

issn 0065-3713

I N S T I T U T D ' A E R O N O M I E S P A T I A L E D E B E L G I Q U E

3 · Avenue Circulaire

B · 1180 BRUXELLES

AERONOMICA ACTA

A - N° 400 - 1996

**Bijdrage tot de ontwikkeling van een nieuwe
technologie voor simultane ionendetectie als
meting van neutrale constituenten van de
stratosfeer**

door

E. Neefs

B E L G I S C H I N S T I T U U T V O O R R U I M T E - A E R O N O M I E

3 · Ringlaan

B · 1180 BRUSSEL

Voorwoord

Dit werk werd eerder voorgedragen als proefschrift tot het behalen van de graad van Doctor in de Toegepaste Wetenschappen (oktober 1996, Katholieke Universiteit Leuven).

Avant-propos

Cette oeuvre a été présentée comme thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Appliquées (octobre 1996, Katholieke Universiteit Leuven).

Foreword

This work has been submitted earlier in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Applied Sciences (Oktober 1996, Katholieke Universiteit Leuven).

Vorwort

Diese Dissertation wurde vorgestellt zur Erlangung der Doktorwürde in die angewandeten Wissenschaften (Oktober 1996, Katholieke Universiteit Leuven).

Samenvatting

In het kader van het SIDAMS/MACSIMS-project werd, in onderlinge samenwerking tussen het *Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie* (Brussel), het *Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement* van het CNRS (Orléans) en het *Physikalisches Institut* van de Universiteit van Bern, een dubbelfocuserende ballongedragen massaspectrometer ontwikkeld voor de simultane detectie van ionen in de stratosfeer. Aan deze spectrometer werd een actief chemi-ionisatiepakket gekoppeld waarin een stromingsbuis wordt gebruikt als reactieomgeving voor de door een turbine aangezogen omgevingslucht en in een ionenbron aangemaakte moederionen. De zo gevormde produktionen worden samen met de moederionen in het massaspectrometergedeelte geregistreerd.

Wanneer naast de gemeten concentratieverhoudingen van moeder- en produktionen ook de reactiesnelheidscoëfficiënten van de betrokken ion-moleculereacties en de verblijftijd van de ionen in het reactiemilieu gekend zijn, kunnen concentraties van neutrale bestanddelen van de stratosfeer bepaald worden. Met het SIDAMS/MACSIMS-instrument wordt in eerste instantie de afleiding geïllustreerd van HNO_3 - en N_2O_5 -concentraties, omdat deze sporegassen een belangrijke rol vervullen in het afbraakproces van stratosferische ozon.

Het instrument krijgt de gewenste wetenschappelijke en technologische waarde doordat een op maat ontworpen hard- en softwarecombinatie aan boord ervoor zorgt dat vitale functies, zoals instrumentbewaking, ionenproductie, massadiscriminatie, ionendetectie, vluchttijdmeting, telemeting en telecommandoïnterpretatie, in parallel en/of synchroon kunnen verlopen.

Een netwerk van drie ingebedde microprocessors, naar de gebruiker toe als één entiteit geprofileerd, bestuurt en controleert het instrument via speciale gestandaardiseerde businterfaces. Een bijzondere ijkingsmethode laat toe het instrument te bedienen in reële fysische eenheden. Een aantal instrumentonderdelen werd voorzien van speciaal ontworpen voedingseenheden. Voor de meting van de verblijftijd van de ionen in de stromingsbuis werd een gevoelige elektrometer en een pulssysteem voor de ionenbronvoedingen gerealiseerd.

Voor de processors werd een werkomgeving ontwikkeld, voorzien van een gebruiksvriendelijke tekstgerichte telecommandoïnterface, die een flexibel gebruik van het instrument mogelijk maakt en toelaat de uitvoeringsnelheid en zo de hoogteresolutie aanzienlijk te verbeteren. Een bedieningsterminal aan de grond staat in voor de gelijktijdige ondersteuning in reële tijd van alle instrumentfuncties en voor een overzichtelijke grafische voorstelling van de datastroom.

De resultaten van de uiterst succesvolle ballonvlucht van 23 november 1995, die reeds aanleiding gaven tot realistische hoogteprofielen voor HNO_3 , worden gebruikt ter illustratie van de technische realisaties. Als bijdrage tot de gegevensverwerking werd een piekanalysealgoritme geïmplementeerd dat toelaat volledig automatisch detectorcorrecties uit te voeren en pieken te karakteriseren in opgemeten massaspectra. Het algoritme berekent ook de individuele bijdrage van een ionenpiek tot een cluster met twee of meer overlappende pieken.

Résumé

Le projet SIDAMS/MACSIMS est une coopération entre l'*Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique* (Bruxelles), le *Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement* du CNRS (Orléans) et le *Physikalisches Institut* de l'Université de Berne. Dans le cadre de ce projet un spectromètre de masse à double focalisation a été développé pour vols sous ballon stratosphérique avec pour but la détection simultanée des ions dans la stratosphère.

Le spectromètre a été couplé avec un paquet d'ionisation chimique active construit autour d'un tube d'écoulement où l'air stratosphérique, qui est aspiré par une turbine, réagit avec les ions formés dans une source ionique. Ces ions parents et ceux résultants de la réaction avec l'air sont enregistrés dans le spectromètre de masse.

Afin de calculer les concentrations de certains constituants neutres de la stratosphère, indépendamment des rapports de concentration entre les ions parents et les ions produits, les coefficients de vitesse des réactions en question et le temps de résidence des ions dans la zone de réaction doivent être connus. Le but primaire de l'instrument SIDAMS/MACSIMS est la déduction des concentrations de HNO_3 et N_2O_5 , deux gaz qui jouent un rôle important dans les procédés de destruction de l'ozone stratosphérique.

Une combinaison de hardware et software à bord apporte à l'instrument la valeur scientifique et technologique requise. Elle permet que l'exécution parallèle et/ou synchrone des fonctions utiles, comme la surveillance de l'instrument, la production des ions artificiels, la discrimination de masse, la détection d'ions, la mesure du temps de vol, la télémessure et l'interprétation des télécommandes, soit possible.

Un réseau de trois microprocesseurs intégrés est profilé envers l'utilisateur comme une entité. Les processeurs gèrent et contrôlent l'instrument au travers d'interfaces standardisées. Une méthode de calibration a été réalisée permettant la gestion de l'instrument en unités physiques réelles. Pour un nombre de sous-ensembles, des unités d'alimentation ont été spécialement conçues. Pour la mesure du temps de résidence des ions dans le tube d'écoulement, un électromètre sensible et un système de pulsation pour l'alimentation de la source ionique ont été développés.

Les processeurs ont été équipés d'environnements de travail à base d'une interface pratique de télécommandes textuelles, qui permet une utilisation flexible de l'instrument, une grande vitesse d'exécution et donc une bonne résolution en altitude. Un terminal de gestion au sol soutient simultanément et en temps réel toutes les fonctions de l'instrument et représente graphiquement le flux de données de manière claire et compréhensible.

A base des résultats du vol ballon réussi du 23 novembre 1995 des profils en altitude ont été déduits pour HNO_3 . Ces résultats illustrent clairement les réalisations techniques. Comme contribution au traitement de données un algorithme d'analyse de pics a été implémenté permettant la correction automatique des erreurs due au détecteur et la caractérisation des pics dans les spectres de masse enregistrés. L'algorithme calcule également la contribution individuelle d'un pic à un cluster contenant plusieurs pics superposés.

Abstract

In the framework of SIDAMS/MACSIMS, a project in which the *Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie* (Brussels) collaborates with the *Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement* of the CNRS (Orléans) and the *Physikalisches Institut* of the University of Bern, a double focusing balloon borne mass spectrometer is developed for the simultaneous detection of stratospheric ions. With this spectrometer an active chemical ionization package is coupled, consisting of a flow tube in which injected source ions react selectively with an ambient air flow maintained by means of a turbine. The resulting product ions are measured in the mass spectrometer section together with the source ions.

When besides the abundance ratios of source and product ions also the reaction rate coefficients of the concerned ion-molecule reactions and the residence time of the ions in the flow tube are known, concentrations of certain neutral constituents of the stratosphere can be inferred. The SIDAMS/MACSIMS-instrument aims primarily at the deduction of HNO_3^- and $N_2O_5^-$ -concentrations, for these trace gases are playing an important role in the depletion process of stratospheric ozone.

The instrument is given the necessary scientific and technological value through a custom tailored hard- and software combination which allows a parallel and/or well synchronized execution of vital functions such as housekeeping, ion production, mass discrimination, ion detection, time of flight measurements, telemetry and telecommand interpretation.

A network of three embedded microprocessors can be controlled by the user as one entity, through special standard bus interfaces and in real physical units, thanks to a particular calibration method. For certain parts of the instrument special power supplies have been developed. For the measurement of the residence time of the ions in the flow tube a combination of a sensitive electrometer and a pulsing system for the ion source power supplies was made.

An operating system with a user friendly text depended telecommand interface was developed and installed in the processors, enabling a flexible management of the instrument, lowering the execution time and enhancing the height resolution significantly. A complex terminal in the ground station supports simultaneously and in real time all instrument functions and gives a clearly structured graphical representation of the data flow.

The successful balloon flight of November 23th 1995 resulted already in realistic height profiles for HNO_3 . The data from this flight are used to illustrate the technical realizations. Finally an algorithm for peak analysis was implemented, allowing detector corrections and peak characterization in mass spectra in a full automatic mode. The algorithm calculates the contribution of individual ion peaks to clusters containing two or more overlapping peaks.

Zusammenfassung

Im Rahmen des SIDAMS/MACSIMS Projektes wurde in gegenseitige Zusammenarbeit zwischen dem *Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie* (Brüssel), dem *Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement* der CNRS (Orléans) und dem *Physikalisches Institut* der Berner Universität ein doppel fokussierendes, ballongetragenes Massenspektrometer für die Simultandetektion der Stratosphärenionen entwickelt. Zu diesem Spektrometer wurde ein aktives Chemie-Ionisationspaket gekoppelt in dem eine Strömungsröhre als Reaktionsumgebung für die Turbine angesogene Umgebungsluft und die, in einer Ionenquelle hergestellte Mutterionen, gebraucht wird. Die Produktionen werden zusammen mit der Mutterionen ins Massenspektrometer registriert.

Wenn neben dem gemessenen Konzentrationsverhältnis der Mutter- und Produktionen auch die Reaktionsgeschwindigkeitskoeffizienten der beteiligten Ion-Molekülreaktionen und die Aufenthaltszeit der Ionen in der Reaktionsumgebung bekannt sind, können die Konzentrationen der neutralen Bestandteile der Stratosphäre bestimmt werden. Mit dem SIDAMS/MACSIMS-Instrumenten wird in erster Instanz die Ableitung der HNO_3 - und N_2O_5 -Konzentrationen visiert, weil diese Spurgasen eine wichtige Aufgabe im Abbauprozess stratosphärisches Ozon erfüllen.

Das Instrument bekommt den gewünschten wissenschaftlichen und technologischen Wert durch eine nach Maß entwickelte Hard- und Softwarekombination an Bord die für ein paralleles und/oder synchrones Erläufen der vitalen Funktionen als Instrumentbewachung, Ionenproduktion, Massendiskriminierung, Ionendetektion, Flugzeitmessung, Fernmessung und Telekommandointerpretation sorgen kann.

Ein Netzwerk drei eingebetteter Mikroprozessoren, zum Benutzer als einer profiliert, steuert und kontrolliert das Instrument via spezielle, standardisierte Businterfaces. Eine besondere Eichungsmethode erlaubt das Instrument in reellen physikalischen Einheiten zu bedienen. Eine Menge Instrumentunterteile wurden mit speziell entworfenen Speiseeinheiten ausgestattet. Für die Messung der Aufenthaltszeit der Ionen in der Strömungsröhre wurde ein empfindlicher Elektrometer und ein Pulssystem für die Ionenquellespeisungen realisiert.

Für die Prozessoren wurde eine mit einer gebrauchsfreundlichen, textorientierten Telekommandointerface ausgestattete Arbeitsumgebung entwickelt, die eine flexible Benutzung des Instrumentes ermöglicht und eine Verbesserung der Ausführungsgeschwindigkeit, und deswegen der Höherauflösung zuläßt. Ein Bedienungsterminal am Grund steht ein für die gleichzeitige Unterstützung aller Instrumentfunktionen in Realzeit und für eine übersichtliche grafische Darstellung des Datenstromes.

Die Resultate des äußerst erfolgreichen Ballonfluges (23 November 1995) gaben schon Veranlassung zu realistischen Höhenprofilen für HNO_3 , und werden benutzt zur Illustration der technischen Realisierungen. Als Beitrag zur Datenverarbeitung wurde ein Pikanalysealgorithmus implementiert der zuläßt völlig automatisch Detektor Korrekturen auszuführen, und Pike in Massenspektren zu charakterisieren. Der Algorithmus berechnet auch den individuellen Beitrag eines Ionenpikes zu einem Cluster mit zwei oder mehr überlappenden Piken.

Dankwoord

Ik wens in de eerste plaats mijn promotoren te bedanken : professor Wambacq voor zijn voortdurende bereidheid, voor het oplossen van praktische problemen maar vooral voor de interesse in het werk van het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie waar deze thesis deel van uitmaakt, professor Oosterlinck voor het blijvend volgen van het werk zelfs na het opnemen van het rectorsambt.

Mijn dank gaat ook uit naar professor Govaerts en professor Puers omdat zij zich ondanks een druk agenda met belangstelling hebben verdiept in het werk van een “niet-KUL-doctorandus”.

Ik ben professor Kopp in de eerste plaats dankbaar voor de bekwaamheid waarmee hij en zijn team zich van hun taak kwijten in het kader van de SIDAMS- en MACSIMS-projecten maar ook en in het bijzonder omdat hij zonder aarzelen aanvaard heeft een thesis te beoordelen die in het Nederlands is geschreven.

In mijn wetenschappelijke loopbaan kwam ik tot nu toe niet veel mensen tegen met de gave een jong ingenieur te motiveren. Professor Van Twembeke deed dat wel. Ik ben hem zeer dankbaar voor een jaar van goede samenwerking, voor de blijvende aangename contacten en voor de belangstelling in mijn werk.

Ik wil ook heel in het bijzonder Dr. Dennis Nevejans bedanken, enerzijds voor de ijver en het overzicht waarmee hij zijn team binnen het BIRA leidt (ik heb mij in de afgelopen zeven jaar geen minuut beklaagd onder zijn leiding te mogen werken), maar anderzijds ook voor de persoonlijke steun en raadgevingen tijdens mijn doctoraatswerk (zonder hem zou het maken van deze thesis onmogelijk zijn geweest).

De andere leden van het MACSIMS-team wil ik bedanken voor de fantastische samenwerking en de vriendschappelijke sfeer, in het bijzonder Fabienne Leclère en Piet Frederick voor de onschatbare hulp en ondersteuning, maar ook Dr. Etienne Arijs, Crist Amelinck, Eddy Equeter, Dr. Wim Vanderpoorten, Dr. Johan Ingels en Dr. Niels Schoon.

Aan twee projecten werken leidt onvermijdelijk tot conflicten van praktische aard maar spijtig genoeg ook van menselijke. Zonder het begrip en de grote professionaliteit van de leden van het SPICAM-team had ik nooit de gulden middenweg gevonden. In de eerste plaats denk ik aan Hilde Deceuninck die door haar geestdrift en werklust vele lasten van mijn schouders heeft genomen, maar ook een woord van dank aan Emiel Van Ransbeeck, Paul Asscherickx en François Coremans.

Verder moet ik Dr. Dominique Fonteyn, Dr. Gaston Kockaerts, Dr. ir Carlos Lippens, Dr. ir Johan De Keyser, Dr. Martine De Mazière, Johan Bulcke, Guido Van den Wijngaert, Roland Clairquin, Jef Craenen, Carine Heymans, Margueritte De Clerq, Jeaninne Mertens, Denis Riquet, Dr. Daniël Heynderickx en Patricia Waeghe bedanken voor de wetenschappelijke en technische hulp

en voor de deugdlopende aanmoedigingen. Tenslotte gaat mijn dank ook uit naar de directeur van het BIRA, Dr. Marcel baron Ackerman, die mij in de mogelijkheid stelde aan dit doctoraat te werken.

Toch moet ik meer dan wie ook een aantal mensen bedanken die een centrale plaats innemen in mijn leven : mijn echtgenote Kristien en mijn dochtertjes Lise en Hanne. Hun aanwezigheid en liefde zijn de motivatie voor alles wat ik doe. Ook mijn vader, mijn moeder en broer ben ik oneindig dankbaar voor een leven van ondersteuning en vriendschap. Dit doctoraat is het resultaat van jullie toewijding, ik draag het dan ook op aan jullie allemaal, en in het bijzonder aan mijn lieve mama die dit moment van dankbaarheid niet kan meemaken.

Afkortingen en symbolen

ACIP	actief chemi-ionisatiepakket
ADC	analoog-naar-digitaalconvertor
ALE	address latch enable
amu	atomic mass unit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BHE	bus high enable
BIRA	Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie
BSP	Board Support Package
BUSIF	businterface
CAESR	Cold Atmospheric Emission Spectral Radiometer
CCD	Charge Coupled Device
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
CFK	Chloor-Fluor-Koolstofverbinding
CIMP	Chemical Ionization Microprocessor
CMRR	common mode rejection ratio
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre Nationale de la Recherche Scientifique
CP	commandoparameter
cpv	channel plate voltage
CR	control register
CRC	cyclic redundancy check
CW	control word
DAC	digitaal-naar-analoogconvertor
DE	data enable
DTR	data transmit/receive
EPLD	Erasable Programmable Logic Device

EOI	end of interrupt
FET	Field Effect Transistor
FKFO/MI	Fonds voor Kollektief Fundamenteel Onderzoek/Ministerieel Initiatief
FM	frequentiemodulatie
GPS	Global Positioning System
HP-UX	Hewlett-Packard UNIX
hsk	housekeeping (bewakingsgegevens)
HV	high voltage
iav	ion acceleration voltage
iiv	ion inlet voltage
INT	hardware interrupt
INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
I/O	input/output
IRIG	Inter-Range Instrumentation Group
IRR	interrupt request register
isr	interrupt service routine
ISR	interrupt service register
itv	inner toroidal voltage
ivt	interrupt vector table
LED	Light Emitting Diode
LIMS	Limb Scanning Infrared Monitor of the Stratosphere
LPCE	Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement
LSB	least significant bit
lvn	lens voltage negative
lvp	lens voltage positive
MACSIMS	Measurement of Atmospheric Constituents by Selective Ion Mass Spectrometry
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MKS	Meter Kilogram Second
MOBC	Main On Board Computer
MPIH	Max Planck Institut für Kernphysik Heidelberg
MSB	most significant bit
NAT	Nitric Acid Trihydrate
NFWO	Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek
NL	“nieuwe lijn”-teken
NPH	non-proton hydrate

opb	octopole bias
otv	outer toroidal voltage
pap	pressurized air pressure
pav	post acceleration voltage
PCB	printed circuit board
PCS	peripheral chip select
PH	proton hydrate
PIC	Priority Interrupt Controller
PIT	Programmable Interval Timer
PIUB	Physikalisches Institut Universität Bern
PM	phase modulation
PSC	Polar Stratospheric Cloud
psv	phosphor screen voltage
RD	read
RAM	random access memory
rf	radio frequency (hoogfrequent)
ROM	read only memory
RTC	Real Time C
RTL	run time library
SCC	Serial Communications Controller
sccm	standard cubic centimeter
SIDAMS	Simultaneous Ion Detection in Atmospheric Mass Spectrometry
SLIP	Serial Line Internet Protocol
stdio	standard input/output
T4	PIUB-pixelprocessor
TC	telecommando
TCecho	telecommando-echo
TM	telemetry
tof	time of flight
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UIM/X	User Interface Manager on X
UNIX	UNIformat eXecutive
ur	uitvoeringsroutine
VRTX	Versatile Real Time eXecutive
WR	write

Inhoud

Voorwoord – Avant-propos – Foreword – Vorwort	i
Dankwoord	ii
Samenvatting	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Zusammenfassung	vii
Afkortingen en symbolen	viii
Inhoud	xi
1. Inleiding	1
2. Wetenschappelijke achtergrond, doelstellingen en opbouw van het SIDAMS/MACSIMS-instrument	4
2.1. Inleiding	4
2.2. Opdeling van de aardse atmosfeer	4
2.2.1. Opdeling volgens samenstelling	4
2.2.2. Opdeling volgens temperatuurverloop	5
2.2.3. Opdeling volgens elektrisch gedrag	6
2.2.4. De ozonlaag in de stratosfeer	6
2.3. Ionenchemie in de stratosfeer	9
2.3.1. Belang	9
2.3.2. Huidige kennis	10
2.3.3. Analyse van de neutrale stratosfeersamenstelling via de natuurlijke ionenchemie	12
2.3.4. Analyse van de neutrale stratosfeersamenstelling door middel van actieve chemi-ionisatie	14
2.3.5. Concurrerende technieken	14
2.4. Concrete doelstellingen van het SIDAMS/MACSIMS-project	15
2.5. Lanceringsmogelijkheden	16
2.6. Het massaspectrometergedeelte	19

2.6.1.	Overzicht van bestaande technieken voor massafiltering	19
2.6.2.	De SIDAMS/MACSIMS – massascheider	23
2.6.3.	De inlaatsectie van de massaspectrometer	24
2.6.4.	De SIDAMS/MACSIMS – ionenoptiek	25
2.6.5.	De detector en de pixelprocessor	29
2.6.6.	De cryopomp	31
2.6.7.	De mechanische structuur	32
2.6.8.	Samenvatting	33
2.7.	Het actief chemi – ionisatiepakket	34
2.7.1.	Het principe van actieve chemi – ionisatie	34
2.7.2.	De opbouw	35
2.8.	De bijdrage van de verschillende partners	40
2.9.	De bijdrage van deze thesis tot het SIDAMS/MACSIMS – project	41
2.9.1.	Overzicht	41
2.9.2.	De ontwikkeling van speciale voedingseenheden	42
2.9.3.	De ontwikkeling van besturingsmodules voor alle instrumentfuncties	43
2.9.4.	De realisatie van een speciale interface tussen de besturingsmodules en de processor	44
2.9.5.	De ontwikkeling van een hardware en software werkomgeving voor een ballongedragen instrument dat zich op grote afstand bevindt	45
2.9.6.	De ontwikkeling van een elektronisch gepulste ionenbron – elektrometer – combinatie voor vluchttijdmetingen	50
2.9.7.	De bedieningsterminal aan de grond	51
2.9.8.	De ontwikkeling van een piekanalysealgoritme	52
3.	De hardware aan boord	54
3.1.	Inleiding	54
3.2.	De processor – en voedingsmodules	54
3.2.1.	De keuze van de processors	54
3.2.2.	De voeding van het instrument	54
3.2.3.	De werking van de processormodules	56
3.2.4.	De processorbus	59
3.3.	De businterface	59
3.3.1.	De opbouw van de interface met de processor	59
3.3.2.	De taak van de BUSIF – component	60
3.3.3.	De werking van de BUSIF – component	61
3.4.	De algemene opbouw van besturingsmodules	64
3.5.	De besturing van de massascheider	66
3.5.1.	De inlaatsectie en het ionentransportsysteem	66
3.5.2.	Het hoogspanningsgedeelte van de massaspectrometer	69
3.6.	De besturing van het actief chemi – ionisatiepakket	79
3.6.1.	De stromingsbuis en de turbine	79
3.6.2.	De afsluitsystemen	82
3.6.3.	De ionenbronnen	84
3.7.	De vluchttijdmeting	90
3.7.1.	De wetenschappelijke achtergrond	90
3.7.2.	De technische probleemstelling	91
3.7.3.	De elektrometer	92
3.7.4.	De besturingsmodule voor de vluchttijdmeting – coördinatie van ionenpuls en stroommeting	97
3.8.	De bewaking van de omgevingsparameters en het instrument	99
3.8.1.	Het nut van housekeeping	99
3.8.2.	Verdeling van de verschillende bewakingstypes	100
3.8.3.	De bewakingsmodules	101

3.9.	De SIDAMS/MACSIMS–interfaces	106
3.9.1.	Dialogoog tussen vier processoreenheden	106
3.9.2.	De interface tussen de MOBC en de bedieningsterminal aan de grond ..	106
3.9.3.	De interface tussen de MOBC en de pixelprocessor	111
3.9.4.	De interface tussen de MOBC en de CIMP	112
3.10.	Besluit	113
4.	De software aan boord	115
4.1.	Inleiding	115
4.2.	De werkomgeving	115
4.2.1.	De kern van de werkomgeving : VRTX–86 voor ingebedde 80C86 toepassingen	115
4.2.2.	De intertace tussen de gebruiker en het instrument	117
4.2.3.	Het gebruik van shells in een multitasking–omgeving	121
4.2.4.	De syntactische ontleding van de telecommando's in de parser	121
4.2.5.	Het gebruik van plaatsafhankelijke parameters	124
4.2.6.	Globale variabelen	125
4.2.7.	De weg van een ASCII–teken : volledig overzicht van de SIDAMS/MACSIMS–telecommandointerface	127
4.2.8.	Scripts	130
4.2.9.	Verdere nuttige algemene telecommando's	139
4.3.	De besturing van de instrumentparameters	141
4.3.1.	Uitvoeringsroutines	141
4.3.2.	Een methode voor de ijking van de sturing en de controle van instrumentparameters.	141
4.3.3.	Enkele nuttige commandoparameters	144
4.4.	De besturing van de massaspectrometer	145
4.4.1.	De inlaatsectie en het ionentransportsysteem	145
4.4.2.	De bediening van de hoogspanningen in het lenzensysteem, de massascheider en de detector	145
4.4.3.	De integratie van de pixelprocessor in de werkomgeving	147
4.5.	De besturing van het actief chemi–ionisatiepakket	149
4.5.1.	De stromingsbuis, de turbine en de afsluitsystemen	149
4.5.2.	De ionenbronnen	150
4.5.3.	De gastoevoer	151
4.6.	De vluchttijdmetering	152
4.6.1.	De flexibiliteit van de vluchttijdmetering	152
4.6.2.	Meerdere accumulaties	152
4.6.3.	Realistische vluchttijdmetering in het labo	155
4.7.	De bewaking van het instrument	155
4.7.1.	Drie types van bewakingsgegevens	155
4.7.2.	Het opmeten en verzenden van de bewakingsgegevens	156
4.7.3.	Aanverwante telecommando's	157
4.8.	Telemetering	157
4.8.1.	Het kanaal voor de wetenschappelijke data	157
4.8.2.	De structuur van telemeteringpakketten	158
4.8.3.	Het SLIP–protocol	159
4.8.4.	Controle na ontvangst : de cyclic redundancy check	160
4.9.	Besluit	160
5.	De bedieningsterminal aan de grond	162
5.1.	Inleiding	162
5.2.	De hardware samenstelling van de bedieningsterminal	163
5.3.	De software werkomgeving van de bedieningsterminal	164

5.3.1.	De nood aan een multitasking werkomgeving	164
5.3.2.	Modulariteit van de taken	165
5.3.3.	Organisatie van de uit te voeren taken	165
5.4.	De grafische bedieningspakketten	167
5.4.1.	De telecommando-interface	167
5.4.2.	Het versturen van een schakelbevel	168
5.4.3.	De telemetinginterface	168
5.4.4.	Opslag en verwerking van de gegevens	174
5.5.	Besluit	174
6.	Resultaten en gegevensverwerking	176
6.1.	Inleiding	176
6.2.	Resultaten uit de vlucht van november 1995	176
6.2.1.	De instrumentbewaking	176
6.2.2.	Massaspectra	184
6.2.3.	Vluchttijdspectra	186
6.3.	De automatisering van de gegevensverwerking	188
6.3.1.	Probleemstelling	188
6.3.2.	De achtergrondcorrectie	188
6.3.3.	De niet-uniformiteitscorrectie	189
6.3.4.	Correctie in functie van de gebruikte itv-spanning	191
6.3.5.	De top- en grensbepaling van de pieken	191
6.3.6.	De catalogering van de pieken	194
6.3.7.	De oppervlaktebepaling van de pieken	195
6.3.8.	Validatie van de methode aan de hand van synthetische dubbelpieken ...	201
6.3.9.	Validatie van de methode aan de hand van isotopenverhoudingen	203
6.3.10.	Integratie van het algoritme in een grafische interface	204
6.3.11.	Opmerkingen bij toepassing op reële spectra	205
6.4.	Besluit	207
7.	Algemeen besluit	208
	Referenties	211
	Publicaties	217

Hoofdstuk 1

Inleiding

Het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie (BIRA) is een federale wetenschappelijke instelling waar zowel theoretisch als proefondervindelijk onderzoek wordt verricht naar de samenstelling en de evolutie van de atmosfeer van de aarde en de planeten. De instelling is opgedeeld in vier departementen : Experimentele, Theoretische, Wiskundige en Toegepaste Aëronomie.

Het departement Toegepaste Aëronomie zorgt voor de technische ondersteuning van alle wetenschappelijke onderzoeksprojecten. Het staat in voor het op maat ontwerpen en realiseren van mechanische en elektronische hardware en bijhorende software.

In het departement Experimentele Aëronomie wordt de samenstelling van de atmosfeer onderzocht, onder meer aan de hand van de meting van het ionenbestand in de stratosfeer. Sinds 1972 wordt er gewerkt aan de ontwikkeling van massaspectrometers die, opgehangen aan ballons, de ionensamenstelling ter plaatse kunnen meten.

Met een eerste generatie quadrupolaire massaspectrometers (ION) werden tussen 1974 en 1984 een vijftiental ballonvluchten ondernomen. Deze vluchten leverden een grote hoeveelheid waardevolle wetenschappelijke gegevens op, die ondermeer toelieten de ware aard van de natuurlijke positieve en negatieve ionen in de stratosfeer te bepalen.

Alle vluchten met de quadrupolaire massaspectrometer werden uitgevoerd met de bedoeling het natuurlijke ionenbestand van de stratosfeer te meten, hetzij concentraties van minderheidsgassen af te leiden via de zogenaamde passieve chemi-ionisatiemethode. Deze methode laat toe uit de verhouding van de relatieve concentraties van de natuurlijke ionen dichtheidsprofielen af te leiden voor bepaalde neutrale constituenten zoals bijvoorbeeld CH_3CN , HNO_3 en H_2SO_4 [Arij 92].

Quadrupolaire massaspectrometers bezitten inherent een aantal voor- en nadelen. Eén van hun belangrijkste zwakke punten is de onmogelijkheid ionen met verschillende massa-ladingsverhouding simultaan te detecteren met voldoende grote massa-resolutie.

Vanaf het midden van de jaren tachtig werd in het kader van het atmosferisch onderzoek van het departement Experimentele Aëronomie en in samenwerking met het *Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement* (LPCE) van het *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS) te Orléans (Frankrijk) en het *Physikalisches Institut* van de *Universität Bern* (PIUB) (Zwitserland) begonnen met de ontwikkeling van een tweede generatie massaspectrometers, die

wel in staat zijn op een performante wijze simultaan ionen te detecteren. Het betreft gecombineerde elektrostatisch-magnetische massascheiders, voorafgegaan door een octopool die zorgt voor een optimale transmissie van de ionen.

Verder werd ook uitgekeken naar een methode om de passieve chemi-ionisatiemethode uit te breiden tot andere gassen dan deze die een rol spelen in de natuurlijke ion-molecuulhuishouding van de stratosfeer. De gelijktijdige meting van het massaspectrum van zelf in de stratosfeer gebrachte moederionen en de daaruit ontstane produktionen, samen met de kennis van de betrokken reactievergelijkingen en -snelheden en van de verblijftijd van de ionen in dit reactiemilieu, moet toelaten de dichtheid te bepalen van zeer specifieke neutrale constituenten, iets wat met passieve massaspectrometrie onmogelijk is.

Het project waarbinnen dit alles werd gerealiseerd wordt verder het SIDAMS/MACSIMS-project genoemd. SIDAMS staat voor *Simultaneous Ion Detection in Atmospheric Mass Spectrometry* en MACSIMS voor *Measurement of Atmospheric Constituents by Selective Ion Mass Spectrometry*.

Oorspronkelijk gestart als een project van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek (NFWO), gebeurde de financiering van dit project in een later stadium zowel in het kader van het STEP-programma (STEP-0009-M(A)) als van het *Research and Development Program in the Field of Environment (Technology and Engineering for the Environment)* (EV5V-CT92-0062 en ENV4-CT95-0042) van de Europese Gemeenschap met als deelnemende partners het LPCE, het PIUB en het BIRA. Bijkomende financiering werd tevens bezorgd door het Fonds voor Kollektief Fundamenteel Onderzoek op Ministerieel Initiatief (SIMULION-FKFO-MI - proj. nr. 2.0110.89)

Deze thesis handelt over de ontwikkeling van nieuwe technische oplossingen voor zowel het massaspectrometergedeelte (simultane ionendetectie) als het actieve chemi-ionisatiepakket. De reële bijdrage van dit werk omhelst zowel de studie, het ontwerp en de verwezenlijking van de voedings- en besturingseenheden van dit instrument, als de volledige realisatie van een op maat van het instrument gemaakte werkomgeving.

Deze werkomgeving is een unieke hardware-software combinatie, gedeeltelijk aan boord van het instrument, gedeeltelijk aan de grond, die het instrument gebruiksvriendelijk maakt en de besturingmogelijkheden ervan verveelvoudigt.

Daarnaast levert deze thesis door de technische realisatie van een synchroon werkende elektronisch gepulste ionenbron - elektrometer combinatie aan het instrument een belangrijke toegevoegde wetenschappelijke waarde. Het wordt zo immers mogelijk gelijktijdig met de in situ registratie van ionenspectra en de daarop volgende bepaling van de verhouding bronionen/produktionen (eerste doelstelling van het project) en de bepaling van de betrokken reactiesnelheden (labo-opdracht), de reële vluchttijd van de ionen te kennen. Dit is de laatste onbekende parameter bij de oplossing van het in het SIDAMS/MACSIMS-project vooropgestelde reactieschema van actieve chemi-ionisatie.

De ontwikkeling van het instrument tot de huidige configuratie verliep in een aantal stappen, die meestal werden afgesloten met een ballonvlucht. Met het SIDAMS/MACSIMS-instrument werden reeds vijf ballonvluchten uitgevoerd. De eerste twee voor de meting van de natuurlijke ionensamenstelling van de stratosfeer, de drie laatste in een configuratie voor actieve chemi-ionisatie. De resultaten die tijdens de succesvolle vlucht van 23 november 1995 werden geboekt worden in deze thesis gebruikt ter illustratie van de technische realisaties.

Ook wordt in dit werk de basis gelegd voor de automatisering van de gegevensverwerking, onder de vorm van een algoritme voor de detectie, de definitie, de catalogering, de karakterisering en

de integratie van de massapeken in de massaspectra. Dit algoritme werd softwarematig geïmplementeerd, de resultaten worden uitvoerig besproken.

Dit werk bevat vijf delen. In een eerste deel (hoofdstuk 2) worden de wetenschappelijke doelstellingen van het SIDAMS/MACSIMS-project uiteengezet en wordt het werk van deze thesis gekaderd in de opbouw van het instrument. In het tweede en derde deel worden hardware (hoofdstuk 3) en software (hoofdstuk 4) aspecten van de ontwikkelde aan-boord instrumentatie besproken. Hoofdstuk 5 handelt over het bedieningssegment van het instrument aan de grond, in hoofdstuk 6 illustreren een aantal bekomen resultaten de instrumentatie en wordt het voorgestelde analysealgoritme behandeld.

De taken voor de realisatie van een ingewikkeld instrument zoals SIDAMS/MACSIMS zijn uiteraard veel ruimer dan het werk in deze thesis. Om bepaalde technische verwezenlijkingen in dit werk volledig uit te leggen is het nochtans nodig af en toe een korte beschrijving te geven van of te verwijzen naar werk dat door collega's van het BIRA, het LPCE of het PIUB werd verricht.

Hoofdstuk 2

Wetenschappelijke achtergrond, doelstellingen en opbouw van het SIDAMS/MACSIMS-instrument

2.1. *Inleiding*

In dit hoofdstuk wordt de wetenschappelijke context geschetst waarbinnen het SIDAMS/MACSIMS-project wordt ontwikkeld. Vermits het hier gaat om een instrument dat tot doel heeft de samenstelling van de stratosfeer te bepalen door middel van actieve chemi-ionisatie wordt het doelgebied (de stratosfeer) gesitueerd en wordt een overzicht gegeven van de huidige kennis van de ionenchemie die zich daar afspeelt. Hierbij wordt speciale aandacht besteed aan openstaande problemen en de actuele ozonproblematiek. Ook wordt kort gesproken over de voordelen die ballons bieden boven andere dragers voor het ter plaatse onderzoeken van de stratosfeer.

Verder wordt een bondige systematische beschrijving van de opbouw van het instrument gebruikt als kader waarin de verschillende realisaties geplaatst worden die het onderwerp uitmaken van deze thesis.

2.2. *Opdeling van de aardse atmosfeer*

De atmosfeer kan op verschillende manieren opgedeeld worden naargelang het criterium dat wordt opgelegd : diffusie-eigenschappen, temperatuurverloop of elektrisch gedrag (figuur 2.1) [Bank 72].

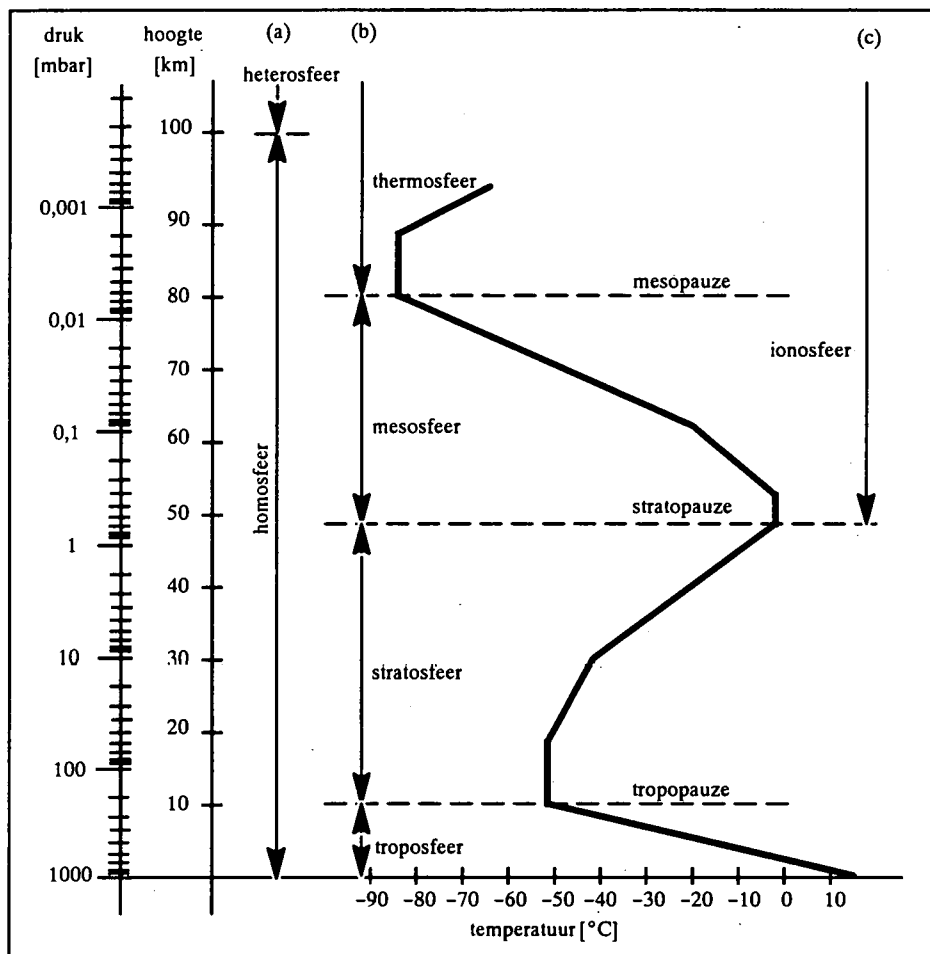
2.2.1. *Opdeling volgens samenstelling*

In de onderste 100 km van de atmosfeer zijn de drie hoofdbestanddelen 78,1 % stikstof, 20,9 % zuurstof en 1 % argon overal ongeveer in dezelfde mengverhouding aanwezig. De neiging die lichtere componenten kunnen hebben om te stijgen in de atmosfeer wordt volledig geannuleerd

door sterke turbulente stromingen en winden. Het gemiddelde moleculair gewicht van de lucht is ongeveer constant. Dit gebied wordt daarom de homosfeer genoemd.

Boven 100 km kan de scheiding volgens massa wel plaatsvinden. Zwaardere elementen blijven in de onderste lagen, lichtere stijgen. Dit is de heterosfeer. Hoe hoger in de heterosfeer, hoe lager het gemiddelde moleculair gewicht. Op de rand van de dampkring (exosfeer) is het gemiddelde moleculair gewicht dat van atomaire waterstof, namelijk 1. De atmosfeer van de aarde gaat hier geleidelijk over in het interplanetaire vacuüm.

Naast N_2 , O_2 en Ar bevinden zich nog een groot aantal minderheidsbestanddelen in de atmosfeer (H_2 , O , OH , H_2O , NO , CO , O_3 , NO_2 , N_2O , CO_2 , HNO_2 , CH_3 , CH_4 , HNO_3 , N_2O_5 , H_2SO_4 , CH_3CN , HCl , $ClONO_2$, ClO , ...) waarvan het chemisch bilan bepaald wordt door fotochemie en transport.



Figuur 2.1: Opdeling van de atmosfeer volgens diffusie-eigenschappen (a), volgens temperatuurverloop (gemiddelde waarden) (b) en volgens elektrisch gedrag (c).

2.2.2. Opdeling volgens temperatuurverloop

De onderste laag van de atmosfeer in contact met de aardkorst wordt de troposfeer genoemd. Wanneer men zich van de aardbodem verwijderd, neemt de temperatuur af tot aan de tropopauze. Dit is een fictieve grens van waaraf de temperatuur terug toeneemt. Afhankelijk van de geografische ligging en de tijd van het jaar, ligt de tropopauze tussen 8 en 18 km boven de aardbodem. De inversietemperatuur bedraagt er tussen -50 en -85 °C.

Boven de tropopauze krijgt de atmosfeer de naam stratosfeer. De temperatuur stijgt terug tot bij de stratopauze die tussen 45 en 55 km ligt en waar het tussen -20 en 20 °C warm kan zijn.

Boven de stratopauze begint de mesosfeer waar de temperatuur terug daalt tot bij de mesopauze die rond 80 km ligt. De temperatuurgradiënt keert er weer om. Het gebied van de atmosfeer dat boven de mesopauze ligt wordt de thermosfeer genoemd.

Het voornaamste kenmerk van de stratosfeer is de aanwezigheid van de ozonlaag (gemiddeld op 25 km boven het aardoppervlak). Ze dient als filter voor de schadelijke ultraviolette zonnestrallen. De absorptie van het zonlicht onder meer door ozon (O_3) is de belangrijkste reden voor het stijgend temperatuurverloop in de stratosfeer.

2.2.3. *Opdeling volgens elektrisch gedrag*

De atmosfeer bestaat niet enkel uit neutrale deeltjes. Doorheen de gehele dampkring treft men ionen en elektronen aan. De concentraties aan geladen deeltjes worden aanzienlijk boven 50 km. Dit gebied wordt de ionosfeer genoemd. Ze is opgedeeld in 4 gebieden in functie van de overheersende ionisatieprocessen : de D-laag tussen 50 en 85 km ($10^3 \frac{e^-}{cm^3}$), de E-laag tussen 85 en 130 km ($10^5 \frac{e^-}{cm^3}$) en hogerop een F1- en een F2-laag ($10^6 \frac{e^-}{cm^3}$) die uiteindelijk overgaat in het interplanetair medium [Bank 72].

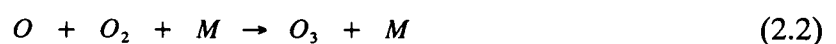
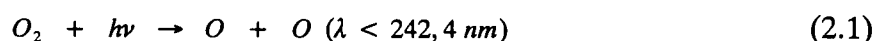
Bronnen van ionisatie van de atmosfeer kunnen zijn : kosmische stralen, ultraviolette en X-stralen van de zon en straling van radioactieve nucleï. Ion-moleculereacties kunnen aanleiding geven tot de vorming van nieuwe ionen.

Gezien de relatief lage electronendichtheden beneden 50 km werd het onderzoek van het elektrisch gedrag van de stratosfeer in eerste instantie als een academisch vraagstuk gezien. Pas later bleek dat geladen deeltjes meespelen in bepaalde stratosferische processen. Dit belang werd lange tijd niet onderkend.

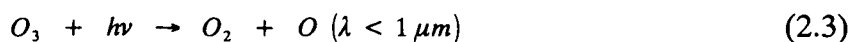
In de stratosfeer vormen kosmische stralen de belangrijkste bron van ionisatie. Zij geven voornamelijk aanleiding tot vorming van N_2^+ en O_2^+ , primaire ionen die op hun beurt via ion-moleculeketteringreacties positieve clusterionen vormen. De losgeslagen elektronen hechten zich aan O_2 tot O_2^- , wat dan weer de basis vormt voor het aanmaken van negatieve clusters. Als positieve ionen werden tot op heden in de stratosfeer twee belangrijke families ontdekt : de protonhydraten $H^+(H_2O)_m$ en de niet-protonhydraten $H^+(CH_3CN)(H_2O)_m$. Ook bij de negatieve ionen kunnen twee hoofdgroepen onderscheiden worden : de NO_3^- -clusters en de HSO_4^- -clusters.

2.2.4. *De ozonlaag in de stratosfeer*

De produktie van ozon in de stratosfeer gebeurt via de fotodissociatie van moleculaire zuurstof (O_2), waarbij atomaire zuurstof (O) wordt aangemaakt (2.1) en de verdere drielichaamsreactie van atomaire en moleculaire zuurstof (2.2).



