten Titanium Saffier Laser (847 nm 30 mJ + 423,5 nm 30 mJ). Dit is de eerste LAM die simultaan zal meten bij deze twee golflengten.
- Een zend/ontvang optisch systeem dat de verbinding vormt tussen laser/telescoop en telescoop/detectors. (hierna de T/R unit genoemd van Transmit/Receive)

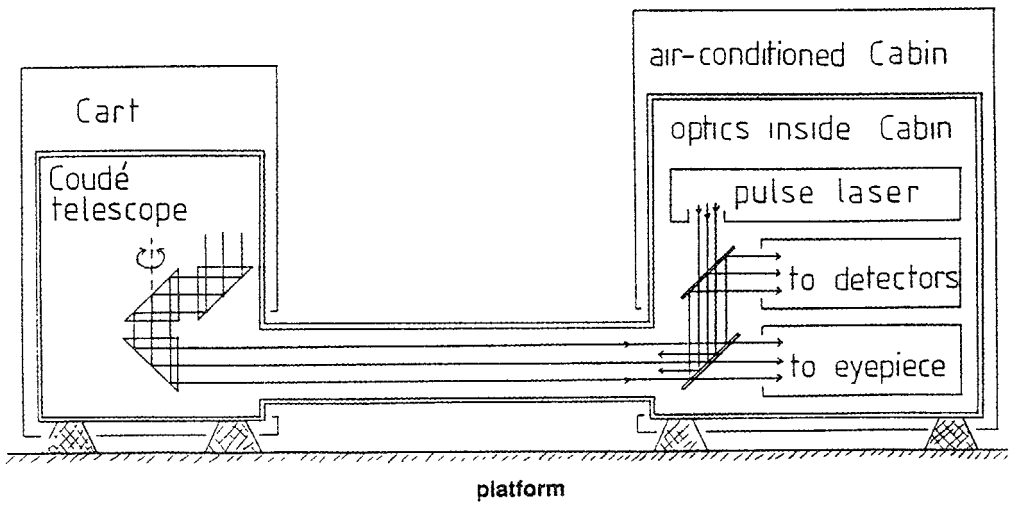
In de mobiele staat zijn alle onderdelen van de LAM ondergebracht in een twaalf meter container. Als het systeem wordt geïnstalleerd op een meetplateau wordt de telescoop in zijn behuizing, een karretje, uit de container gereden. Deze behuizing dient bovendien om de telescoop bij slechte weersomstandigheden te beschermen. De figuren 1 en 2 geven een schematisch beeld van de opstelling. Figuur 3 geeft een CAD plaat van de telescoop in het karretje. Als de telescoop opgesteld staat om te meten is deze 5,5 meter van de container verwijderd.

De telescoop optiek

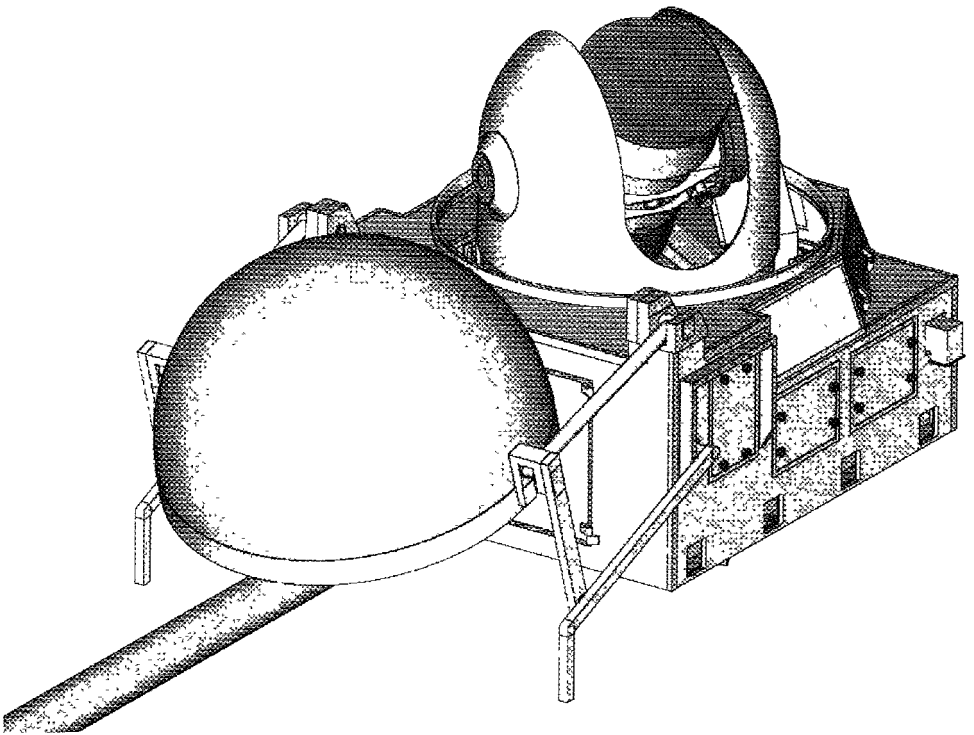
Het algemeen concept van de telescoop



Figuur 1
De telescoop met optische interface naar de container



Figuur 2
Schematische weergave van de opto-mechanische configuratie



Figuur 3
CAD weergave van de verplaatsbare eenheid voor de telescoop

optiek is getekend in figuur 4. De telescoop wordt gebruikt voor zowel het zenden als ontvangen van de laserpuls. Een frontlens met een diameter van 0,5 m (een gekit achromatisch doublet) en een kleiner corrigerend triplet lens systeem vormen de basis van deze Coudé telescoop. De lange brandpuntsafstand van de frontlens is opgevouwen tot een compact en mechanisch uitgebalanceerd systeem met behulp van twee vlakke spiegels. Het triplet lens systeem collimeert de beide ontvangen laser golflijnen tot een bundel met diameter van 60 mm (vergroting $500/60 = 8,33 \times$).

De orientatie van de telescoop in een absoluut coördinaten systeem wordt vastgesteld door een zogenaamd ster programma te draaien. De telescoop wordt gericht op een bekende ster. De ster wordt geobserveerd door een oculair en wanneer de ster exact in het midden van het beeld is (hiervoor is een kruisdraad in het beeld gespiegeld), worden de azimuth en elevatie

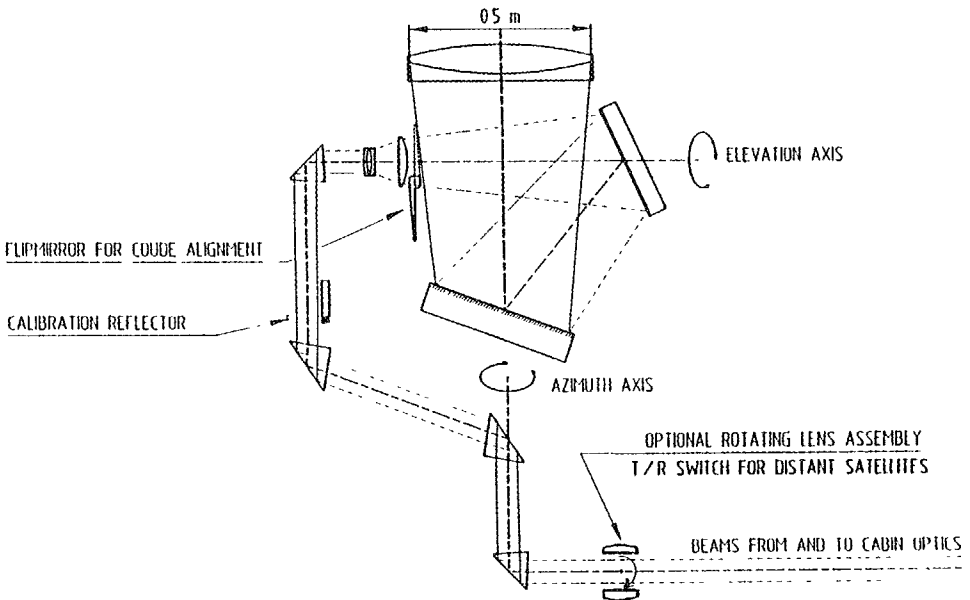
hoeken en het exacte tijdstip vastgelegd. Dit wordt herhaald met meerdere sterren. De telescoop en de rest van het optisch mechanisch systeem zijn van een zodanige nauwkeurigheid dat de telescoop richting na dit programma op beter dan 2 boogseconden bekend is over het hele hoek bereik van de telescoop.