Ozon wordt echter ook afgebroken door fotodissociatie (2.3) en door de recombinitie met atomaire zuurstof tot zuurstofmoleculen (2.4).



Vergelijkingen (2.1) tot (2.4) vormen samen het Chapman-mechanisme [Bank 72]. Dit mechanisme laat wel toe de totale ozonhoeveelheid in te schatten maar is niet toereikend wanneer hoogteprofielen worden opgesteld. Daartoe moeten andere processen in rekening gebracht worden, waarbij in het bijzonder gedacht wordt aan katalytische cycli (2.5)(2.6) die steeds als nettoresultaat omzetting geven van ozon naar moleculaire zuurstof (2.7) [Nico 75][Bras 84].



Voor X komen een reeks radicalen in aanmerking, zoals OH , NO , Cl of Br . Ze worden gevormd door de fotodissociatie van allerlei zogenaamde brongassen die van natuurlijke maar ook van menselijke oorsprong kunnen zijn, zoals H_2O (verdamping, de watercyclus), N_2O (uitlaat van vliegtuigen, bodembacteriën, ...), chloor-fluor-koolstofverbindingen (CFK's) (frigokoeling, spuitbussen, uitlaten, ...) of broomverbindingen (brandblusapparaten, pesticiden, ...). Die brongassen hebben meestal een lange levensduur en komen via atmosferische transportmechanismen vanuit de lager gelegen troposfeer in de stratosfeer terecht.

Anderzijds wordt dan weer vastgesteld dat een deel van de XO -moleculen verdwijnen in zogenaamde reservoirgassen die de ozonlaag niet aantasten. NO_2 en ClO verbinden zich bijvoorbeeld tot $ClONO_2$, een reservoirgas dat een veel tragere fotodissociatie kent en dus minder gevaarlijk is voor ozon.

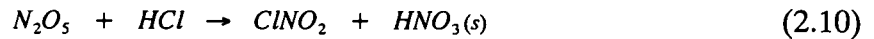
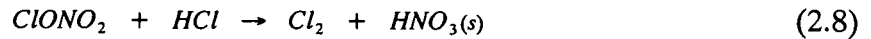
Om de geleidelijke globale afname van ozon te verklaren waarop modelberekeningen en ook metingen wijzen, moeten naast katalytische cycli ook transportprocessen en heterogene chemie aan het oppervlak van *polar stratospheric clouds* (PSC's) of op aërosols in rekening gebracht worden [Crut 86][Spr 94]. Pas dan kunnen ook de spectaculaire ozonverminderingen die in de lente in de polaire stratosfeer waargenomen worden verklaard worden [Font 96].

De vorming van PSC's heeft slechts plaats bij zeer lage temperaturen. Daarom worden ze hoofdzakelijk aangetroffen boven de polen gedurende de winter. In die periode koelt de lucht boven de poolkappen sterk af en komen sterke westenwinden voor die er zo voor zorgen dat de atmosfeer boven de polen als het ware een geïsoleerd zeer koud reactiemilieu wordt (de vortex), waarin PSC's kunnen gevormd worden [Sala 93].

Men onderscheidt twee types PSC's :

- type PSC-I of NAT (*nitric acid trihydrate* $HNO_3(H_2O)_3$) wordt gevormd bij 195 K door condensatie van water en salpeterzuur (HNO_3);
- type PSC-II wordt gevormd bij 188 K en bestaat hoofdzakelijk uit ijskristallen.

Aan het oppervlak van deze PSC's treden reacties op ((2.8) tot (2.11)) die in de gasfase niet of veel trager opgaan [Moli 91] en die tot gevolg hebben dat onschadelijke reservoirgassen van chloor (HCl , $ClONO_2$) en van NO (N_2O_3) omgezet worden in gassen (Cl_2 , $HOCl$, $ClNO_2$) die later wel gemakkelijk omgezet kunnen worden in het actieve chloorradicaal [Tolb 88][Hans 91][Webs 93]. Bij al deze reacties slaat salpeterzuur neer op de PSC-oppervlakken [Toon 86].

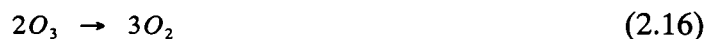
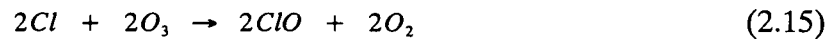
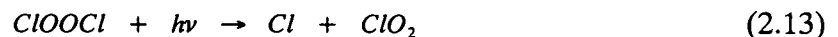
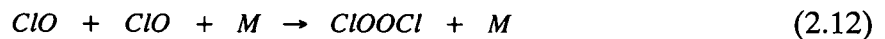


Het verdwijnen van NO_x -gassen zoals distikstofpentoxyde (N_2O_5) en het neerslaan van HNO_3 in vaste vorm op de PSC's wordt denoxificatie genoemd. Door het neerslaan van salpeterzuur worden de PSC-deeltjes zwaarder en vallen ze uit de stratosfeer weg. Dit wordt denitrificatie genoemd.

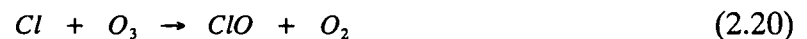
De denoxificatie zorgt ervoor dat bij het aanbreken van de polaire lente de stratosfeer zeer arm is aan NO_x -gassen waardoor ClO , Cl_2 en HOCl niet meer terugreageren tot het reservoorgas ClONO_2 .

Door de denitrificatie in de winter is de hoeveelheid salpeterzuur in de stratosfeer sterk teruggelopen en kan er geen fotolytische omzetting plaatsvinden van salpeterzuur naar NO_2 in het terugkerende zonlicht. Ook transport van NO_2 of reservoorgassen uit niet-polaire gebieden wordt door het bestaan van de vortex bemoeilijkt. Er is geen enkele mogelijkheid om de gevaarlijke Cl_2 - en HOCl -gassen te neutraliseren. Fotolyse van deze gassen geeft dan aanleiding tot het ontstaan van het Cl -radicaal en tot afbraak van ozon.

Een belangrijke katalytische afbraakcyclus van ozon steunt op de vorming en afbraak van het ClO -dimeer ((2.12) tot (2.16)) [Moli 87][Font 96].



Een ander reactiemechanisme waarbij ozon wordt afgebroken is gebaseerd op koppelingsreacties van broom en chloor ((2.17) tot (2.21)) [McEl 86].



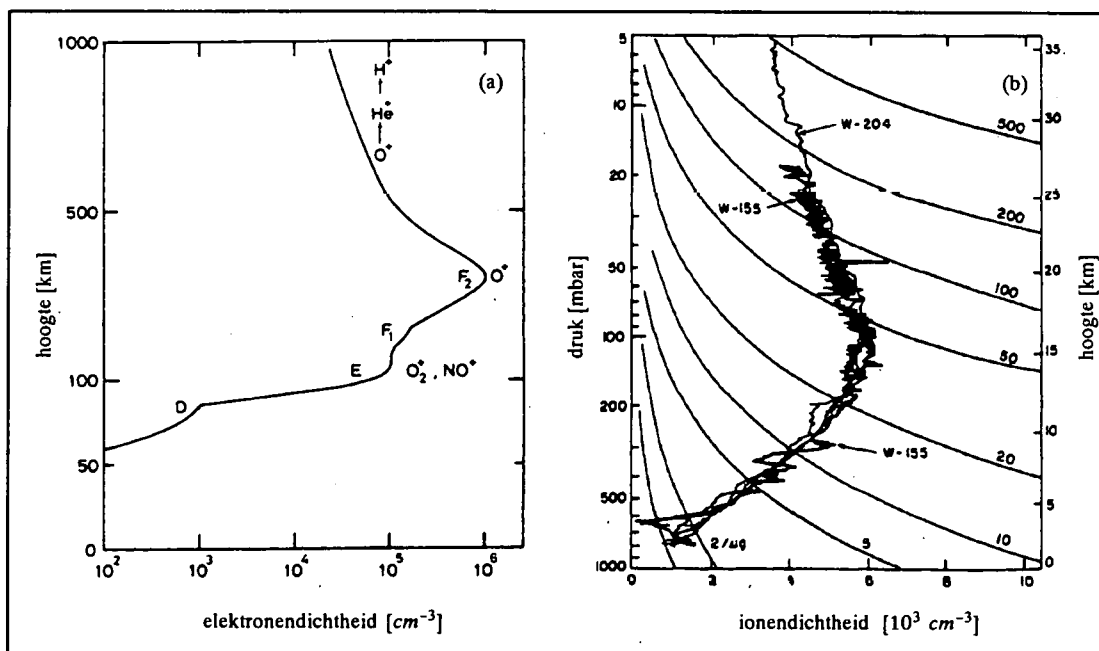
In de niet-polaire stratosfeer waar geen PSC's bestaan zouden toch analoge cycli kunnen voorkomen door reacties aan oppervlakken van aërosols. Een typisch voorbeeld is het sulfaataërosol dat ontstaat door condensatie van water en zwavelzuur al of niet geënt op rondzwevende stofdeeltjes. Het zwavelzuur wordt gevormd door oxydatie van zwavelverbindingen die bijvoorbeeld in de atmosfeer kunnen terecht komen bij vulkaanuitbarstingen.

2.3. Ionenchemie in de stratosfeer

2.3.1. Belang

De aëronomie is de wetenschap die zich bezighoudt met de studie van processen, op gang gebracht door interactie van straling en de atmosfeer. Als dusdanig maakt de ionenchemie daar dan ook deel van uit.

Het belang van geladen deeltjes (elektronen en ionen) in de ionosfeer werd erkend door de ontdekking van hun effect op de voortplanting van radiogolven. In de ionosfeer lopen de dichtheden van geladen deeltjes snel op (figuur 2.2a). Vanuit het standpunt van de telecommunicatie was het onderzoek van het elektrisch gedrag van de ionosfeer waardevol.



Figuur 2.2: (a) De elektronendichtheid in de ionosfeer (D-, E- en F-lagen) [Bank 72].
(b) De ionendichtheid in de atmosfeer tussen 0 en 35 km [Rose 81].

In de stratosfeer is de dichtheid aan geladen deeltjes echter veel lager. De elektronendichtheid is er verwaarloosbaar omdat de elektronen zich dadelijk hechten aan de overvloedig aanwezige zuurstofmoleculen. De ionendichtheid ligt er tussen 2000 en 3000 $\frac{\text{ionen}}{\text{cm}^3}$ [Rose 81]. Ze hebben daar geen invloed meer op radiogolven (figuur 2.2b). Toch mag hun rol in de totale chemie van de stratosfeer niet verwaarloosd worden. De levensduur van de ionen is zeer groot (100 tot 3000 s) waardoor ze de kans krijgen verscheidene keren te botsen of te reageren met neutralen zelfs wanneer die maar in kleine concentraties in de stratosfeer aanwezig zijn. Uiteindelijk verdwijnen ionen via recombinitie met andere ionen.

De studie van de ionenchemie is daarom noodzakelijk bij het steeds nauwkeuriger modelleren van het atmosfeergedrag. Ionen kunnen het resultaat zijn van reacties waarin neutrale bestanddelen een rol spelen of er zelfs voor zorgen dat bepaalde neutralen aangemaakt worden of verdwijnen waar dat zonder de aanwezigheid van ionen niet mogelijk is. Ook bij de

ingewikkelde en veelal nog onbekende processen van de vorming van aërosols zouden de ionen in de stratosfeer een rol spelen.

In elk geval kan het ter plaatse bepalen van de ionensamenstelling van de stratosfeer (via ionenmassaspectrometrie) ons veel leren over haar neutrale samenstelling, daar waar andere technieken tekortschieten.

2.3.2. Huidige kennis

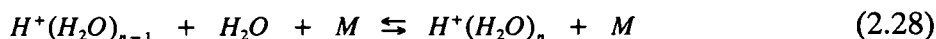
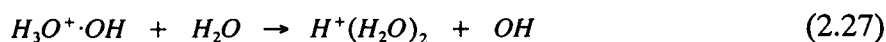
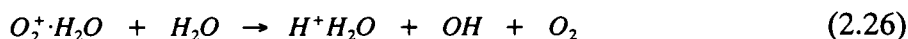
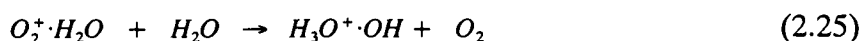
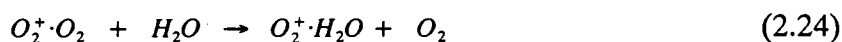
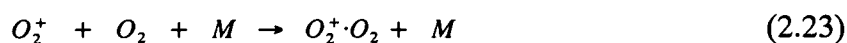
De kennis van de stratosferische ionenchemie [Arij 92] is lang beperkt gebleven tot theoretische modellen. Zoals gezegd is de elektronendichtheid er te laag om interessant te zijn vanuit telecommunicatiestandpunt, anderzijds is er de moeilijkheid om met een instrument dat inwendig onder lage druk werkt, metingen te verrichten in een omgeving waar de druk aanzienlijk hoger is dan in de mesosfeer of de thermosfeer.

Met het besef dat ionenchemie in de stratosfeer ook een wetenschappelijke waarde heeft, kwam de ontwikkeling op gang van de instrumentatie om ter plaatse in de stratosfeer metingen uit te voeren. Met deze instrumenten werd vanaf de zeventiger jaren een zekere kennis verworven omtrent de ionensamenstelling van de stratosfeer. Naast het BIRA was ook het *Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIH)* in Heidelberg (Duitsland) actief in dit domein [Arno 80][Vigg 83].

De enige bron van ionisatie in de stratosfeer zijn hoog energetische kosmische stralen. Zij rukken elektronen los bij de meerderheidsbestanddelen (moleculaire stikstof en zuurstof leveren N_2^+ resp O_2^+) en bij enkele minderheidsbestanddelen (atomaire stikstof en zuurstof leveren N^+ resp O^+). De losgerukte elektronen hechten zich zeer snel, vooral door driedeeltjesreacties, aan O_2 , een elektronegatief gas, en vormen O_2^- (2.22).

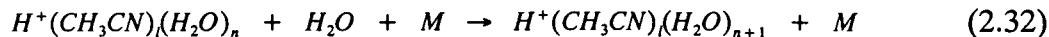
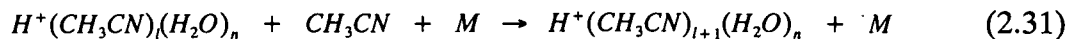
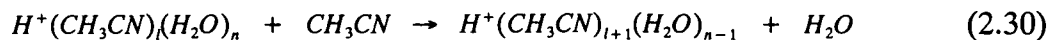
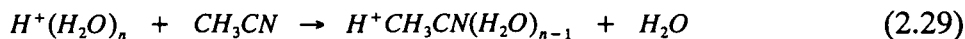


Het primaire positieve ion O_2^+ hydrateert zeer snel ((2.23) tot (2.28)) en is zo de bouwsteen voor de vorming van protonhydraten ($H^+(H_2O)_m$), een eerste belangrijke groep van positieve stratosferische ionen.

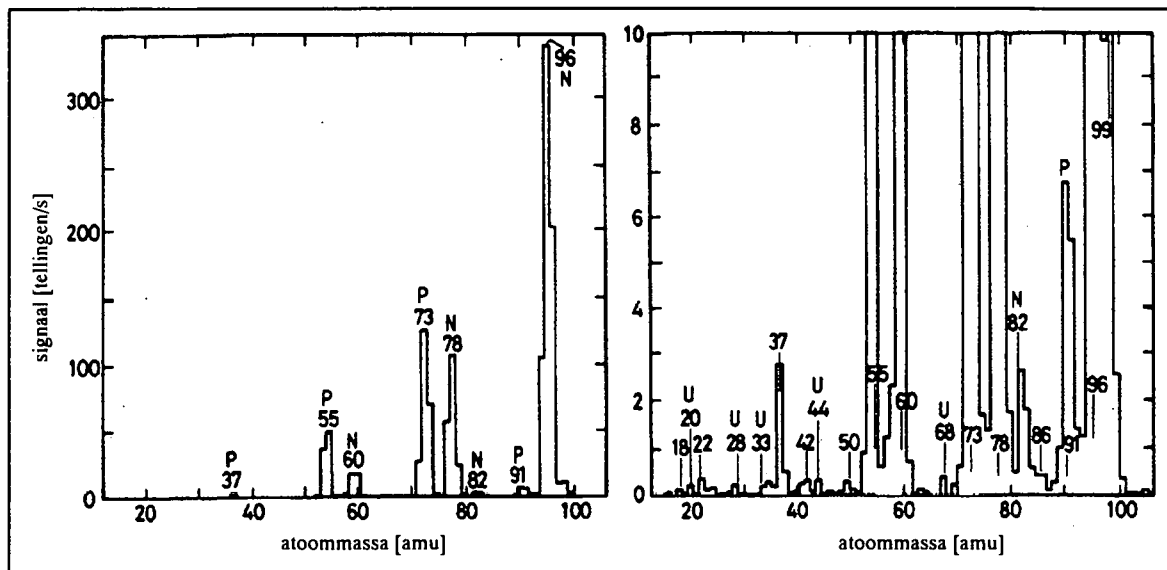


Aangezien de conversiesnelheid van dit schema hoog is (milliseconden) in vergelijking met de gemiddelde levensduur van de ionen (minuten tot uren) kunnen de protonhydraten als relatief stabiele ionen beschouwd worden.

Ze gaan echter wel ion-moleculereacties aan met één of meer sporegassen in de stratosfeer en vormen zo niet-protonhydraten. Alleszins staat nu vast dat de protonhydraten reageren met acetonitrile (CH_3CN) tot $H^+(CH_3CN)(H_2O)_m$ via ligand-uitwisseling (2.29)(2.30) en/of driedeeltjeshechting (2.31)(2.32).

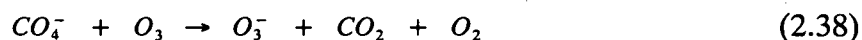
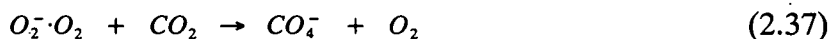
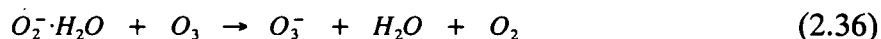
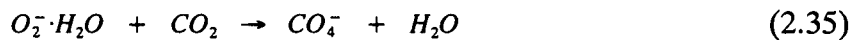
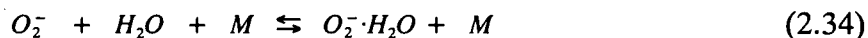
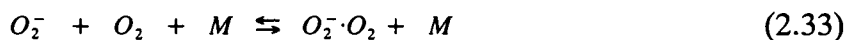


In figuur 2.3 wordt een spectrum getoond met positieve ionen dat werd opgenomen tijdens één van de eerste ballonvluchten met de ION-massaspectrometer van het BIRA. In [Arij 80], [Arij 82], [Arij 83c] en [Arij 86] worden de ION-vluchten voor de meting van positieve ionen besproken.

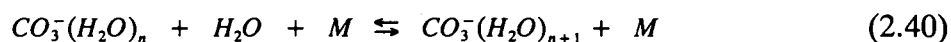


Figuur 2.3: Eerste massaspectrum van ION met positieve ionen (30/09/'77 - 35 km) : protonhydraten $H^+(H_2O)_m$ bij massa's 37 ($n=2$), 55 ($n=3$), 73 ($n=4$) en 91 ($n=5$) en niet-protonhydraten op basis van acetonitrile $H^+CH_3CN(H_2O)_m$ bij massa's 60 ($m=1$), 78 ($m=2$) en 98 ($m=3$) [Arij 80][Arij 95].

Het primaire negatieve ion O_2^- reageert zeer snel met het overvloedig aanwezige O_2 , maar ook met sporengassen zoals H_2O , CO_2 en O_3 ((2.33) tot (2.39)).

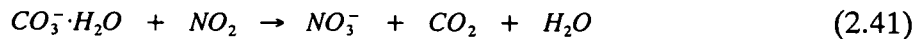


CO_3^- kan dan verder hydrateren (2.40).

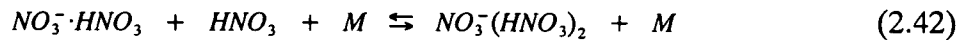


De conversietijd voor deze reacties is ook hier van de orde van milliseconden. De CO_3^- -ionen en CO_3^- -waterclusters blijken niet zeer stabiel te zijn. Een omzetting van CO_3^- naar NO_3^- heeft

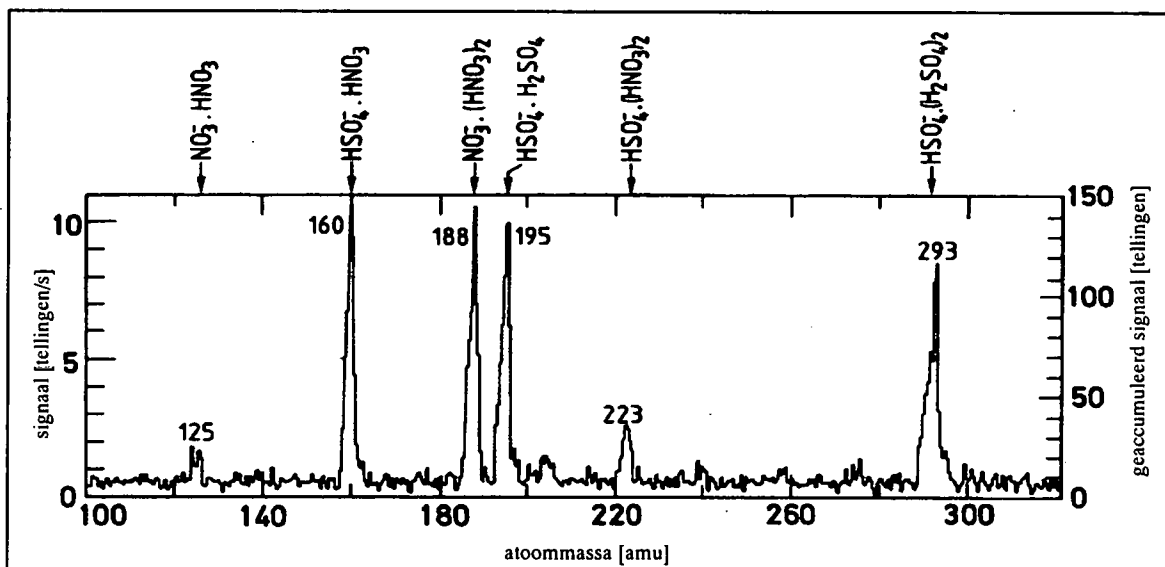
plaats. De mechanismen die deze omzetting sturen zijn redelijk goed gekend. Reacties met NO_x , HNO_3 en N_2O_5 spelen hierbij een rol [Fehs 75]. Hoe de gehydrateerde CO_3^- -clusters omgezet worden in NO_3^- -clusters is minder duidelijk, waarschijnlijk ook via reacties met NO_x (2.41) en daaropvolgende hydratering van NO_3^- .



Daarna worden de waterliganden vervangen door HNO_3 ter vorming van de stabiele $NO_3^-(HNO_3)_n$ -ionen. Toch kunnen deze ionen op hun beurt weer verder reageren met H_2SO_4 tot $HSO_4^-(H_2SO_4)_m(HNO_3)_n$ (2.42)(2.43).



In figuur 2.4 is een spectrum met negatieve ionen voorgesteld, opgemeten met de ION-massaspectrometer van het BIRA. [Arij 83b], [Arij 85] en [Inge 87] bespreken de ION-resultaten voor de meting van negatieve ionen in de stratosfeer.



Figuur 2.4: Een massaspectrum van ION met negatieve ionen (35 km) [Arij 95].

2.3.3. Analyse van de neutrale stratosfeersamenstelling via de natuurlijke ionenchemie

Na de snelle vorming van de stabiele ionenfamilies $NO_3^-(HNO_3)_n$ en $H^+(H_2O)_m$ wordt de ionenchemie in de stratosfeer nog slechts beheerst door protontransfer, liganduitwisseling en associatiereacties. Bij deze reacties spelen ook neutrale componenten een rol. Het is de bedoeling deze ionenchemie te bestuderen om zo de dichtheid van deze neutrale bestanddelen te kennen.

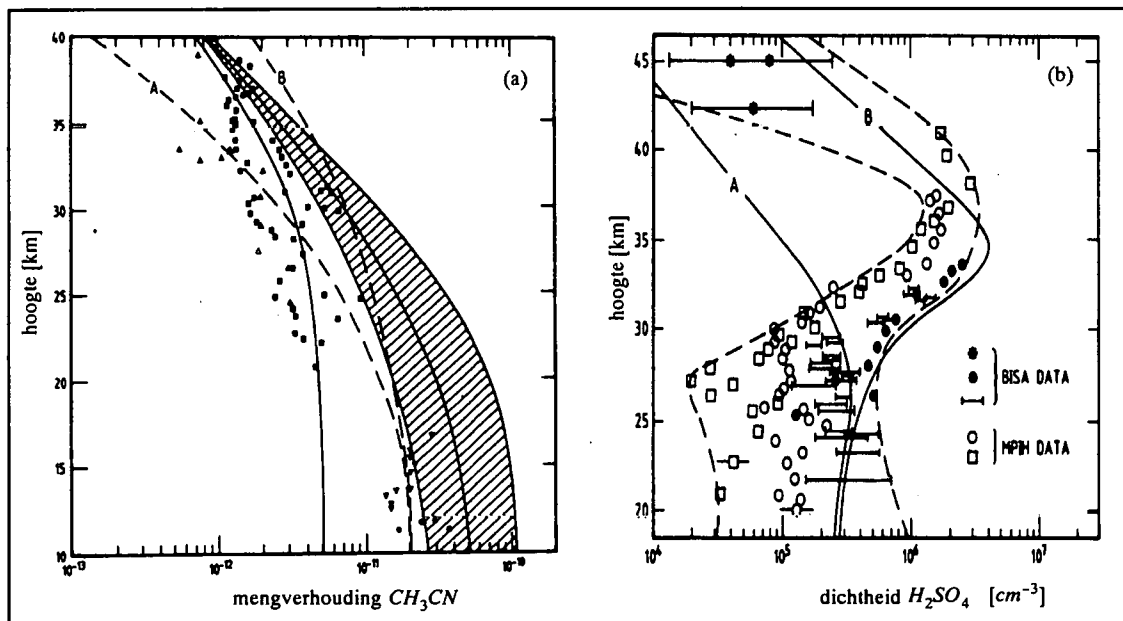
Acetonitrile (CH_3CN) was een niet vermoede verbinding in de stratosfeer, maar werd ontdekt via de meting van de positieve ionenclusters $H^+(CH_3CN)_n(H_2O)_m$ (niet-protonhydraten), namelijk door de analyse te maken van de omzetting van proton- naar niet-protonhydraten. In figuur 2.5a wordt een vergelijking gemaakt van de mengverhouding voor acetonitrile afgeleid uit metingen van het BIRA en het MPIH en uit modelberekeningen.

Bij vorige metingen werden ook sporen gevonden van andere ionenfamilies. Een gebrek aan metingen, instrumentatie met te lage gevoeligheid en resolutie en de moeilijke toegankelijkheid van de geïsoleerde gebieden (tussen de tropopauze en de stratopauze) maakten het tot nu toe onmogelijk daar meer uit af te leiden.

De meting van HSO_4^- (H_2SO_4)_m(HNO_3)_n-ionen en de analyse van de reacties waarbij HNO_3 -liganden worden uitgewisseld voor H_2SO_4 was de eerste experimentele bevestiging van H_2SO_4 in de stratosfeer.

Deze meting was van groot wetenschappelijk belang, gezien de rol die zwavelzuur blijkt te spelen bij de vorming van aërosols, die op hun beurt belang hebben in de heterogene ozonchemie. Momenteel bestaat er geen andere methode om de zwavelzuurconcentratie in de stratosfeer te bepalen dan via de meting van de ionensamenstelling.

Figuur 2.5b geeft een vergelijking van de dichtheidsprofielen van H_2SO_4 bekomen uit metingen van het BIRA en het MPIH.



Figuur 2.5: (a) Profielen van de mengverhouding van acetonitrile (BIRA en MPIH en modellen (A en B)). Het gearceerd gebied is mogelijke verschuiving ten gevolge van clusteropbraak. (b) Profielen van de concentratie van zwavelzuur (BIRA en MPIH en modellen (A en B)) [Arij 95].

Vermoedens bestaan dat ook verbindingen met andere liganden, zoals HCl , H_2O en $HOCl$ aanwezig zijn in de stratosfeer. Dit werd echter nog niet bevestigd door metingen ter plaatse.

Eén van de veel voorkomende problemen bij de meting van stratosferische ionen met massaspectrometers is het opbreken van de ionenclusters in het inlaatgedeelte van het instrument. Het vrij sterke elektrische veld dat net na de inlaat moet aangelegd worden om de ionen te bundelen, kan de optredende botsingen tussen ionen en neutrale componenten voldoende energie geven om liganden van de ionenclusters te rukken. Zodoende zijn de ionen die uiteindelijk in het detectiegedeelte van de massaspectrometer terecht komen, niet meer representatief voor de ware stratosferische ionensamenstelling.

Bovendien werd geconstateerd dat het bij proton-hydraten ($H^+(H_2O)_m$) niet enkel voorkomt dat liganden afbreken, waardoor de orde m van het ion verlaagt, maar dat ook de sterkere acetonitrile-verbindingen in niet-protonhydraten ($H^+(CH_3CN)(H_2O)_m$) kunnen verbroken worden, waardoor een kunstmatige omzetting gebeurt van niet-protonhydraten naar protonhydraten.

Uiteraard heeft clusteropbraak een negatieve invloed op de nauwkeurigheid waarmee dichtheidsprofielen van neutrale bestanddelen kunnen worden opgesteld. Dit verklaart waarom in sommige gevallen H_2O - en HNO_3 -concentraties bekomen door massaspectrometrie sterk kunnen afwijken van resultaten bekomen met andere technieken.

2.3.4. *Analyse van de neutrale stratosfeersamenstelling door middel van actieve chemi-ionisatie*

Het meten van de natuurlijke ionensamenstelling leert enkel iets over neutrale bestanddelen die een belangrijke rol spelen in de natuurlijke ionenchemie. De recent ontwikkelde methode van actieve chemi-ionisatie laat toe ook andere neutrale bestanddelen van de stratosfeer te ontdekken.

Dit gebeurt door middel van een ionenbron, gemonteerd aan de inlaat van de ballongedragen massaspectrometer. De kunstmatig gevormde ionen reageren met de minderheidsbestanddelen in de stratosfeer tot meetbare produktionen. Wanneer de verblijftijd tussen ionenbron en spectrometer en de reactiesnelheidscoëfficiënten van de betrokken ionen gekend zijn, kan uit de door de massaspectrometer gemeten verhouding van bron- en produktionen de concentratie van sommige sporegassen afgeleid worden.

De methode werd voor het eerst gebruikt door de groep van het MPIH. Zij maakten gebruik van CO_3^- , $CO_3^-(H_2O)_n$ - en $NO_3^-(H_2O)_n$ -moederionen bekomen door ionisatie van de omgevingslucht en waren zo in staat HNO_3 -, HCN - en HCl -concentraties te meten [Arno 87][Knop 87][Möhl 91].

N_2O_5 -concentraties werden tot nu toe nooit in situ in de stratosfeer gemeten.

2.3.5. *Andere technieken*

Naast in situ massaspectrometrie worden ook optische methodes gebruikt om de neutrale samenstelling van de stratosfeer te bepalen bijvoorbeeld vanaf satellieten (*remote sensing*). De technieken vullen mekaar aan wat betreft doelgebied en gemeten sporegassen en waar ze overlappen bieden ze de mogelijkheid de resultaten te vergelijken en te valideren.

De optische methodes steunen op het principe van de emissie- of de absorptie-eigenschappen van de moleculen in welbepaalde banden van het lichtspectrum. Het nadeel van deze methoden is dat ze slechts kunnen gebruikt worden tijdens relatief korte perioden, bijvoorbeeld bij zonsopgang of zonsondergang, waar massaspectrometrie de hele dag door mogelijk is. Bovendien zijn de gemeten waarden in optische instrumenten gemiddelden over grote afstanden doorheen de atmosfeer. Zonder volledigheid na te willen streven worden hierna enkele voorbeelden gegeven van zulke optische instrumenten.

MIPAS (*Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding*) is een Fouriertransformatie-spectrometer die in situ metingen doet van de atmosferische emissie aan de horizon (*limb emission*). Met deze interferometer werden recentelijk HNO_3 -, $ClONO_2$ - en N_2O_5 -profielen gemeten [Öhla 94][Wetz 95].

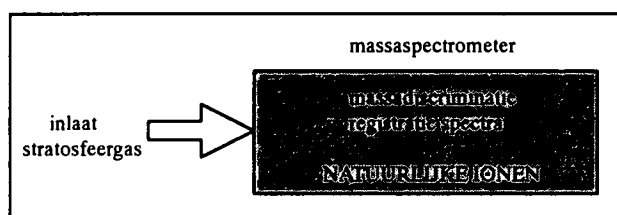
CAESR (*Cold Atmospheric Emission Spectral Radiometer*) is een kleine infrarood radiometer die eveneens de emissie aan de horizon meet. Ook met dit instrument werden in 1992 HNO_3 -profielen opgemeten [Murc 94].

H_2O en HNO_3 zijn neutrale minderheidsbestanddelen die recent in de stratosfeer werden gemeten door het LIMS-instrument (*Limb Scanning Infrared Monitor of the Stratosphere*) aan boord van de NIMBUS-satelliet [WMO16].

2.4. Concrete doelstellingen van het SIDAMS/MACSIMS-project

De nieuwe technologie in het SIDAMS/MACSIMS-instrument biedt de mogelijkheid simultaan ionen te meten, hetzij positieve, hetzij negatieve, met een hogere massa-resolutie, met een verbeterde gevoeligheid en met betere hoogteresolutie, dan voorheen mogelijk was. Bovendien wordt de afbraak van clusters in de inlaatsectie zo klein mogelijk gehouden.

De eerste doelstelling van het project (figuur 2.6) is door simultane meting van natuurlijke ionen de reeds bekende en mogelijk nieuwe sporegassen te detecteren die betrokken zijn in de stratosferische ionenchemie (CH_3CN , H_2O , H_2SO_4 , HNO_3 , HCl).



Figuur 2.6: Een "stand-alone"-massaspectrometerconfiguratie.

De tweede doelstelling van het SIDAMS/MACSIMS-project is de massaspectrometer zo te configureren dat ook sporegassen of minderheidsbestanddelen kunnen gedetecteerd worden, die slechts in geringe mate deelnemen aan de natuurlijke ion-moleculechemie of zelfs helemaal niet. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de methode van de actieve chemi-ionisatie.

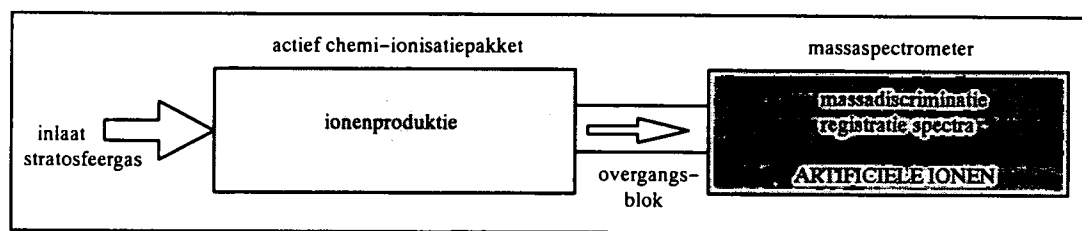
In het kader van het SIDAMS/MACSIMS-project werd gelijktijdig een ionenbron ontwikkeld voor ionisatie van de omgevingslucht en één voor de productie van Cl^- - en I^- -ionen door ionisatie van meegevoerde moedergassen. Het was de bedoeling via de gekende ion-moleculereacties van deze ionen tegelijk HNO_3 en N_2O_5 te meten, twee gassen die een belangrijke rol spelen in de ozoncyclus (zie 2.2.4).

HNO_3 is betrokken bij de vorming van *NAT polar stratospheric clouds* en mogelijk ook van aërosols. Bovendien is het verdwijnen van salpeterzuur uit de stratosfeer in de winter (denoxificatie en denitrificatie) de directe aanleiding voor het overleven van gemakkelijk activeerbare en dus gevaarlijke chloorhoudende gassen in de lente.

N_2O_5 reageert met H_2O en HCl op PSC's of met wateroplossingen van zwavelzuur in aërosols. Beide reacties dragen eveneens bij tot het verdwijnen van NO_x uit de stratosfeer in de winter en openen zo de weg voor het afbreken van de ozonlaag.

Het SIDAMS/MACSIMS-instrument zoals het in dit werk wordt voorgesteld is de combinatie van een nieuwe performante ballongedragen massaspectrometer voor het simultaan meten van

ionen en een actief chemi-ionisatiepakket dat door ingrijpen in de stratosferische ionenchemie moet leiden tot een methode voor de detectie van wetenschappelijk belangrijke sporegassen zoals HNO_3 en N_2O_5 (figuur 2.7).



Figuur 2.7: Combinatie van een massaspectrometer en een actief chemi-ionisatiepakket.

2.5. Lanceringmogelijkheden

Vier verschillende methodes worden gebruikt om instrumenten (bijvoorbeeld massaspectrometers) op de gewenste plaats in de atmosfeer te brengen. Met vliegtuigen kan de hele troposfeer bestreken worden (0 – 15 km). Raketten worden gebruikt in de hoge mesosfeer (> 60 km). Ook worden wel eens raket-dropsondes gebruikt tussen 45 en 60 km, waarbij de raket is uitgerust met een parachute die zich opent net voor het bereiken van de baantop, op 60 tot 70 km hoogte.

Stratosfeerballons bieden zeer goede omstandigheden om ter plaatse in de stratosfeer metingen van ionen te verrichten. Er moet geen rekening gehouden worden met schokgolven ten gevolge van te hoge verplaatsingssnelheden, een probleem waarop bij raketexperimenten wel moet gelet worden. In tegenstelling tot raketten bieden stratosfeerballons bovendien de mogelijkheid veel langer in eenzelfde atmosfeerlaag te blijven hangen of zeer traag af te dalen. Dit is een voordeel gezien zo, ondanks de lagere ionendichtheden in de stratosfeer, toch spectra kunnen gemeten worden met een groot dynamisch bereik en een goede hoogteresolutie.

Het *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES) in Frankrijk, heeft een afdeling die zich uitsluitend bezighoudt met het lanceren van ballons. Hun faciliteiten staan ter beschikking van wetenschappers die deze ballons willen gebruiken als platform voor hun onderzoek.

De lanceringen gebeuren meestal vanaf twee basissen in Frankrijk, de thuisbasis in het zuid-westen (Aire-sur-l'Adour) of de basis in de lage Alpen (Gap-Tallard). Ook vanuit het Zweedse Kiruna en het Spaanse León kunnen lanceringen plaatsvinden. De keuze van de basis wordt gemaakt in functie van de plaatselijke weersomstandigheden zoals de overheersende windrichting op grote hoogte. Bovendien zal een lancering slechts dan plaatsvinden wanneer een landing in een weinig bevolkt gebied gegarandeerd is (voorkomen van ongevallen) dat ook redelijk toegankelijk is (gemakkelijke recuperatie van het instrument).

De chronologie tijdens de voorbereidende fase van een ballonvlucht en de vlucht zelf volgt in grote lijnen het volgende patroon.

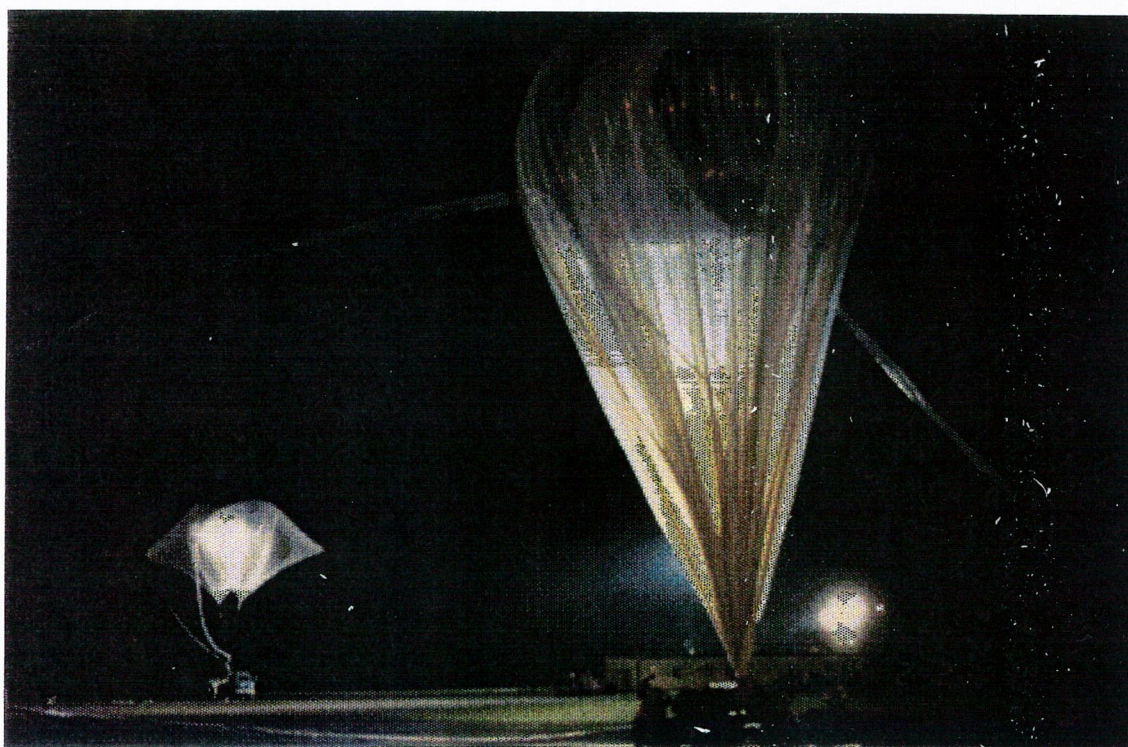
Het instrument dat voor het transport deels werd gedemonteerd, wordt na aankomst op de lanceerbasis weer opgesteld. De werking wordt volledig gecontroleerd, de elektrische interface met de zend- en ontvangstinstallatie van het CNES wordt uitgetest en het instrument wordt gewogen.

Zodra het instrument klaar is om te vertrekken, wordt uitgekeken naar een geschikt lanceertijdstip. Daarvoor moeten de weersomstandigheden aan de grond (wind en neerslag) en de winden in troposfeer en stratosfeer aanvaardbaar zijn, en moet een vluchtprofiel kunnen gewaarborgd worden dat tegelijk voldoende tijd laat voor de nodige metingen en toch leidt naar een geschikte landingsplaats.

Eens het tijdstip voor de lancering H_0 gekozen begint het eigenlijke klaarmaken van het instrument. De cryopompen die het instrument onder vacuüm moeten brengen worden met helium gevuld. De start van de heliumvulling is afhankelijk van de standtijd van de pompen en de vooropgestelde vluchtduur en situeert zich meestal een vijftal uren voor H_0 (een goed vacuüm moet tot het einde van de vlucht verzekerd zijn).

Twee uur voor de lancering worden de hulpballons klaargemaakt die het instrument bij de lancering een weinig van de grond tillen om beschadigingen te voorkomen. Het instrument zelf wordt anderhalf uur voor de lancering naar de lanceerbaan gebracht.

Een uur voor de lancering begint het openplooiën van de stratosfeerballon. Het type van ballon wordt gekozen in functie van de gewenste plafondhoogte en het gewicht van het instrument. Gezien het SIDAMS/MACSIMS-instrument ongeveer 420 kg zwaar is en plafondhoogtes van 30 à 35 km gevraagd worden bedraagt het geschikte ballonvolume voor dit instrument 100.000 m³ (figuur 2.8).



Figuur 2.8: Foto van de lancering van het SIDAMS/MACSIMS-instrument in León op 21 november 1994.

Een kwartier voor de lancering wordt de ballon gedeeltelijk gevuld met waterstof. Op H_0 wordt de ballon losgelaten. De hulpballons die het instrument in de eerste seconden van de lancering begeleiden worden na ongeveer één minuut automatisch losgekoppeld.

Het verdere verloop van de vlucht hangt sterk af van de weersomstandigheden. De ballon stijgt aan een opgelegde snelheid tot op de gekozen plafondhoogte (b.v. in 2 uur tot 33 km of 7 mbar).

Afhankelijk van de wetenschappelijke doelstelling wordt de ballon zolang mogelijk op dezelfde plafondhoogte gehouden (dit wordt geregeld door regelmatig ballast af te werpen) of wordt er traag afgedaald met een gekozen snelheid (b.v. 1m/s) tot op ongeveer 20 km (65 mbar). Hier wordt het instrument afgescheiden van de ballon en daalt het verder af tot aan de grond met behulp van valschermen.

De controle van de ballast, het afscheiden van het instrument, het volgen van de vluchtpositie (GPS-systeem aan boord) en het doorzenden van telecommando's en het ontvangen van telemeting gebeurt vanop afstand vanaf de lanceerbasis.

Na de landing wordt het instrument per vliegtuig of helicopter gelocaliseerd en daarna met de wagen gerecupereerd.

Een tijdschema van een typisch vluchtscenario wordt gegeven in tabel 2.1.

H_0 - één week	: aankomst op lanceerbasis, voorbereiding van het instrument
H_0 - 2 dagen	: integratietesten telemeting- en telecommandointerfaces
H_0 - 10 h	: OK meteo (grond, traject, richting, plaats recuperatie, ...)
H_0 - 8 h	: weging instrument
H_0 - 5 h	: vullen cryopompen met vloeibaar helium
H_0 - 4 h	: controleren grondcondities met Zeppelin
H_0 - 2 h	: klaarmaken hulpballons
H_0 - 1 h 30'	: instrument naar lanceerstrook, gereedmaken ketting
H_0 - 1 h	: "OK dépliage" : openplooiën ballon
H_0 - 15'	: "OK gonflage" : opblazen ballon
H_0	: "lancer" : lancering, begin stijgfase, geen metingen
H_0 + 1'	: afsnijden hulpballons
H_0 + 2 h	: bereiken plafondhoogte, instellen parameters
H_0 + 3 h	: einde plafond, begin langzame afdaling, metingen
H_0 + 7 h	: einde afdaling, "squib", parachutes
H_0 + 1 dag	: recuperatie (vliegtuig, helicopter, terreinwagen)

Tabel 2.1: Tijdschema van een typisch vluchtscenario.