Optiek in de container

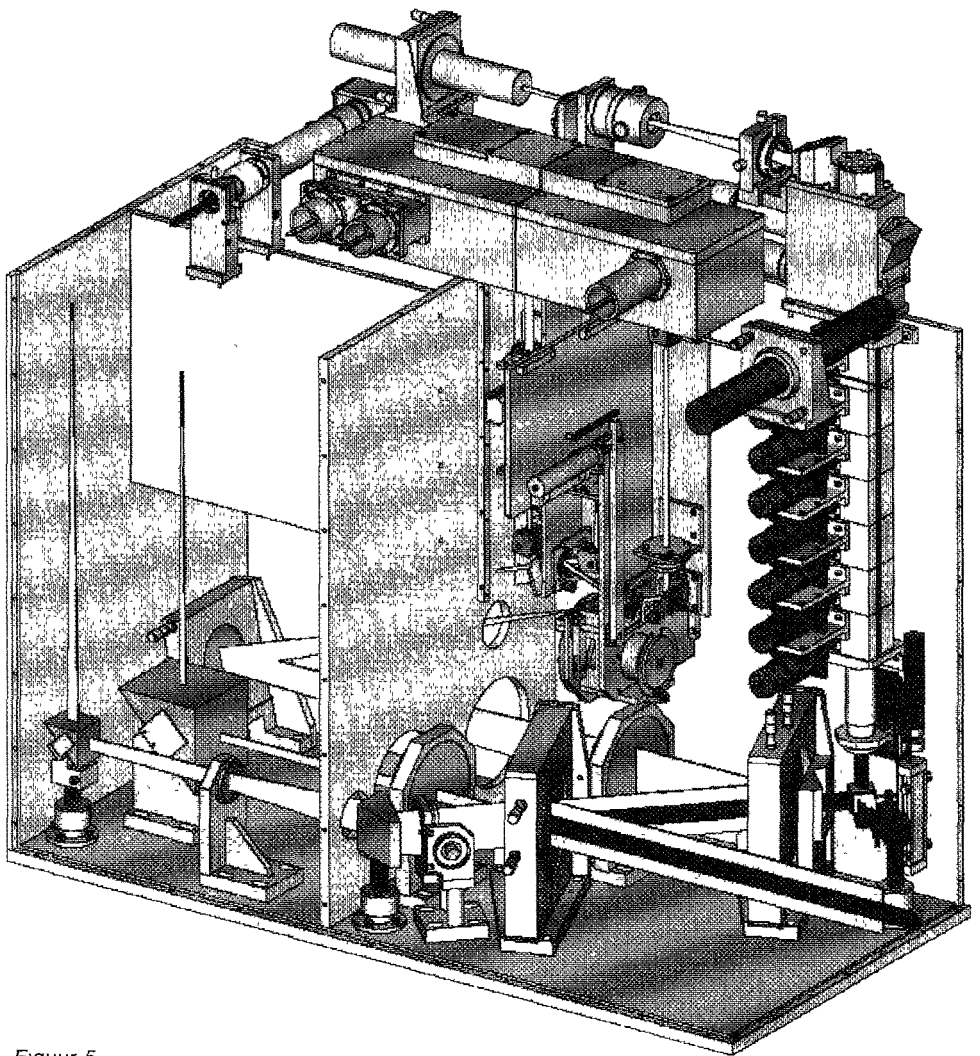
De pulslaser en de T/R unit bevinden zich in de 12 meter container. Dit heeft vele voordelen daar deze ruimte stofarm, air-conditioned en goed toegankelijk is voor onderhoud.