2.6. Het massaspectrometergedeelte

2.6.1. Overzicht van bestaande technieken voor massafiltering

2.6.1.1. Inleiding

Het eerste gebied van de atmosfeer dat grondig werd onderzocht wat betreft de samenstelling aan geladen deeltjes was de ionosfeer. De reden hiervoor lag, zoals gezegd, in het belang voor de voortplanting van radiogolven voor telecommunicatiedoeleinden. Toen niet alleen de vraag naar de dichtheid maar ook naar de aard van de geladen deeltjes in de ionosfeer gesteld werd, lag het gebruik van de techniek van de massaspectrometrie voor de hand.

Een tweede belangrijke reden waarom de hoogste lagen van de atmosfeer eerst geëxploreerd werden, was het feit dat dit technisch gezien de minste moeilijkheden opleverde. Hoe lager de atmosfeerlaag die moet onderzocht worden, hoe hoger de buitendruk en hoe moeilijker het wordt een voldoende vacuüm te onderhouden in de massaspectrometer. In de delen van de massaspectrometer waar de extractie gebeurt van de ionen uit het gasexpansiegebied na de inlaatopening, waar de bundeling van de ionen en het transport naar de massascheider plaats vindt en in de eigenlijke massascheider moet het vacuüm zo zijn dat verstrooiing van de ionen verwaarloosbaar is.

De verbetering van de cryopomptechniek liet toe steeds lager gelegen gebieden te onderzoeken en sinds het begin van de jaren tachtig is ook de ionensamenstelling van de stratosfeer in grote lijnen gekend. Initieel kwamen signaalgevoeligheid en massa-resolutie van het instrument hierbij slechts op de tweede plaats.

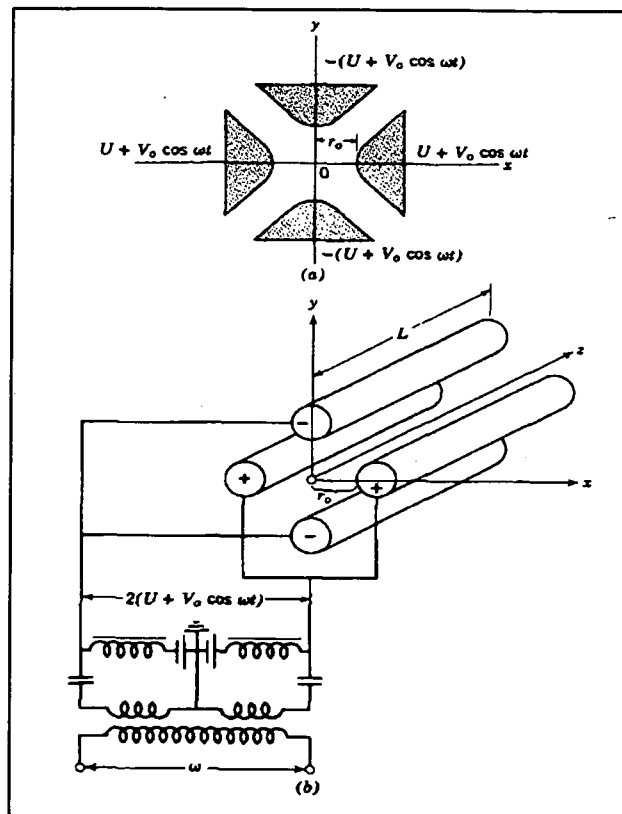
Het hart van een massaspectrometer is de massascheider die uit de binnenkomende ionen deze selecteert die in een gekozen massadomein liggen. Enerzijds worden dynamische massascheiders gebruikt waar de massafiltering geschiedt op basis van een tijdsafhankelijke parameter, zoals bijvoorbeeld in vluchttijdmassafilters of in hoge frequentie massascheiders zoals quadrupolen. Anderzijds bestaan er statische massascheiders waar de massafiltering gebeurt door middel van een magnetisch veld al of niet in combinatie met een elektrisch veld. In een vroeger project van het BIRA (ION) werden metingen verricht door massaspectrometers met quadrupolaire massafilters.

2.6.1.2. Quadrupolaire massafilters

Quadrupolen behoren tot de familie van de hoogfrequente massafilters. Door een elektrisch veld aan te leggen dat periodisch is in de tijd en symmetrisch ten opzichte van de as van een ionenbundel worden ionen met welbepaalde massa-ladingsverhoudingen doorgelaten naar een detector, terwijl andere ionen van de as worden afgebogen.

Een quadrupool (figuur 2.9) bestaat uit vier staven, concentrisch opgesteld en paarsgewijze gevoed met een positieve en een negatieve spanning, bestaande uit een hoogfrequent spanningsgedeelte, gesuperponeerd op een gelijkspanning (2.44).

$$\pm [U + V \cos(\omega t)] \quad \left(f = \frac{\omega}{2\pi} = 1 \text{ à } 2 \text{ MHz} \right) \quad (2.44)$$



Figuur 2.9: De quadrupoolconfiguratie [Whit 86].

Quadrupolen bieden het voordeel dat de ionenbanen er wiskundig volledig uitrekenbaar zijn. Dit laat toe theoretisch het verband tussen de aangelegde spanningen en het geselecteerd massadomein en de massa-resolutie te bepalen. Bovendien zijn het lichtgewicht instrumenten.

Het grote nadeel van een quadrupolair massafilter is echter de onmogelijkheid om terzelfdertijd meerdere ionen te meten met een goede massa-resolutie. Het kan wel zeer goed gebruikt worden om ionen met een massa rond een ingestelde massawaarde met goede resolutie te filteren. In dat geval wordt met de verhouding $\frac{U}{V}$ de massa-resolutie ingesteld en wordt de massa lineair afhankelijk van de amplitude V van de wisselspanning. Door het feit dat de opname van een massaspectrum inhoudt dat achtereenvolgens alle massawaarden dienen afgelopen te worden, is dit massafilter minder efficiënt dan massafilters die simultane ionendetectie zouden toelaten bij hoge massa-resolutie.

De gelijkspanning op de as van een quadrupolair massafilter kan ingesteld worden door bij alle aangelegde spanningen een spanning op te tellen. Aangezien de hoogfrequente spanningscomponent op de as afwezig is, kan deze zogenaamde *pole bias* gebruikt worden om de ionen uit de expanderende gasstroom achter de inlaatopening van de massaspectrometer aan te trekken. Deze spanning wordt ingesteld op een waarde van enkele tientallen volt. Doordat de in dit relatief sterke elektrisch veld versnelde ionen energetische botsingen maken met residuele neutrale bestanddelen, verhoogt het risico aanzienlijk dat liganden met zwakke bindingsenergie van de ionenclusters afbreken. Dit fenomeen vervalst de gemeten relatieve abundantie van de ionen [Fuss 89].

Bij de nieuwe generatie massaspectrometers zijn kenmerken zoals massaresolutie en signaalgevoeligheid veel belangrijker geworden, gezien de wetenschappelijke doelstellingen niet meer liggen bij de exploratie van onbekende gebieden, maar veeleer bij gedetailleerde studie van welbepaalde chemische mechanismen.

2.6.1.3. Vluchttijdmassascheiders

In dit type van massascheiders wordt principieel de tijd gemeten die een ion met massa m nodig heeft om een welbepaalde afstand af te leggen [Jaya 66]. Dit kan door een gesynchroniseerde tijdmeting τ uit te voeren tussen een gepulste ionenbron en een detector, die er een gekende afstand L van verwijderd is. Voor enkelvoudig geladen ionen die eenzelfde potentiaalbarrière V hebben overwonnen is de snelheid $v = \frac{L}{\tau}$ een maat voor de massa en kan zo'n snelheidsfilter gebruikt worden als massascheider ($eV = \frac{m \cdot v^2}{2}$). Essentiële componenten in een vluchttijdmassascheider zijn een ionenproductie-eenheid, een gepulst roostersysteem om de ionen uniforme snelheden te geven, een driftgebied voor de ionen en een snelle ionendetector (figuur 2.10).

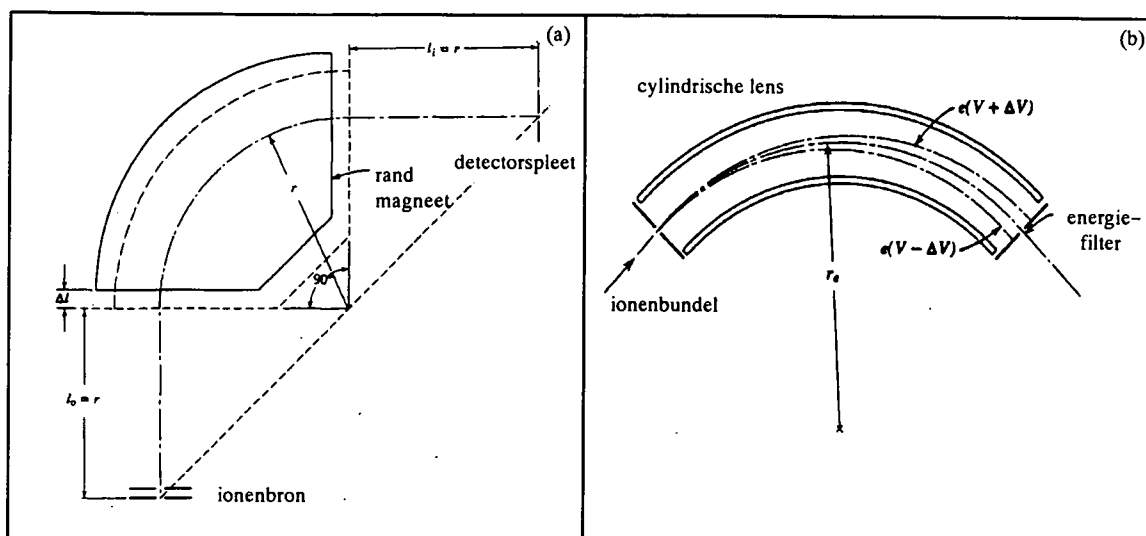


Figuur 2.10: Principe van een vluchttijdmassascheider [Jaya 66].

Gepulste vluchttijdmassascheiders hebben als nadeel dat slechts gedurende een fractie van de tijd effectief kan gemeten worden. Daardoor vereisen zij, net als quadrupolaire massafilters, te lange integratietijden en verliezen dus aan massaresolutie [Rams 86].

2.6.1.4. Magnetische massascheiders

Een ander type van massascheider is gebaseerd op het principe van het magnetische sectorveld (figuur 2.11a) [Jaya 66]. Het instrument bestaat uit een uniform magnetisch veld binnen een strikt afgebakend gebied of sector. De ionen die het magnetisch veld binnenkomen worden afhankelijk van hun massa-ladingsverhouding $\frac{m}{e}$ minder of meer afgebogen en afgebeeld op een detector aan het andere eind van de sector. Belangrijk bij magnetische sectorvelden is het vermijden van strooivelden, het verzorgen van de grenzen van het veld en het uitsluiten van beïnvloeding van het veld door ruimte- of oppervlakteladingen.

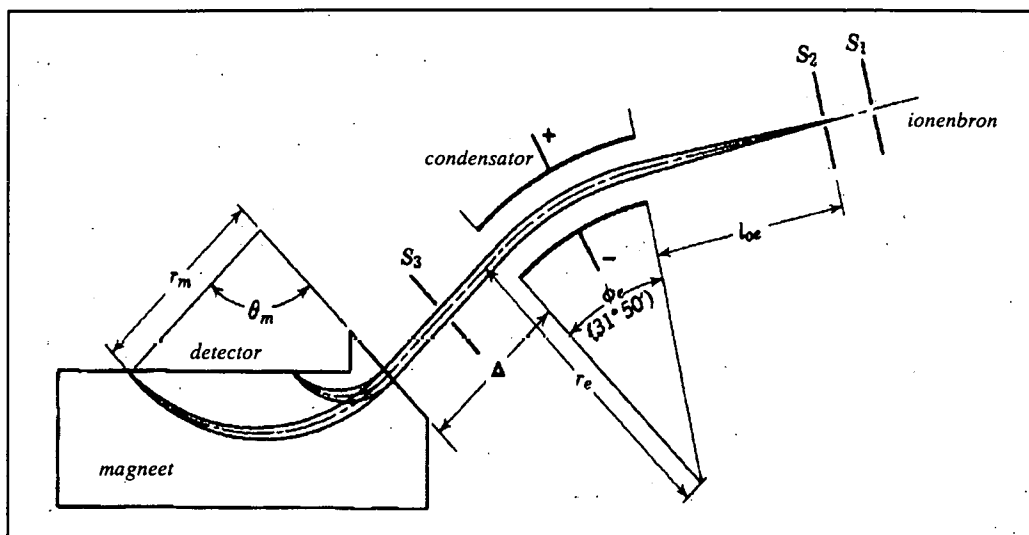
2.6.1.5. *Elektrostatische filters*

Figuur 2.11: Voorbeeld van een 90° -magnetische massascheider (a) en van een elektrostatisch filter (b) [Whit 86].

Waar magnetische massafilters zeer geschikt zijn voor het bepalen van de massa-ladingsverhouding van een geladen deeltje, worden electrostatische filters veeleer gebruikt om ionen met verschillende energie te focuseren (energiefiltering) [Whit 86]. Ze worden dikwijls gebruikt om een homogene ionenbundel met een beperkt energiebereik aan een magnetische massascheider aan te bieden. De meest gebruikte elektrostatische filters zijn cilindrische of toroïdale condensators. De as van de condensator wordt op een potentiaal V gebracht door een spanningsverschil aan te leggen tussen de binnen- en de buitenwand van het filter. Ingang- en uitgang van de condensator worden afgesloten met collimatorspleten. Hierdoor zullen slechts die ionen de condensator doorkomen wiens kinetische energie ligt tussen $e(V - \Delta V)$ en $e(V + \Delta V)$ (figuur 2.11b). Hierbij wordt ΔV bepaald door de spanningen op de wanden en de grootte van de collimatorspleten.

2.6.1.6. *Dubbelfocuserende massascheiders*

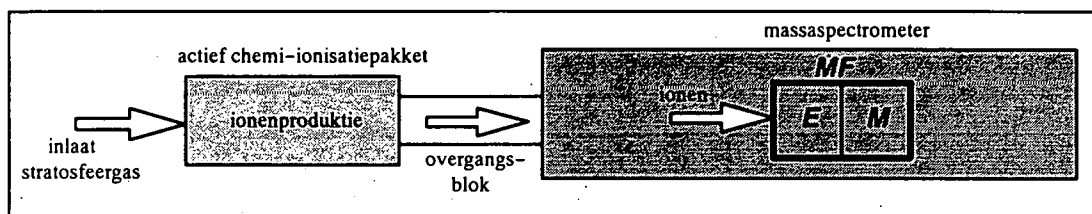
Zowel magnetische als elektrische velden hebben een focuserende invloed op passerende ionenbundels. Men spreekt van dubbelfocusering wanneer alle ionen met eenzelfde massa-ladingsverhouding ($\frac{m}{e}$) die uit een puntvormige ionenbron vertrekken met verschillende snelheden en met verschillende richtingen in een bepaald vlak, door toedoen van een combinatie van een elektrisch en een magnetisch veld weer in één punt worden afgebeeld. Een dubbelfocuserende massascheider voert zowel een richtings- als een snelheidsfocusering uit. De ionen bewegen zich in een dubbelfocuserende combinatie op parallelle banen tussen elektrisch en magneetveld [Jaya 66].



Figuur 2.12: Voorbeeld van een dubbelfocuserende Mattauch-Herzog-massascheider [Whit 86].

Hoewel dubbelfocusering kan gerealiseerd worden door overlapping van een elektrisch en een magnetisch veld, is de meest gebruikte configuratie deze waarin het beeld gevormd aan de uitgang van een radiaal elektrostatisch sectorveld tot ingang dient van een magnetisch sectorveld (*tandem sectors*). De eigenlijke massascheiding gebeurt volledig in het magnetisch veld. De combinatie van twee velden laat toe afwijkingen in het ene veld te compenseren in het andere. De meest gekende dubbelfocuserende massascheider werd ontworpen door Mattauch en Herzog (figuur 2.12).

2.6.2. De SIDAMS/MACSIMS-massascheider



Figuur 2.13: Situering van het massafilter (MF) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

E : elektrisch veld ; M : magnetenveld

In het SIDAMS/MACSIMS-project wordt een dubbelfocuserende massascheider gebruikt bestaande uit een radiaal elektrisch sectorveld gevolgd door een homogeen magnetenveld [Rytz 94].

Deze massascheider laat toe alle ionen waarvan de massa in een breed massadomein ligt, simultaan aan te bieden aan een detectorsysteem, wat een belangrijke winst oplevert in meettijd ten opzicht van quadrupolaire of vluchtijmassafilters.

Om dubbelfocussing te bekomen voor alle waarden van $\frac{m}{e}$ (garantie voor goede massaresolutie) moet het beeldpunt virtueel op oneindig gelegd worden. Dit is het geval wanneer de ionenbundel die de massascheider binnenkomt beperkt wordt in diameter en geen te grote divergentie vertoont. Daarom wordt aan de ingang van de massascheider een ionenoptiek geplaatst die zorgt voor het bundelen en focuseren van de ionen.

Een speciaal geval van een voor alle massa-ladingsverhoudingen dubbelfocusserende massascheider is het Mattauch-Herzog-massafilter. Het bestaat uit een toroïdaal radiaal elektrostatisch veld gevolgd door een homogeen magneetveld, waarbij de ionen loodrecht de magnetische sector binnenkomen (figuur 2.12). Dit levert een bijkomend voordeel op, namelijk dat de beeldrechte op de rand van het magneetveld ligt en de ionen bij het verlaten van de massascheider naar de detector toe het randveld van de magneet niet moeten doorkruisen [Spre 93].

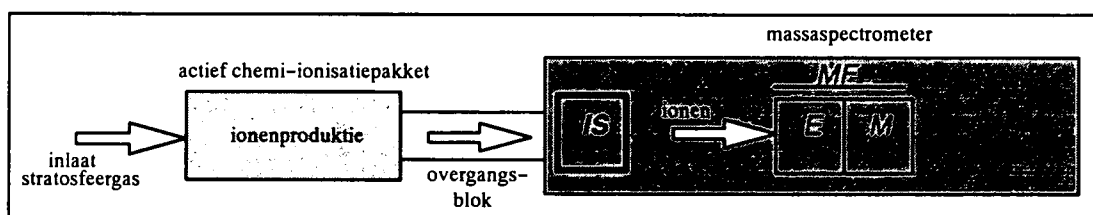
Voor het magnetisch veld wordt een permanente samarium-kobaltmagneet gebruikt. Permanente magneten hebben de meest stabiele en homogene magnetisch velden.

Het elektrostatisch veld wordt opgewekt in een toroïdevormige condensator. De platen van deze condensator worden op een verschillende hoogspanningspotentiaal gebracht. De binnenplaat krijgt de *inner toroidal voltage* (itv) en de buitenplaat de *outer toroidal voltage* (otv). De as van de condensator bevindt zich zo op een hoogspanningspotentiaal die *ion acceleration voltage* (iav) genoemd wordt.

Aangezien de elektrische veldlijnen tussen de condensator en de magneet parallel zijn, is het mogelijk de onderlinge afstand zodanig te vergroten dat een elektrisch aangestuurde afsluitkraan tussenin kan geplaatst worden om het verder gelegen detectiegedeelte te beschermen wanneer het instrument niet in werking is.

De massaresolutie ($\frac{m}{\Delta m}$) van de Mattauch-Herzog-massascheider hangt af van de elektrostatische en magnetische sectorstralen. Voor de SIDAMS/MACSIMS-massaspectrometer werd een massaresolutie van 250, en een massabereik tussen 12 en 500 atoommassaeenheden (amu) vooropgesteld. Dit en een goed dynamisch bereik moeten toelaten met het SIDAMS/MACSIMS-instrument simultaan stratosferische ionen te detecteren waarvan de concentraties ver uit mekaar liggen [Rytz 94].

2.6.3. De inlaatsectie van de massaspectrometer



Figuur 2.14: Situering van de inlaatsectie van de massaspectrometer (IS) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

MF : massafilter ; E : elektrisch veld ; M : magneetveld

De inlaatsectie van de massaspectrometer vormt de interface met de omgeving. Dit kan de stratosfeer zijn wanneer het natuurlijke ionenbestand wordt gemeten. In de

SIDAMS/MACSIMS-configuratie is die omgeving het deel van het instrument waar de actieve chemi-ionisatie plaatsvindt (figuur 2.14).

De inlaat van de massaspectrometer wordt gevormd door een flens waarin zich een kleine opening bevindt. Voor de keuze van de diameter van de opening moet een compromis gemaakt worden tussen een hoog signaal en een goede inwendige druk.

Rondom de opening kan een elektrisch geïsoleerd deel van de flens op een bepaalde laagspanning gebracht worden, de *ion inlet voltage* (iiv), om zo hetzij positieve, hetzij negatieve ionen aan te trekken uit de omgeving. Deze ionen ondergaan op hun weg naar de inlaat talrijke botsingen en komen daarom de massaspectrometer binnen met een energie die praktisch gelijk is aan de thermische energie van de stratosfeermoleculen.

Door het vacuüm in het instrument komen de ionen na de inlaat in een expanderende gasstroom terecht.

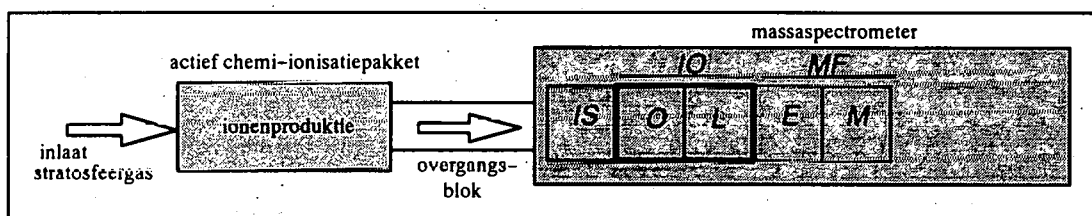
Voor de koppeling met het actief chemi-ionisatiepakket wordt een overgangsblok op de inlaatflens van de massaspectrometer bevestigd.

In het geval geen actief chemi-ionisatiepakket aan de massaspectrometer wordt gekoppeld zal de inlaatopening moeten afgesloten worden met een afsluitsysteem. Dit systeem zorgt ervoor dat het vacuüm in het instrument goed blijft tot net voor de start van de metingen. Op dat moment moet het pyrotechnisch geopend worden.

2.6.4. De SIDAMS/MACSIMS-ionenoptiek

2.6.4.1. Functies

De ionenoptiek gaat aan het massafilter vooraf (figuur 2.15) en vervult een aantal belangrijke functies.



Figuur 2.15: Situering van de ionenoptiek (IO) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

IS : inlaatsectie ; O : octopool ; L : lenzensysteem ; MF : massafilter ; E : elektrisch veld ;
M : magneetveld

In de eerste plaats vindt hier de extractie plaats van de ionen uit de expanderende gasstroom na de inlaatopening van de massaspectrometer. Zoveel mogelijk van deze ionen moeten verzameld worden en getransporteerd naar de massascheider. Deze functies worden vervuld door een ionentransportsysteem. Voor het SIDAMS/MACSIMS-instrument zal hiervoor een octopool gebruikt worden.

De goede dubbelfocuserende werking van de Mattauch-Herzog-massascheider hangt sterk af van de kenmerken van de binnenvallende ionenbundel. Ideaal moet het beeldpunt van de

massascheider op oneindig liggen. Dit wil zeggen dat de ionenbundel zo smal en zo parallel mogelijk moet zijn en goed gefocuseerd. Hiervoor wordt gezorgd door een elektrostatisch lenzensysteem dat geplaatst wordt tussen octopool en massascheider. Dit lenzensysteem zorgt er verder nog voor dat de ionen die op weg zijn naar de massascheider tot een gewenste kinetische energie worden versneld.

2.6.4.2. Keuze van een ionentransportsysteem

In het algemeen worden de staven van een $2n$ -pool op een hoogfrequente wisselspanning geplaatst. Hierop wordt een constante gelijkspanning gesuperponeerd. Deze totale spanning is van staaf tot staaf afwisselend in fase en tegenfase (2.45).

$$\pm [U + V \cos(\omega t)] \quad (2.45)$$

Voor een quadrupool ($n=2$) kan de beweging van een enkelvoudig geladen ion beschreven worden door middel van twee Matthieu-differentiaal-vergelijkingen (2.46)(2.47).

$$\frac{d^2 X}{dT^2} + [a_2 - 2q_2 \cos[2(T - T_0)]]X = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{d^2 Y}{dT^2} - [a_2 - 2q_2 \cos[2(T - T_0)]]Y = 0 \quad (2.47)$$

Hierbij is : $X = \frac{x}{r_0}$, $Y = \frac{y}{r_0}$, $T = \frac{\omega t}{4}$ en $T_0 = \frac{\omega t_0}{4}$.

(x, y) is de coördinaat van een punt binnen de quadrupool en r_0 de straal van de concentrische cirkel waarop de staven van de quadrupool zich bevinden. $a_2 = \frac{8.e.U}{m\omega^2 r_0^2}$ en $q_2 = \frac{4.e.V}{m\omega^2 r_0^2}$ zijn twee systeemp parameters.

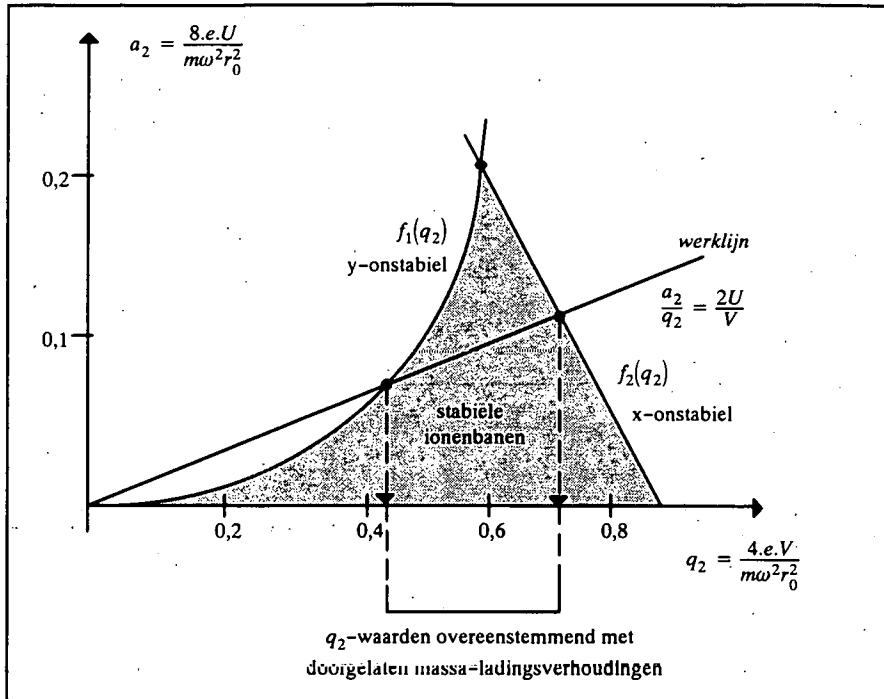
Uit het stelsel vergelijkingen blijkt dat de beweging in de x -richting onafhankelijk is van de beweging in de y -richting. De oplossingen van zo'n stelsel zijn gekend.

Bovendien bepalen alleen de waarden van a_2 en q_2 of een ionenbaan stabiel is, onafhankelijk van de plaats, de snelheid en de fase bij het binnenkomen van de quadrupool [Hägg 86a].

Wanneer in een twee-dimensionaal stabiliteitsdiagram a_2 wordt uitgezet tegen q_2 kan hierin een gebied aangeduid worden waarbinnen de stabiele oplossingen van het stelsel differentiaalvergelijking liggen (figuur 2.16). $f = \frac{\omega}{2\pi}$ is de frequentie van de aangelegde wisselspanning, r_0 wordt bepaald door de geometrie, U en V zijn de amplitudes van de gelijkspannings- respectievelijk wisselspanningscomponent van de quadrupoolspanning.

Er wordt één bepaalde werkfrequentie gekozen en er geldt steeds dat $\frac{a_2}{q_2} = \frac{2U}{V}$. Indien we $\frac{U}{V}$ constant houden beschrijven alle (a_2, q_2) -paren die aan deze gelijkheid voldoen een werklijn van de quadrupool. Wanneer deze punten ook nog in het stabiele gebied van het a_2 - q_2 -diagram liggen stellen ze ionen voor met een welbepaalde massa-ladingsverhouding $\frac{m}{e}$ die met succes doorheen de quadrupool lopen. Door de werklijn naar de top van het stabiliteitsgebied te verschuiven werkt de quadrupool meer en meer als massafilter. Door de werklijn naar de q_2 -as te verschuiven (a_2 wordt 0) zullen uiteindelijk alle ionen doorgelaten worden met een massa-ladingsverhouding hoger dan een zekere limiet, die afhangt van de ingestelde spanning V . De quadrupool werkt dan als een ionengeleider.

Multipolen van een hogere orde, bijvoorbeeld hexapolen ($n=3$), octopolen ($n=4$), enz. zijn analytisch onoplosbare niet-lineaire systemen. (2.48) en (2.49) geven het stelsel bewegingsvergelijkingen voor een octopool.



Figuur 2.16: Stabiliteitsdiagram voor een quadrupool.

$$\frac{d^2X}{dT^2} = [2q_4 \cos[4(T - T_0)] - a_4] \cdot [X^3 - 3XY^2] \quad (2.48)$$

$$\frac{d^2Y}{dT^2} = [a_4 - 2q_4 \cos[4(T - T_0)]] \cdot [3X^2Y - Y^3] \quad (2.49)$$

Hierbij geldt weer : $X = \frac{x}{r_0}$, $Y = \frac{y}{r_0}$, $T = \frac{\omega t}{4}$ en $T_0 = \frac{\omega t_0}{4}$ met als systeemparameters $a_4 = \frac{32 \cdot e \cdot U}{m \omega^2 r_0^2}$ en

$$q_4 = \frac{16 \cdot e \cdot V}{m \omega^2 r_0^2}$$

De beweging van een ion in de x -richting is nu gekoppeld aan de beweging in de y -richting. Het stelsel is analytisch niet meer oplosbaar.

Nu bepalen niet alleen a_4 en q_4 of een ionenbaan stabiel is (zoals wel het geval was bij een quadrupool) maar ook de plaats, snelheid en fase bij het betreden van de octopool. De banen van de ionen kunnen alleen via numerieke simulatie berekend worden. In de literatuur kunnen voorbeelden van onderzochte $2n$ -polen ($n=2, 3, 4, 5$) gevonden worden [Hägg 86b]. De banen die werden gevonden voor octopolen zijn veel complexer dan voor quadrupolen en de vorm en de grootte van het stabiliteitsdiagram in het a_4 - q_4 -vlak hangt af van de beginvoorwaarden van de beweging van het ion.

Uit de vergelijking van stabiliteitsdiagrammen voor quadrupolen en octopolen, genomen onder gelijkaardige voorwaarden, en uit de baanberekeningen blijkt dat de quadrupool eerder aangewezen is als massascheider (betere massaresolutie dan de octopool wanneer zowel hoogfrequente wisselspanning als gelijkspanning aan de staven wordt gelegd), terwijl de octopool veel beter ionen met verschillende massa-ladingsverhoudingen bundelt en geleidt (wanneer $a_4 = 0$ of met andere waarden geen gelijkspanningscomponent aan de staven wordt gelegd heeft de octopool een veel grotere stabiliteit en worden veel smallere ionenbundels bekomen aan de uitgang) [Rytz 94].

2.6.4.3. De SIDAMS/MACSIMS-octopool

De SIDAMS/MACSIMS-octopool wordt gevormd door 8 staven die afwisselend een negatieve en positieve hoogfrequente spanning krijgen (2.50).

$$\pm V \cos(\omega_0 t) \left(f = \frac{\omega_0}{2\pi} = 1 \text{ MHz} \right) \quad (2.50)$$

Aan de staven van de octopool wordt geen gelijkspanningscomponent U aangelegd zoals bij quadrupolaire massascheiders. De octopool doet hier immers geen dienst als massafilter maar wel als ionenbundelaar en transportmiddel naar het Mattauch-Herzog-massafilter toe. Door U op nul te houden worden uiteindelijk zo weinig mogelijk massa-ladingscombinaties geëlimineerd.

Op elke octopoolstaaf wordt op de aanwezige hoogfrequente spanning $\pm V \cos(\omega_0 t)$ wel een vaste gelijkspanning gesuperponeerd : de *octopole bias* opb. Deze moet toelaten de ionen aan te trekken nadat ze de inlaatopening van het instrument zijn gepasseerd. De *octopole bias* zorgt ervoor dat de ionen door de octopool bewegen met een bekende kinetische energie die groter is dan de thermische.

Doordat de *octopole bias* veel kleiner kan zijn dan de *pole bias* bij quadrupolen (typisch 0,5 V hoger dan de *ion inlet voltage* iiv), wordt de kans dat ionenclusters verbroken worden zeer klein.

2.6.4.4. Het lenzensysteem

De voornaamste functie van het lenzensysteem is de ionen te focuseren en te versnellen naar de ingang van de massascheider toe.

Een slecht gefocusseerde ionenstraal aan de ingang van de massascheider (onscherpe beeldvorming, dispersie van de bundel of spreiding in kinetische energie) leidt tot signaalverlies of tot beeldverbreding op de detector en dus tot lagere resolutie.

Naar analogie met het breken van lichtbundels aan de overgang tussen twee materialen (gebolde optische lenzen) kunnen ionenbundels gebroken worden door middel van potentiaalbarrières in elektrostatische openingslenzen. Ze zijn opgebouwd uit twee of drie cilindervormige schijven met centrale opening en gekende onderlinge afstand [Hedd 91].

Het versnellingsveld achter de octopool in het SIDAMS/MACSIMS-instrument wordt aangebracht door middel van een aangepaste *Einzellens*. Een *Einzellens* is een drie-openingslens waarvan de potentiaal aan het eerste en laatste element gelijk is. In het SIDAMS/MACSIMS-instrument staan ze op de *ion acceleration voltage* (iav).

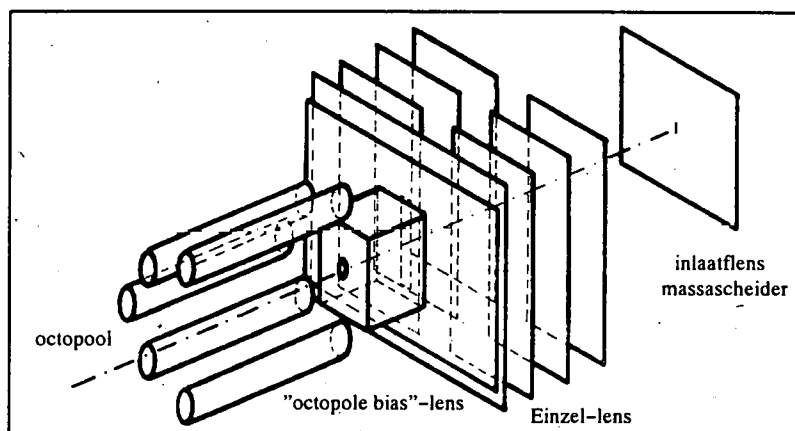
Het voordeel van *Einzellens* is dat de focuseigenschappen van de lens onafhankelijk zijn van de aangelegde potentialen aan het ingangselement (objectief) en het uitgangselement (beeld), waar dat bij twee-openingslenzen niet het geval is. Zo kunnen met deze lens verschillende versnellingsspanningen ingesteld worden zonder bij één van de instellingen de focussing te degraderen. Om een uniforme potentiaalverdeling te garanderen aan de objectief- en aan de beeldzijde van de lens wordt aan de voorkant van het eerste en aan de achterkant van het laatste lenselement een lange cylinder bevestigd.

De uitgaande bundel van de octopool [Rytz 88] vormt het objectief voor het lenzensysteem dat er een beeld van vormt op de inlaatspleet van de massascheider. De lens zorgt ervoor dat het gevormde beeld voldoet aan de door het massafilter opgelegde hoekafwijkingen zodat uiteindelijk een voldoende massaresolutie bekomen wordt.

Het middelste element van de traditionele *Einzel*-lens werd opgesplitst in twee halfplaten. Door het aanleggen van asymmetrische spanningen aan de halfplaten (de *lens voltage positive* (lvp) en de *lens voltage negative* (lvn)) kunnen mogelijke mechanische asafwijkingen gecorrigeerd worden door verschuiving van het brandpunt.

Net voor de *Einzel*-lens bevindt zich een flens met een kleine centrale opening. Ze sluit de octopool af van het achterliggende versnellingsgebied. Deze flens wordt op de laagspanningspotentiala $iiv + opb$ gebracht. Doordat het achterliggende elektrische veld, dat de ionen moet versnellen, door de flensopening in de octopool grijpt, is ze een ionenverzamelaar met een effectieve doorsnede groter dan de eigenlijke flensopening.

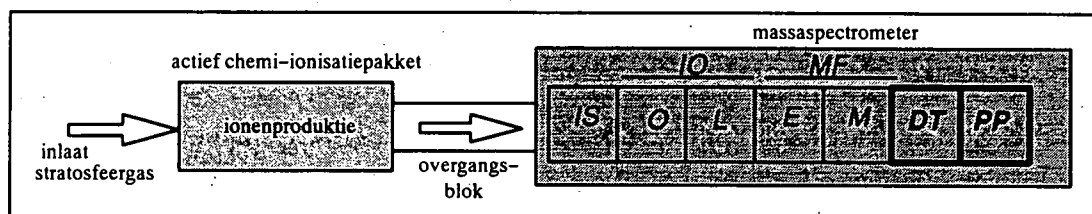
Achter de *Einzel*-lens bevindt zich de inlaatspleet van de massascheider (ook wel Herzogflens genoemd) die op de iav -spanning staat.



Figuur 2.17: Het lenzensysteem.

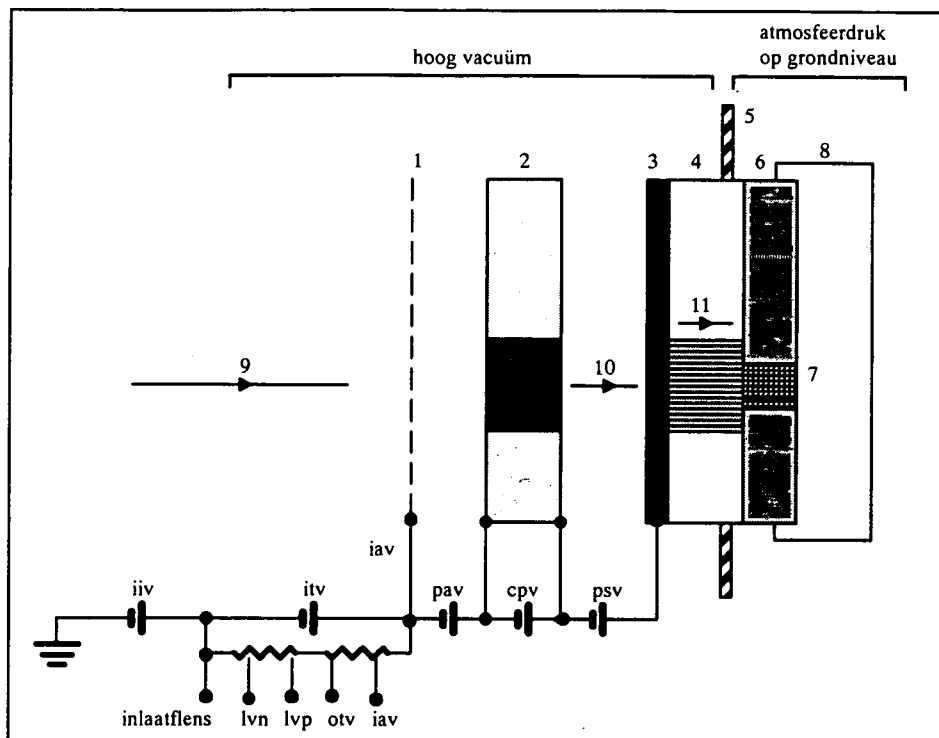
De ionenbanen in het lenzensysteem werden voor verschillende configuraties numeriek berekend en vergeleken qua transmissie-eigenschappen en massa-resolutie bij verschillende spanningen, geometrieën en drukken [Wälc 91]. Het resulterende lenzensysteem voor het SIDAMS/MACSIMS-instrument is voorgesteld in figuur 2.17.

2.6.5. De detector en de pixelprocessor



Figuur 2.18: Situering van de detector (DT) en de pixelprocessor (PP) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

IS : inlaatsectie ; IO : ionenoptiek ; O : octopool ; L : lenzensysteem ; MF : massafilter ;
E : elektrisch veld ; M : magneetveld



Figuur 2.19: Voedingsschema van de elektro-optische ionendetector (voor negatieve ionen).

1. rooster ; 2. *microchannel*-plaat ; 3. fosforscherm ; 4. glasvezelverbinding ;
 5. scheiding hoog vacuüm - grondatmosfeer ; 6. detector ; 7. pixels ; 8. nabijheidselektronica ; 9. ionen ;
 10. elektronen ; 11. fotonen.

Het detectorgeheel in het SIDAMS/MACSIMS-instrument is een “elektro-optische ionendetector” (figuur 2.19) [Moor 89a][Rytz 94]. Het bestaat achtereenvolgens uit een rooster, een *microchannel*-plaat, een fosforscherm aangebracht op een glasvezelverbinding en een fotodiodelijn met geïntegreerde nabijheidselektronica. De voorkant van de elektro-optische ionendetector bevindt zich op de door de massascheider gevormde beeldrechte.

Door de massascheider worden ionen binnen een bepaald massadomein simultaan op een gedeelte van de beeldrechte afgebeeld. In de elektro-optische ionendetector wordt dit volledige beeldinterval ook gelijktijdig geregistreerd.

Het rooster bevindt zich op de *ion acceleration voltage* (*iav*). De ionen krijgen tussen het rooster en de ingang van de *microchannel*-plaat een naversnelling mee. Daartoe wordt de ingang van de *microchannel*-plaat op de hoogspanning $iav + pav$ geplaatst. De ionen worden dus extra versneld door een potentiaalverschil *pav* (*post acceleration voltage*). Het is immers zo dat de versterking van *microchannel*-platen sterk afhangt van de energie en de aard (massa-ladingsverhouding) van de invallende ionen. De naversnellingsspanning is noodzakelijk om ook voor ionen met grote massa-ladingsverhoudingen, die bij lage *iav*-waarden doorheen het massafilter komen en dus een lagere energie hebben, voldoende versterking te bekomen in de *microchannel*-plaat [Moor 89a].

Elk ion dat inslaat op de *microchannel*-plaat creëert een stortvloed van elektronen die worden versneld naar de uitgang doordat deze zich op een hoogspanning $iav + pav + cpv$ bevindt. De spanning over de *microchannel*-plaat is dus *cpv* (*channel plate voltage*).

De elektronen die de *microchannel*-plaat verlaten worden dan versneld naar het fosforschermb. Het fosforschermb wordt op een hoogspanning $iav + pav + cpv + psv$ geplaatst. Het potentiaalverschil psv (*phosphor screen voltage*) geeft de elektronen die de *microchannel*-plaat verlaten extra energie vooraleer ze het fosforschermb bereiken.

De elektronen worden afgeremd in een fosforlaag waarbij een deel van de vrijkomende energie wordt omgezet in zichtbaar licht, dat via de glasvezelverbinding op de eigenlijke detector wordt geprojecteerd.

De detector moet dus lichtgevoelig zijn en een voldoende resolutie hebben over het volledige bestreken lineair gebied. Hiervoor komen halfgeleiderdetectoren in aanmerking zoals fotodiodelijnen of CCD's. Voor het SIDAMS/MACSIMS-instrument werden twee rijen van 512 fotodiodes met een individuele rijbreedte van 25,6 mm naast mekaar geplaatst. Elk detectoroog heeft een eigen voorversterker die samen met de fotodiodes is geïntegreerd.

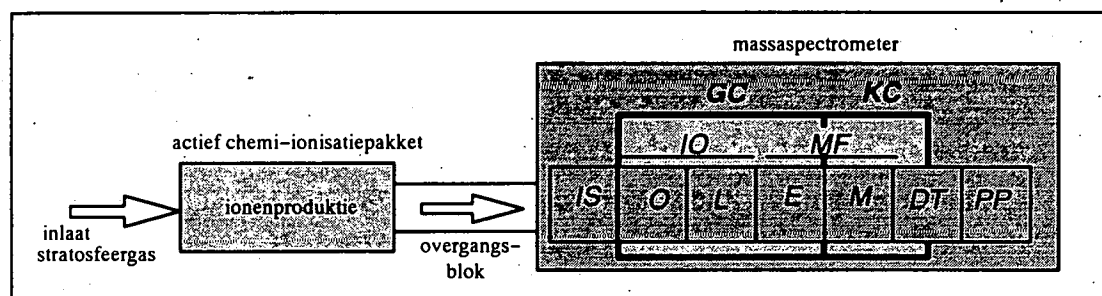
De sturing van de detector en de verwerking van de uitlezingen gebeurt door middel van een apart microprocessorsysteem, dat de "pixelprocessor" wordt genoemd [Brac 89][Jenz 90].

De pixelprocessor is in staat geaccumuleerde spectra te maken door een door de gebruiker op te geven aantal *scans* op te tellen. De pixelprocessor houdt ook steeds het laatst geregistreerde achtergrondspectrum in het geheugen. Indien gewenst kan het systematisch afgetrokken worden van alle daaropvolgende massaspectra.