De taken van de T/R unit zijn

- instellen van divergentie van de uitgaande laserbundel
- ruimtelijke scheiding van het uitgaande en binnenkomende licht
- spectrale scheiding van laser licht voor detectors en licht voor waarneming met het oog (o.a. voor het sterprogramma)
- opvangen van het gereflecteerde licht in een instelbaar gezichtsveld



Figuur 4
Concept van de telescoop optiek

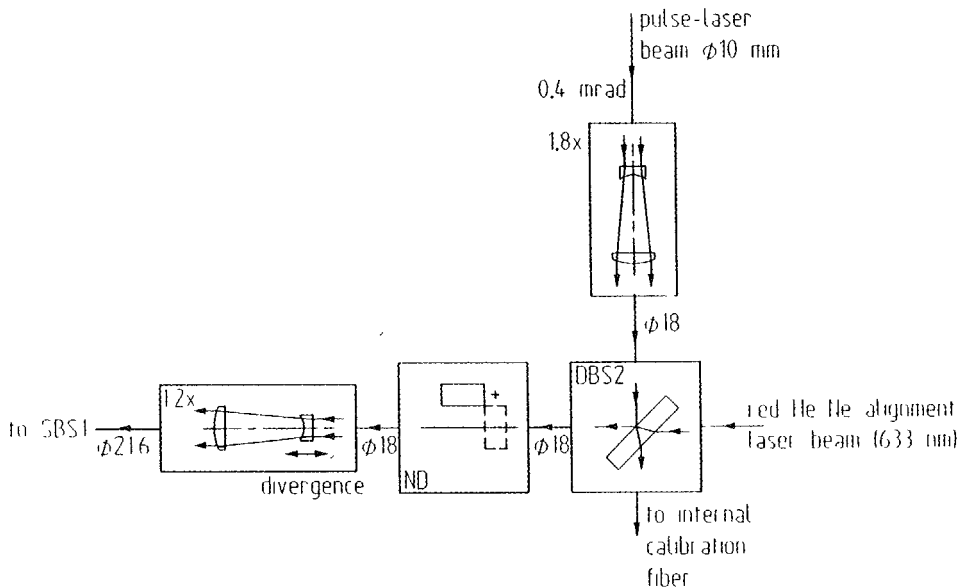


Figuur 5
CAD weergave van de T/R (zend- en ontvang-) eenheid

- smalbandige spectrale filtering van het ontvangen licht voor metingen overdag
 - verzamelen van de ontvangen photonen op de detectors
 - een simultane interne kalibratie van het systeem door een vaste interne lichtweg (glasvezel)
 - in/uitkoppelen van He/Ne laserbundels voor het uitlijnen van het optisch systeem
- Het CAD plaatje in figuur 5 geeft een duidelijk beeld van deze unit

Van laser naar telescoop

In figuur 6 worden schematisch de optisch componenten in de lichtweg van de laser naar de telescoop weergegeven. Het binnenkomende laserlicht heeft een bundel diameter van 10 mm en een evenwijdigheid van 80 boogseconden. Om de energiedichtheid te verlagen wordt de bundel diameter vergroot met behulp van een 1,8X telescoop tot een bundel van 18 mm. Hiermee is kans op beschadiging van de optiek



Figuur 6
Schematische weergave van de optische componenten in de lichtweg van de laser naar de telescoop

verderop in het systeem aanzienlijk verminderd

De volgende componenten van de optiek DBS2 (dichroic beam splitter 2) koppelt een rode He/Ne laser bundel in de uitgaande bundel. Dit licht kan gebruikt worden om het systeem uit te lijnen. Bovendien wordt hier een zeer klein deel van de pulslaser energie in de single mode glasvezel gestuurd die gebruikt wordt voor de interne kalibratie (100 m lang)