De pixelprocessor kan functioneren in twee modes. De analoge mode is het best geschikt wanneer hoge ionendichtheden moeten gemeten worden, bijvoorbeeld bij actieve chemi-ionisatie. De digitale mode leent zich beter tot meting van lage ionendichtheden, bijvoorbeeld voor de meting van de natuurlijke ionensamenstelling van de atmosfeer.

De geregistreerde spectra worden door de pixelprocessor doorgegeven aan een centrale processor.

2.6.6. De cryopomp

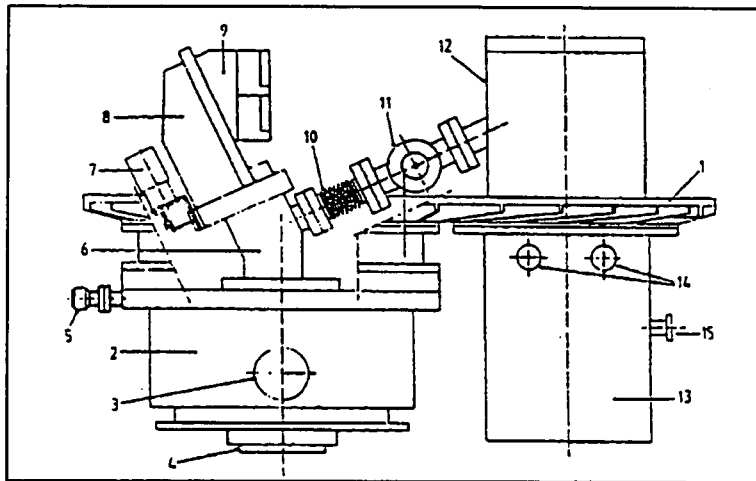


Figuur 2.20: Situering van de grote cryopomp (GC) en de kleine cryopomp (KC) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

IS : inlaatsectie ; IO : ionenoptiek ; O : octopool ; L : lenzensysteem ; MF : massafilter ;
E : elektrisch veld ; M : magneetveld ; DT : detector ; PP : pixelprocessor

De ganze massaspectrometer (ionenoptiek, massascheider en detectiegedeelte tot aan het fosforschermb) moet onder vacuüm gebracht worden tijdens de werking, enerzijds om botsingen van ionen met neutrale bestanddelen te vermijden in de massaspectrometer en anderzijds om hoogspanningsdoorslag in de detector te voorkomen.

Het deel vanaf de inlaatflens tot de afsluitklep tussen elektrostatische condensator en permanente magneet in de massascheider, wordt vacuüm gepompt door een grote helium-cryopomp die zich rondom het instrument bevindt. Ze wordt opgehangen aan de onderkant van een basisflens waarop het ganse instrument wordt gemonteerd. Het vacuüm moet gedurende de ganse vlucht beter blijven dan 10^{-4} mbar ondanks het lek naar de atmosfeer via de opening in de inlaatflens.



Figuur 2.21: Cryopompstelling in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

1. basisplaat ; 2. grote cryopomp ; 3. voerpompverbinding voor grote cryopomp ; 4. inlaatflens ; 5. inlaat helium ; 6. condensator in massascheider ; 7. motor afsluitklep in massascheider ; 8. magneet in massascheider ; 9. detector ; 10. balg ; 11. T-stuk ; 12 en 13. kleine cryopomp ; 14. in- en uitlaat helium ; 15. voerpompverbinding kleine cryopomp

Deze cryopomp werd ontwikkeld voor vroegere ballonvluchten van het BIRA (ION) en werd uitvoerig beschreven in [Inge 78][Neve 79]. Ze kan 2,3 l vloeibaar helium bevatten en heeft een pompsnelheid van 1200 l/s.

Het deel tussen de afsluitklep en de glasvezelverbinding wordt op een nog lagere druk gebracht ($p < 10^{-6}$ mbar) door een tweede kleinere helium-cryopomp die differentieel pompt via het kleine lek ter hoogte van de afsluitklep. De opstelling van de cryopompen is weergegeven in figuur 2.21.

Beide cryopompen hebben een standtijd van ongeveer 10 uren nadat ze worden opgevuld met vloeibaar helium. Onder uitzonderlijke meteorologische omstandigheden zijn ballonvluchten van lange duur niet uitgesloten en kan de standtijd van de cryopompen de beperkende factor zijn voor de vluchtduur.

Wanneer de cryopompen terug opwarmen kunnen op de wanden neergeslagen gassen terug vrijkomen. Vervuiling van het detectorgedeelte van de massaspectrometer door deze gassen wordt tegengegaan door het plaatsen van de hoger genoemde afsluitklep in de massascheider.

2.6.7. *De mechanische structuur*

Elektronicamodules en batterijensets voor de voeding van het instrument worden in een hermetisch afgesloten aluminium klok met een diameter van 0,74 m en een hoogte van 1 m geplaatst.

In de klok blijft de normale druk tijdens de vlucht behouden, zodat doorslag in het hoogspanningsgedeelte van de elektronica vermeden wordt. De klok wordt gemonteerd aan de bovenkant van de basisflens. In deze flens zijn hermetisch afgesloten doorvoeren voorzien voor de telecommando- en telemetingverbinding, voor de verbinding met het actief chemi-ionisatiepakket, voor het aanleggen van de *ion inlet voltage* en het uitvoeren van de vluchtmeting aan de inlaatflens, voor de bediening van de afsluitsystemen en voor de toevoer van een externe voeding en de meting van voedingsspanning en stroomverbruik tijdens integratietesten aan de grond. De elektronicamodules zijn bevestigd op platen op verschillende niveaus in de klok.

Gans het instrument wordt opgehangen in een stevige mechanische structuur, die voorzien is van schokdempers om bij de terugkeer op de aardbodem de schade zo veel mogelijk te beperken.

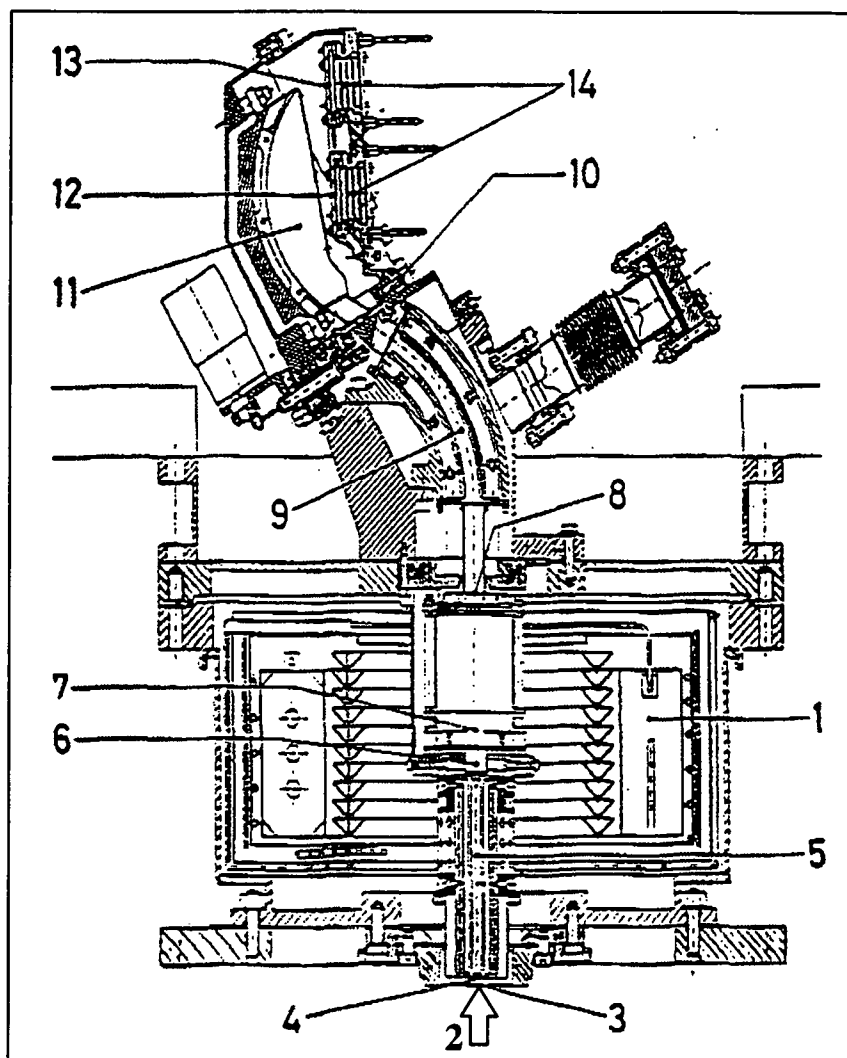
Het gebruik van materialen die kunnen ontgassen wordt zoveel mogelijk vermeden om te voorkomen dat onzuiverheden in de massaspectrometer terecht zouden komen.

2.6.8. *Samenvatting*

Door het combineren van de Mattauch-Herzog-massascheider met een ionenoptiek gebaseerd op een octopool in de aangewezen functie van ionengeleider en -bundelaar biedt de SIDAMS/MACSIMS-massaspectrometer enerzijds een goede massaresolutie en een breed massadomein, maar laat anderzijds toe in dit massadomein simultaan ionen met verschillende massa's te detecteren. De combinatie garandeert zo een veel betere hoogteresolutie bij een hoge gevoeligheid en een groot dynamisch bereik, en sluit de kans dat clusters worden opgebroken bij het betreden van het instrument uit. Globaal gezien is de SIDAMS/MACSIMS-massaspectrometer performanter dan de vorige generatie quadrupolaire massaspectrometers.

Dit instrument is in staat de hiervoor geformuleerde wetenschappelijke doelstellingen te realiseren, zowel waar het de studie van de natuurlijke ionensamenstelling van de atmosfeer betreft, als in het gebied van de actieve chemi-ionisatie.

Figuur 2.22 is een realistische doorsnedetekening van de massaspectrometer in het SIDAMS/MACSIMS-instrument. De belangrijkste onderdelen die hiervoor besproken werden zijn er nog eens op aangeduid [Moor 89b].



Figuur 2.22: De SIDAMS/MACSIMS-massaspectrometer.

1. vloeibaar He container ; 2. ionenstroom ; 3. inlaatflens ; 4. rooster ; 5. octopool ; 6/7. ionenoptiek ; 8. inlaatflens massascheider ; 9. condensator ; 10. afsluitklep ; 11. magneet ; 12. detectoroog A ; 13. detectoroog B ; 14. glasvezelverbinding

2.7. Het actief chemi-ionisatiepakket

2.7.1. Het principe van actieve chemi-ionisatie

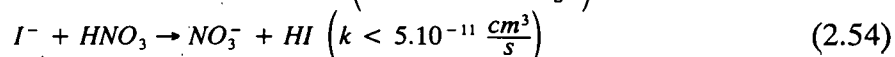
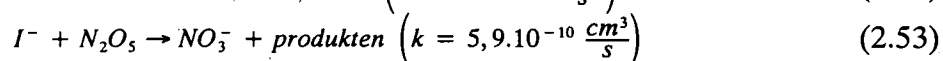
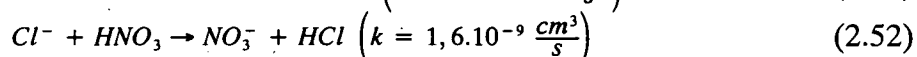
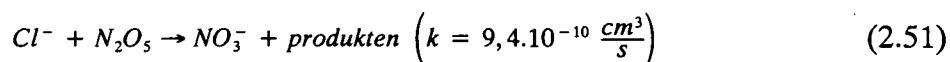
De ontwikkeling van een actief chemi-ionisatiepakket laat toe actief in te grijpen in de ionenchemie van de stratosfeer. Het eigenhandig inbrengen van de juiste ionen in de stratosfeer brengt reacties op gang waarin neutrale componenten betrokken worden, die niet deelnemen aan de natuurlijke ionenchemie en die dus niet door passieve massaspectrometers kunnen gedetecteerd worden. Het uiteindelijke doel is de stratosfeer te verkennen in een configuratie

waarbij het actief chemi-ionisatiepakket aan de inlaat van de SIDAMS/MACSIMS-massaspectrometer is bevestigd.

Tot nu toe werd in het domein van de actieve chemi-ionisatie van de stratosfeer slechts gebruik gemaakt van ionisatie van de omgevingslucht (groep van het MPIH). In het kader van het SIDAMS/MACSIMS-project werden naast de omgevingslucht als moedergas voor het eerst ook andere gassen gebruikt. Met het oog op de bepaling van de concentraties van HNO_3 en N_2O_5 , twee sporegassen die van belang zijn in de afbraakprocessen van stratosferische ozon (zie 2.2.4), werd oorspronkelijk geopteerd voor het afwisselend inbrengen van twee moederionen: Cl^- en I^- .

De moederionen kunnen met de gezochte sporegassen (HNO_3 en N_2O_5) tot produktionen reageren (NO_3^-) die samen met de moederionen in de massaspectrometer worden gemeten.

Uit laboratoriummetingen bleek dat de ion-moleculereacties (2.51) tot (2.54) een rol spelen [Fehs 75].



Aangezien Cl^- zowel met HNO_3 als met N_2O_5 reageert tot NO_3^- is de gemeten concentratieverhouding $\frac{[NO_3^-]}{[Cl^-]}$ een maat voor de gewogen som van de concentraties van de sporegassen $[N_2O_5]$ en $[HNO_3]$. I^- reageert enkel met N_2O_5 . De in de massaspectrometer gemeten concentratieverhouding $\frac{[NO_3^-]}{[I^-]}$ is een maat voor de $[N_2O_5]$ -concentratie.

Dit idee is nu geëvolueerd in zoverre dat voor de bepaling van HNO_3 niet de reactie met Cl^- maar deze met Cl_3^- gebruikt wordt [Amel 95b].

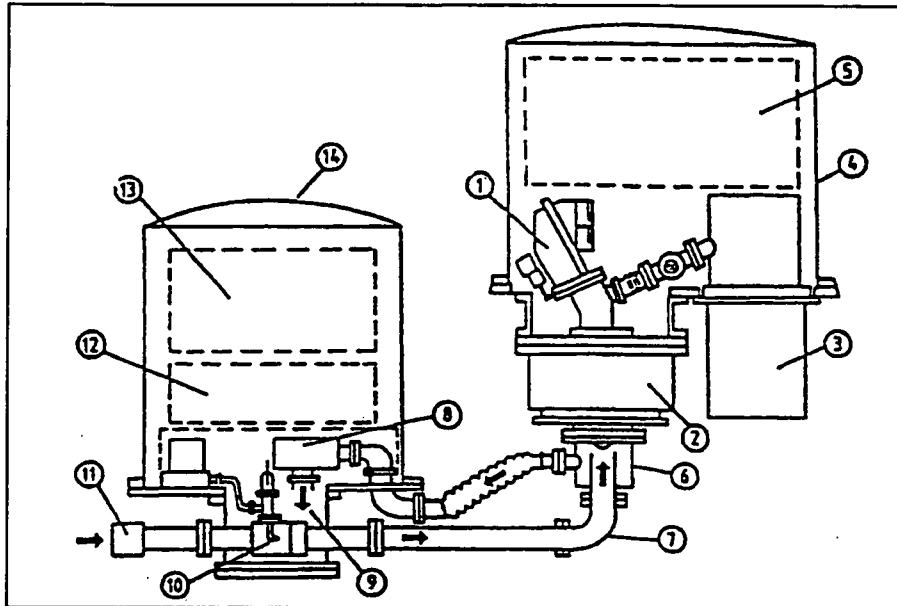
Voor de berekening van de sporegasconcentraties ($[N_2O_5]$ en $[HNO_3]$) worden dus de concentratieverhoudingen $\frac{[NO_3^-]}{[Cl_3^-]}$ en $\frac{[NO_3^-]}{[I^-]}$ gemeten met de massaspectrometer, maar moeten ook de reactiesnelheidscoëfficiënten (meten in het laboratorium) en de verblijftijd van de bewuste sporegassen in de reactiezone gekend zijn. De tijd die een ionenwolk nodig heeft om van de ionenbron naar de inlaatflens te propageren (vluchttijd of *time of flight*) is een goede benadering voor deze verblijftijd. De realisatie van zo een vluchttijdmeting in het SIDAMS/MACSIMS-project lost de laatste onbekende op in het actief chemi-ionisatieschema voor $[N_2O_5]$ en $[HNO_3]$.

2.7.2. De opbouw

2.7.2.1. De mechanische structuur

De mechanische constructie van het actief chemi-ionisatiepakket is er op gericht de ionen die er worden geproduceerd zo efficiënt mogelijk tot bij de spectrometer te brengen (figuur 2.23).

Net zoals in het massaspectrometergedeelte worden alle onderdelen gemonteerd op een basisflens en bevinden ze zich tijdens de vlucht in een hermetisch afgesloten container waarin de normale druk zo goed mogelijk wordt behouden.



Figuur 2.23: Gecombineerde opstelling van de massaspectrometer en het actief chemi-ionisatiepakket.

1. massaspectrometer ; 2. grote cryopomp ; 3. kleine cryopomp voor detector ; 4. kuip massaspectrometer ; 5. elektronica massaspectrometer ; 6. overgangsblok ; 7. stromingsbuis ; 8. turbine ; 9. uitlaat ; 10. ionenbronblok ; 11. inlaat ; 12. gasvoorraad ; 13. elektronica ; 14. kuip

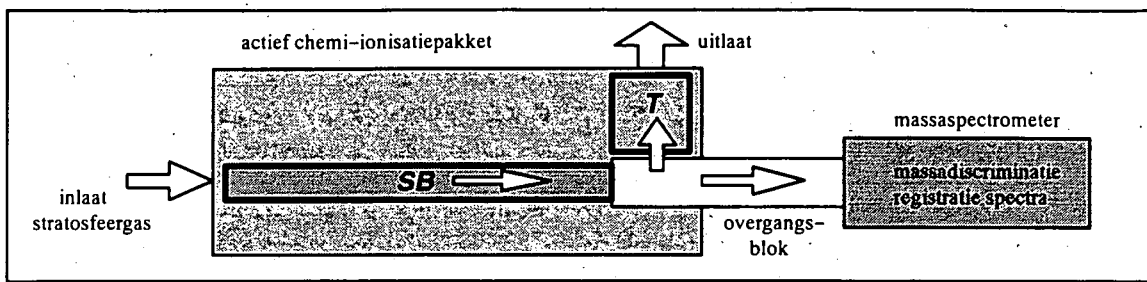
In deze kuip kunnen drie niveaus onderscheiden worden. Het bovenste niveau bevat de besturingselektronica van het actief chemi-ionisatiepakket met zijn elektrische voeding (batterijen). Op het middelste niveau bevindt zich de gasvoorraad. Het onderste niveau bevat de eigenlijke productiesectie.

Het geheel wordt samen met het massaspectrometergedeelte geïntegreerd in een stevige schokdempende mechanische structuur.

2.7.2.2. *De stromingsbuis en de turbine*

De geproduceerde ionen worden geïnjecteerd in een stromingsbuis die verbonden is met de ingang van de massaspectrometer. In de stromingsbuis kunnen, naar wens, afwisselend Cl_n^- - en I_n^- -wolken geïnjecteerd worden of kan de omgevingslucht geïoniseerd worden. De massaspectrometer bemonstert de gasstroom die door middel van een turbine naar het einde van de stromingsbuis wordt gedreven. Die turbine moet voor een constante stroom van omgevingslucht in de stromingsbuis zorgen. Dit wordt uiteraard steeds moeilijker wanneer de omgevingsdruk toeneemt tijdens de wetenschappelijk interessante afdaalfase van de ballonvlucht.

De stromingsbuis maakt een bocht van 90° naar de spectrometer toe (figuur 2.23). Een constructie zonder bocht zou uit aërodynamisch en chemisch standpunt beter zijn, doch het is praktisch gezien nagenoeg onmogelijk het actief chemi-ionisatiepakket onder de massaspectrometer te monteren.

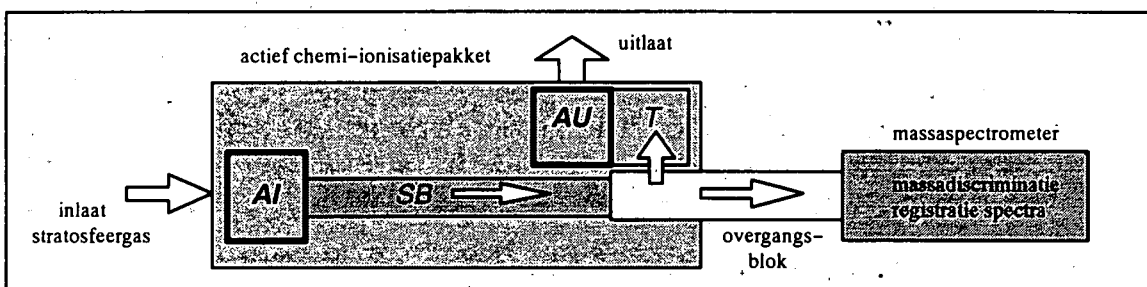


Figuur 2.24: Situering van de stromingsbuis (SB) en de turbine (T) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

De verbinding tussen de stromingsbuis en de massaspectrometer wordt gemaakt in een overgangsblok waarop ook de aanzuigleiding van de turbine is aangesloten. De omgevingslucht die de stromingsbuis binnenkomt wordt er ter hoogte van de inlaatflens van de massaspectrometer weer uitgezogen naar de turbine toe.

In- en uitlaat van de stromingsbuis staan zo ver mogelijk uit mekaar om contaminatie aan de aanzuigopening te minimaliseren.

2.7.2.3. De afsluitsystemen



Figuur 2.25: Situering van de afsluitsystemen aan de inlaat (AI) en aan de uitlaat (AU) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

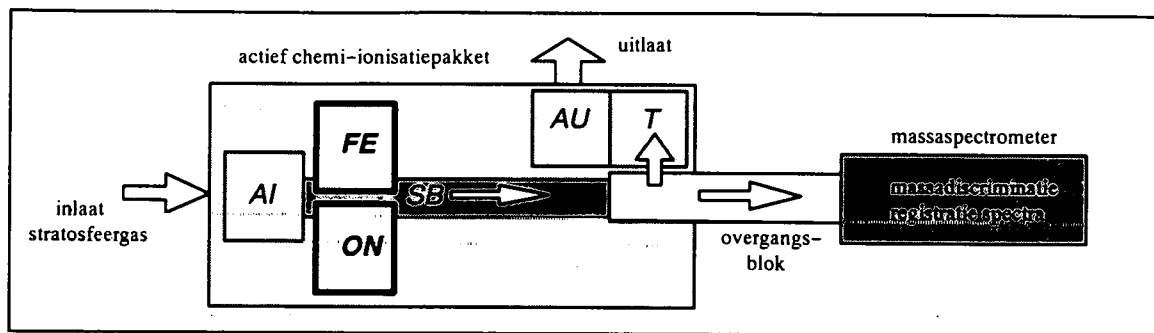
SB : stromingsbuis ; T : turbine.

Het werkvacuüm dat via cryopompen voor de lancering in het instrument wordt gecreëerd, dient zo goed mogelijk bewaard te worden zolang de eigenlijke metingen niet kunnen beginnen. Indien het ingangskleef van de massaspectrometer niet zou afgesloten blijven tijdens het stijgen naar de gewenste hoogte, zou de vluchtduur drastisch verkorten. Een afsluitsysteem is dus nodig.

Anderzijds mag dit afsluitsysteem op geen enkele manier de werking van het instrument belemmeren. Het opengaan moet betrouwbaar kunnen gebeuren en de aanwezigheid van een, weliswaar geopend, afsluitsysteem mag geen invloed hebben op de metingen, via mogelijke oploadingsverschijnselen of door verstoring van de inlaatstroming.

In- en uitlaat van het instrument (inlaat van de stromingsbuis en uitlaat van de turbine) zijn tijdens de stijgfase afgesloten. Bij het bereiken van het vluchtplafond worden beide deksels pyrotechnisch verwijderd.

2.7.2.4. De ionenbronnen



Figuur 2.26: Situering van de foto-elektrische (FE) en ontladingsionenbron (ON) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

SB : stromingsbuis ; T : turbine ; AI : afsluitsysteem inlaat ; AU : afsluitsysteem uitlaat

Ongeveer halverwege de stromingsbuis bevindt zich het ionenbronblok. Dit blok laat toe geïoniseerd gas uit twee aan weerszijden van de stromingsbuis gelegen ionenbronnen in de buis te brengen. De ene ionenbron is gebaseerd op het principe van de elektrische ontlading in een gasmengsel. De tweede ionenbron is een foto-elektrische bron (lamp) gebaseerd op dissociatieve elektronenaanklamping aan een neutraal gas.

De ontladingsionenbron is schakelbaar uitgevoerd. Dit wil zeggen dat kan gekozen worden welk moedergas wordt toegevoerd : een mengsel van Cl_2 in Ar ter vorming van Cl^- -ionen, of CH_3I in Ar ter vorming van I^- -ionen. Terwijl Cl^- en I^- gevormd worden, worden ook respectievelijk Cl_2^- , Cl_3^- en I_2^- , I_3^- gevormd en nog andere parasitaire ionensoorten. Door inspelen op de parameters in de productie-eenheid, zoals het gasstroomdebiet en de aangelegde spanning aan de ionenbron kan getracht worden deze nevenprodukten te verminderen. Alleszins moet met hun aanwezigheid rekening gehouden worden in het globale reactieschema [Amel 94].

Een belangrijk probleem bij het artificieel produceren van ionen is de stabiliteit van de ionenbron. Tot nu toe is het niet volledig duidelijk welk verband er is tussen de hoeveelheid geproduceerde ionen en parameters zoals de druk in de bron, het debiet van het moedergas, de aangelegde hoogspanning, de druk in de stromingsbuis en de geometrie van de bron.

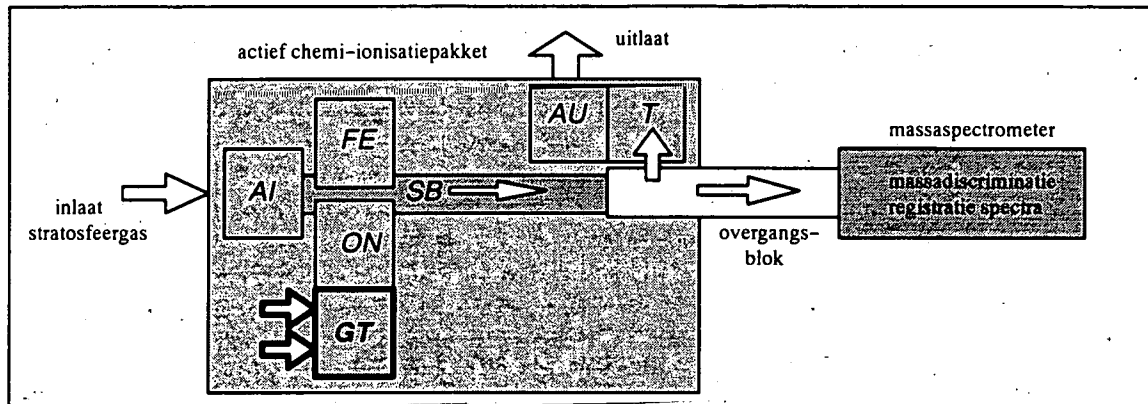
Doordat de SIDAMS/MACSIMS-massaspectrometer de mogelijkheid biedt gelijktijdig ionen met verschillende massa-ladingsverhoudingen te meten is de invloed van fluctuaties van de ionenbron minder belangrijk. Alle ionen die in één massaspectrum worden geregistreerd ontstaan immers onder dezelfde ionenbronvoorwaarden.

Waar de ontladingsionenbron wordt gebruikt om welbepaalde moedergassen te ioniseren, wordt de foto-elektrische ionenbron gebruikt voor de ionisatie van de doorstromende omgevingslucht zonder additionele gastoevoer.

De ionenbronnen kunnen in continue mode werken (voortdurende productie bij het nemen van massaspectra) maar ook in gepulste mode (ionenpuls bij het meten van vluchttijdspectra).

2.7.2.5. De gastoevoer voor de ontladingsionenbron

De gastoevoersectie voor de ontladingsionenbron is opgedeeld in twee helften : de chloorzijde en de jodiumzijde (figuur 2.28). Het omschakelen tussen de Cl^- -productie en de I^- -productie gebeurt door middel van vier kranen : een stel van twee kranen aan de chloorzijde, een stel van twee kranen aan de jodiumzijde.



Figuur 2.27: Situering van de gastoevoer voor de ontladingsionenbron (GT) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

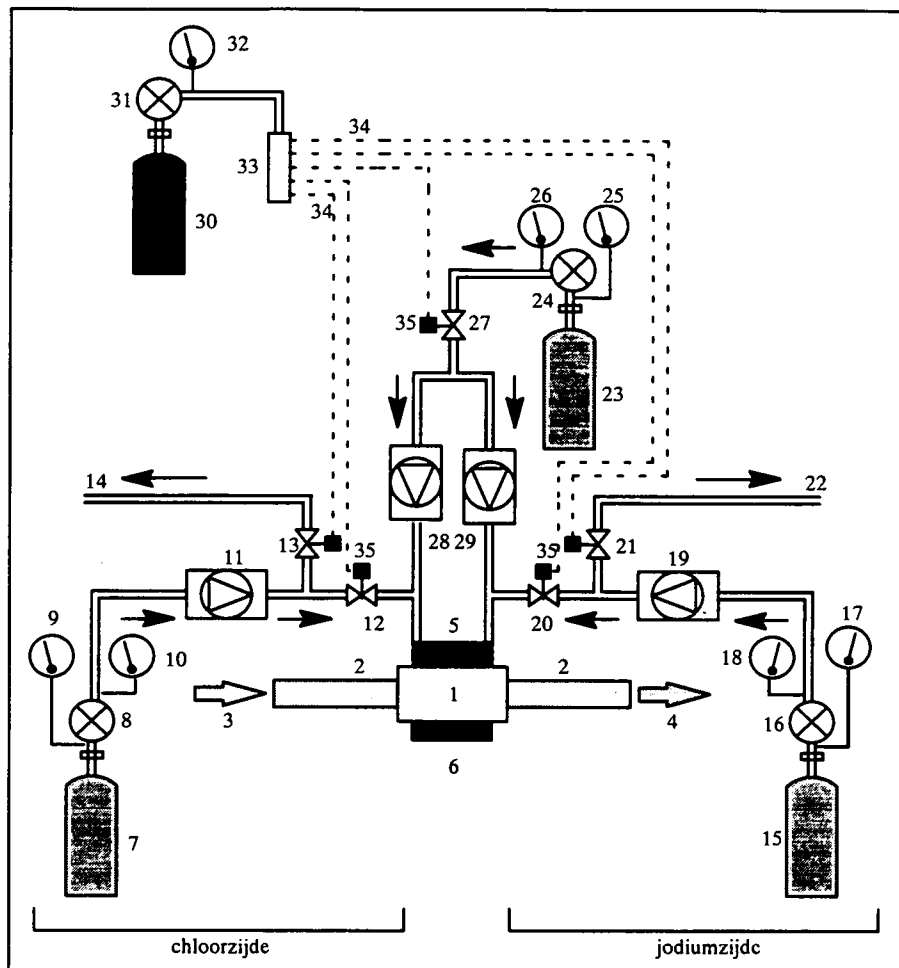
SB : stromingsbuis ; T : turbine ; AI : afsluitsysteem inlaat ; AU : afsluitsysteem uitlaat ;
FE : foto-elektrische ionenbron ; ON : ontladingsionenbron

Het stel chloorkranen kan zo gecombineerd worden dat het gas de ionenbron invloeit of dat het wordt geloosd. Op dezelfde manier kan ook het stel aan de jodiumzijde worden geschakeld. Er moet steeds voor gezorgd worden, dat wanneer het chloormengsel de ionenbron instroomt, het jodiummengsel wordt geloosd en andersom.

Op elk van de toevoerleidingen van de moedergassen staat een debietregelaar met een debietmeter. Tussen gasfles en debietregelaar staat telkens een gasontspanner, die het gas, dat zich onder hoge druk in de flessen bevindt, ontspant. Elke gasontspanner is uitgerust met een hoge en een lage drukkometer.

Tenslotte is een spoelinstallatie voorzien voor zowel de chloor- als de jodiumtak van de produktiesectie. Een gemeenschappelijke container bevat het spoelgas (Ar), dat via een gasontspanner en een afsluitkraan naar de twee takken wordt gebracht, waar het debiet afzonderlijk kan ingesteld worden in twee debietregelaars. Er wordt steeds voor gezorgd dat bij omschakeling van één moedergas naar het andere, de leidingen en de stromingsbuis worden gespoeld.

De 5 afsluitkranen in de produktiesectie werken pneumatisch. Ze openen en sluiten door toevoer van perslucht uit een container. De druk in de leiding die van deze container vertrekt wordt gecontroleerd. De persluchtleidingen naar de 5 kranen kunnen geopend of gesloten worden door middel van vijf elektronisch bediende solenoïdekranen. Wanneer dus over een afsluitkraan wordt gesproken, wordt de combinatie bedoeld van de pneumatische kraan waarvan de druktoevoer wordt geschakeld door een elektronisch bestuurd solenoïdekraan.

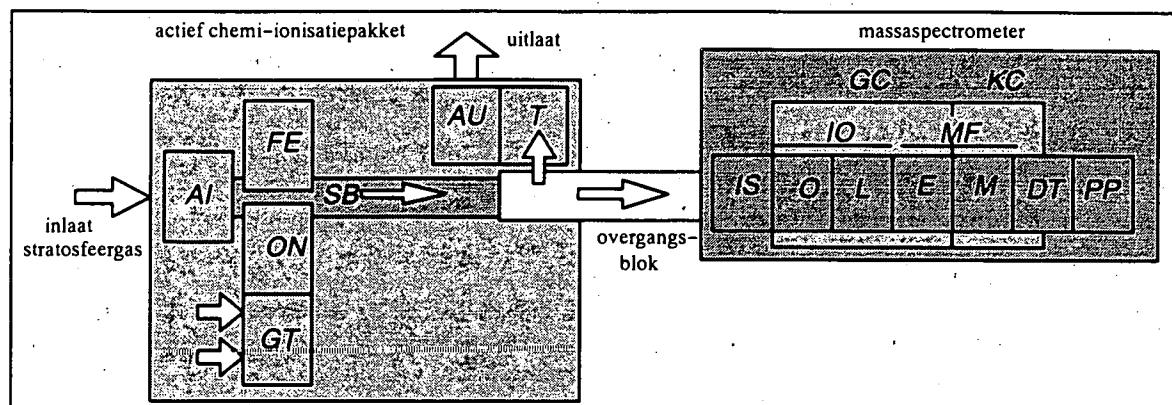


Figuur 2.28: Overzicht van de gasstroom doorheen het actief chemi-ionisatiepakket.

1. ionenbronblok ; 2. stromingsbuis ; 3. inlaat stratosfeerlucht ; 4. naar massaspectrometer ; 5. ontlading ; 6. lamp ; 7. chloor moedergas ; 8. ontspanner chloor ; 9. hoge druk chloor ; 10. lage druk chloor ; 11. debietregelaar chloor ; 12. kraan chloor in ; 13. kraan chloor uit ; 14. uitlaat chloor ; 15. jodium moedergas ; 16. ontspanner jodium ; 17. hoge druk jodium ; 18. lage druk jodium ; 19. debietregelaar jodium ; 20. kraan jodium in ; 21. kraan jodium uit ; 22. uitlaat jodium ; 23. spoelgas ; 24. ontspanner spoelgas ; 25. hoge druk spoelgas ; 26. lage druk spoelgas ; 27. kraan spoelgas in ; 28. debietregelaar spoelgas chloortak ; 29. debietregelaar spoelgas jodiumtak ; 30. perslucht ; 31. ontspanner perslucht ; 32. lage druk perslucht ; 33. verdeelstrook perslucht ; 34. drukleidingen ; 35. solenoïdekransen

2.8. De bijdrage van de verschillende partners

In figuur 2.29 worden de blokschema's van massaspectrometer (figuur 2.20) en actief chemi-ionisatiepakket (figuur 2.27) samengevoegd tot een blokschema van het ganse SIDAMS/MACSIMS-instrument. Voor elk aangeduid onderdeel wordt vermeld welke partner verantwoordelijk is voor de constructie ervan.



Afkorting	Benaming	Partner
IS	inlaatsectie massaspectrometer en overgangsblok	BIRA
IO (O + L)	ionenoptiek (octopool en lenzensysteem)	PIUB
MF (E + M)	massascheider (elektrostatistische condensator, afsluitklep en magneet)	PIUB
DT	detector	PIUB
PP	pixelprocessor	PIUB
GC	grote cryopomp	BIRA
KC	kleine cryopomp	BIRA
SB	stromingsbuis	BIRA
T	turbine	BIRA
AI	afsluitsysteem inlaat	PIUB
AU	afsluitsysteem uitlaat	PIUB
FE	foto-elektrische ionenbron	LPCE
ON	ontladingsionenbron	BIRA
GT	gastoevoer voor ontladingsionenbron	BIRA
	elektronische en software besturing	BIRA
	mechanische structuur	BIRA

Figuur 2.29: Bijdrage van de partners aan het SIDAMS/MACSIMS-project.

2.9. De bijdrage van deze thesis tot het SIDAMS/MACSIMS-project

2.9.1. Overzicht

In dit deel wordt het werk in deze thesis geënt op het hierboven beschreven instrument. Het blokschema van figuur 2.29 wordt hierbij verder uitgebouwd. Aan het eind van dit deel wordt in figuur 2.36 een gedetailleerd overzicht gegeven van alle aspecten van het SIDAMS/MACSIMS-project met aanduidingen van de onderdelen die in dit werk werden gerealiseerd.

In de ontwikkeling van de massaspectrometer en het actief chemi-ionisatiepakket neemt de realisatie van op maat ontwikkelde elektronische hardware en software een belangrijke plaats

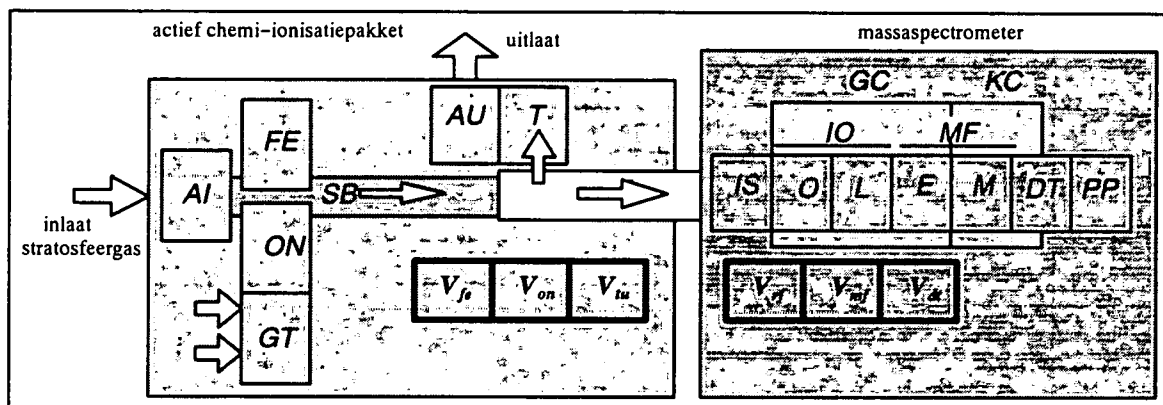
in. Ze laten niet alleen toe de vitale deelsystemen van het instrument te besturen, hun nauwkeurigheid bepaalt mee de kwaliteit van de wetenschappelijke resultaten. De moeilijke omstandigheden waarin moet gewerkt worden (stratosfeer) werden hierbij niet uit het oog verloren.

Daarenboven werd ook veel aandacht geschonken aan de gebruiksvriendelijkheid van het instrument. Het inkapselen van het instrument in een eigen werkomgeving, de speciaal ontworpen bedieningsterminal aan de grond en een ASCII-telecommando-interface verveelvoudigen de functionaliteit van het geheel.

De technische realisatie van een elektronisch gepulste ionenbron - elektrometer combinatie, softwarematig bestuurd via een digitale interface, geeft het instrument, zoals hierboven werd aangeduid, een unieke toegevoegde wetenschappelijke waarde.

Tenslotte wordt ook een bijdrage geleverd tot de verwerking van de data door het opstellen en automatiseren van een piekanalyse algoritme.

2.9.2. De ontwikkeling van speciale voedingseenheden



Figuur 2.30: Situering van de voedingseenheden (V) voor de octopool (V_{rf}), voor het massafilter en de ionenoptiek (V_{mf}), voor de detector (V_d), voor de turbine (V_{tu}), voor de foto-elektrische ionenbron (V_{fe}) en voor de ontladingsionenbron (V_{on}) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

Een aantal van de hierboven besproken deelsystemen vereisen elektrische voedingsmodules die moeten voldoen aan bepaalde voorwaarden.

Voor de octopool werd een voeding (V_{rf} in figuur 2.30) ontworpen die een hoogfrequente spanning (rf) en een gesuperponeerde *pole bias* (de *octopole bias voltage* opb) op de staven aanbrengt en waarbij de stabiliteit en het evenwicht van de spanningen tussen de staven van zeer groot belang is.

De as van de elektrostatische condensator moet op de *ion acceleration voltage* (iav) gebracht worden. Dat gebeurt door de binnenwand van de condensator op de iets hogere *inner toroidal voltage* (itv) te brengen en de buitenwand op de iets lagere *outer toroidal voltage* (otv). In de *Einzellens* in het lenzensysteem wordt de spanning iav eveneens gebruikt en ook de halfplaatspanningen *lens voltage negative* (lvn) en *lens voltage positive* (lvp).

De itv-spanning heeft in de massascheider steeds de hoogste waarde. Voor deze spanning werd een hoogspanningsmodule ontwikkeld (V_{mf} in figuur 2.30). Alle andere spanningen in de

ionenoptiek en de elektrostatische condensator (iav, otv, lvn en lvp) worden afgeleid uit itv in een hoogspanningsdeler. Voor de itv-module wordt een grote stabiliteit nagestreefd omdat het deze spanning is die de baan bepaalt die de ionen in de massascheider volgen en dus de plaats waar ze op de detector zullen terecht komen. Een te grote rimpel op itv leidt tot piekverschuiving en -verbreding.

In het detectorgedeelte van de massaspectrometer moeten drie hoogspanningen, de *post acceleration voltage* (pav), de *microchannel plate voltage* (cpv) en de *phosphor screen voltage* (psv) aangelegd worden. Hiervoor werd een hoogspanningsvoeding gebouwd (V_a in figuur 2.30) die bestaat uit de cascade van drie modules gelijkaardig aan de itv-module. Aan deze modules werd wel een minder sterke stabiliteitseis opgelegd omdat kleine fluctuaties op deze hoogspanningen niet kritiek zijn voor de massaresolutie. Ze kunnen slechts zorgen voor kleine schommelingen op de intensiteit van de pieken.

Voor de turbine in het actief chemi-ionisatiepakket werd een bestaande voeding (V_u in figuur 2.30) ingepast met een dubbele regeling: een toerental- en een stroomregeling. De turbinepomp moet aan een stabiele snelheid van $1500 \frac{tr}{s}$ kunnen draaien om een voldoende stroming in de stromingsbuis te garanderen. Anderzijds wordt de maximale stroom die de voeding zal leveren wel beperkt tot 5 A, enerzijds vanwege de beperkte energie in de batterijen aan boord en anderzijds om oververhitting van de vermogentransistors te voorkomen.

Ten gevolge van de stroombeperking in de turbinevoeding zal de pompsnelheid bij het oplopen van de druk (de daalfase van de ballonvlucht) vanaf een bepaald moment afnemen. Dit is een van de redenen waarom de vluchttijd van de ionen in de stromingsbuis tijdens de vlucht regelmatig moet opgemeten worden.

Tenslotte werden twee hoogspanningsvoedingen gebouwd voor de beide ionenbronnen (de foto-elektrische en de ontladingsionenbron) (resp V_{fe} en V_{on} in figuur 2.30). In eerste instantie moeten ze een continue ionenproductie kunnen verzekeren tijdens dewelke massaspectra kunnen geregistreerd worden. Anderzijds moeten ze in een gepulste mode kunnen werken met het oog op de meting van vluchttijden in de stromingsbuis.

De energievoorziening van al deze voedingseenheden gebeurt uit batterijensets die berekend zijn om voldoende vermogen te kunnen leveren gedurende de totaliteit van een ballonvlucht.

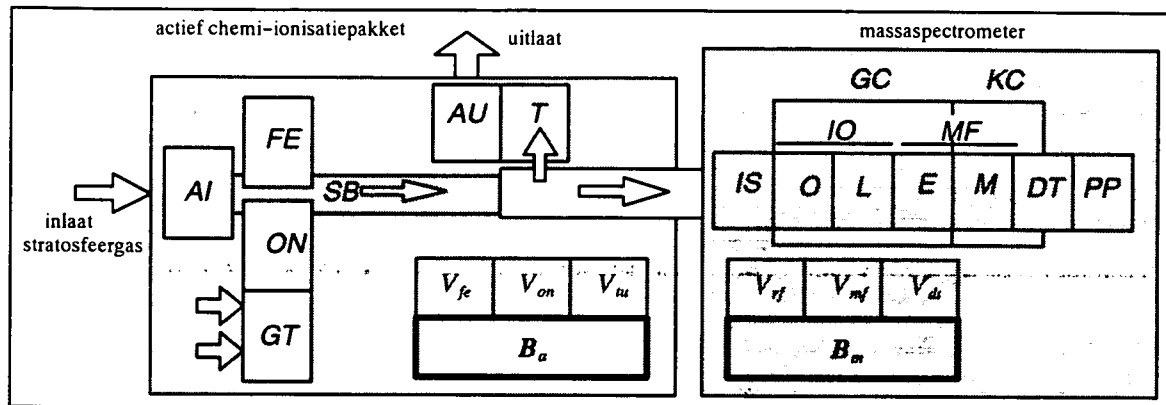
2.9.3. *De ontwikkeling van besturingsmodules voor alle instrumentfuncties*

Zowel in het massaspectrometergedeelte als in het actief chemi-ionisatiepakket werden een reeks van modules gebouwd die instaan voor de besturing van de instrumentfuncties (de verzameling van de besturingsmodules in de massaspectrometer is in figuur 2.31 aangeduid met B_m en in het actief chemi-ionisatiepakket met B_a). De besturingsmodules kunnen gekoppeld zijn aan de voedingseenheden ofwel sommige deelsystemen van het instrument en een aantal toestellen rechtstreeks bedienen.

Zo werden modules geïmplementeerd voor de iiv-, opb- en rf-spanningen in inlaat en ionenoptiek, voor de hoogspanningen in lenzensysteem, massascheider en detector, voor de turbine, voor de twee ionenbronnen (waarvan één uitgerust met een schakelsysteem voor de gastoevoer), voor de gascontroletoeestellen (drukmeters, debietregelaars), voor de vluchttijdmeting, voor de afsluitsystemen en voor de bewaking van instrumentparameters in massaspectrometer en actief chemi-ionisatiepakket.

In het algemeen is de functie van een besturingsmodule voor een deelsysteem drievoudig: het aan- of afleggen (schakelfunctie), het instellen van een werkwaarde (stuurfunctie) en het meten

van de ingestelde werkwaarde (controlefunctie). De schakelfunctie laat toe een deelsysteem pas onder spanning te brengen op het moment dat dit vereist is in een bepaald meetschema.



Figuur 2.31: Situering van de besturingsmodules (B) in het massaspectrometergedeelte (m) en voor het actief chemi-ionisatiepakket (a) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

V : voedingseenheden

De stuurfunctie zorgt voor de flexibiliteit van het instrument. Ze biedt de mogelijkheid vlot instrumentparameters aan te passen of te doorlopen zoals het gekozen massadomein (itv), het debiet van een moedergas, enz. Deze functie laat ook toe de werkwaarde van een deelsysteem tijdens de vlucht anders in te stellen wanneer de omstandigheden dat vereisen.

De controlefunctie laat in eerste instantie toe door een meting te verifiëren of de gevraagde werkwaarde ook effectief door het deelsysteem werd aangenomen. Verder kan de controle van de deelsystemen ingebouwd worden in een permanente bewaking van het instrument tezamen met de druk- en temperatuurbewaking.

De bewaking van het instrument is om verschillende redenen belangrijk. Aan een door de gebruiker opgelegd ritme kunnen alle gewenste instrumentparameters opgemeten worden. Dit laat de gebruiker in de eerste plaats toe zich te verzekeren van de goede werking van het instrument en dadelijk in te grijpen in geval van onvoorziene gebeurtenissen (het onverwacht afvallen van voedingsspanningen, ongewenst verloop van drukken en temperaturen, enz.). Een aantal van de instrumentparameters zijn ook onontbeerlijk bij de verwerking van de data na de vlucht (spanningen in de massaspectrometer, debieten, turbinesnelheid, drukken, temperaturen, hoogte, enz.). Tenslotte is de lijst van bewakingsmetingen in veel gevallen de enige betrouwbare bron bij het verklaren van storingen of pannes in het instrument.

Voor de meeste deelsystemen werden de drie functies (schakelen, sturen en controleren) geïmplementeerd. Voor een aantal deelsystemen is één van de functies niet nodig of irrelevant en werd dan ook weggelaten.

2.9.4. *De realisatie van een speciale interface tussen de besturingsmodules en de processor*

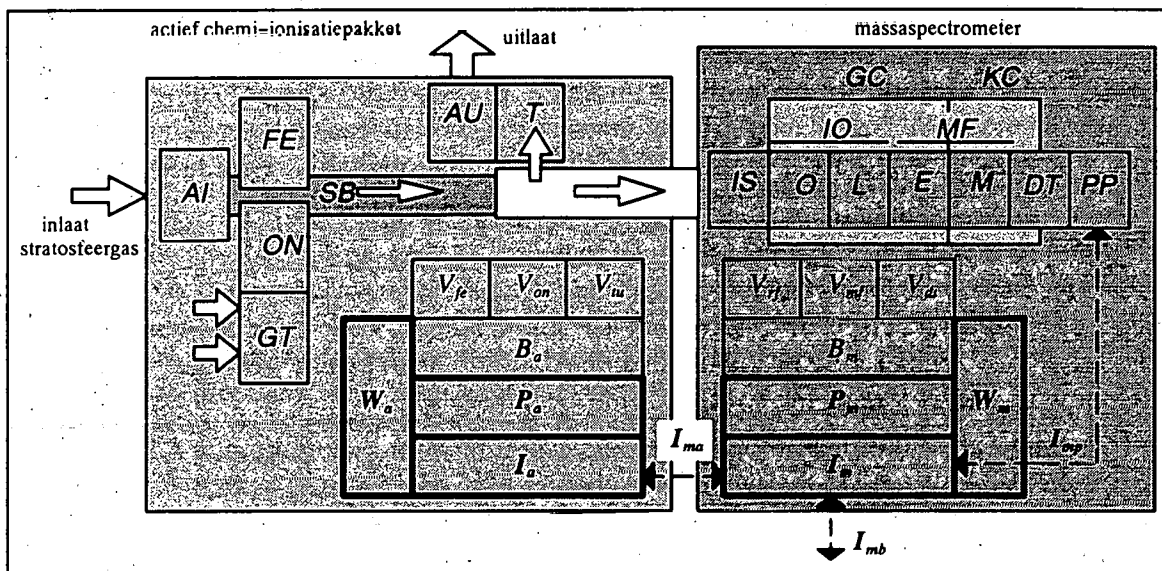
Aangezien alle besturingsmodules met de processor in verbinding staan via de interne processorbus, werd deze businterface aan de zijde van de besturingsmodules gestandaardiseerd.

Elke module wordt uitgerust met een EPLD (*Erasable Programmable Logic Device*) die de processor een aantal hulpmiddelen aanbiedt om de module op een eenvoudige manier te beheren. De businterface communiceert aan zijn buszijde met de processor maar voorziet aan de modulezijde in lokale adressering, lokale dataverzameling en stelt een aantal lokale schakellijnen ter beschikking.

Door het koppelen van een softwarestructuur aan de businterface kunnen de schakel-, stuur- en controlefunctie van alle besturingsmodules op een eenduidige manier geïmplementeerd worden. Het volstaat in de programmacode de hulpmiddelen die de businterface ter beschikking stelt op een gepaste manier aan te wenden. De volledige besturing van het instrument is op deze manier zeer modulair opgebouwd, is flexibel en gemakkelijk uit te breiden.

2.9.5. De ontwikkeling van een hardware en software werkomgeving voor een ballongedragen instrument dat zich op grote afstand bevindt

2.9.5.1. Twee gelijkaardige processoreenheden



Figuur 2.32: Situering van de processormodules (P), de interfacemodules (I) en de werkomgeving (W) voor het massaspectrometergedeelte (m) en voor het actief chemi-ionisatiepakket (a) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

V : voedingseenheden ; B : besturingsmodules

m : massaspectrometer ; a : actief chemi-ionisatiepakket ; b : bedieningsterminal aan de grond

Een microprocessorsysteem werd ontwikkeld bestaande uit 2 processoreenheden, één in het massaspectrometergedeelte (de *main on board computer* MOBC) (P_m in figuur 2.32) en één in het actief chemi-ionisatiepakket (de *chemical ionization microprocessor* CIMP) (P_a in figuur 2.32). Het massaspectrometergedeelte werd eerst ontwikkeld met het oog op vluchten voor de meting van de natuurlijke ionensamenstelling van de stratosfeer, het actief chemi-ionisatiepakket werd pas in een later stadium bijgevoegd. Binnen het SIDAMS/MACSIMS-instrument vervullen ze totaal verschillende functies (enerzijds

produceren, anderzijds detecteren van ionen). Bovendien werden ze opgebouwd als twee mechanisch gescheiden systemen (eigen basisplaat, eigen kuip, ...). Het lag dan ook voor de hand hun elektronische besturing gescheiden te houden.

De introductie van een tweede processorsysteem voor het actief chemi-ionisatiepakket in plaats van een uitbreiding van de MOBC had daarenboven verscheidene voordelen. In de eerste plaats moesten zo haast geen wijzigingen aangebracht worden aan de goed werkende MOBC en bleef deze steeds beschikbaar voor laboratoriumtesten, terwijl ook het nieuwe systeem los van de MOBC kon opgebouwd en uitgetest worden. Bovendien zouden het groot aantal bijkomende functies in het actief chemi-ionisatiepakket het bestaande processorsysteem te zeer hebben belast (adresseringsmogelijkheden, geheugenbeperking, verbruik, ...).

Elk van de beide processorsystemen (MOBC en CIMP) beheert zijn gedeelte van het instrument door middel van een interne processorbus. Alle modules die nodig zijn om het instrument te bedienen worden verbonden met deze bus.

Het gebruik van twee processorsystemen vereist wel een dialoog tussen beiden en dus extra communicatie-interfaces in MOBC en CIMP.

2.9.5.2. *Ingebedde processors*

Het SIDAMS/MACSIMS-instrument werkt in reële tijd. De tijd die in een vlucht ter beschikking staat moet zo efficiënt mogelijk benut worden. De keuze van technische oplossingen moet erop gericht zijn de wetenschappelijke objectieven zo min mogelijk te compromitteren.

Wijzigingen aan de instrumentparameters die door de gebruiker via telecommando's worden aangevraagd moeten zo snel mogelijk geïmplementeerd worden en de door het instrument verzamelde gegevens moeten zo snel mogelijk aan de gebruiker overgemaakt worden. De veelheid aan te bedienen deelsystemen, de noodzaak steeds klaar te staan voor de ontvangst van de bevelen van de gebruiker en de eis data dadelijk door te geven aan de gebruiker maakt de aanwezigheid van een *multitasking* werkomgeving onontbeerlijk.

Voor de besturing van zulke reële tijd toepassingen met meerdere taken komen PC's niet in aanmerking. De enige mogelijkheid is ingebedde processors te gebruiken en hen uit te rusten met een gepast beheersysteem.

Bij het ontwerp van de elektronische hardware en de keuze van de componenten moet steeds aandacht geschonken worden aan het gespecificeerde temperatuurbereik. De elektronica moet betrouwbaar blijven werken bij de lage temperaturen die in de stratosfeer heersen. Er moet ook aan gedacht worden het energieverbruik zo klein mogelijk te houden. Tijdens de ballonvlucht wordt het instrument gevoed uit batterijen. Hoe kleiner het verbruik hoe kleiner de batterijensets die nodig zijn om het instrument een voldoende lange autonomie te geven, wat een besparing op het gewicht van het instrument met zich brengt.

2.9.5.3. *Eisen voor de processorsystemen*

Er werd voor gezorgd dat het geheel van de processoreenheden en alle hiervoor opgesomde voedings- en besturingsmodules voldoen aan de volgende kenmerken :

- een grote bedrijfszekerheid in een omgeving met wisselende temperatuur. De elektronische componenten worden gekozen om te kunnen functioneren in een breed temperatuurdomein en voldoen indien mogelijk aan een militaire norm;

- compatibiliteit met de interne processorbus en modulariteit op kaartniveau om gemakkelijke integratie en snelle interventies mogelijk te maken;
- het geheel kan zowel uit batterijen (tijdens de vlucht) als uit een labovoeding gevoed worden;
- het geheel is opsplitsbaar in eenheden die zowel samen als apart kunnen gestuurd worden. Dit biedt grote voordelen in de ontwikkelingsfase.
- de mogelijkheid tot communicatie tussen de verschillende eenheden van het geheel;
- een maximale compactheid;
- gemakkelijk te manipuleren tijdens de voorbereidende fasen.

De temperatuureis en de noodzaak aan compatibiliteit, modulariteit en compactheid maakt het moeilijk om in de handel verkrijgbare kaarten te gebruiken voor sommige functies van het instrument.

Daarbij komt dat de processoreenheden geen alleenstaande systemen zijn (zoals PC's) maar wel zogenaamde ingebedde systemen. Ze moeten in staat zijn snel genoeg te reageren op onverwachte gebeurtenissen in hun omgeving en in functie daarvan te handelen (werken in reële tijd). Bovendien moeten ze een aantal overlappende taken gelijktijdig kunnen behandelen.

Om deze redenen zijn alle elektronicamodules van eigen makelij en werd er geopteerd voor het gebruik van de militaire versie van de 8086 Intelprocessor voor ingebedde toepassingen. Omwille van de compatibiliteit werd ook voor de andere componenten in de processoreenheden zoveel mogelijk uit het Intelgamma gekozen.

2.9.5.4. De werkomgeving

Elke processoreenheid werd uitgerust met een op maat ontworpen reële tijd *multitasking* werkomgeving (W_m en W_a in figuur 2.32) met de volgende kenmerken :

- ze werkt in reële tijd wat toelaat dat bevelen van de gebruiker zonder uitstel worden uitgevoerd en dat resultaten (spectra, bewakingsgegevens) ook dadelijk aan de gebruiker worden meegedeeld;
- ze biedt de mogelijkheid processen parallel en zowel op de voorgrond als op de achtergrond te laten verlopen. Een elementaire vereiste is dat het besturen van het instrument en het bewaken ervan gelijktijdig kan gebeuren. Daarnaast moeten echter ook nog een aantal andere taken in parallel kunnen gebeuren;
- ze is zeer gebruiksvriendelijk. Een gebruiker moet het instrument kunnen bedienen op een volledige transparante manier, dit wil zeggen zonder enige kennis van de opbouw van de achterliggende hardware en software;
- ze bezit een flexibele en overzichtelijke telecommandointerface. Niet enkel telecommando's voor het bedienen van de deelsystemen van het instrument staan ter beschikking. Een stel telecommando's zorgt bovendien voor bijkomende functionaliteit voor de werkomgeving. Dit gaat van tijds aanduiding, over beveiliging van geheugensegmenten tot het werken met in *scripts* gegroepeerde telecommando's;
- ze biedt een brede waaier aan besturings- en controlemogelijkheden. In de ter beschikking staande telecommando's worden de instrumentparameters steeds aangeduid in aangepaste en voor zichzelf sprekende fysische eenheden;

- de communicatie tussen de verschillende eenheden van het geheel moet veilig zijn. Het verlies van data bij het transport tussen de verschillende eenheden en tussen het instrument en de bedieningsterminal aan de grond moet minimaal zijn.

Zowel de MOBC als de CIMP zijn uitgerust met zo'n beheersysteem, zodat ook op softwaregebied het massaspectrometergedeelte en het actief chemi-ionisatiepakket volledig onafhankelijk zijn.

Toch werd ervoor gezorgd dat de gebruiker het instrument in vluchtconfiguratie bedient alsof het slechts één processorsysteem en bijhorende werkomgeving heeft. Het is uitsluitend de MOBC die verantwoordelijk is voor de ontvangst van telecommando's. Telecommando's die bestemd zijn voor het actief chemi-ionisatiepakket worden doorgegeven aan de CIMP. De wetenschappelijke data en de bewakingsgegevens van het ganse instrument worden enkel vanuit de MOBC over het telemetingkanaal naar de grond gestuurd.

Aan de basis van elke reële tijd *multitasking* werkomgeving liggen een aantal standaard basismechanismen. Het is tijdrovend ze voor elk ingebed processorsysteem telkens weer te programmeren en daarom zijn ze in de handel verkrijgbaar. Voor de door ons gebruikte ingebedde 8086 microprocessor brengt Ready Systems een *Versatile Real Time Executive* (VRTX) op de markt. Hierrond werd de polyvalente werkomgeving gebouwd voor de ontvangst, interpretatie en implementatie van de telecommando's (geprogrammeerd in C).

De communicatie met andere processorsystemen (de bedieningsterminal aan de grond, de pixelprocessor, de CIMP of de MOBC) verloopt voornamelijk via *interrupt*-behandelingsroutines. Vermits het behandelen van *interrupts* tijdkritisch is, zijn deze routines geschreven in assembler om een maximale optimalisatie van de code te bekomen.

2.9.5.5. De interfaces

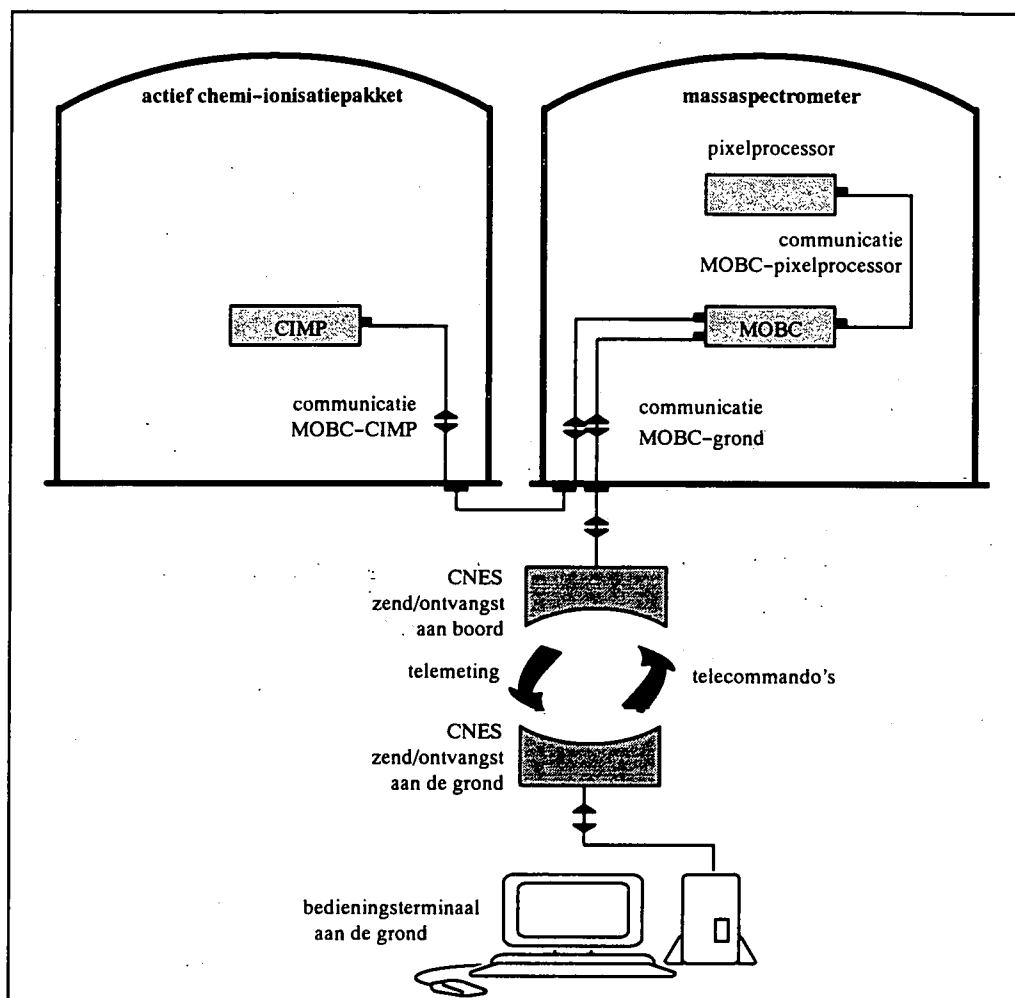
VRTX voorziet niet in softwaremechanismen voor communicatie met andere systemen. Die werden dan ook voor alle in het instrument aanwezige interfaces aangemaakt (I_m en I_a in figuur 2.32) (figuur 2.33).

De processoreenheid van de massaspectrometer (P_m) is voorzien van een dubbele interface met de pixelprocessor (I_{mp}) en een drie-kanalen-communicatieverbinding met de processor in het actief chemi-ionisatiepakket (I_{ma}) en met de bedieningsterminal aan de grond (I_{mb}).

De processoreenheid in het actief chemi-ionisatiepakket heeft enkel de reeds genoemde interface (I_{ma}) met de processor in het massaspectrometergedeelte.

De communicatie met de bedieningsterminal aan de grond verloopt via de telemeting- en telecommandoinfrastructuur van het CNES. De hardware van de interfacemodules in het instrument is hieraan aangepast.

De eerste telecommandoinfrastructuur van het CNES was vrij elementair [Neve 82][Neve 85]. In het geval van het ION-instrument gebeurde het doorgeven van telecommando's via 8 geheugenrelais die aan de grond vanaf een rek met druktoetsen moesten ingesteld worden. Sedert enkele jaren biedt het CNES een seriële interface aan met de zend- en ontvangstapparatuur. Hiervan werd gebruik gemaakt om een volledig nieuwe tekstgebonden telecommando-interface uit te werken.



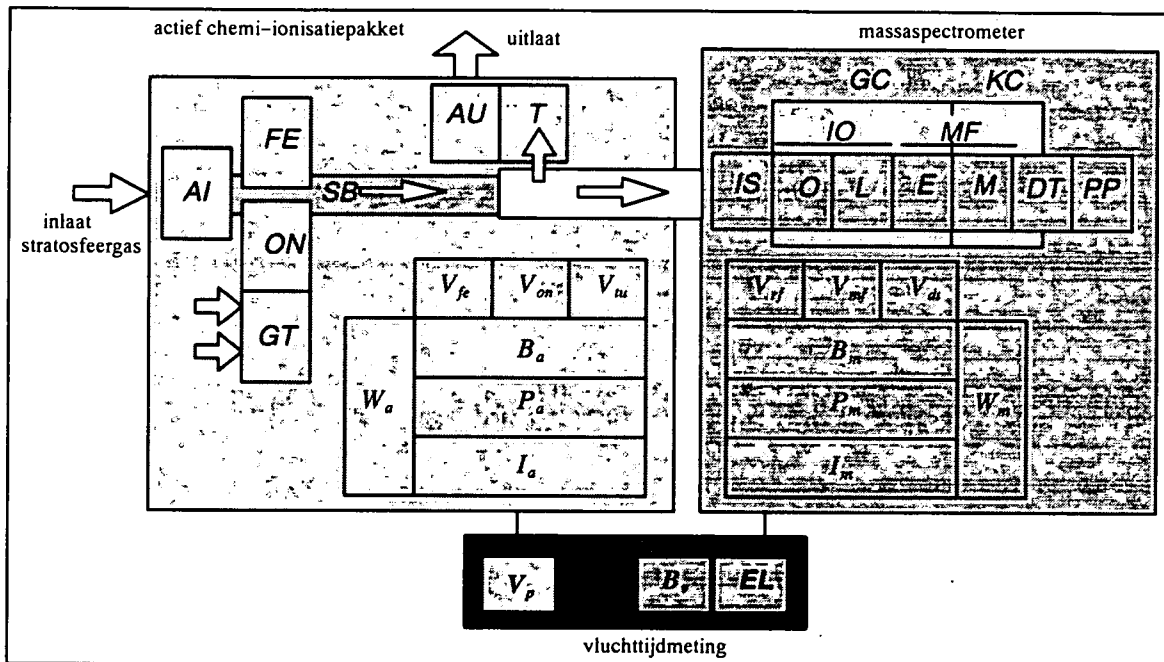
Figuur 2.33: De communicatiekanalen tussen MOBC, CIMP, pixelprocessor en bedieningsterminal aan de grond.

Met deze nieuwe ASCII-telecommandointerface kunnen een onbeperkt aantal verschillende telecommando's snel tot in het instrument gebracht worden, waar deze dan in de processoreenheden geïnterpreteerd worden. Bovendien zal in het instrument een kopij van elk ontvangen teken dadelijk via een speciaal daarvoor voorzien telemetingkanaal (het telecommando-echokanaal) teruggestuurd worden naar de bedieningsterminal aan de grond. De gebruiker communiceert nu met het instrument vanaf een commandolijn in een terminal en ziet als het ware hoe zijn telecommando's het instrument bereiken. Fouten bij het ingeven van de telecommando's kunnen zo dadelijk ontdekt en verbeterd worden.

Op basis van dit telecommando- en echoprincipe werd een handige grafische interface gemaakt in de bedieningsterminal aan de grond wat het bedienen van het instrument nog vergemakkelijkt.

Alle gegevens die in het instrument verzameld worden, worden via een apart telemetingkanaal binair doorgezonden naar de bedieningsterminal aan de grond om er de gebruiker zo snel mogelijk ter beschikking te staan. Dit kanaal is volledig gescheiden van de telecommando- en echokanalen zodat de besturing van het instrument nooit belemmerd wordt. Het transport van de data over het telemetingkanaal wordt beveiligd om verlies van data te beperken.

2.9.6. *De ontwikkeling van een elektronisch gepulste ionenbron-elektrometer-combinatie voor vluchttijdmetingen*



Figuur 2.34: Situering van de vluchttijdmeting in het SIDAMS/MACSIMS-instrument. De besturingseenheid (B_a) en elektrometer (EL) in het massaspectrometergedeelte, een pulssysteem voor de ontladingsionenbronvoeding (V_p) in het actief chemi-ionisatiepakket.

V : voedingseenheden ; B : besturingsmodules ; P : processormodules ; I : interfacemodules ;
W : werkomgeving

m : massaspectrometer ; a : actief chemi-ionisatiepakket ; b : bedieningsterminal aan de grond

Bij buitendrukken vanaf 30 mbar neemt de snelheid van de turbine die de gasstroom in de stromingsbuis bepaalt, en dus ook de verblijftijd van de ionen in het reactiemidden af bij toenemende druk. Het is dus zeer belangrijk op elk moment van de ballonvlucht deze verblijftijd te kennen. Naast de drukafhankelijkheid speelt waarschijnlijk ook de temperatuur een rol in mogelijke variaties van de verblijftijd.

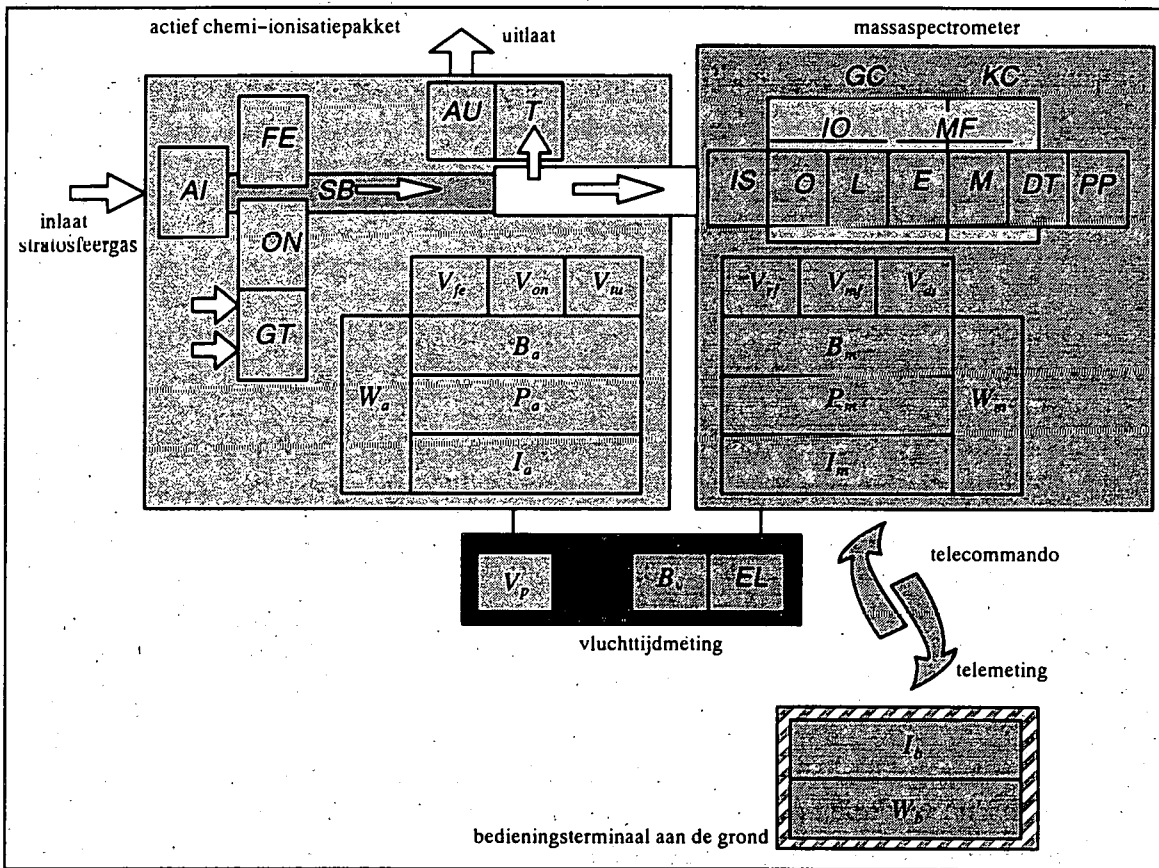
Ter benadering van de verblijftijd van de ionen in het reactiemilieu wordt hun vluchttijd tussen de plaats waar ze ontstaan (de ionenbron) en de plaats waar ze worden gemeten (de ingang van de spectrometer) aangenomen. Het instrument krijgt een belangrijke meerwaarde indien het uitgerust wordt met een vluchttijdmeting.

Het theoretische principe van de vluchttijdmeting werd omgezet in een technische realisatie. Een vluchttijdmeting kan gebeuren wanneer in één van de ionenbronnen (FE of ON in figuur 2.34) een wolk van moederionen gelost wordt (een "ionenpuls"), die na verloop van tijd een wijziging in de stroom veroorzaakt op de inlaatflens van de spectrometer (een "stroompuls"). Deze stroompuls wordt opgemeten. De tijdsperiode tussen ionenpuls en stroompuls beschouwen we als zijnde de vluchtduur van de ionen. Aangezien niet alle ionen in de hoofdstroom even snel bewegen, heeft ook de vorm van de stroompuls belang. Daarom werd geopteerd voor registratie

van het volledige stroomprofiel in een zogenaamd vluchtijdspectrum, dat naar de bedieningsterminal aan de grond wordt doorgezonden.

De voedingen voor de ionenbronnen (V_{fe} en V_{on} in figuur 2.34) werden voorzien van een pulssysteem (V_p) en aan de inlaat van de massaspectrometer werd een gevoelige elektrometer voorzien (EL). Een besturingsmodule (B_v) werd ontwikkeld, passend in het bestaande businterfaceconcept van het instrument. In de werkomgeving van het massaspectrometergedeelte (W_m) werd de mogelijkheid voorzien geparametriseerde vluchtijdmetingen uit te voeren.

2.9.7. De bedieningsterminal aan de grond



Figuur 2.35: Situering van de bedieningsterminal aan de grond (I_b en W_b) in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

V : voedingseenheden ; B : besturingsmodules ; P : processormodules ; I : interfacemodules ;
 W : werkomgeving ; EL : elektrometer

m : massaspectrometer ; a : actief chemi-ionisatiepakket ; b : bedieningsterminal aan de grond

De gebruiker beschikt tijdens de vlucht over een bedieningsterminal aan de grond. Deze benaming wordt gemakshalve gebruikt om een combinatie aan te duiden van twee werkstations uitgerust met het UNIX-beheersysteem en één X-terminaal. Hierop werden een aantal grafische interfaces gebouwd (W_b in figuur 2.35) via dewelke de gebruiker het instrument kan bedienen

(telecommando- en telecommando-echointerface) en waarin hij alle meetgegevens uit het instrument kan terugvinden (telemetinginterface). Er werden interfaces gebouwd voor :

- het aan- en afzetten van het instrument;
- het doorzenden van telecommando's naar het instrument;
- het aanbieden van een telecommando-echo terminaal;
- de aanschouwelijke voorstelling van de massaspectra;
- de aanschouwelijke voorstelling van de vluchttijdspectra;
- de aanschouwelijke voorstelling van de bewakingsgegevens (*housekeeping*) uit het actief chemi-ionisatiepakket;
- de aanschouwelijke voorstelling van de bewakingsgegevens uit het massaspectrometergedeelte.

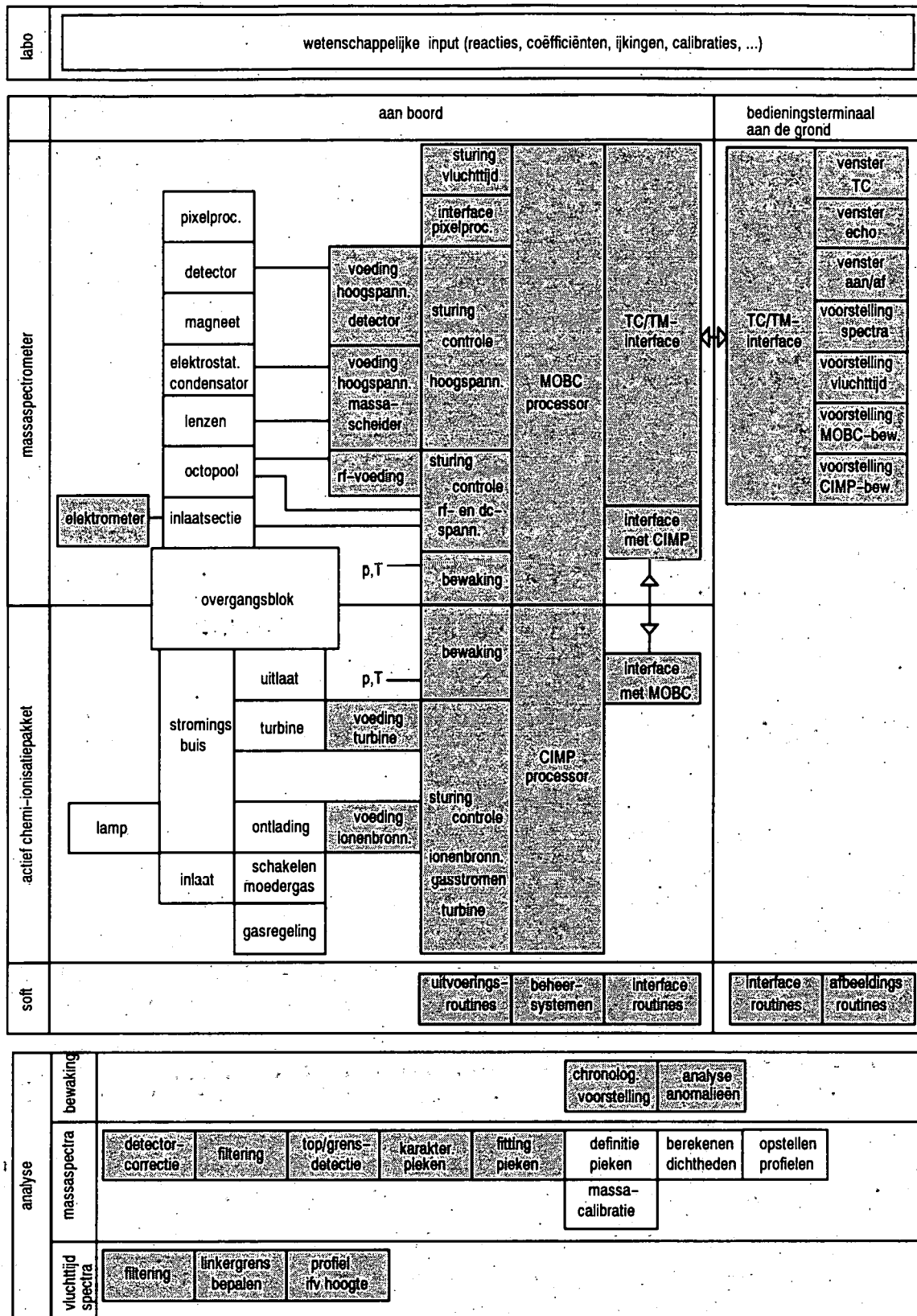
Een kleine hardware aanpassing is nodig tussen de seriële poorten van het werkstation dat instaat voor ontvangst en verzending en de CNES-infrastructuur aan de grond (I_b in figuur 2.35).

2.9.8. *De ontwikkeling van een piekanalysealgoritme*

De eerste stap in de verwerking van de resultaten van het SIDAMS/MACSIMS-instrument is een individuele behandeling van alle massaspectra. De nodige detectorcorrecties moeten uitgevoerd worden, waarna alle massapieken moeten gedetecteerd en afgebakend worden. Tenslotte moet een "realistische" schatting gemaakt worden van de oppervlakte van de massapieken omdat dit een maat is voor het aantal gedetecteerde ionen bij een bepaalde massa.

Pas in een tweede fase zullen op basis van deze piekoppervlakten hoogteprofielen per ion worden opgesteld en zal met verhoudingen van oppervlakten van bepaalde ionenpieken getracht worden ook hoogteprofielen voor neutrale bestanddelen van de atmosfeer op te stellen. Naast de verhoudingen van de piekoppervlakten, lees ionenconcentraties, zijn hiervoor ook de kennis van de relevante reactievergelijkingen en reactiesnelheden nodig en van de verblijftijd van de ionen in het reactiemilieu.

Het eerste deel van de gegevensverwerking is zeer tijdrovend en leent zich goed voor volledige automatisering. Het ontwikkelde piekanalysealgoritme levert op een snelle manier de nodige *input* voor het tweede deel van de spectrumanalyse. Deze verderé analyse maakt deel uit van het doctoraatswerk van C. Amelynck [Amel 95a].



Figuur 2.36: Bijdrage van deze thesis (grijs) tot het SIDAMS/MACSIMS-project.

Hoofdstuk 3

De hardware aan boord

3.1. Inleiding

In dit hoofdstuk worden de ontworpen hardwaremodules aan boord van het ballongedragen SIDAMS/MACSIMS-instrument in meer detail besproken. Hierbij wordt vooral de nadruk gelegd op de integratie van de modules in het instrument, hun opbouw en functionaliteit. Er wordt ook aandacht besteed aan bepaalde toegepaste principes en bijzondere technieken. Voor een uitgebreide technische beschrijving wordt verwezen naar appendix A.

3.2. De processor- en voedingsmodules

3.2.1. De keuze van de processors

Als processor voor het massaspectrometergedeelte en het actief chemi-ionisatiepakket werd voor de 80C86 van Harris Semiconductor gekozen. De keuze werd in de eerste plaats bepaald door de beperkte beschikbaarheid van componenten die aan hoge kwaliteitseisen voldoen. Voor deze processor wordt bovendien door Ready Systems een *Real Time Executive* op de markt gebracht, VRTX-86, die een aantal basisfaciliteiten voor een beheersysteem bevat, gericht op ingebedde systemen.

Gezien de omgeving waarin gewerkt dient te worden (lage temperaturen) wordt een militaire versie van de 80C86 gebruikt.

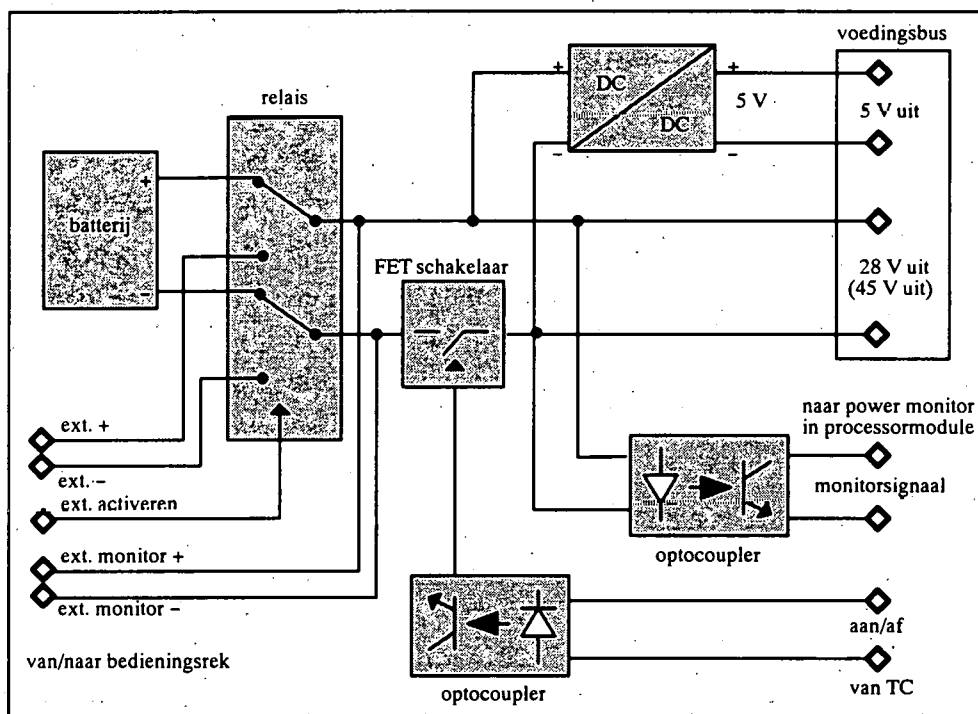
3.2.2. De voeding van het instrument

Tijdens de vlucht wordt zowel het massaspectrometergedeelte als het actief chemi-ionisatiepakket gevoed uit telkens twee bedrijfszekere lithium-batterijensets. Ze zijn zo gedimensioneerd dat ze de nodige stroom kunnen garanderen gedurende de totaliteit van de vlucht (tabel 3.1).

Naam	Spanning	Energie	Stroomverbruik	Functie
MOBC batterij 1	28 V	28 Ah	1 A	MOBC-elektronica
MOBC batterij 2	28 V	28 Ah	0,5 A	rf-voeding van octopool
CIMP batterij 1	28 V	28 Ah	2 A	CIMP-elektronica
CIMP batterij 2	45 V	56 Ah	max. 5 A	turbine

Tabel 3.1: De batterijensets in het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

Tijdens integratietesten bestaat de mogelijkheid om batterijcapaciteit te sparen en het ganse instrument te voeden met externe laboratoriumvoedingen. Het omschakelen tussen batterijen en labovoedingen gebeurt in "power switch"-modules (figuur 3.1). In deze modules bevinden zich relais die in onbekrachtigde toestand de batterijspanning doorlaten (tijdens de vlucht), maar bij bekrachtiging vanaf een bedieningsrek de labospanning aanbrenge.



Figuur 3.1: De "power switch"-module.

Zolang het instrument zich aan de grond bevindt (toegankelijk met kabel) wordt de voeding van het instrument streng gecontroleerd. De vier voedingsspanningen kunnen steeds op het bedieningsrek afgelezen worden, zowel als het uit batterijen of uit labovoedingen wordt gevoed. Wordt het uit labovoedingen gevoed dan wordt in het bedieningsrek ook het stroomverbruik gemeten en afgebeeld.

Aan het instrument wordt de primaire 28 V-voedingsspanning en een 5 V-spanning aangeboden. Deze spanningen worden over alle electronicamodules verspreid via een voedingsbus. Het doorschakelen van de batterijspanning naar de voedingsbus tijdens de vlucht gebeurt vanaf de grond via het door het CNES ter beschikking gestelde telecommandokanaal (zie 3.9.2.5.1).

In de "power switch"-modules wordt uit de voedingsspanningen voor MOBC- en CIMP-elektronica een monitorsignaal afgeleid dat zal gebruikt worden als voedingsbewakingssignaal in de processormodule

3.2.3. De werking van de processormodules

3.2.3.1. De interne klok en voedingsbewaking

De processormodules zijn zodanig opgebouwd dat een minimum aan externe connecties nodig is voor de basiswerking van het instrument. De processors werken bij een frequentie van 5 MHz die door een klokcircuit geleverd wordt uit een 15 MHz kwartskristal.

De power monitor houdt via een door de "power switch"-module geleverd monitorsignaal voortdurend de voedingsspanning in de gaten en zorgt ervoor dat de processor op een ordentelijke manier aan- en afschakelt, ook bij onverwacht verlies van de primaire voedingsspanning.

3.2.3.2. Adresvergrendeling en -decoding

De microprocessor heeft een 20 bits adres bus ($A_{19} \rightarrow A_0$). De 16 eerste bits ($A_{15} \rightarrow A_0$) zijn *gemultiplexed* met de data bus ($D_{15} \rightarrow D_0$). We noemen ze verder $AD_{15} \rightarrow AD_0$. 15 adresbits ($A_{15} \rightarrow A_1$) kunnen door het ALE-sigitaal (*address latch enable*) van de microprocessor vergrendeld worden ($LA_{15} \rightarrow LA_1$) en blijven dus stabiel tot een nieuwe ALE ze uitklokt. De vergrendelde adressen worden onder meer gebruikt voor lees- en schrijfoperaties in het geheugen.

Als geheugen-decoder wordt een EPLD (*Erasable Programmable Logic Device*) met programmeerbare AND-matrix, vaste OR-matrix en programmeerbare flipflop-uitgang gebruikt. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de geheugenadressering.

A ₁₉	A ₁₈	A ₁₇	A ₁₆	A ₀ = 0 : even bytes		\overline{BHE} = 0 : oneven bytes		Functie
				Adreszone		Adreszone		
0	0	0	0	0xxx0h	EM ₀	0xxx1h	OM ₀	RAM, ROM
0	0	0	1	1xxx0h	EM ₁	1xxx1h	OM ₁	
0	0	1	0	2xxx0h	EM ₂	2xxx1h	OM ₂	
0	0	1	1	3xxx0h	EM ₃	3xxx1h	OM ₃	perifere circuits in processormodule
0	1	0	0	4xxx0h	EM ₄	4xxx1h	OM ₄	

Tabel 3.2: Geheugenadressering ($x = 0 \rightarrow F$).

De geheugenblokken EM₀, EM₁ en EM₂ worden toegewezen aan RAM- of ROM-geheugens met even byte-adressen (selecteren met adreslijn A₀), de geheugenblokken OM₀, OM₁ en OM₂ aan de RAM- of ROM-geheugens met oneven byte-adressen (selecteren met het \overline{BHE} -signaal (*bus high enable*)).

De geheugenblokken EM₃, OM₃, EM₄ en OM₄ worden enkel gebruikt voor de selectie van perifere circuits in de processormodule zelf :

- EM₃ *Programmable Interval Timer* (PIT);
- EM₄ *Priority Interrupt Controller* (PIC);
- OM₃ eerste *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART₁);
- OM₄ tweede *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART₂).

De adresruimte voor *input* en *output* met andere modules is gereserveerd binnen de totale adresruimte voor toegang tot het geheugen (*memory mapping*). Hier wordt alle I/O beperkt tot even adressen omdat de databus tussen de microprocessor en de andere modules slechts 8 bits breed is.

De geheugen-*decoder* stelt een signaal $\overline{BUSIO} = \overline{A_0} \cdot \overline{A_{19}} \cdot A_{18} \cdot A_{17} \cdot \overline{A_{16}}$ ter beschikking dat in combinatie met een aantal vergrendelde adreslijnen zorgt voor zogenaamde "*peripheral chip select*"-lijnen (PCS). Deze lijnen worden gebruikt om via de processorbus de verschillende modules te selecteren.