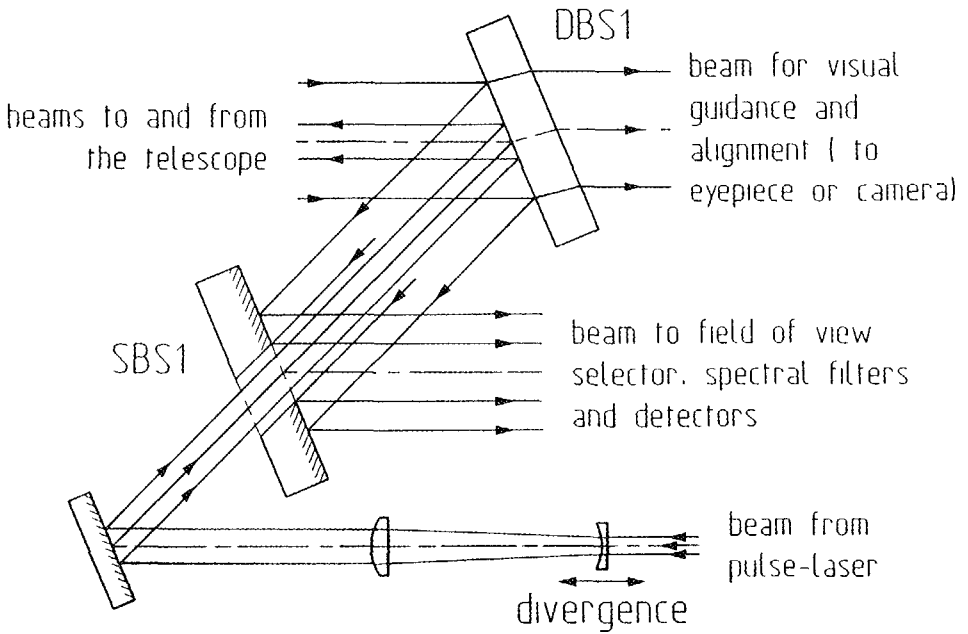
Hierna kunnen een aantal grijsfilters naar believen in of uit de bundel worden gezet. Hiermee kan men de bundel verzwakken met een factor tussen 0 en 10^{16} . Dit is nuttig om te kunnen meten naar dicht bij staande voorwerpen.

Uiteindelijk wordt de divergentie ingesteld door een 1,2 X telescoop. De bundel wordt vergroot tot een diameter van 216 mm. Door de negatieve lens te verschuiven kan de divergentie ingesteld worden van 5 boogsec. tot 1 boogmin van de vertrekken-de bundel na de 0,5 m telescoop

De bundel gaat nu door een gat in spiegel SBS1 (spatial beam splitter) weergegeven in figuur 7. Dan wordt het laserlicht door dichroïtische spiegel DBS1 (dichroic beam splitter) naar de eerder beschreven Coudé telescoop zo 5,5 m verder gereflecteerd. Deze twee bundelsplitters vormen het hart van de T/R unit

SBS1 scheidt de uitgaande laserbundel en de inkomende photonen. Dit gat vermindert de effectieve oppervlak voor het terugkerende licht tot 84%. Dankzij deze ruimtelijke scheiding van uitgaande en inkomende bundel kan deze LAM werken zonder optische zend/ontvang schakelaar, en dus is er ook geen beperking in de kortst meetbare afstand.

Met een roterend lens stelsel werkend als een zend/ontvang schakelaar kan eventueel de collimatie van uitgaande bundel nog verbeterd worden tot 2 boogsec. Deze optie is toegevoegd voor metingen aan zeer verre satellieten zoals die in een geostationaire baan



Figuur 7
Spiegelsysteem voor splitsing van de diverse bundels

Vanuit de telescoop gaat de lichtpuls naar de retroreflector op de satelliet en weer terug naar de telescoop en vandaar naar de T/R unit in de container waar de eerste optische component bestaat uit de dichroïsche bundel splitser (DBS1) die het laserlicht reflecteert naar spiegel SBS1. Het overige (zichtbare) licht wordt doorgelaten door DSB1 en wordt gebruikt om met camera of het oog door de telescoop te kunnen kijken. Dit is nodig voor uitlijndoel-einden en voor het doen van een eerder genoemd sterprogramma.

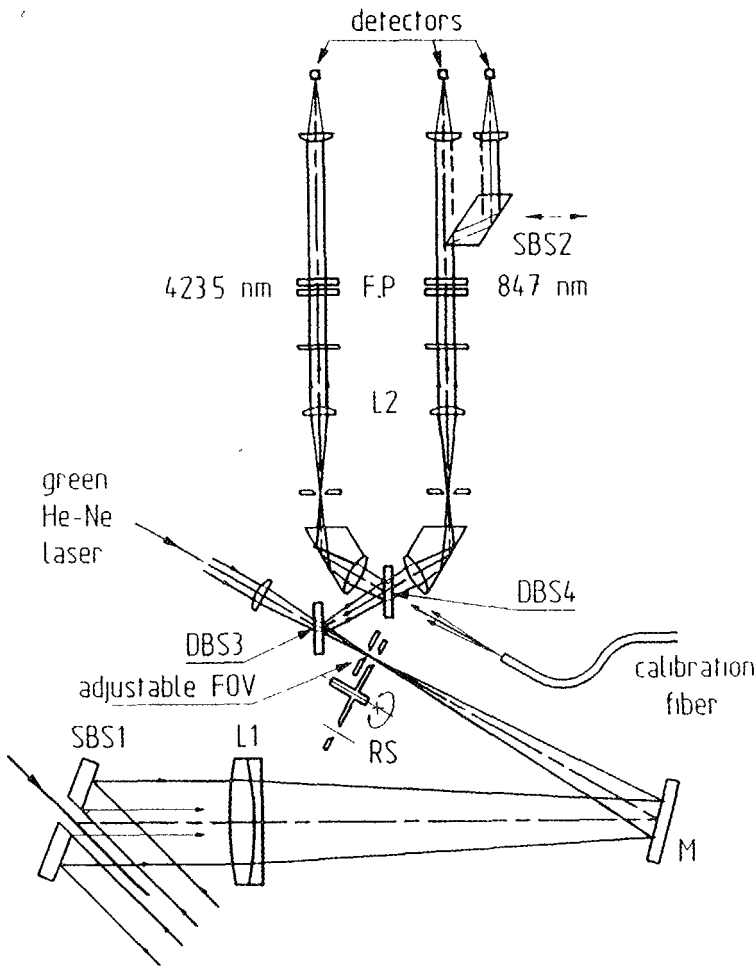
Van SBS1 naar detectors

In figuur 8 is schematisch weergegeven hoe de optische lichtweg er uitziet vanaf SBS1 tot aan de 'stop'detectors. De ontvangen gecollimeerde bundel gereflecteerd door spiegel SBS1 wordt door lens L1 afgebeeld op een instelbaar gezichtsveld opening. Net voor deze opening is een roterende sluitert (RS) gemonteerd. Deze sluitert beschermt de detectors tegen te

veel strooilig. Strooiligheid dat afkomstig kan zijn van optiek als de hoogvermogen laser vuurt. De sluitert is dicht als de laser vuurt en open als de via de satelliet gereflecteerde puls terug verwacht wordt. Het gezichtsveld is instelbaar van 0 tot 1,5 boogminuut.

Na de sluitert en de instelbare gezichtsveld opening wordt het licht eerst gereflecteerd door spiegel DSB3 via welke ook een groene uitlijn laser bundel het systeem in kan worden gekoppeld. Hierna wordt door dichroït DBS4 het licht gesplitst in de twee laser golflengten 847 nm en 423,5 nm en beide bundels worden weer gehercollimeerd door lenzen L2. Bij DSB4 wordt ook het interne kalibratie signaal vanuit de glasvezel weer ingekoppeld.

De bandbreedte van de Titanium Safier laser is 0,2 nm bij 847 nm. Om ook bij daglicht te kunnen meten met de LAM moet er goed spectraal gefilterd worden. Dit wordt gedaan door twee instelbare Fabry-Perot filters. Deze beide filters hebben een hoge



Figuur 8
Optiek in de lichtweg van de bundelsplitser tot de detectoren

efficiëntie ($>80\%$), een spleet van $12 \text{ } \Omega\text{m}$ en een relatief lage finesse (50 voor 847 nm en 25 voor 423.5 nm). De Fabry-Perot filters zijn in een klein drukkamertje ingebouwd. De gewenste golflengte filtering wordt ingesteld door de luchtdruk in de drukkamer te variëren. Per bar verschuift de doorgelaten golflengte met 0.028% ($0,12 \text{ nm}$ per bar voor $423,5 \text{ nm}$ en $0,23 \text{ nm}$ per bar voor 847 nm). Zo kunnen de filters exact op de lasergolflengten worden afgesteld.

Uiteindelijk wordt het licht naar de detectoren geleid. Voor het 847 nm signaal wordt het in tweeën opgesplitst door SBS2 waarbij iedere gewenste verhouding tussen de signalen gekozen kan worden.

Als detectoren worden Single Photon Avalanche Dioden (SPAD) gebruikt. Deze detectoren zijn alleen gedurende een zeer korte tijd (100 ns , de tijd dat het terugkomende signaal verwacht wordt) gevoelig te maken (gating). Door de grote versterking van het avalanche effect ($\sim 10^6$) veroorzaakt 1 photon een duidelijk signaal.