De modules waarin deze selectiesignalen gebruikt worden in het massaspectrometergedeelte en in het actief chemi-ionisatiepakket worden in tabel 3.3 getoond.

Naam	Adreszone	Toepassing in de MOBC
PCS ₀	68000h-687FEh	besturingsmodule hoogspanningen
PCS ₁	68800h-68FFEh	bewakingsmodule MOBC
PCS ₂	69000h-697FEh	seriële communicatie met pixelprocessor, telemeting naar bedieningsterminal aan de grond en telemeting van CIMP
PCS ₃	69800h-69FFEh	besturingsmodule rf- en dc-spanningen
PCS ₄	6A000h-6A7FEh	besturingsmodule vluchttijdmeting

Naam	Adreszone	Toepassing in de CIMP
PCS ₀	68000h-687FEh	besturingsmodule turbine
PCS ₁	68800h-68FFEh	bewakingsmodule CIMP
PCS ₂	69000h-697FEh	seriële communicatie voor telemeting naar MOBC
PCS ₃	69800h-69FFEh	besturingsmodules ionenbronnen en gastoevoer
PCS ₄	6A000h-6A7FEh	
PCS ₅	6A800h-6AFFEh	

Tabel 3.3: Selectielijnen in de MOBC en de CIMP.

De geheugen-*decoder* zorgt verder voor de verspreiding van de controlesignalen \overline{DE} (*data enable*), DT/\overline{R} (*data transmit/receive*), \overline{RD} (*read*) en \overline{WR} (*write*) van de processor via de processorbus naar de modules : $\overline{BUSDE} = \overline{BUSIO} + \overline{DEN}$, $BUSDTR = DT/\overline{R}$, $\overline{BUSRD} = \overline{BUSIO} + \overline{RD}$, $\overline{BUSWR} = \overline{BUSIO} + \overline{WR}$.

3.2.3.3. *Het geheugen*

De geheugenbank van de MOBC bestaat uit 6 speciale 32 Kbyte geheugens. Ze zijn uitgerust met een interne lithiumbatterij en onderzoeken voortdurend of de 5 V-voeding binnen de toleranties blijft. Bij een 5 V-storing nemen de lithiumbatterijen dadelijk de voeding van de geheugens over en wordt schrijven naar het geheugen onmogelijk. Deze circuits kunnen opgedeeld worden in 16 blokken van 2 Kbyte, die dan elk afzonderlijk kunnen beschermd worden tegen schrijfoperaties. Deze bescherming gebeurt door een ononderbroken reeks van 24 welbepaalde leesoperaties naar het betrokken circuit. Het geheugen kan zo naar keuze opgedeeld worden in ROM- en RAM-zones.

Het gebruik van dit type van geheugens biedt een zekere flexibiliteit. Tijdens testen in het laboratorium blijft het geheugen onbeschermd, zodat alle segmenten toegankelijk zijn. Door kritische delen van het geheugen daarentegen tijdens de vlucht de ROM-status mee te geven (de programmacode, *scripts*, constanten, calibratietabellen) wordt de kans klein dat het instrument onbestuurbaar wordt ten gevolge van een ongewenst overschrijven van geheugencellen.

3.2.3.4. *Perifere circuits*

De processormodules bevatten een programmeerbaar *timer*-circuit (PIT). Hier worden de klokken aangemaakt die de *baud rates* bepalen van de seriële communicatielijnen en een klok die de kadans van het beheersysteem bepaalt (VRTX-tik).

Een *interrupt controller* (PIC) behandelt de interventieaanvragen van alle modules die daartoe uitgerust zijn en laat hen toe in communicatie te treden met de processor.

Voor interfacedoeleinden zijn de processormodules uitgerust met twee seriële communicatiecircuits (UART). In de MOBC-module worden die gebruikt om te communiceren met de bedieningsterminal aan de grond (telecommando en telecommando-echo) en met de CIMP (*remote* telecommando en *remote* telecommando-echo) In de CIMP-module wordt slechts één van de circuits gebruikt voor de communicatie met de MOBC. Alle UART-kanalen werken bij een *baud rate* van 1200 bits/s. Voor de communicatie tussen de MOBC en de pixelprocessor wordt op een aparte module bijkomende communicatiehardware voorzien (3.9.2.4).

3.2.3.5. *Het emulatiesysteem*

Tijdens integratie van hard- en software wordt gebruik gemaakt van een HP64762/3 emulator voor de 80C86 processor. De emulator heeft dezelfde functie als de processor, de emulator-*pod* vervangt de processor dan ook fysisch op de processorkaart. De emulator geeft informatie over de processor, laat toe de uitvoering van het doelsysteem te controleren en er wijzigingen in aan te brengen.

De emulator kan intern geklokt worden (8 MHz) of de klok van het doelsysteem zelf gebruiken. De emulator bezit een 510 Kbyte emulatiegeheugen, waarin 16 geheugenblokken kunnen gedefinieerd worden als zijnde ROM- of RAM-emulatiegeheugen, of als zijnde ROM- of RAM-doelgeheugen.

De emulator kan werken in een reële-tijd-uitvoeringsmode, waarbij het verloop van het programma in het doelsysteem niet wordt onderbroken.

Een stel hulpmiddelen zijn voorhanden voor het opsporen van de fouten in de software (lezen en wijzigen van registers, "single step"-uitvoering, breekpunten, *tracing*, ...).

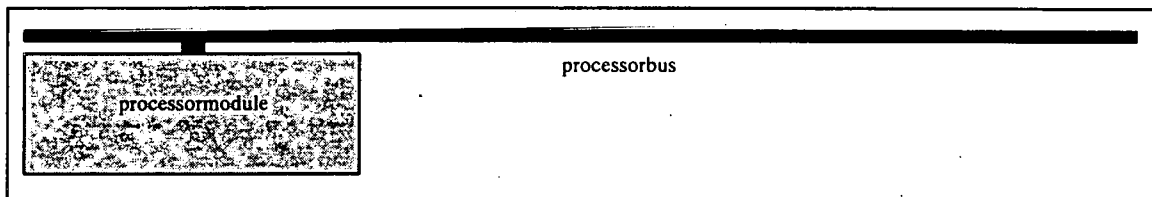
3.2.4. De processorbus

De adres/data-signalen ($AD_7 \rightarrow AD_0$) in de processormodule worden van en naar de processorbus gebracht via een buffer. Op de processorbus krijgen ze de naam $BD_7 \rightarrow BD_0$. Het DT/\bar{R} -signaal van de microprocessor kiest de richting van de datastroom in de buffer.

Ook de controlesignalen \overline{BUSDE} , $BUSDTR$, \overline{BUSRD} , \overline{BUSWR} en $RESET$ worden gebufferd tot \overline{BIODE} , \overline{BIODTR} , \overline{BIORD} , \overline{BIOWR} en $BRESET$.

De vergrendelde adreslijnen ($LA_5 \rightarrow LA_1$) en de "peripheral chip select"-lijnen ($PCS_5 \rightarrow PCS_0$) worden *onbufferd* op de processorbus geplaatst.

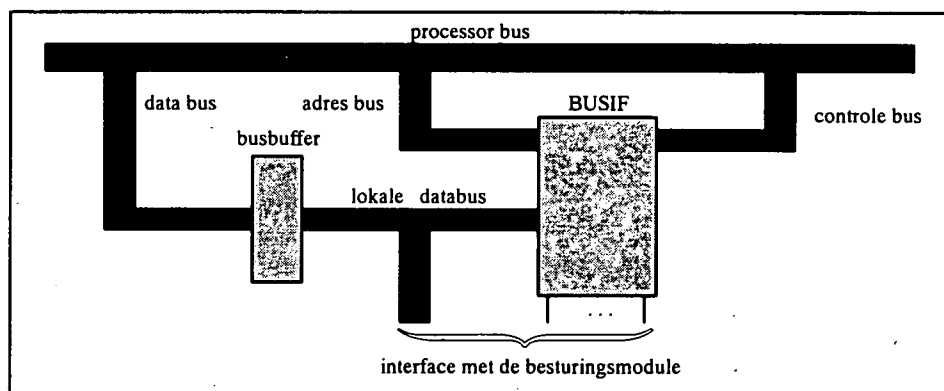
Figuur 3.2 wordt verder gebruikt ter illustratie van de opbouw van de SIDAMS/MACSIMS-hardware.



Figuur 3.2: De processormodule en de processorbus.

3.3. De businterface

3.3.1. De opbouw van de interface met de processor



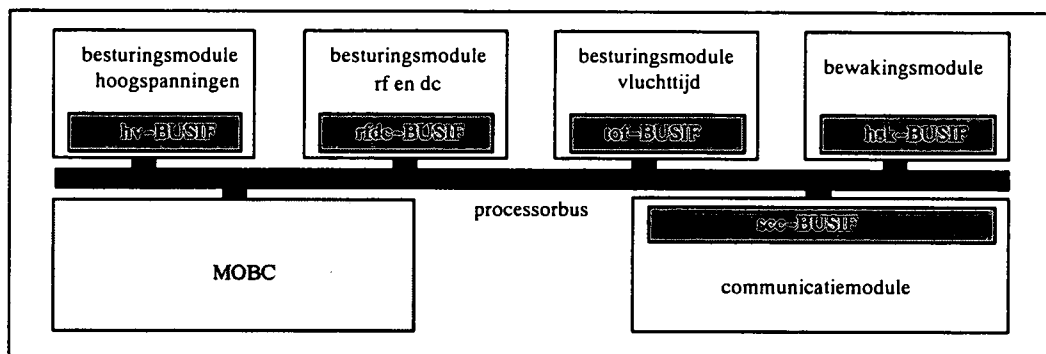
Figuur 3.3: De businterface.

Alle besturingsmodules zijn aan de processorbus verbonden via een standaard businterface. Elke businterface bestaat steeds uit twee elementen. Enerzijds een busbuffer tussen het datagedeelte van de processorbus en een lokale databus in de besturingsmodule zelf ($LD_7 \rightarrow LD_0$), anderzijds

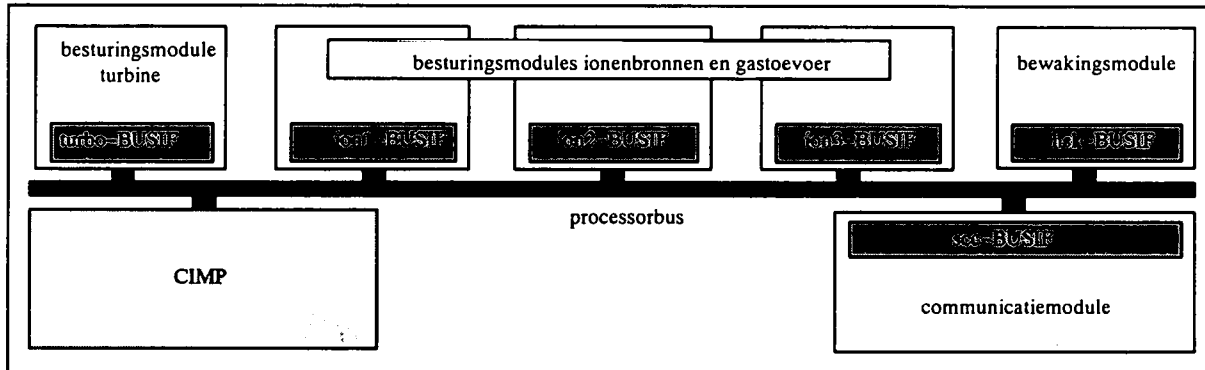
een EPLD (*Erasable Programmable Logic Device*) verbonden met het adres- en het controlegedeelte van de processorbus langs waar de processor de besturingsmodule beheert (figuur 3.3).

Als EPLD wordt een 5C090 van Intel gebruikt met programmeerbare AND-matrix, vaste OR-matrix en programmeerbare flipflop-uitgang. Dit EPLD wordt verder steeds aangeduid met BUSIF, een acroniem voor businterface.

In het SIDAMS/MACSIMS-instrument worden in totaal elf businterfaces gebruikt. Figuren 3.4 en 3.5 tonen hoe de verschillende businterfaces in de MOBC- en de CIMP-hardware met de respectievelijke processorbussen verbonden zijn.



Figuur 3.4: De BUSIF-componenten op de processorbus van de MOBC.



Figuur 3.5: De BUSIF-componenten op de processorbus van de CIMP.

3.3.2. De taak van de BUSIF-component

De hoofdbedoeling van het gebruik van BUSIF-componenten is de uitbreiding van de adresseringsmogelijkheden van de processor. In het ganse instrument moeten tientallen functies verzekerd worden (schakeloperaties, instellingen en uitlezingen van signaalconvertors, enz.). Het processorsysteem beschikt over een te beperkt aantal selectielijnen om al deze circuits afzonderlijk te bedienen.

Aangezien de instrumentfuncties gegroepeerd zijn in besturingsmodules, gematerialiseerd op elektronica-kaarten, werd een systeem bedacht om door de logische combinatie van één

selectielijn van de processor en enkele adreslijnen toch alle functies binnen één besturingsmodule te bedienen.

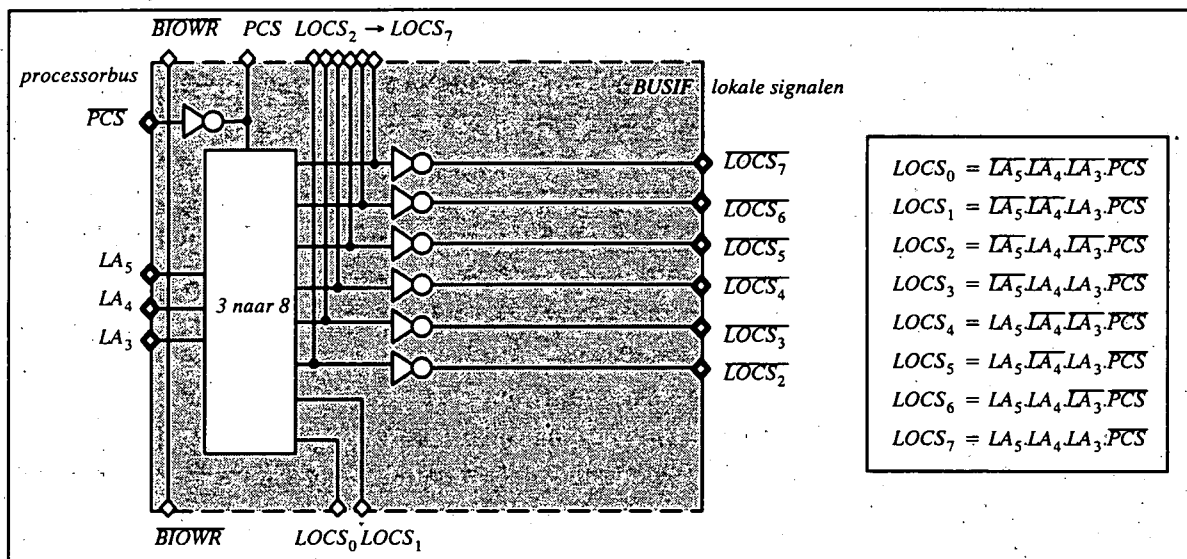
Voor de realisatie van de logische combinatie van deze processorsignalen tot lokale controlesignalen voor de besturingsmodule werd geopteerd voor een EPLD omdat deze, in tegenstelling tot een volledige hardwarerealisatie, een grote flexibiliteit biedt in de programmatiemogelijkheden (zowel combinatorische logica in het matrixgedeelte van het EPLD, als sequentiële logica in de uitgangssectie), steeds aanpasbaar is (mogelijkheid tot uitbreiding) en zeer weinig plaats inneemt op de elektronica-kaarten.

In elke module moeten specifieke spanningen aan- of afgelegd kunnen worden (schakelfunctie), moeten spanningen ingesteld worden (stuurfunctie) en moeten spanningen opgemeten worden (controlefunctie).

Hoewel deze functies in iedere module anders worden ingevuld, worden alle BUSIF-componenten omwille van de modulariteit toch met dezelfde logische combinaties geprogrammeerd. Zo'n standaard BUSIF is voor de meeste besturingsmodules in de huidige configuratie van het instrument dan ook overgedimensioneerd.

3.3.3. De werking van de BUSIF-component

3.3.3.1. Lokale selectiesignalen



Figuur 3.6: De lokale selectiesignalen van de BUSIF.

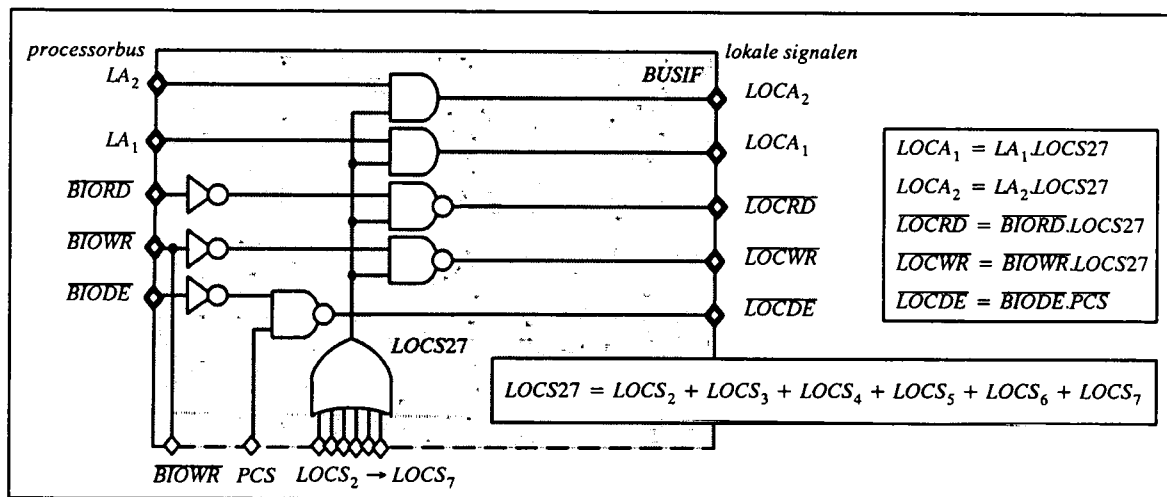
De processor selecteert een besturingsmodule en dus de daarin aanwezige BUSIF door middel van één van zijn PCS-selectielijnen. Uit drie van de vergrendelde adreslijnen van het processorsysteem (LA₅→LA₃) decodeert de BUSIF 8 lokale selectielijnen (LOCS₀→LOCS₇).

Hiervan worden de zes laatste selectiesignalen (LOCS₂→LOCS₇) ook werkelijk aangeboden voor de selectie van circuits in de besturingsmodule na inversie in de uitgangssectie van het EPLD (fysische lokale selectielijnen \overline{LOCS}_2 → \overline{LOCS}_7). De twee eerste selectiesignalen (LOCS₀ en LOCS₁) worden verder gebruikt in de interne BUSIF-logica (figuur 3.6).

3.3.3.2. Lokale controlesignalen

Voor het uitlezen van analoog-naar-digitaal- en het schrijven naar digitaal-naar-analoogconvertors plaatst de processor een lees- en een schrijfsignaal op de bus (\overline{BIORD} en \overline{BIOWR}). Deze signalen worden in de BUSIF ontkoppeld, door ze logisch te combineren met de fysieke lokale selectiesignalen. De zo gevormde lokale lees- en schrijfsignalen worden pas actief als één van de circuits in de besturingsmodule ook effectief geselecteerd wordt.

Op dezelfde manier worden ook de vergrendelde adreslijnen LA_1 en LA_2 van het processorsysteem ontkoppeld (figuur 3.7). Ze kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden als bijkomende controlelijnen voor inwendige selectie in meerkanaalscircuits, voor aparte toegang tot de onderste en bovenste helft van digitale codes met meer dan 8 bits, enz.



Figuur 3.7: De lokale controlesignalen van de BUSIF.

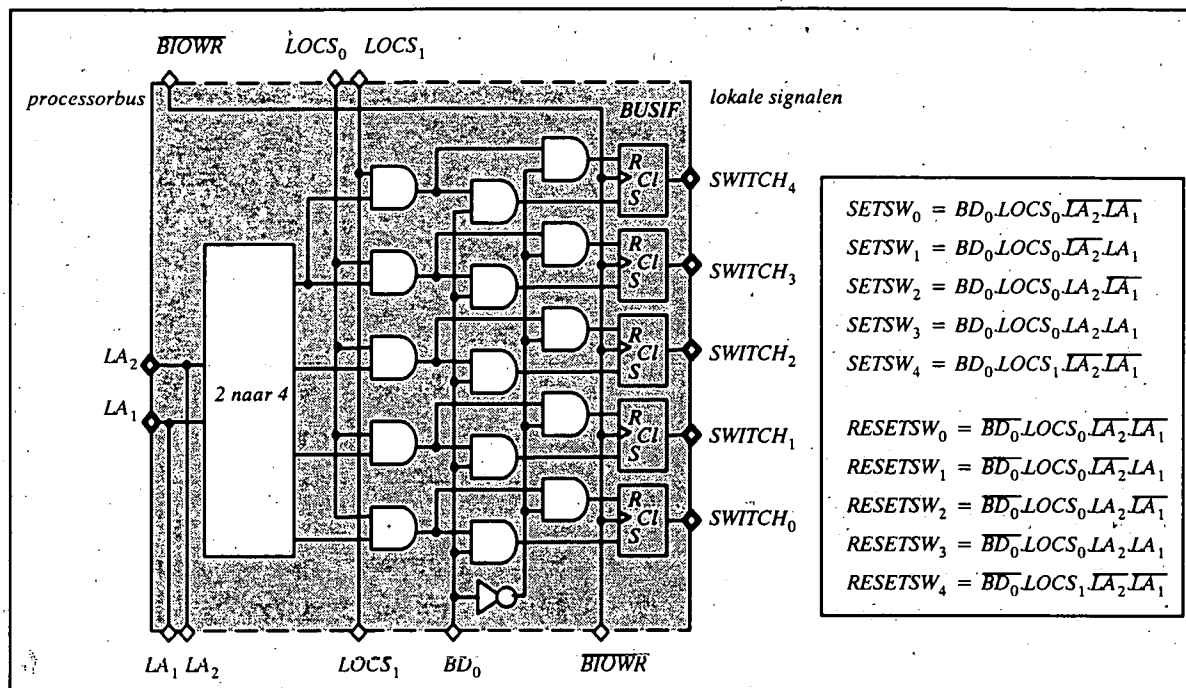
3.3.3.3. Lokale schakelsignalen

De BUSIF voorziet in 5 schakellijnen (figuur 3.8). De selectie van één van deze lijnen gebeurt door de logische combinatie van de twee eerste vergrendelde adreslijnen (LA_1, LA_2), op voorwaarde dat het interne lokale selectiesignaal $LOCS_0$ (voor $SWITCH_0 \rightarrow SWITCH_3$) of $LOCS_1$ (voor $SWITCH_4$) actief is.

De waarden die de schakelaars meekrijgen (0 of 1) worden aangebracht door de datalijn BD_0 van de processor. De stand van de schakelaars wordt vergrendeld in RS-flipflops in de uitgangssectie van het EPLD.

De waarde van de schakelaar wordt ingeklokt door het \overline{BIOWR} -signaal, de flipflops kunnen gereset worden door het \overline{BRESET} -signaal.

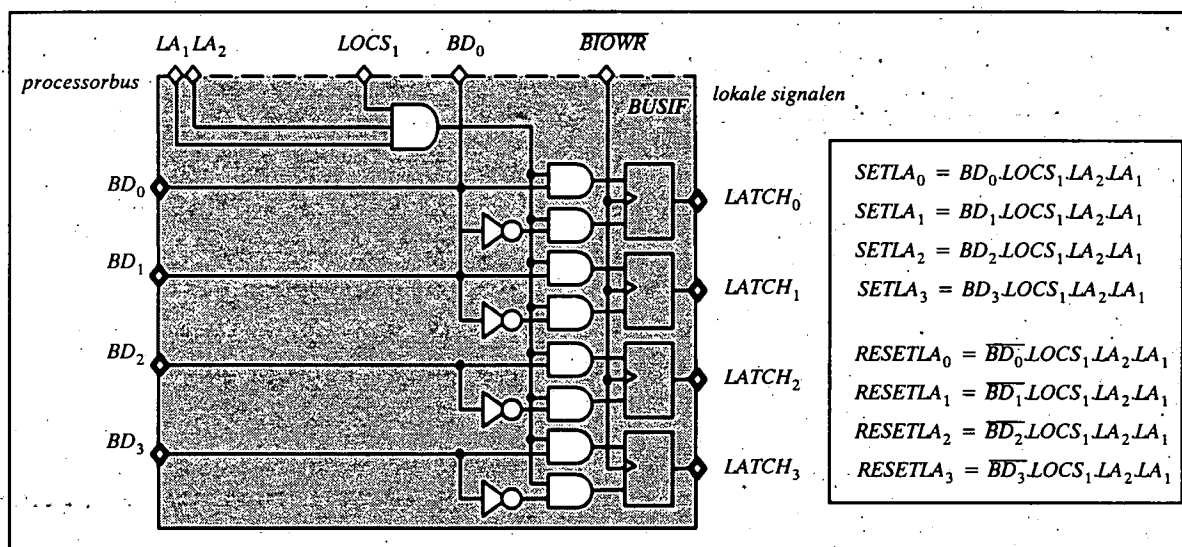
De uiteindelijke schakelsignalen die op kloktik t in de besturingsmodule worden aangeboden zijn dan : $SWITCH_i^t = SETSW_i^{t-1} + SWITCH_i^{t-1} \cdot RESETSW_i^{t-1}$ ($i = 0, \dots, 4$).



Figuur 3.8: De lokale schakelsignalen van de BUSIF.

3.3.3.4. Vergrendeld lokaal adresregister

Tenslotte wordt in de BUSIF een vergrendeld 4 bits register (*latch*) aangeboden, dat zijn waarde krijgt uit de 4 datalijnen ($\text{BD}_3 \rightarrow \text{BD}_0$) van de processor en geselecteerd wordt door de logische combinatie van LOCS_1 , LA_1 en LA_2 (figuur 3.9). De vergrendeling gebeurt ook hier weer door een stel RS-flipflops in de uitgangssectie van het EPLD.



Figuur 3.9: Het vergrendelde lokale 4 bits register van de BUSIF.

De registerwaarde op kloktik t is : $LATCH_i^t = SETLA_i^{t-1} + LATCH_i^{t-1}.RESETLA_i^{t-1}$ ($i = 0, \dots, 3$).

Het vergrendeld register kan bijvoorbeeld gebruikt worden bij de interne adressering van een 16-kanaalsmultiplexer.

3.3.3.5. Lokale data

Het "data enable"-signaal van de processorbus (\overline{BIODE}) wordt nog ontkoppeld voor lokaal gebruik (figuur 3.7). Dit gebeurt niet door combinatie met een fysisch lokaal selectiesignaal maar wel door de selectielijn van de processor (\overline{PCS})

De ontkoppeling van de processorbus door \overline{PCS} is nodig omdat niet alleen bij het uitlezen of instellen van lokaal geadresseerde circuits data over de processorbus circuleert, maar ook bij schakeloperaties (de waarde van de schakelaar) of bij het gebruik van het vergrendelde 4 bits register (de inhoud van het register).

Het lokale "data enable"-signaal (\overline{LOCDE}) activeert de busbuffer. Het plaatsen van data in de busbuffer of het lezen van data uit de buffer door de processor wordt rechtstreeks geregeld door het "transmit/receive"-signaal ($BIOTR$) op de processorbus.

3.3.3.6. Toegankelijkheid van de BUSIF-component vanuit software

Met het oog op een gemakkelijke integratie van de BUSIF-functies in de besturingssoftware werd een structuur gedefinieerd van de volgende vorm :

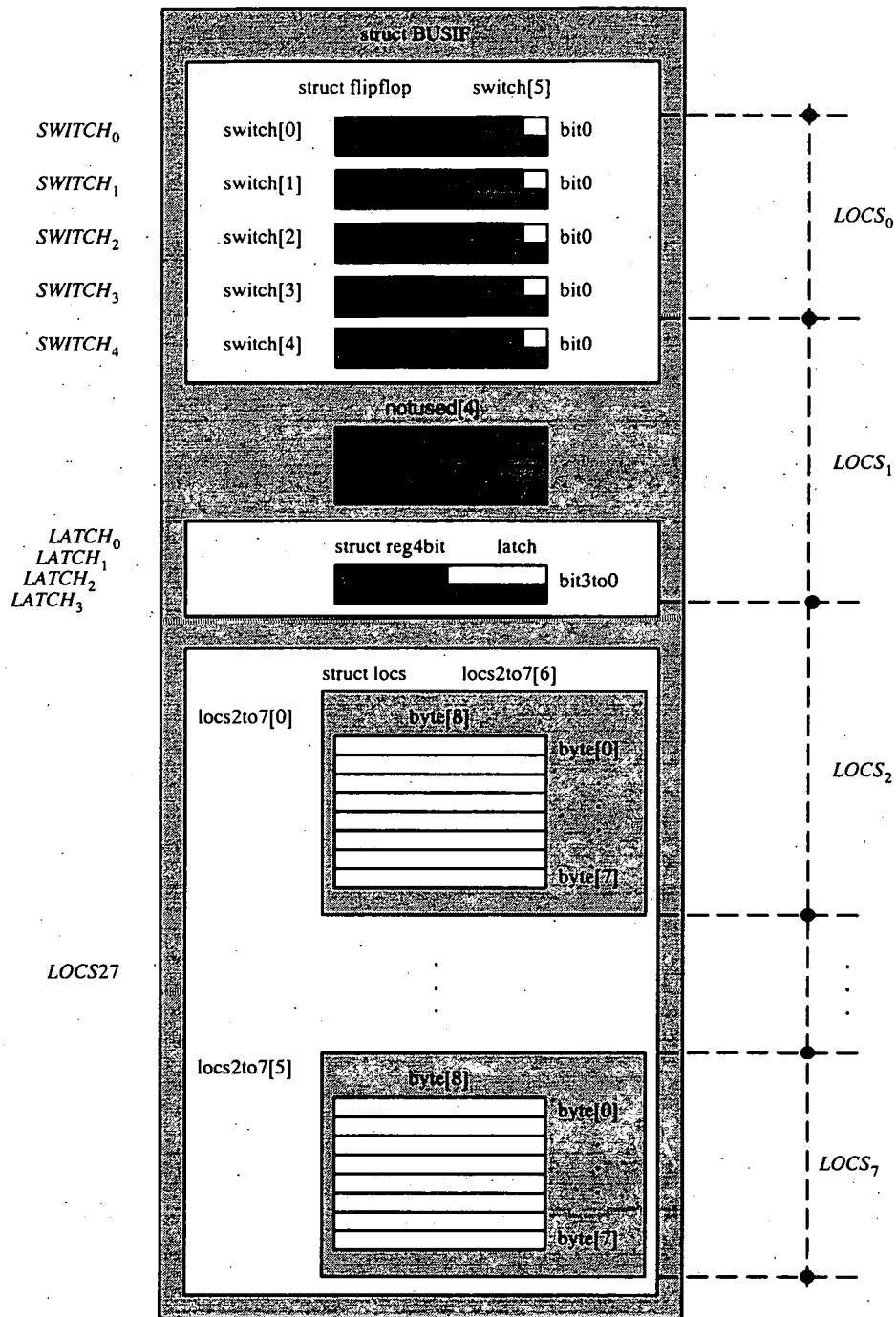
```
struct {
    struct flipflop  switch[5];    de vijf lokale schakellijnen
    char            notused[4];
    struct reg4bit  latch;        het lokale 4 bits vergrendelde adresregister
    struct locs     locs2to7[6];  6 selectiemogelijkheden voor de uitwisseling van data
} BUSIF;
```

De software BUSIF-structuur weerspiegelt dus volkomen de hardware eigenschappen van het EPLD in onze toepassing (figuur 3.10). Ze bevat namelijk een structuur die overeenkomt met de 5 lokale schakellijnen ($switch[5]$) :

```
struct {
    char    bit0;    0 of 1 voor aan- of afschakelen
    char    notused;
} flipflop;
```

Verder bevat ze een structuur ($latch$), waarlangs het lokale 4 bits vergrendelde adresregister kan geprogrammeerd worden :

```
struct {
    char    bits3to0;    4 bits voor lokale adressering
    char    notused;
} reg4bit;
```



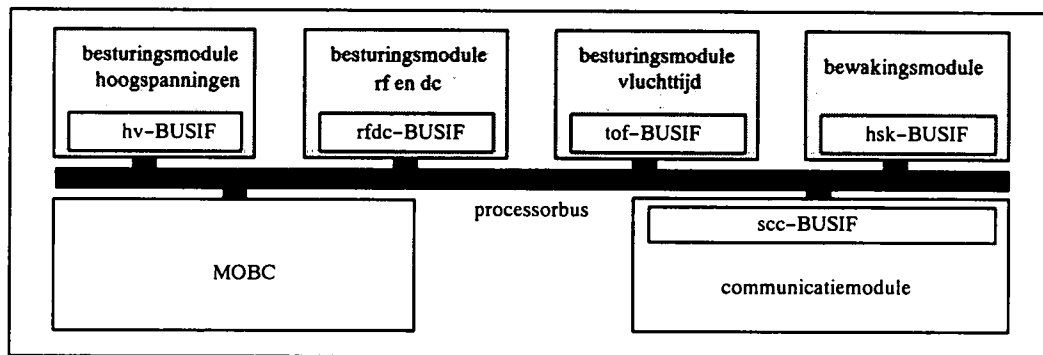
Figuur 3.10: Softwarestructuur geassocieerd aan de BUSIF-componenten.

Tenslotte bevat ze een stel van 6 structuren (`locs2to7`) waarin telkens 8 1-byte registers kunnen gebruikt worden voor lokale adressering en datatransfer :

```
struct {      char      byte[8];
                } locs;
```

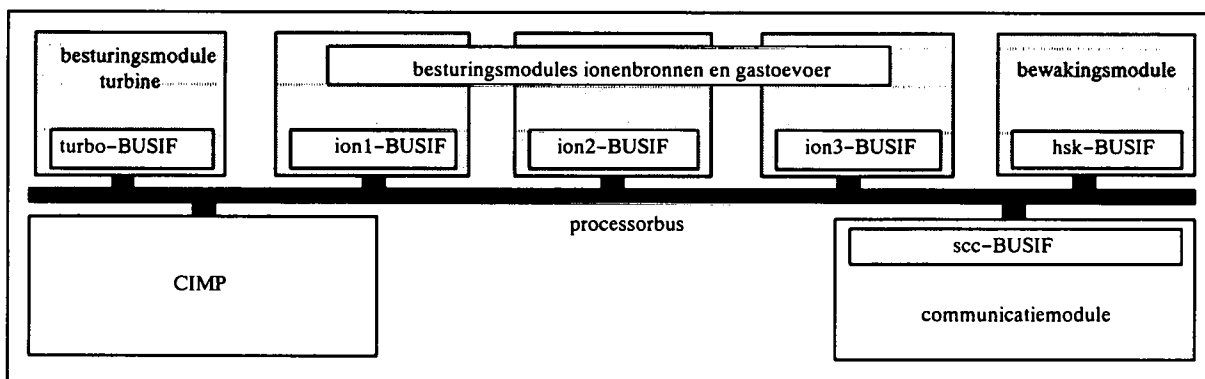

3.4. De algemene opbouw van besturingsmodules

In het SIDAMS/MACSIMS-instrument worden negen modules gebruikt voor de eigenlijke besturing van het instrument (figuur 3.11 en 3.12). Elk van de processorsystemen bevat een bewakingsmodule. In het massaspectrometergedeelte zijn er verder besturingsmodules voor de rf- en dc-spanningen in het inlaatgedeelte en de ionenoptiek, voor de hoogspanningen in de massascheider en de detector en voor de vluchttijdmeting. Bij de CIMP horen nog een besturingsmodule voor de turbine en drie modules voor de besturing van de ionenbron- en gastoevoerparameters.



Figuur 3.11: De besturingsmodules in de MOBC.

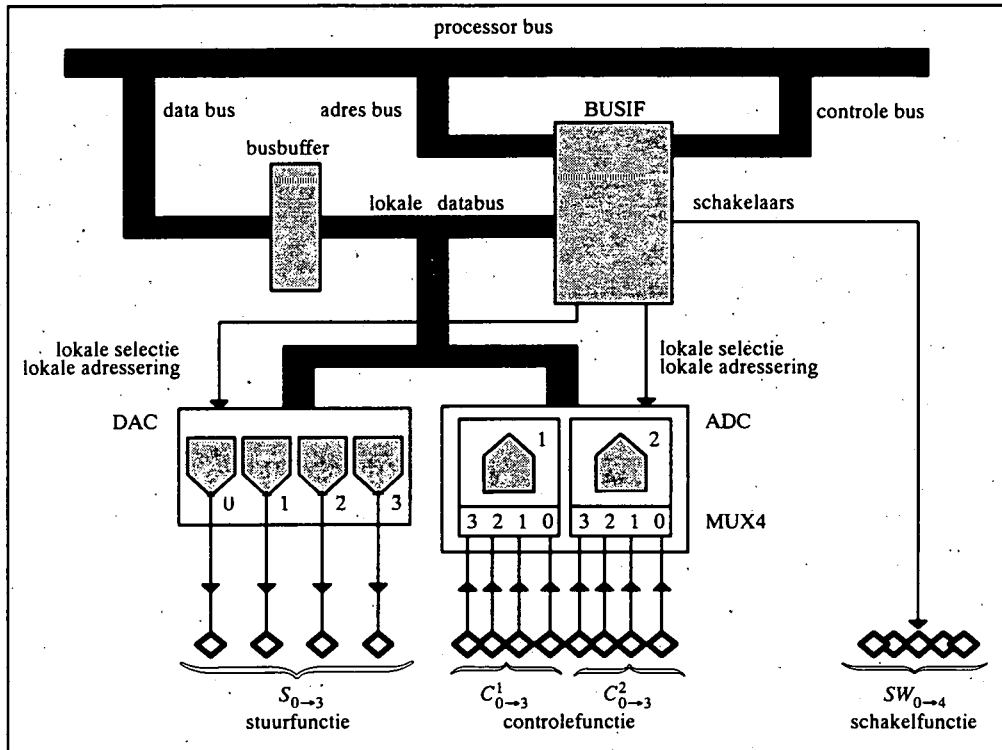
Elk van deze modules is voorzien van een interfacegedeelte met de processorbus bestaande uit een busbuffer en een BUSIF-component (zie 3.3.1). Niet alleen dit interfacegedeelte is gemeenschappelijk op de besturingsmodules, ook de verdere opbouw gebeurde volgens een vast patroon.



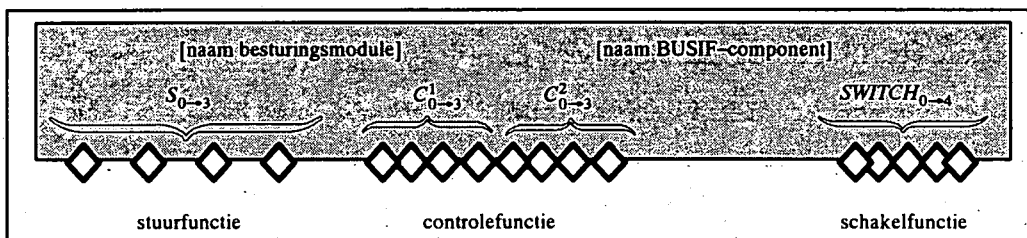
Figuur 3.12: De besturingsmodules in de CIMP.

In principe voorziet elke besturingsmodule in drie functies : schakelen, uitsturen en controleren. Voor elk van deze functies bieden de modules een aantal kanalen aan dat kan verschillen van de ene module tot de andere. Een besturingsmodule in maximale configuratie (figuur 3.13) bestaat uit 5 schakelkanalen (BUSIF), 4 stuurkanalen (4 digitaal-naar-analoogconvertors) en 8 controlekanalen (2 analoog-naar-digitaalconvertors met ingebouwde 4-kanaalsmultiplexer).

ADC's en DAC's worden geselecteerd en geadresseerd door lokale BUSIF-signalen. Bij de bespreking van de verschillende besturingsmodules zal de algemene structuur uit figuur 3.13 voorgesteld worden zoals in figuur 3.14 aangegeven. In de begeleidende tekst zullen lokale selectie en lokale adressering en de stuur-, controle- en schakelfuncties ingevuld worden.



Figuur 3.13: Algemene structuur van de besturingsmodules (maximale configuratie).

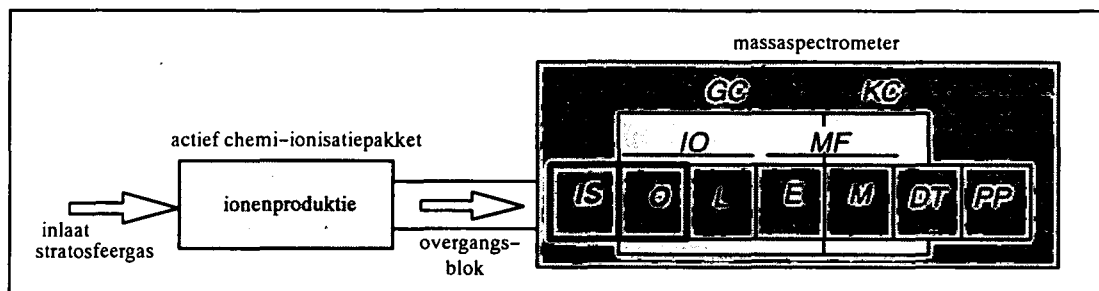


Figuur 3.14: Voorstellingswijze voor de besturingsmodules.

3.5. De besturing van de massascheider

3.5.1. De inlaatsectie en het ionentransportsysteem

3.5.1.1. De rf- en dc-spanningen



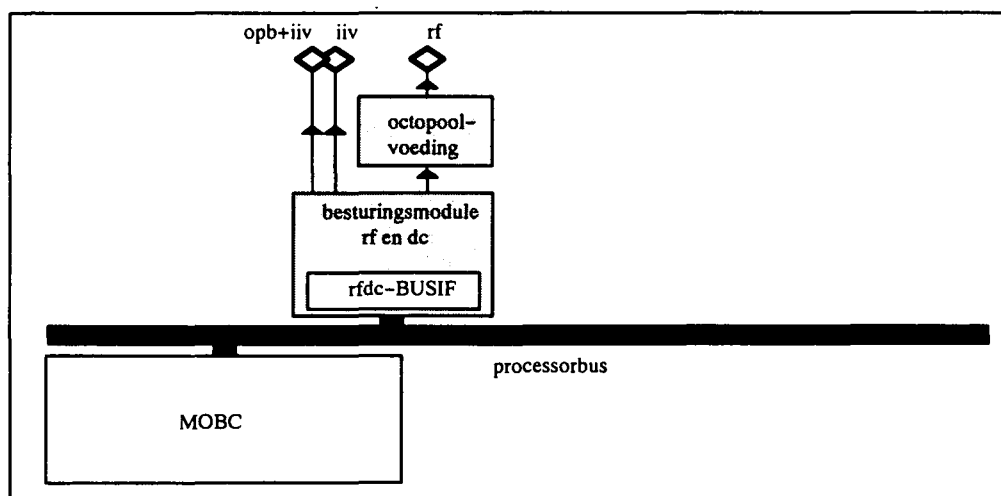
Figuur 3.15: De inlaatsectie (IS) en de octopool (O).

De ionen komen de massaspectrometer binnen via een opening in een inlaatflens. De inlaatflens bestaat uit een ronde plaat (70 mm diameter en 1,11 mm dik) in aluminium, die aan de onderflens van de cryopomp is bevestigd. Centraal in deze plaat is een aluminium cilindervorm geïsoleerd gemonteerd die de kleine inlaatopening (0,2 mm diameter) bevat. De inlaatflens kan op de *ion inlet voltage* of iiv-spanning gebracht worden.

Het transport van de ionen naar de massascheider toe gebeurt door middel van een octopool. De acht staven van de octopool worden concentrisch opgesteld op een cirkel met een diameter van 4 cm. De staven zijn 11 cm lang en hebben een diameter van 8 mm.

De staven krijgen afwisselend een negatieve en positieve hoogfrequente spanning, de rf-spanning :

$$\pm V \cos(\omega_0 t) \quad \left(f = \frac{\omega_0}{2\pi} = 1 \text{ MHz} \right) \quad (3.1)$$

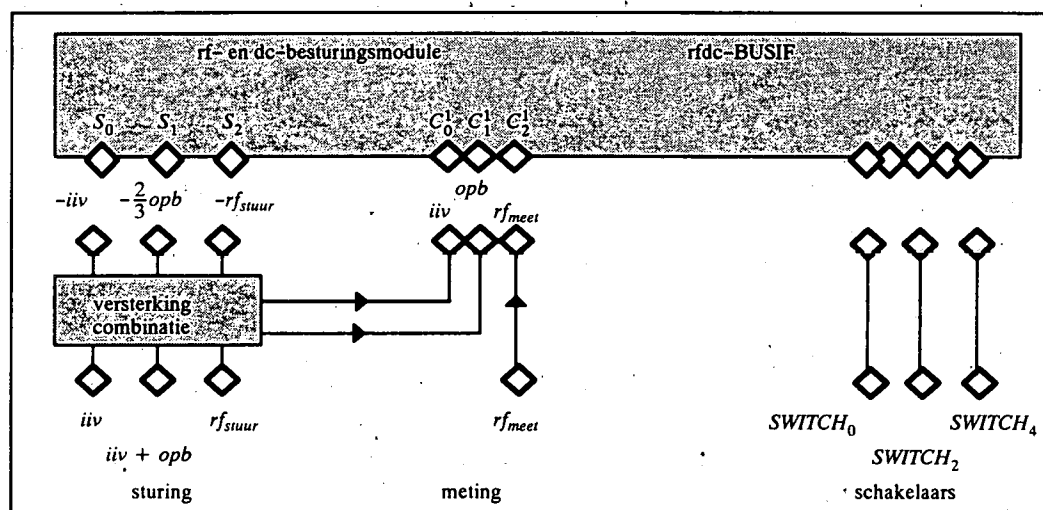


Figuur 3.16: De rf- en dc-besturingsmodule en de octopoolvoeding (MOBC).

Op de hoogfrequente spanning kan een vaste gelijkspanning gesuperponeerd worden, de *octopole bias*. Deze asspanning moet gerefereerd zijn ten opzichte van iiv om het gewenste potentiaalverschil te bekomen dat nodig is voor de extractie van de ionen uit de inlaatsectie. Als *octopole bias* wordt daarom de som van de iiv- en een opb-spanning gebruikt.

De iiv-, rf- en opb-spanningen worden verzameld onder de naam rf- en dc-spanningen. De besturing van deze spanningen werd geconcentreerd in één besturingsmodule van het MOBC-processorsysteem. De laagspanningsvoedingen van iiv en opb bevinden zich ook in deze module, de hoogfrequente octopoolvoeding is volledig gescheiden (figuur 3.16).

3.5.1.2. De rf- en dc-besturingsmodule



Figuur 3.17: De rf- en dc-besturingsmodule.

De rf- en dc-besturingsmodule (figuur 3.17) is opgebouwd volgens het standaard patroon (stuur-, controle- en schakelfuncties) maar heeft niet de maximale configuratie (zie 3.4).

Voor de sturing worden drie 14-bits digitaal-naar-analoogconvertors gebruikt. De ingestelde digitale codes leveren na omzetting, combinatie en versterking respectievelijk de spanningen iiv, iiv+opb en rf_{stuur} , een stuurspanning voor de hoogfrequente spanning in de octopoolvoeding. Selectie en adressering van de DAC's gebeurt met behulp van de lokale signalen $LOCS_2$ tot en met $LOCS_4$ en $LOCA_1$ en $LOCA_2$ van de rfdc-BUSIF (één DAC in de module wordt niet gebruikt).

De iiv-spanning is instelbaar tussen -10 V en 10 V ten opzichte van de structuur van het instrument, de opb-spanning kan geregeld worden tussen -15 en 15 V en dus kan de *octopole bias* (iiv+opb) ingesteld worden tussen -25 en 25 V. De stuurspanning voor de hoogfrequente octopoolvoeding rf_{stuur} kan ingesteld worden tussen -10 en 10 V.

De controle van de rf- en dc-spanningen gebeurt via één 12-bits analoog-naar-digitaalconverter met ingebouwde 4-kanaalsmultiplexer. De selectie van de ADC en de keuze van de multiplexerkanalen gebeurt met behulp van de lokale BUSIF-signalen $LOCS_6$, $LOCA_1$ en $LOCA_2$ (één multiplexerkanaal wordt niet gebruikt).

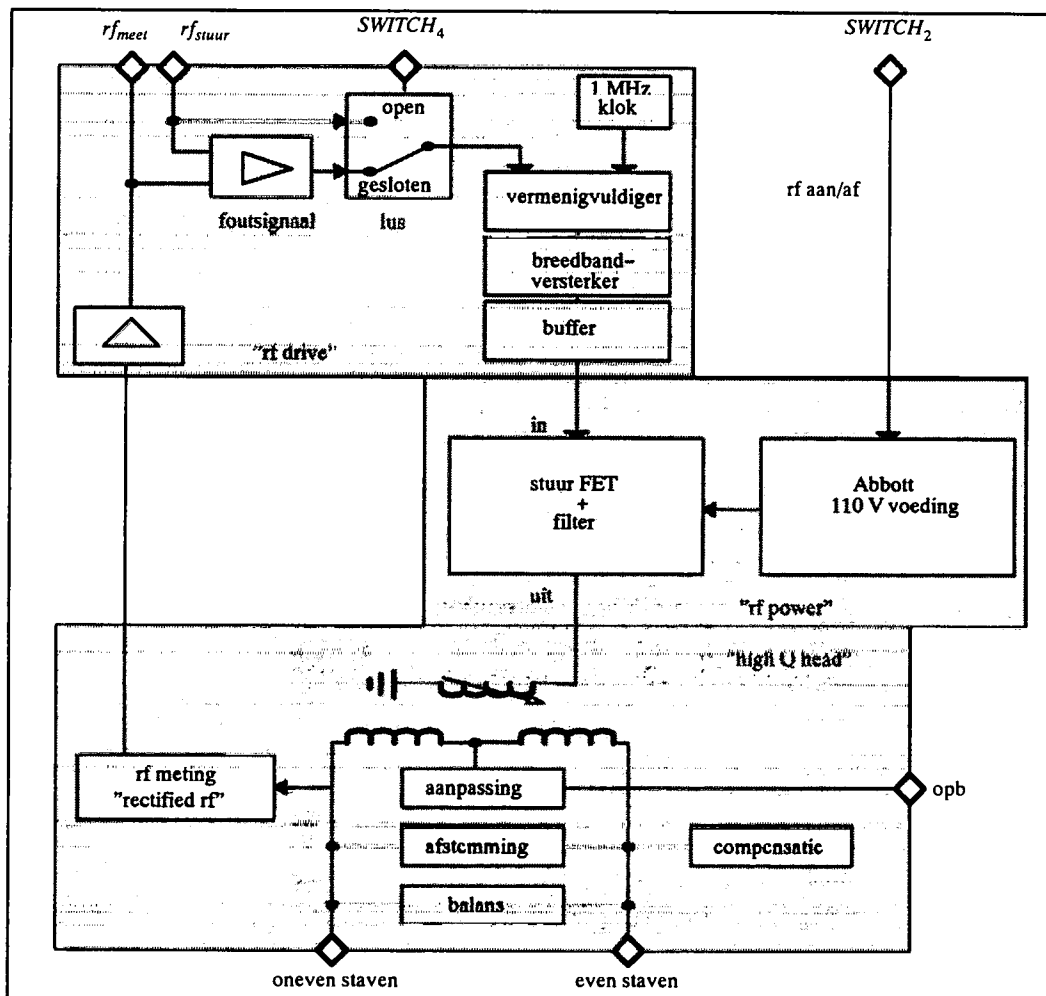
De ADC verwacht meetspanningen aan zijn ingangen die liggen tussen 0 en 5 V. De opgemeten stuurspanningen iiv en iiv+opb worden daarom door spanningsdeling binnen dit bereik gebracht. Het controlesignaal van de rf-spanning (rf_{meet}) wordt geleverd door de octopoolvoeding.

Drie van de vijf schakellijnen van de rfdc-BUSIF worden gebruikt :

- SWITCH₀ : het omschakelen van iiv tussen spectrometer- en elektrometermode voor vluchtmetingen (zie 3.7.3);
- SWITCH₂ : het aan- en afschakelen van de voeding van de octopoolsturing;
- SWITCH₄ : het omschakelen van de octopoolvoeding tussen de "open" en "gesloten lus"-mode (zie 3.5.1.3).

3.5.1.3. De hoogfrequente octopoolvoeding

De voeding (figuur 3.18) werd ontworpen voor een frequentie f_0 van 1 MHz, een maximale hoogfrequente amplitude van 600 V en een typische werkwaarde voor de hoogfrequente amplitude van 200 V.



Figuur 3.18: De hoogfrequente octopoolvoeding.

De octopoolstaven zijn verbonden met een LC-kring afgestemd op de frequentie f_0 . De zelfinductie is opgebouwd uit twee wikkelingen. De 4 oneven octopoolstaven zijn verbonden met de ene wikkeling, de andere, in tegenfase, met de tweede wikkeling. De afstemming gebeurt

door een regelbare condensator met middenaftakking. Bovendien is er voorzien in een balansregeling om de asymmetrie tussen de even en de oneven staven weg te regelen.

De LC-kring is gekoppeld met zijn sturing door een koppelwikkeling met regelbare koppelingsgraad. De sturing via deze wikkeling gebeurt door een eindtrap bestaande uit een vermogen-MOSFET.

De stuurschakeling voor deze FET ziet eruit als volgt. Een analoge spanningsvermenigvuldiger ontvangt aan zijn ene ingang een 1 MHz basissignaal (met vaste amplitude), waarvan de amplitude uiteindelijk variabel moet gemaakt worden. Aan zijn tweede ingang ontvangt de vermenigvuldiger een amplituderegelsignaal. Het geregelde signaal wordt via een breedbandversterker en een buffer aan de *gate* van de vermogen-MOSFET aangeboden.

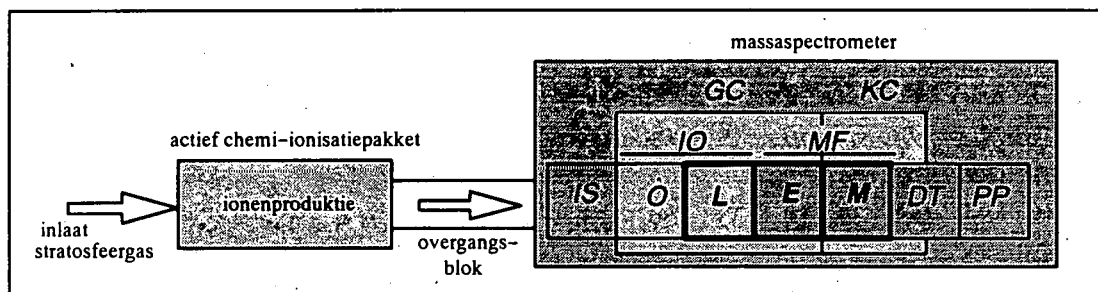
Het amplituderegelsignaal kan van tweeërlei oorsprong zijn. Ofwel is het de rf-stuurspanning rf_{stuur} afkomstig uit de rf- en dc-besturingsmodule. Dan werkt de voeding in "open lus"-mode. Ofwel is het een foutsignaal dat het verschil is tussen een zogenaamd "rectified rf"-signaal en het controlesignaal. Dit "rectified rf"-signaal is lineair afhankelijk van de amplitude van de rf-spanning aan de uitgang. In dit geval werkt de voeding in de "gesloten lus"-mode.

De keuze tussen open lus en gesloten lus, met andere woorden tussen controlesignaal of teruggekoppeld foutsignaal, wordt gemaakt in een analoge schakelaar, bediend door SWITCH₄ van de rfdc-BUSIF in de besturingsmodule.

SWITCH₂ van deze rfdc-BUSIF schakelt een 110 V-voeding aan of af. Deze voeding levert een spanning die, gefilterd en beschermd tegen hoogfrequente ruis, de LC-kring aanstuurt in de rf-uitgangstrap.

3.5.2. Het hoogspanningsgedeelte van de massaspectrometer

3.5.2.1. Het lenzensysteem en de massascheider



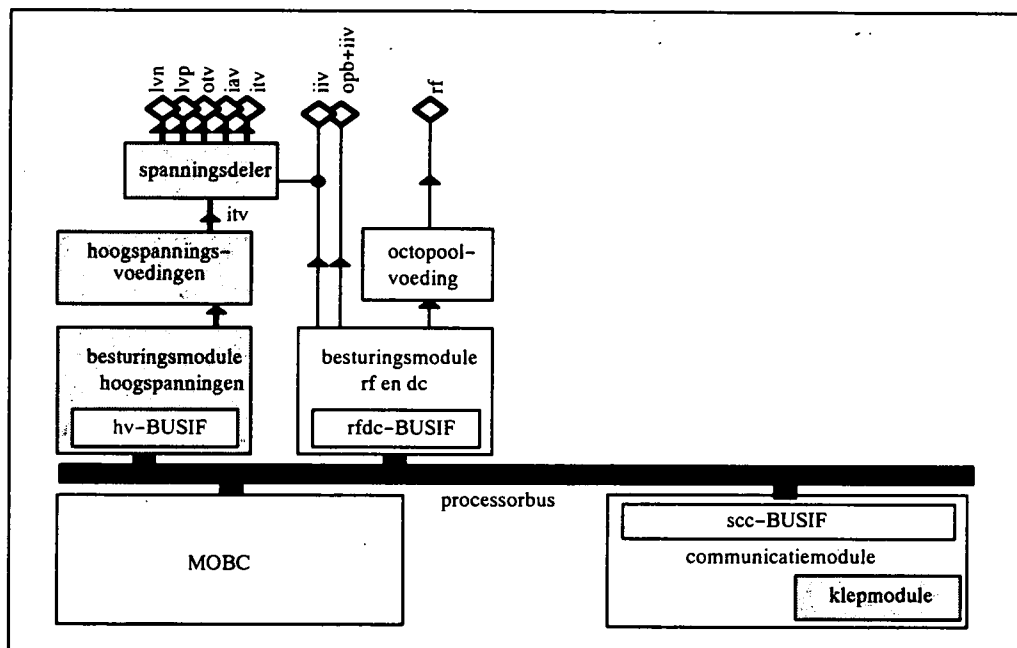
Figuur 3.19: Het lenzensysteem (L) en het massafilter (MF) met de elektrostatische condensator (E) en de permanente magneet (M).

Het eerste deel van het lenzensysteem is de "octopole bias"-lens, die de octopool afsluit van het achterliggende versnellingsgebied. Een opening met een diameter van 3 mm rond de octopoolas laat de ionen door. Deze flens wordt op de laagspanningspotentiala $iiv + opb$ gebracht. Het versnellingsveld achter de octopool wordt aangebracht door middel van een *Einzel*-lens, die aan in- en uitgang op een hoogspanning iav (*ion acceleration voltage*) staat. In principe is het mogelijk op de twee halfplaten in het midden van de lens verschillende hoogspanningen aan te leggen, met name de *lens voltage positive* (lvp) en de *lens voltage negative* (lvn).

Ook de inlaatspleet van de massascheider staat op de iav-spanning. De massascheider bestaat uit twee delen : een elektrostatische condensator en een permanente magneet.

Ionen die aan de ingang van de condensator aangeboden worden komen er terecht in een elektrisch veld binnen een bepaalde geometrie. De condensator heeft een straal op de as van 10,5 cm bij een hoek van $59,4^\circ$. De as van de condensator bevindt zich op de iav-spanning en de beide afbuigplaten respectievelijk op de *inner toroidal* en de *outer toroidal voltage* (itv en otv).

Er bestaat een lineair verband tussen itv, iav en otv [Moor 89a] dat voor de SIDAMS/MACSIMS-condensator wordt weergegeven door de volgende verhoudingen : $\frac{itv}{iav} = 1,105$ en $\frac{otv}{iav} = 0,905$. Omdat de itv-spanning steeds groter is dan iav en otv werd voor itv een voeding ontwikkeld en worden iav en otv (en ook lvn en lvp) uit itv afgeleid door spanningsdeling (figuur 3.20) met als referentie de iiv-spanning.



Figuur 3.20: De hoogspanningsvoeding en spanningsdeler voor het lenzensysteem en de massascheider en de module voor de bediening van de afsluitklep (MOBC).

Uiteindelijk kan gesteld worden, dat verandering van itv, verandering van iav en otv impliceert en bepalend is voor het massabereik van het instrument. Daarom moet de itv-voeding een zeer stabiele spanning kunnen leveren. Instabiliteit van de itv-spanning vertaalt zich rechtstreeks in piekverbreding of -verschuiving en dus in een lagere massaresolutie.

De permanente magneet (samarium-kobaltverbinding) heeft een afbuighoek van $96,6^\circ$ en de spleet tussen de magneetschoenen is 7 mm. De afbuigstraal, afhankelijk van de massa-tot-ladingsverhouding van de ionen, varieert tussen 28 mm en 83,9 mm. In het homogeen veldgebied bedraagt de magnetische inductie 0,64 T.

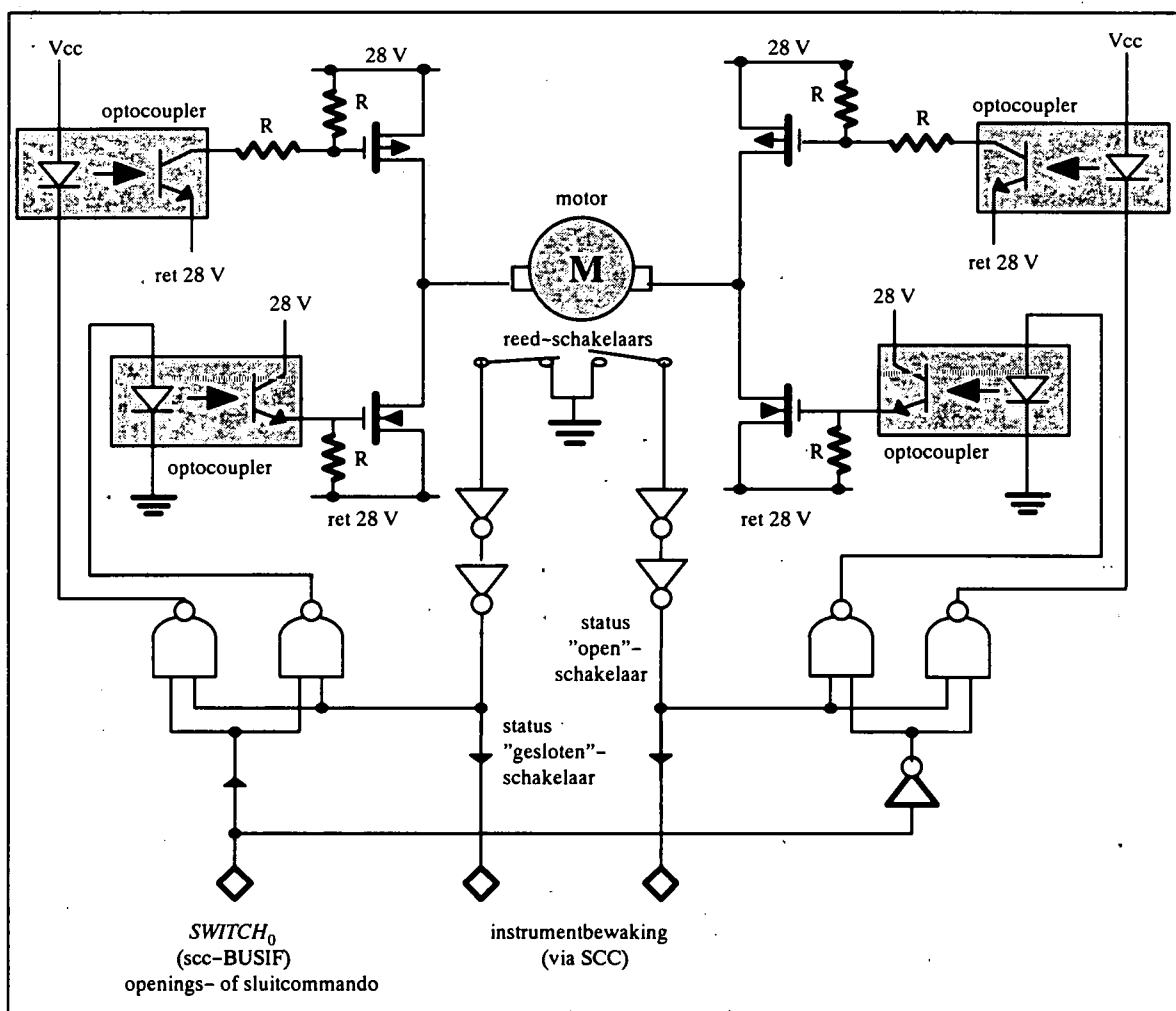
Tussen condensator en magneet bevindt zich een motorgestuurde afsluitklep, die het hoog vacuüm detectorgedeelte (waarvan de magneet deel uitmaakt) scheidt van het laag vacuüm optiekgedeelte (waarin de condensator zich bevindt). Wanneer het instrument niet in werking is beschermt deze klep de detector ook tegen vocht.

De aluminium afdichtingsklep wordt door middel van een armscharnier bediend door een DC-motor, voorzien van twee *reed*-schakelaars voor de beperking van de klepposities.

De klepelektronica werd geïntegreerd in de communicatiemodule van de MOBC die gebruikt wordt voor de dialoog tussen de MOBC en de pixelprocessor en voor telemetingdoeleinden (figuur 3.54). Het communicatiegedeelte van deze module wordt later besproken (zie 3.9).

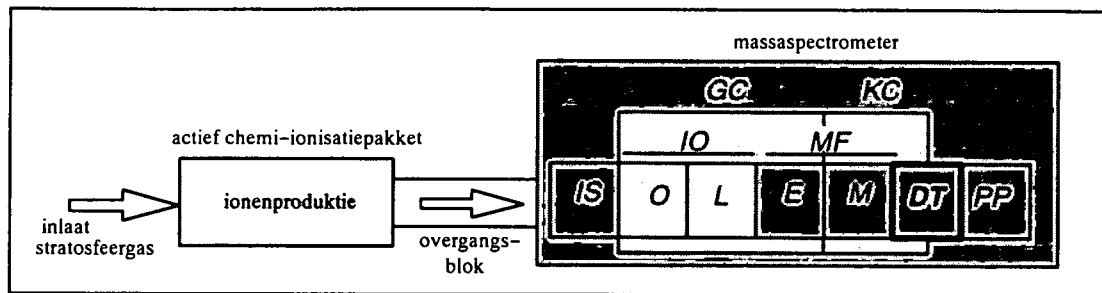
De klep wordt bestuurd door een logische gecombineerde uitlees-sturingseenheid. Het samengaan van de "gesloten"-meettoestand (inlezen *reed*-schakelaar) en een openingscommando, zal een openingsstroom naar de motor sturen. De combinatie van een "open"-meting (inlezen *reed*-schakelaar) en een sluitcommando doet een sluitingsstroom vloeien. Andere combinaties zijn logisch uitgesloten. Het openings- of sluitingscommando wordt geïmplementeerd via een schakellijn (SWITCH₀) van de BUSIF-component in de communicatiemodule

De *reed*-schakelaars worden uitgelezen via twee "general purpose input"-klemmen van een circuit (*Serial Communications Controller SCC*) dat verder wordt gebruikt voor seriële communicatie. De status van de schakelaars worden voor bewakingsdoeleinden (*housekeeping*) aan de processor doorgegeven. In figuur 3.21 is het elektrische schema gegeven van de klepelektronica.



Figuur 3.21: Elektrisch schema van de klepsturing.

3.5.2.2. De elektro-optische ionendetector



Figuur 3.22: De elektro-optische ionendetector (DT).

Het ingangsrooster van de detector staat op de *ion acceleration voltage* (iav). Vanaf het rooster krijgen de ionen een naversnelling mee naar de ingang van de *microchannel*-plaat. De ingang van de *microchannel*-plaat bevindt zich daarom op de hoogspanning $iav + pav$. Het is dus een potentiaalverschil pav (*post acceleration voltage*) dat zorgt voor de bijkomende versnelling van de ionen.

De *microchannel*-plaat in de SIDAMS/MACSIMS-detector is een 0,96 mm hoge bundel capillaire buisjes en bestaat eigenlijk uit twee in V op elkaar geplaatste *microchannel*-platen van het Chevron-type. Elk buisje heeft een diameter van 12 μm .

Een *microchannel*-plaat is een secundaire elektronenvermenigvuldiger. Secundaire elektronen ontstaan wanneer een ladingsdrager inslaat op het voorvlak van de plaat (FeCr-elektrode). Deze secundaire elektronen bewegen zich, onder invloed van een hoogspanning cpv over de *microchannel*-plaat (*channel plate voltage*) naar de uitgang. Aan de ingang van de plaat staat een spanning $iav + pav$, aan de uitgang $iav + pav + cpv$.

De versterkingsfactor van de *microchannel*-plaat wordt in eerste instantie bepaald door de spanning die erover staat. Deze cpv -spanning moet rond de 1500 V liggen om een versterking van $5 \cdot 10^5$ te bekomen.

Tussen de uitgang van de *microchannel*-plaat en het fosforscherf wordt de elektronenwolk versneld. Daarvoor wordt het scherm op de spanning $iav + pav + cpv + psv$ geplaatst, zodat de versnelling gebeurt onder invloed van een potentiaalverschil psv (*phosphor screen voltage*).

De grootte van dit potentiaalverschil en de afstand tussen de uitgang van de *microchannel*-plaat en het fosforscherf zijn bepalend voor de bekomen lichtintensiteit. Bij een vaste afstand tussen *microchannel*-plaat en fosfor levert een groter potentiaalverschil een grotere lichtintensiteit. De bovengrens voor psv wordt bepaald door de verzadigingsgrens van de fosfor en de detector.

De afstand tussen *microchannel*-plaat en fosforscherf moet groot genoeg zijn om doorslag te voorkomen ten gevolge van mechanische onnauwkeurigheden en/of vervuiling, maar moet klein genoeg zijn om een te grote spreiding van de elektronenwolk te voorkomen. Het gevaar op doorslag is ook de belangrijkste reden waarom de spanning psv een bovengrens van 1900 V heeft.

Het fosforscherf (P20) bevindt zich op de ingangszijde van de glasvezelverbinding. In feite doet een 10 nm dikke aluminiumfilm bovenop de fosfor dienst als anode voor de elektronenversnelling. De dikte van deze film is dusdanig dat de elektronen er nog wel door kunnen dringen, maar dat het licht dat op de achterliggende fosfor ontstaat niet terugvalt op de uitgang van de *microchannel*-plaat. In recentere versies werd de aluminiumfilm weggelaten.

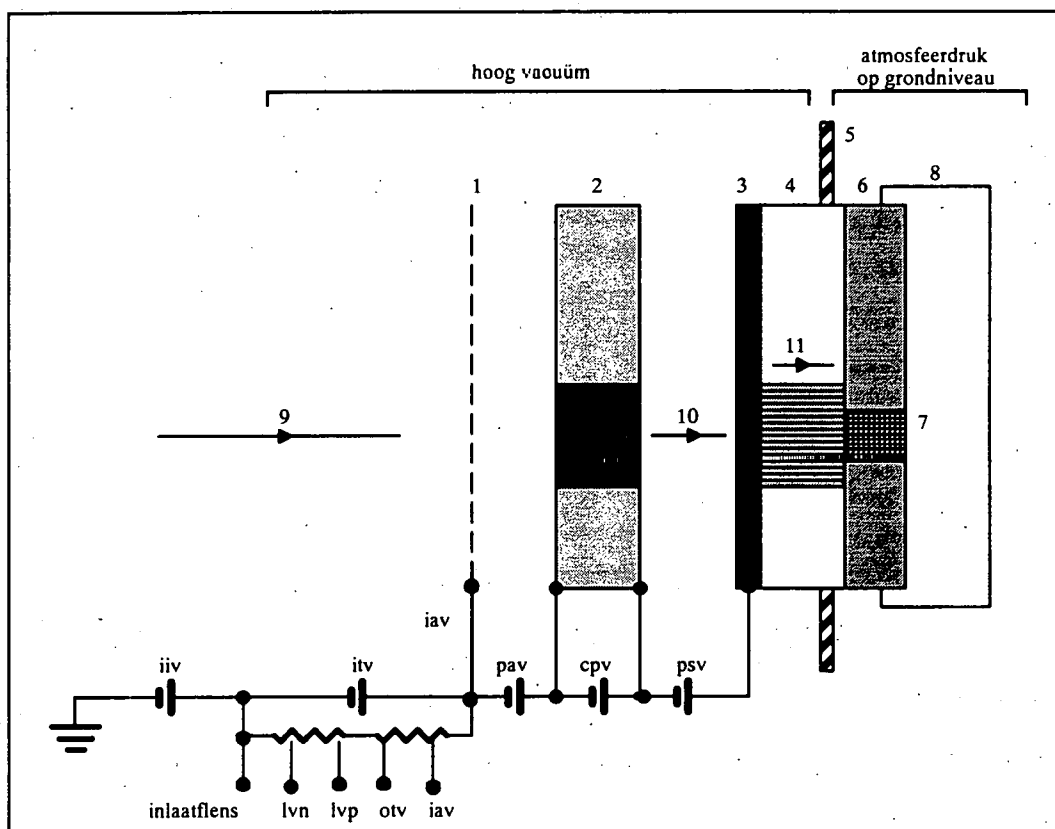
De glasvezelverbinding zorgt voor de doorgang van de fotonen uit het hoog vacuüm gedeelte van de massaspectrometer naar het gedeelte dat op atmosferedruk op grondniveau staat. De verzegeling gebeurt via kunststof O-ringen. De gelijkde overgang van glasvezel naar halfgeleider is extra verzorgd om verspreiding van licht zoveel mogelijk te beperken.

De vezels hebben een diameter van $6 \mu\text{m}$, de lengte is 16 mm en het nuttige oppervlak heeft een diameter van 26,6 mm. De transmissie ligt tussen 50 en 60 %.

De uitgang van de glasvezelverbinding wordt bekleed met een In_3SnO_2 -film om de detector tegen storingen te beschermen die ontstaan aan de overgang tussen de elektrisch niet-geleidende glasvezels en het halfgeleidermateriaal van de detector [Moor 89a].

Eén SIDAMS/MACSIMS-detectoroog bestaat uit een rij van 512 fotodiodes waarin de fotonen in elektrische lading worden omgezet. De diodes hebben een hoogte van 2,5 mm en een breedte van $50 \mu\text{m}$. De afstand tussen de pixelcentra bedraagt $50 \mu\text{m}$. De detector heeft twee gelijke ogen en dus een totale lengte van $2 \times 25,6 \text{ mm} + 24 \text{ mm}$ (opening tussen de ogen).

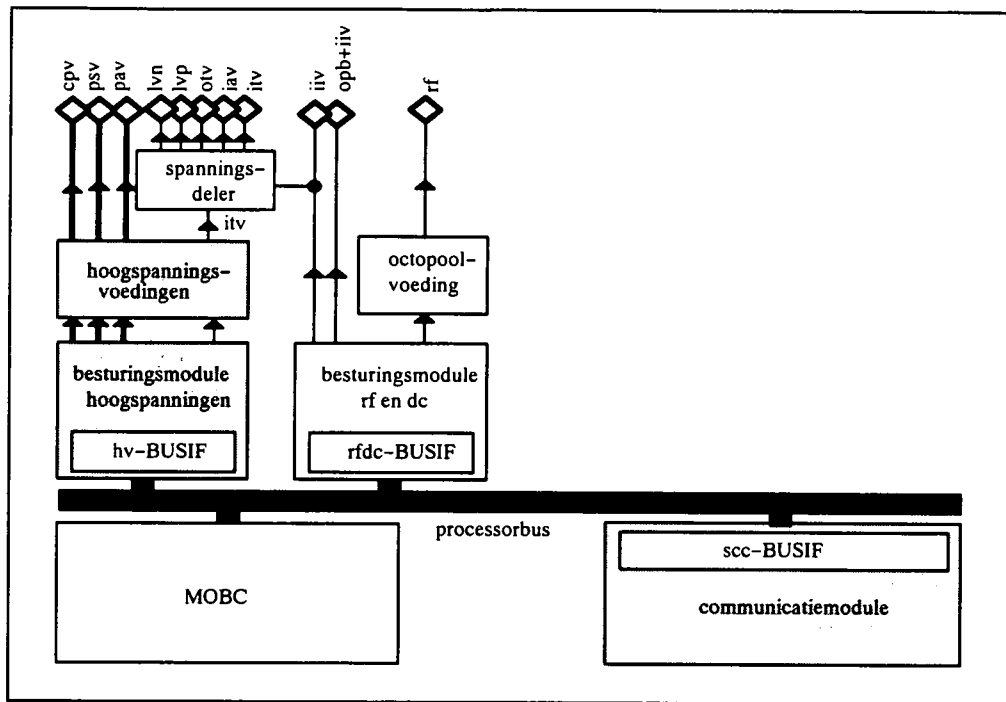
In figuur 3.23 wordt het voedingsschema van de detector hernomen.



Figuur 3.23: Voedingsschema van de elektro-optische ionendetector (voor negatieve ionen).

1. rooster ; 2. microchannel-plaat ; 3. fosforscherm ; 4. glasvezelverbinding ;
5. scheiding hoog vacuüm - normale druk ; 6. detector ; 7. pixels ; 8. nabijheidselektronica ; 9. ionen ;
10. elektronen ; 11. fotonen

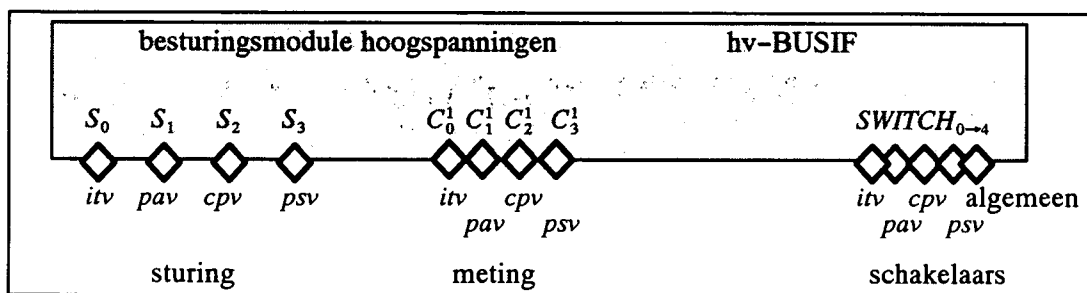
De iav-, pav-, cpv- en psv-spanning worden tezamen aangeduid als de hoogspanningen in de massaspectrometer. Vanuit één module van het MOBC-processorsysteem worden de vier hoogspanningen bestuurd. De eigenlijke hoogspanningsvoeding is gescheiden (figuur 3.24).



Figuur 3.24: De hoogspanningsvoedingen voor de detector en de module voor communicatie met de pixelprocessor (MOBC).

3.5.2.3. De besturingsmodule voor de hoogspanningen

Net zoals de rf- en dc-besturingsmodule is de besturingsmodule voor de hoogspanningen (figuur 3.25) opgebouwd volgens het standaard patroon (stuur-, controle- en schakelfuncties). Ze heeft ook niet de maximale configuratie (zie 3.4).



Figuur 3.25: De besturingsmodule voor de hoogspanningen.

Vier 14-bits digitaal-naar-analogoconvertors leveren een stuurspanning (tussen 0 en 10 V) aan de respectievelijke hoogspanningsvoedingen. Selectie en adressering van de DAC's gebeurt op dezelfde manier als in de rf- en dc-module, namelijk via de lokale signalen LOCS₂ tot en met LOCS₅ en LOCA₁ en LOCA₂ van de hv-BUSIF.

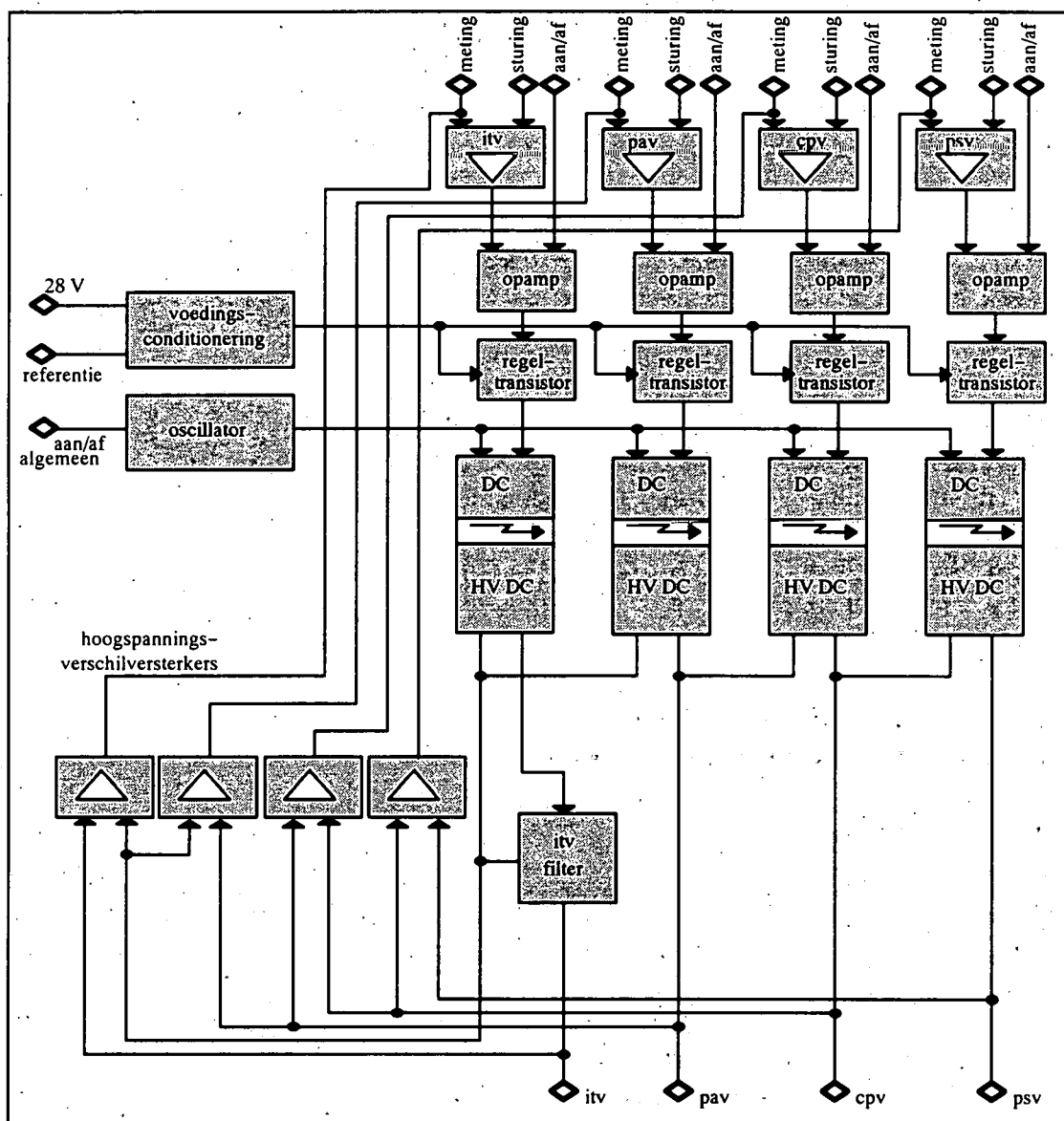
Voor de controle van de hoogspanningen worden door de respectievelijke hoogspanningsvoedingen meetsignalen geleverd (tussen 0 en 5 V) die worden gedigitaliseerd

in één 12-bits analoog-naar-digitaalconverter met ingebouwde 4-kanaalsmultiplexer. De ADC wordt geselecteerd door de lokale selectielijn $LOCS_6$ en de multiplexerkanalen worden gekozen door $LOCA_1$ en $LOCA_2$.

De schakellijnen $SWITCH_0$ tot $SWITCH_3$ van de hv-BUSIF worden gebruikt voor het aan- en afschakelen van itv, pav, cpv en psv. $SWITCH_4$ is een algemene schakelaar voor de ganse hoogspanningsvoeding.

3.5.2.4. De hoogspanningsvoeding

Vier hoogspanningsmodules werden ontwikkeld bij de firma INVERTO volgens gevraagde specificaties. Ze worden gebruikt voor de itv-, pav-, cpv- en psv-spanningen (figuur 3.26).



Figuur 3.26: De hoogspanningsvoeding.

Uitgaande van de 28 V batterijspanning wordt een uitgangsspanning gemaakt die tussen 100 V en 2500 V ligt, afhankelijk van de vanuit de besturingsmodule aangelegde stuurspanning (0 tot 10 V). De rimpel op de uitgangsspanning bedraagt maximaal $5 V_{pp}$. De voeding werd gespecificeerd om een maximale stroom van $250 \mu A$ te kunnen leveren. Tussen de primaire en de secundaire en tussen de secundaire en de elektrische massa wordt een isolatiespanning van 8000 V geëist. Een meetsignaal, dat tussen 0 en 5 V ligt, wordt aan de besturingsmodule aangeboden.

Eén van de vier modules is van hogere kwaliteit. De itv-module garandeert een rimpel van hoogstens $0,5 V_{pp}$, door toedoen van een extra filter. Een zeer stabiele itv-spanning is immers belangrijk met het oog op een goede massaresolutie.

De hoogspanningsvoeding bestaat uit vier modules, ingeplugd op een moederbord. Op dit moederbord wordt gezorgd voor de laagspanningsvoeding en voor een oscillatiefrequentie voor de vier hoogspanningsmodules. De eerste vier schakellijnen van de hv-BUSIF doen dienst als *enable*-signaal voor de werking van de respectievelijke modules. De volledige hoogspanningsvoeding kan aan- en afgeschakeld worden via de algemene schakellijn (SWITCH₄).

Elk van de vier hoogspanningsmodules is opgebouwd als een regelsysteem waarbij de gemaakte hoogspanningen aan de uitgang worden teruggekoppeld naar de ingang via hoogspanningsverschilversterkers.

Centraal in de opbouw van elke module staat een hoogspanningstransformator met dubbele primaire wikkeling, in *push-pull* aangestuurd op het ritme van het kloksignaal van het moederbord.

De primaire voedingsstroom van de transformator wordt geregeld in een transistor die gestuurd wordt door het verschil (operationele versterker) tussen het stuursignaal afkomstig van de besturingsmodule en een meetsignaal dat teruggekoppeld wordt vanaf de secundaire van de hoogspanningsmodule. De AC-uitgangsspanning van de transformator wordt gelijkgericht en gefilterd. Het meetsignaal wordt terug aangeboden aan de besturingsmodule.

3.5.2.5. De eigenschappen van het detectorgeheel

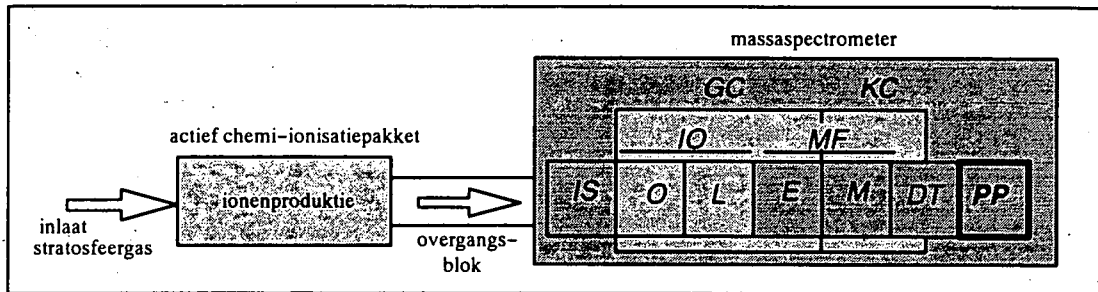
De elektro-optische ionendetector heeft een goede lineariteit (het verband tussen de in de halfgeleider-elementen opgeslagen ladingen en de ionenstroombichtheid) met een maximale afwijking van 2 %. De signaalhomogeniteit over het detectoroppervlak ligt, behalve in de randpixels, binnen een ± 10 % marge. Deze inhomogeniteit is hoofdzakelijk te wijten aan de *microchannel*-plaat. Elk spectrum zal daarom moeten gecorrigeerd worden door middel van een niet-uniformiteits-*frame*.

De piekverbreding in de detector bedraagt een factor 2 tot 3. Een ionenmassapijk heeft op de beeldrechte aan de uitgang van de massascheider een typische breedte van $100 \mu m$. In ideale omstandigheden zou dit moeten resulteren in een piek op de halfgeleiderdetector die over ongeveer 3 pixels is uitgesmeerd. In werkelijkheid wordt een piek bekomen die 2 tot 3 keer zo breed is en dus over 6 tot 7 pixels is uitgesmeerd. De piekverbreding ontstaat door de cumulatieve werking van afwijkingen op alle niveaus van de ideale detectorconfiguratie [Moor 89a].

Het dynamisch bereik van de detector wordt bij vaste spanningen p_{av} , c_{pv} en p_{sv} , theoretisch door de resolutie van de analoog-naar-digitaal-omzetting bepaald. Gezien een 12 bits AD-converter wordt gebruikt is het maximale dynamische bereik gelijk aan 4095. Dit wordt

echter verminderd tot ongeveer 1000 door ruis van allerlei oorsprong, zowel systematische als statistische, en door een temperatuur- en pixelafhankelijke *offset* (signaal op de detector wanneer geen ionen worden gemeten). Een groot deel van de *offset* wordt weggewerkt door consequent de achtergrond van de spectra af te trekken.

3.5.2.6. De detectorelektronica en de pixelprocessor



Figuur 3.27: De pixelprocessor (PP).

Bij het begin van een uitlezing van de fotodiodelijn worden condensators, in parallel met de gesperde fotodiodes, opgeladen door middel van een spanning U_1 . De inval van licht op een fotodiode zorgt voor een lekstroom evenredig met het aantal fotonen en ontladde de condensators tot een spanning U_2 . De spanning U_2 wordt pixel per pixel, via schakeltransistoren, op de videolijn gebracht, versterkt en gedigitaliseerd. De *scan*-duur voor één fotodiodelijn bedraagt 512 keer de klokperiode. De tijd tussen twee opeenvolgende uitlezingen van de fotodiodes bedraagt 27 ms.

De sturing van de detectoruitlezing (start-, klok-, "end of scan"-pulsen) en de verwerking van de over de videolijn ontvangen *scans*, gebeurt door middel van een apart microprocessorsysteem (de pixelprocessor).

De integratie van de pixelprocessor in de SIDAMS/MACSIMS-hardware wordt besproken in 3.9.3.

3.6. De besturing van het actief chemi-ionisatiepakket

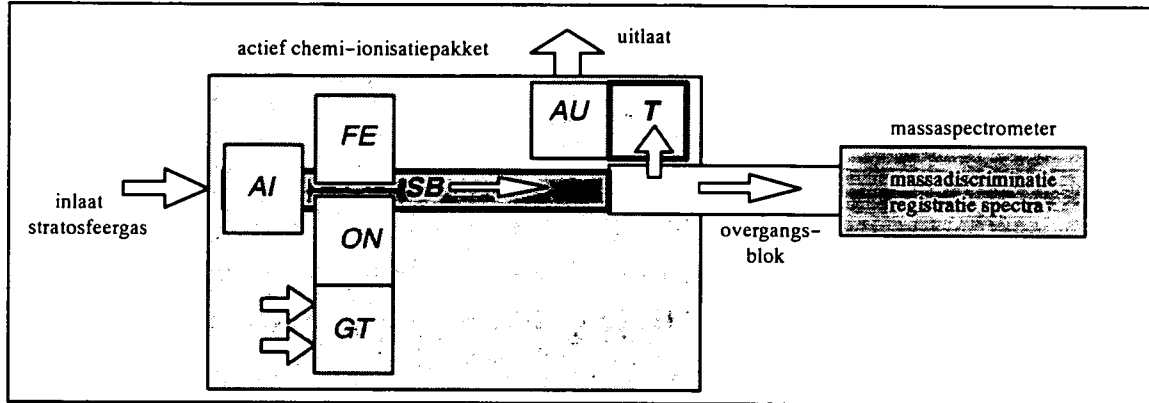
3.6.1. De stromingsbuis en de turbine

3.6.1.1. Het onderhouden van een gasstroom

De stromingsbuis is een roestvrij stalen buis waarbinnen, wanneer zijn inlaatopening vrij is, bestanddelen van de atmosfeer reacties ondergaan met ionen. De buis heeft een binnendiameter van 4 cm. De lengte van de buis in de SIDAMS/MACSIMS-configuratie bedraagt ongeveer 1 m.

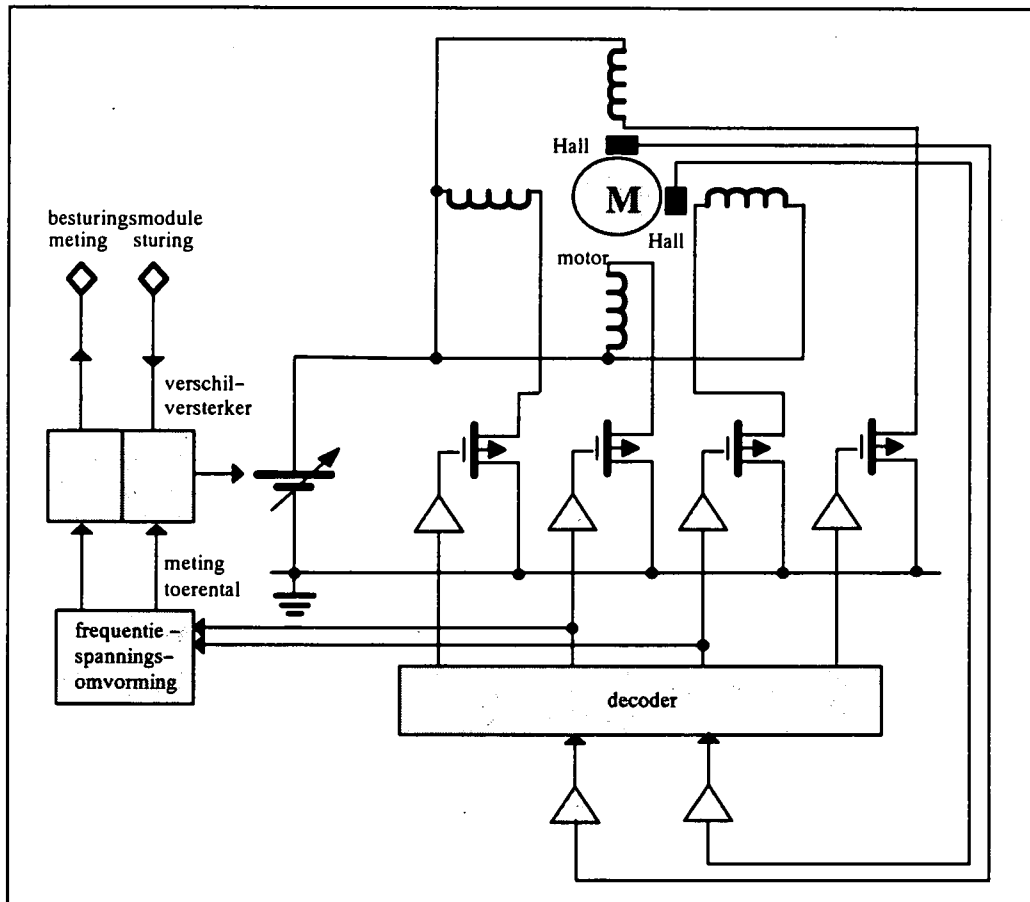
Voor het aanzuigen van de omgevingslucht en het in stand houden van een constante stroming werd een turbomoleculaire pomp (Pfeiffer) (die typisch gebruikt wordt voor vacuümzuigen en

dus een hoge compressiefactor heeft tussen in- en uitlaat) omgebouwd tot een turbine met een compressiefactor van ongeveer 1. Deze lichtgewicht turbine is in staat tot bij drukken lager dan ongeveer 30 mbar een constante stroming te verzekeren van 22 l/s. De rotatiesnelheid van de turbine is dan ± 1500 tr/s.



Figuur 3.28: De stromingsbuis (SB) en de turbine (T).

3.6.1.2. De aandrijving van de turbine



Figuur 3.29: De aandrijfelektronica van de turbine.

De motorsturing van de turbine werd in opdracht van het BIRA gebouwd door een daarin gespecialiseerde firma (ATPE).

De turbine wordt aangedreven door de beurtelingse bekrachtiging van vier statorwikkelingen met een stroom die regelbaar is in amplitude. Dit gebeurt op basis van een rotatiesnelheidsmeting met behulp van twee Hall-sondes op de stator van de turbine (figuur 3.29). De toegeleverde stroom is bepalend voor de snelheid van de turbine.

Deze turbinevoeding omvat fundamenteel drie regelkringen. De eerste regelkring is de toerentalregeling. Het toerental wordt ingesteld in functie van een stuursignaal afkomstig uit de besturingsmodule voor de turbine en een meting van het toerental door middel van de Hall-sondes.

De tweede regelkring is de ingangsstroomregeling en wordt in dit geval gebruikt als stroombegrenzing. De maximale stroom wordt ook ingesteld door een stuurspanning uit de besturingsmodule.

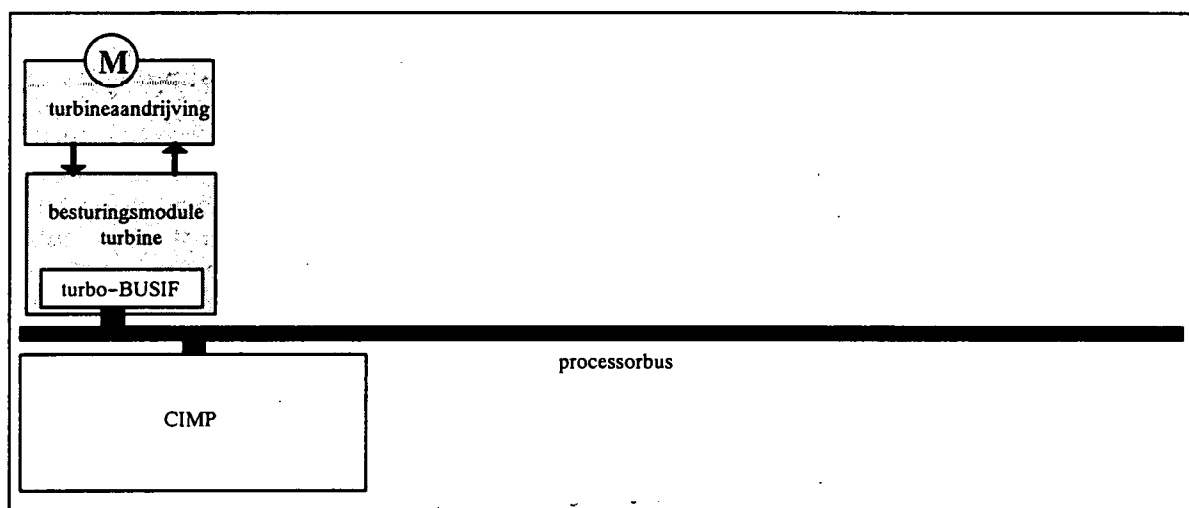
De derde regeling voorziet in een begrenzing van de uitgangsspanning op 55 V, om problemen te voorkomen bij onbelast aanschakelen van de turbinevoeding, maar is niet stuurbaar uitgevoerd.

Drie metingen worden uitgevoerd in de turbinevoeding : een stroommeting, een toerentalmeting en een temperatuurmeting. Ze worden onder de vorm van meetsignalen doorgegeven aan de besturingsmodule.

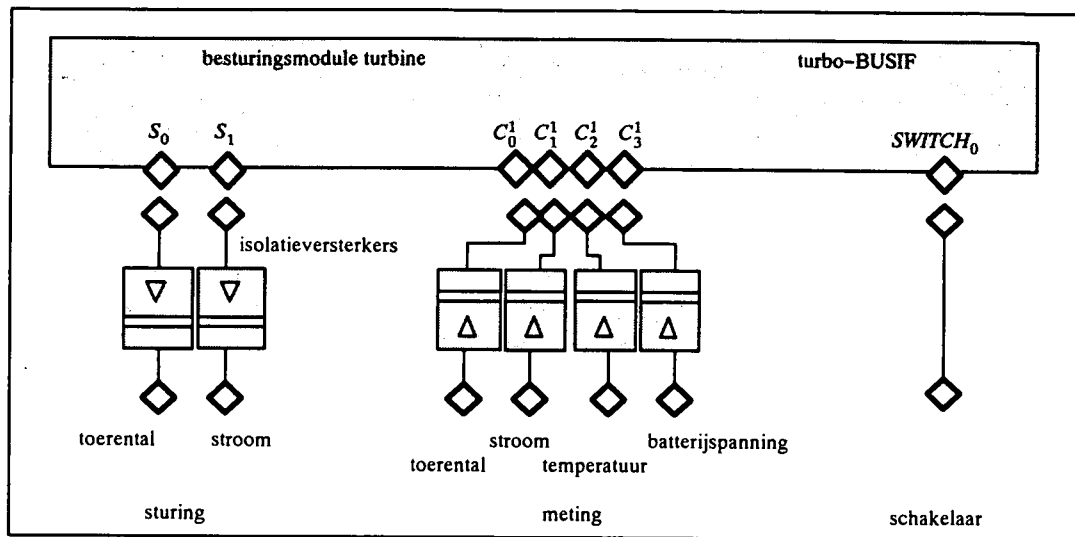
3.6.1.3. De besturingsmodule voor de turbine

Ook de besturingsmodule voor de turbine (figuur 3.30 en 3.31) is opgebouwd volgens het standaard patroon (stuur-, controle- en schakelfuncties) (zie 3.4).

Voor de sturing van het toerental en de stroombegrenzing worden 2 12-bits digitaal-naar-analoogconvertors gebruikt. Selectie en adressering van de DAC's gebeurt met behulp van de lokale signalen $LOCS_3$, $LOCS_4$, $LOCA_1$ en $LOCA_2$ van de turbo-BUSIF. De stuursignalen (0-10 V) worden elektrisch geïsoleerd alvorens ze aan de turbinevoeding aan te bieden.



Figuur 3.30: De aandrijving en de besturingsmodule voor de turbine (CIMP).

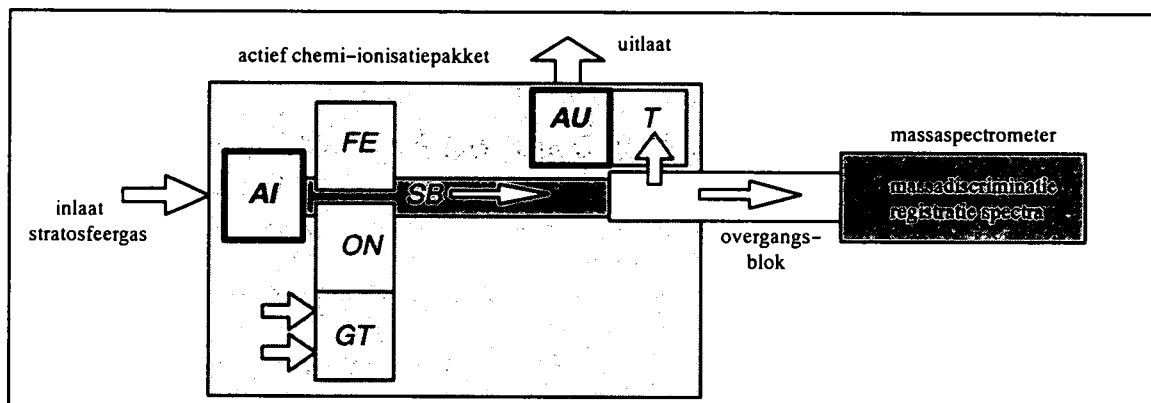


Figuur 3.31: De besturingsmodule voor de turbine.

Meetsignalen voor het toerental, de geleverde stroom, de temperatuur in de turbine en de spanning van de aparte batterij, worden na elektrische isolatie aangeboden aan 4 kanalen van een 12 bits analoog-naar-digitaalconverter. De selectie van de ADC en de keuze van de multiplexerkanalen gebeurt met behulp van de lokale BUSIF-signalen LOCS₂, LOCA₁ en LOCA₂.

Het aan- of afschakelen van de turbine gebeurt door de lokale schakellijn SWITCH₀ van de turbo-BUSIF.

3.6.2. De afsluitsystemen



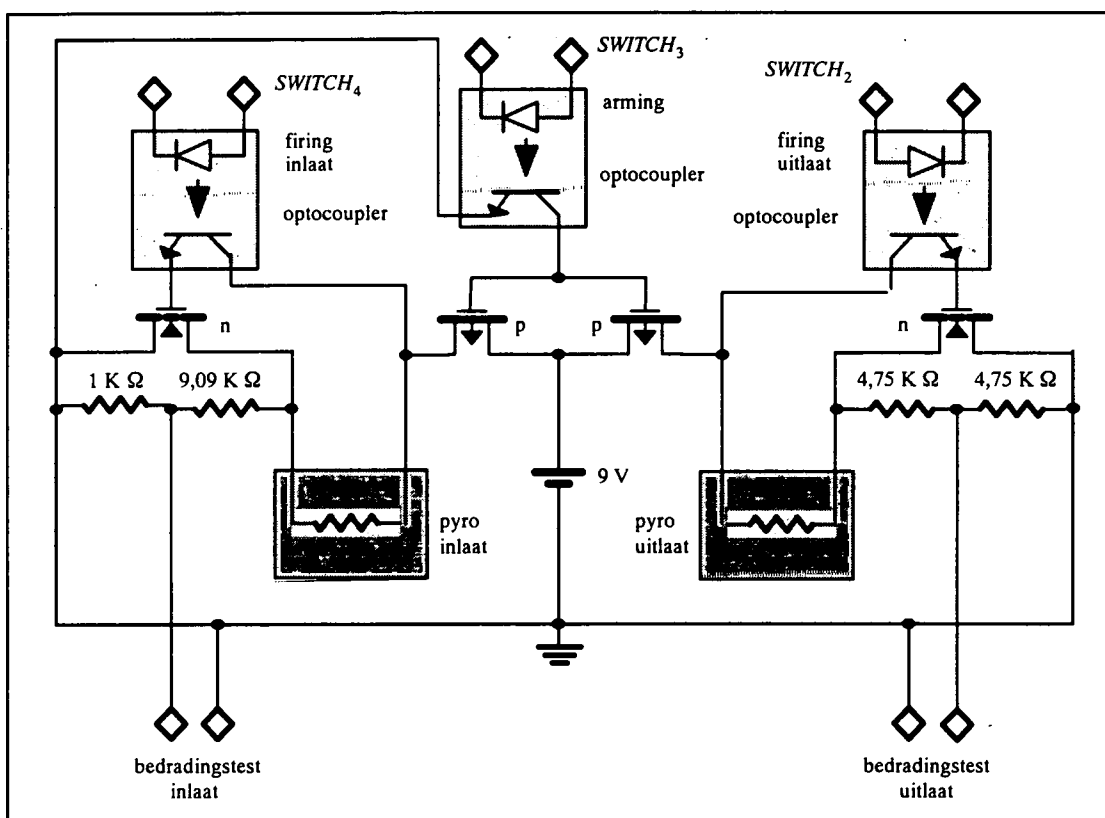
Figuur 3.32: De afsluitsystemen aan de inlaat van de stromingsbuis (AI) en aan de uitlaat van de turbine (AU).

Zowel de inlaatopening van de stromingsbuis als de uitlaat van de turbine zijn tijdens het stijgen afgesloten. De afsluitsystemen bestaan uit een cilindervormig lichaam dat op de af te sluiten buis wordt gemonteerd en waarin zich langs de omtrek een reeks messen bevinden. Een drievoudige

pyrotechnische explosie drijft de messen langsheen de buisomtrek en snijdt die als het ware open. Het buiseinde valt naar beneden, zodat belemmering van in- of uitlaat volledig is uitgesloten (principe van een blikopener).

Om accidenteel afvuren van het pyrotechnisch afsluitingssysteem te voorkomen, werd een beveiligde elektronische sturing ontwikkeld. Deze sturing werd geïntegreerd in de bewakingsmodule van het massaspectrometergedeelte (figuur 3.50).

Elk afsluitsysteem wordt geopend in twee fasen : een *arming*-fase en een *firing*-fase. De twee afsluitsystemen worden gelijktijdig in de *arming*-fase gebracht. De *arming-optocoupler* (figuur 3.33) wordt uitgestuurd door een schakellijn (SWITCH₃ van de hsk-BUSIF) waardoor p-kanaal MOSFET's in geleiding komen en een stroom voeren doorheen de explosieweerstand, die echter niet voldoende groot is om de explosie tot stand te laten komen. De stroom moet beneden 10 mA worden gehouden.



Figuur 3.33: De elektronische sturing voor het dubbele afsluitsysteem.

Het afvuren in de *firing*-fase is gescheiden voor de beide systemen. Wanneer ook de *firing-optocouplers* worden uitgestuurd (SWITCHe₂ en SWITCHe₄ van de hsk-BUSIF), en de bijhorende n-kanaal MOSFET's geleiden, zal de stroom door de explosieweerstand groot genoeg worden om de explosie te laten plaatsvinden.

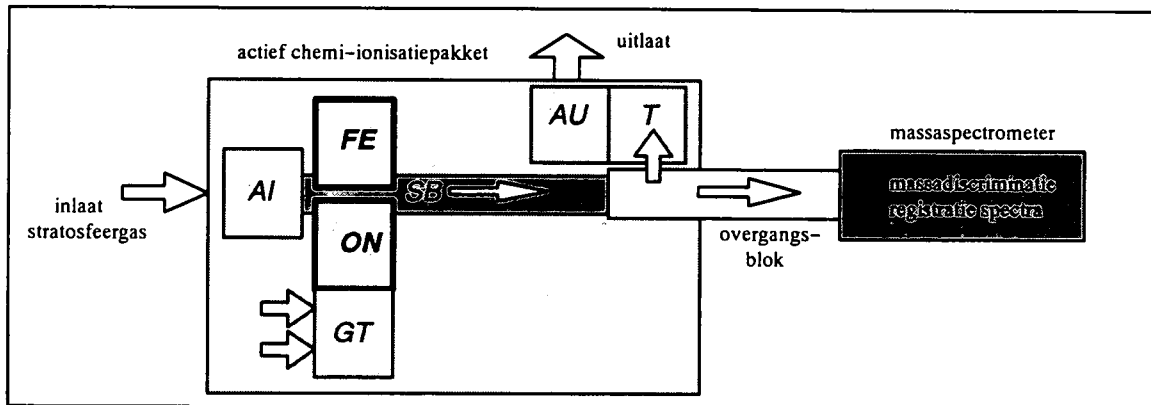
Een aparte 9 V Lithiumbatterij met een capaciteit van 21 Ah doet dienst als voeding voor de elektronica van het pyrotechnisch ontstekingsysteem.

Het is mogelijk in de *arming*-toestand een bedradingstest van beide afsluitsystemen uit te voeren. Daarvoor wordt een teststroom doorheen de pyrotechnische afsluitsystemen gestuurd. Deze is klein genoeg om afvuren zeker te voorkomen. De teststroom ondervindt de explosieweerstand van de pyrotechnische ontstekers en een kabelweerstand.

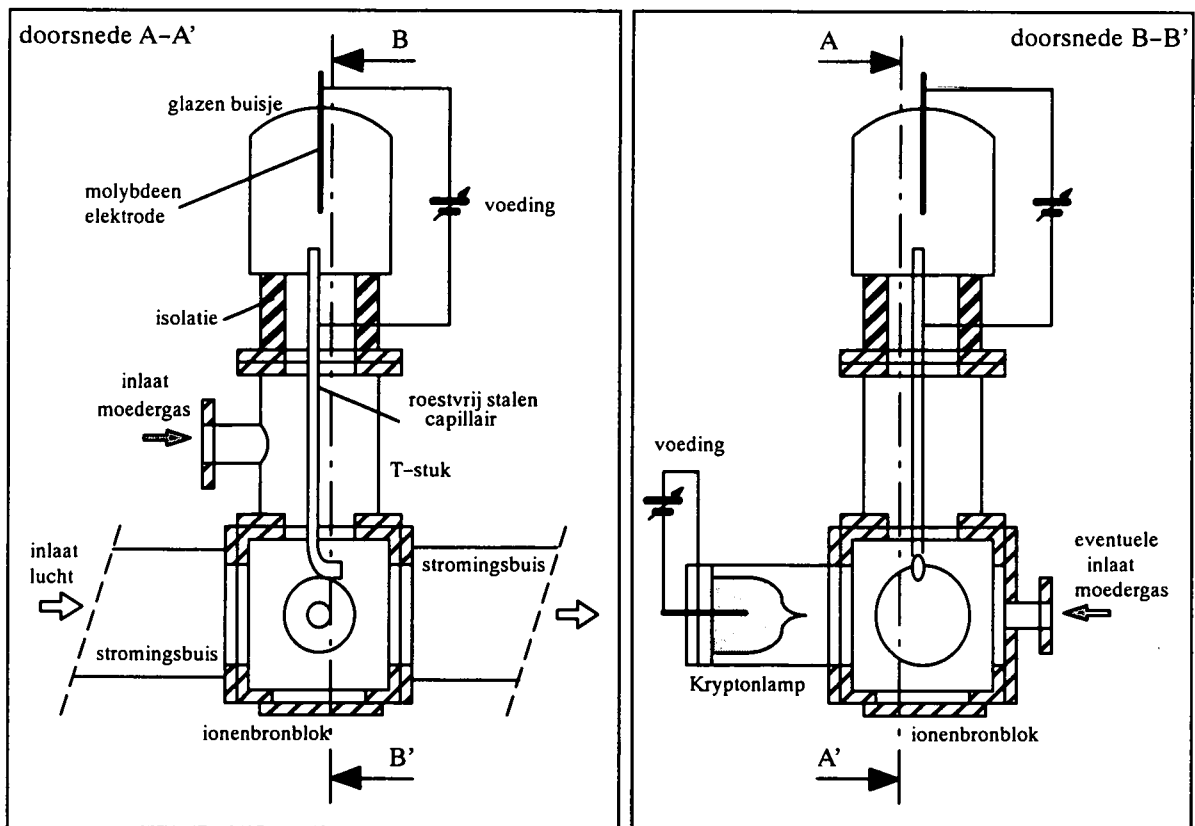
De toestand van de afsluitsystemen (gesloten, in beweging of open) wordt eveneens geregistreerd door uitlezing van telkens twee *reed*-schakelaars.

3.6.3. De ionenbronnen

3.6.3.1. Ioniseren van een ingebracht moedergas of van de omgevingslucht



Figuur 3.34: De ontladingsionenbron (ON) en de foto-elektrische ionenbron (FE).



Figuur 3.35: Doorsnedetekening in twee aanzichten van de ontladingsionenbron en de foto-elektrische ionenbron.

Zowel de ontladingsionenbron als de foto-elektrische ionenbron worden gemonteerd op een ionenbronblok dat de mechanische interface vormt met de stromingsbuis.

In de ontladingsionenbron (figuur 3.35) wordt een boog gevormd tussen een anode en een kathode. De anode is een fijne molybdeennaald vastgesmolten in een glazen buisje. Als kathode doet een capillaire buis dienst in roestvrij staal en met een inwendige diameter van 4 mm. Dit capillair mondt uit in de stromingsbuis. Via een T-stuk kan het gebruikte moedergas in de ontladingsionenbron ingebracht worden (3.6.3.3). Het wordt er geïoniseerd en via het capillair in de stromingsbuis geïnjecteerd. Het is de overdruk die in de ionenbron ontstaat ten gevolge van de moedergasstroom die ervoor zorgt dat de geproduceerde ionen in de stromingsbuis terecht komen.

De foto-elektrische ionenbron (figuur 3.35) is een Kryptonlamp die via een opening in het ionenbronblok de metalen binnenoppervlakken van dit blok met UV-stralen belicht. Hierdoor worden elektronen losgemaakt (foto-elektron-emissie) die zich dissociatief hechten aan neutrale moleculen. Het is mogelijk in het ionenbronblok een neutraal moedergas (bijvoorbeeld CCl_4 ter vorming van Cl^-) in te brengen, een andere mogelijkheid is de omgevingslucht in de stromingsbuis als moedergas te gebruiken (typisch wordt dan CO_3^- gevormd uit CO_2).

Typische hoogspanningen voor de ontladingsionenbron zijn 1500 V voor het chloormoedergas en 800 V voor het jodiummoedergas. In de foto-elektrische ionenbron is 1000 V een gebruikelijke waarde.

3.6.3.2. Gepulste ionenbronvoedingen

Een MATSUSADA DC/HV-converter zonder teruggekoppeld regelsysteem wordt als hoogspanningsbron gebruikt (figuur 3.36). De ionenbronvoeding wordt aan- of afgeschakeld door een schakelsignaal afkomstig van de besturingsmodule voor de ionenbron. De te leveren hoogspanning is in grootte evenredig met een stuurspanning, eveneens afkomstig van deze besturingsmodule.

De uitgang van de MATSUSADA ligt tussen 0 en 2000 V en is verbonden met de elektrodes van de ionenbron. Tussen de uitgangsklemmen is de minimaal vereiste belasting van $3M\Omega$ geplaatst voor het geval de verbinding met de nuttige belasting verbroken wordt. Eens de ontladingsionenbron aan en de boog getrokken kan de belasting als niet-resistief gezien worden. Daarom wordt een stabilisatiweerstand van $3M\Omega$ in serie op de positieve uitgangsklem geplaatst.

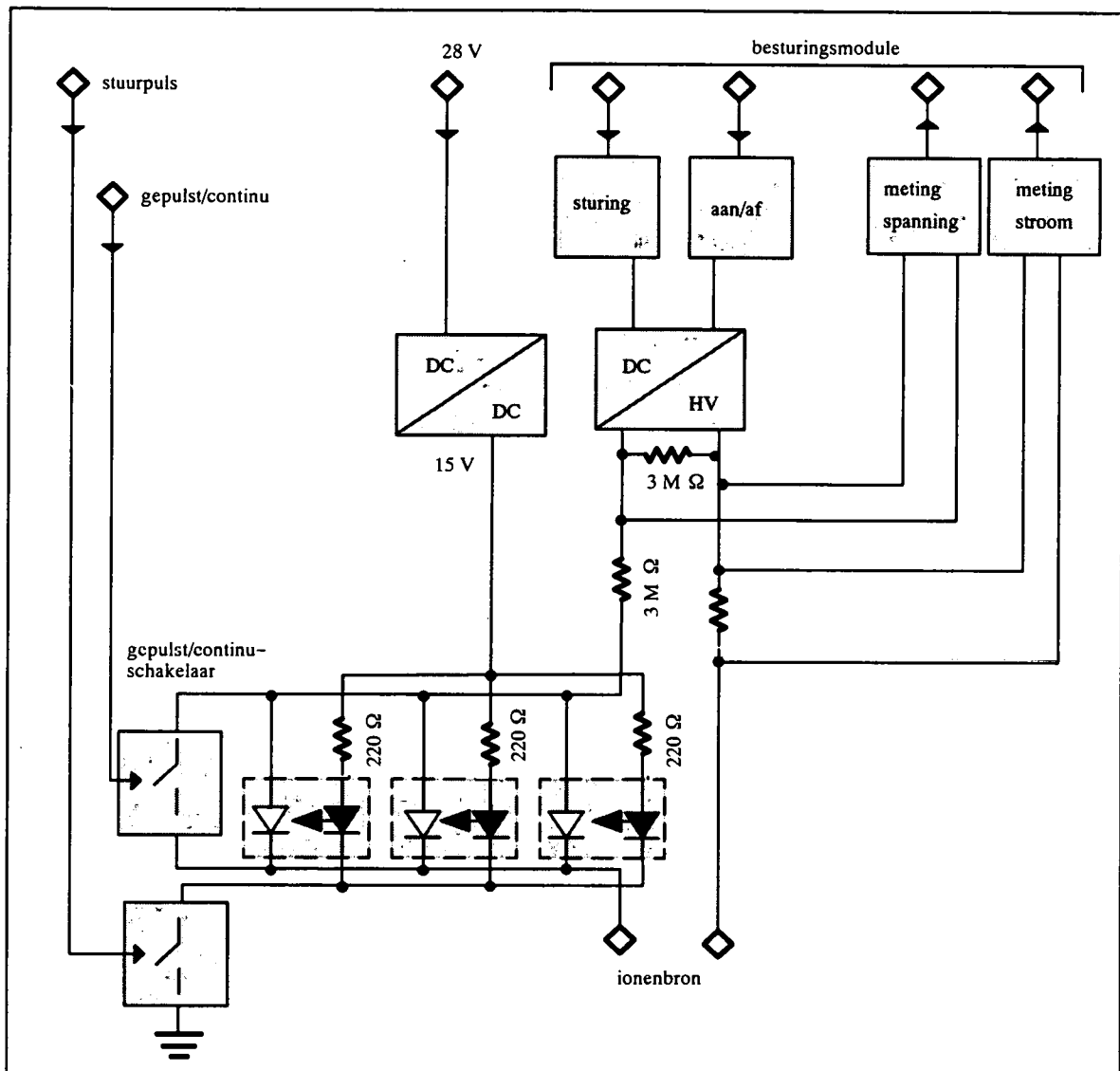
Op de uitgang van de converter worden twee metingen verricht, één van de geproduceerde hoogspanning en één van de stroom die door de ionenbron vloeit (typisch 0.5 mA). De gevormde meetsignalen worden doorgegeven aan de besturingsmodule.

Van deze hoogspanningsvoeding werd een gepulste versie gemaakt door aan de hoogspanningszijde van de DC/HV-converter een schakelaar te plaatsen tussen één van zijn polen en de belasting.

Voor de realisatie van deze hoogspanningsschakelaar werd gekozen voor het gebruik van hoogspanningsdiodes (SEMTECH) die in gesperde toestand een maximale hoogspanning van 7500 V kunnen dragen. Een interessante eigenschap van deze hoogspanningsdiodes is dat ze in gesperde toestand gaan lekken wanneer ze belicht worden met infrarood licht. Hoe intenser het licht, hoe groter de lekstroom.

Elke hoogspanningsdiode wordt belicht door twee infrarode LED's (golflengte tussen 860 en 900 nm) en voert dan een lekstroom van ongeveer 115 μA per 50 mA LED-stroom. Afhankelijk

van het rendement van de optische koppeling tussen LED en hoogspanningsdiode moet de schakelaar bestaan uit twee of drie in parallel geplaatste hoogspanningsdiodes, zodat een totale stroom van ongeveer $450 \mu\text{A}$ kan geleverd worden. De LED's worden grondig getest en geselecteerd volgens hun rendement. De plaatsing van de LED's ten opzichte van de hoogspanningsdiodes is van groot belang voor het bekomen van een goed optisch rendement. De uitlijning van de hoogspanningsschakelaar gebeurt proefondervindelijk.



Figuur 3.36: Blokschema van de gepulste ionenbronvoeding.

Het is principieel mogelijk de ionenbronvoeding in de continue mode te laten werken door de hoogspanningsdiodes voortdurend te belichten. De belastingsweerstand van de LED's werd daarom zelfs zodanig gekozen dat de hogere vermogendissipatie die dan optreedt, geen probleem vormt (220Ω , 1 W). Toch werd geopteerd voor een veiligere oplossing: de voeding wordt in de continue mode gebracht door de hoogspanningsdiodes kort te sluiten.

In parallel met de hoogspanningsdiodes wordt daarom een hoogspanningsrelais geïnstalleerd waarvan de normale stand gesloten is (continue mode). Voor het omschakelen van dit relais

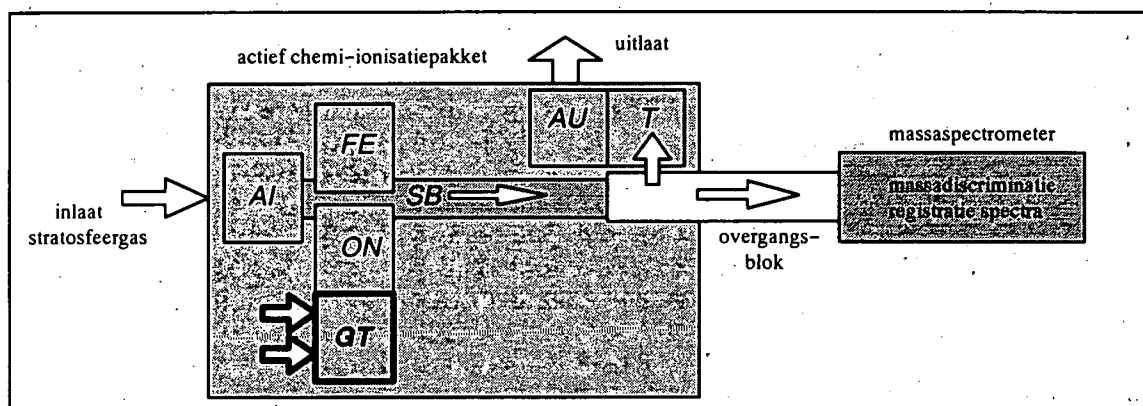
tussen de continue en de gepulste werkingsmode wordt een schakelijn uit de bewakingsmodule gebruikt.

Het eigenlijke pulsen gebeurt tenslotte door de infrarode LED's gedurende de tijd van de openingspuls in geleiding te brengen (anodes verbinden met de massa). De puls wiens breedte de gewenste bronopeningstijd voorstelt is afkomstig van de besturingsmodule voor de vluchtijdmetering in de MOBC (zie 3.7).

Samenvattend kunnen we stellen dat het gebruik van de ionenbronvoeding in gepulste mode de volgende sturing vereist :

- het aanschakelen van de ionenbronvoeding (schakelfunctie van de besturingsmodule voor de ionenbron);
- het instellen van de stuurspanning voor de hoogspanning (stuurfunctie van de besturingsmodule voor de ionenbron);
- het omschakelen naar gepulste mode (schakelfunctie van de bewakingsmodule);
- het aanleggen van een openingspuls van de gewenste breedte (vanuit de besturingsmodule voor de vluchtijdmetering in de MOBC).

3.6.3.3. De ontladingsionenbron schakelend uitgevoerd



Figuur 3.37: De gastoevoersectie voor de ontladingsionenbron (GT).

In de ontladingsionenbron kunnen alternerend twee verschillende moedergassen ingebracht worden. De ene keer is dat 1000 ppm Cl_2 in Ar voor Cl^- -productie, de andere keer 1000 ppm CH_3I in Ar voor I^- -productie.

Het schakelen van de ene naar de andere moedergasstroom gebeurt door middel van pneumatische kranen (toevoeren of wegnemen van luchtdruk aangevoerd uit een fles met perslucht). De luchtdruk kan al of niet op de leiding naar een pneumatische kraan geplaatst worden door middel van elektrisch bestuurd solenoïdekranen (figuur 3.38).

De kranen moeten steeds zo geschakeld zijn dat nooit beide moedergassen tegelijk in de ionenbron worden binnengebracht. Voor het inbrengen van bijvoorbeeld jodium in de ionenbron moeten de "jodium in"- en de "chloor uit"-kranen open zijn, de "jodium uit"- en de "chloor in"-kranen gesloten.

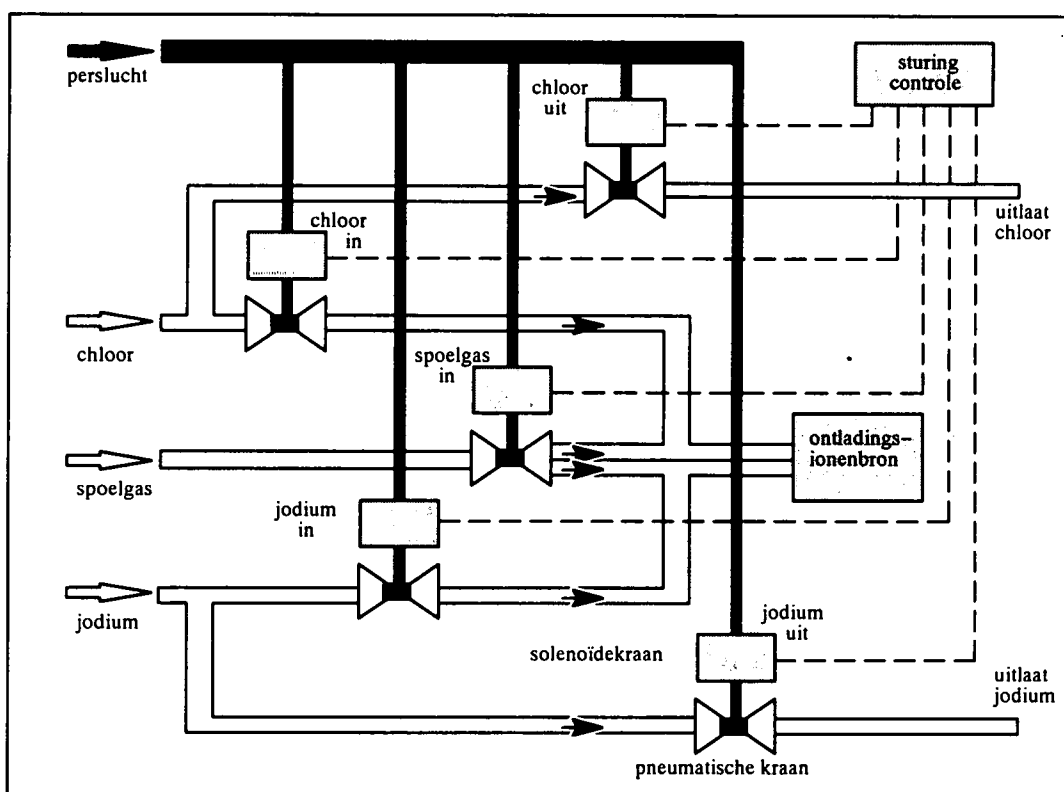
Bij het omschakelen van het ene moedergas naar het andere zorgt een continu lopende spoelgasstroom (Ar) voor de zuivering van de ionenbron. Zo worden hinderlijke interacties

tussen de twee chemische families grotendeels vermeden. Het spoelgas wordt via twee takken, de chloor- respectievelijk jodiumtak, naar de ontladingsionenbron gevoerd.

Uit de vluchten blijkt dat het vaak nuttig is na het opnemen van een reeks spectra met één moedergas, enige tijd te wachten alvorens te beginnen aan een reeks spectra met het andere moedergas. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door het nemen van een tweetal zogeheten *dummy* spectra (spectra genomen zonder ionenproductie), zodat tegelijk ook een mogelijk geheugenefect in de detector wordt vermeden. Dezelfde opmerking geldt ook wanneer wordt overgeschakeld van metingen met de ontladingsionenbron naar metingen met de foto-elektrische ionenbron.

Tijdens de vlucht bevinden de gasvoorraden zich in flessen onder hoge druk (100 bar voor de moedergassen en 200 bar voor het spoelgas). De flessen zijn uitgerust met gasontspanners zodat de druk in de toevoerleidingen naar de ionenbron ongeveer 2 bar bedraagt. De fles met de perslucht brengt, na ontspanning, alle persluchtleidingen naar de pneumatische kranen onder een druk van 6 à 7 bar.

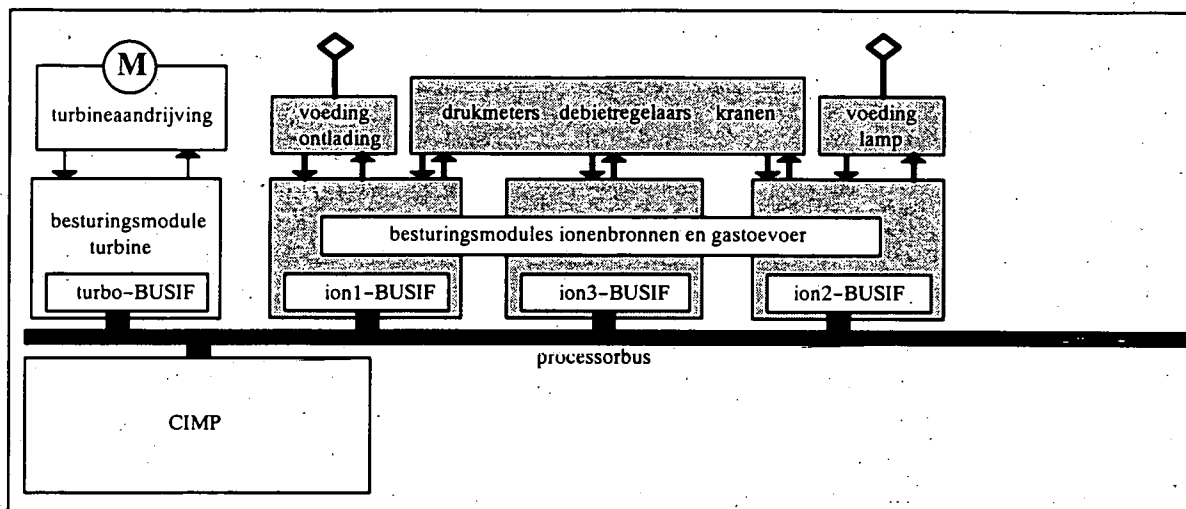
Het debiet van de moedergasstromen en van de spoelgasstroom in beide spoeltakken wordt geregeld door debietregelaars met een bereik tussen 0 en 1370 sccm.



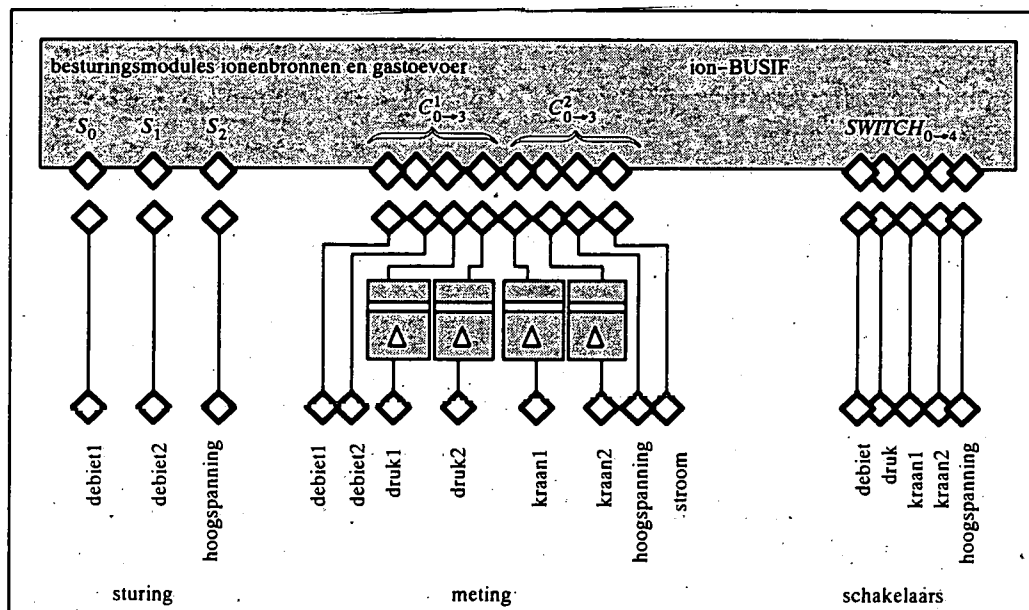
Figuur 3.38: Het kranenschema.

3.6.3.4. De besturingsmodules voor de ionenbronnen

Voor het schakelen, sturen en controleren van de twee ionenbronnen en van de debietregelaars, kranen en drukmeters in de gastoevoersectie van de ontladingsionenbron wordt een stel van drie identieke besturingsmodules gebruikt (figuur 3.40).



Figuur 3.39: De ionenbronvoedingen en de besturingsmodules voor de ionenbronnen en de gastoevoer (CIMP).



Figuur 3.40: De besturingsmodules voor de ionenbronnen en de gastoevoer.

In totaal staan zo 15 schakellijnen ter beschikking waarvan er 13 gebruikt worden. Twee lijnen dienen voor het schakelen van de ionenbronnen, vijf andere voor de bediening van de pneumatische kranen. Voor de vier debietregelaars zijn slechts drie schakellijnen voorzien omdat de debietregelaars in de twee spoelgastakken steeds samen worden geschakeld. Twee schakellijnen laten drukmetingen toe aan de chloorgasontspanner en aan de jodiumgasontspanner. Tenslotte is er één schakellijn voorzien voor de drukmetingen aan de ontspanners van het spoelgas en de perslucht.

Elke module beschikt over vier 8 bits digitaal-naar-analoogconvertors (lokale selectie en adressering door de signalen $LOCA_1$, $LOCA_2$ en $LOCS_4$ van de ion-BUSIF's in de modules). De helft van de 12 beschikbare DAC's wordt gebruikt : instelling van de spanningen in de

ontladings- en de foto-elektrische ionenbron en regeling van de debieten van de beide moedergassen en van de spoelgasstroming in de twee spoeltakken.

Het controlegedeelte van elke module bestaat telkens uit twee 8 bits analoog-naar-digitaalconvertors met ingebouwde 4-kanaalsmultiplexer (lokale adressering en selectie via LOCA₁, LOCA₂, LOCS₂ en LOCS₃ van de ion-BUSIF's). Van de 24 beschikbare ADC's worden er 19 gebruikt : vier voor de spannings- en stroommetingen in de ionenbronvoedingen, vier voor de debietmetingen, vijf voor de registratie van de stati van de pneumatische kranen en zes voor de drukmetingen aan de gasontspanners van de moedergassen en het spoelgas.

3.7. De vluchttijdmeting

3.7.1. De wetenschappelijke achtergrond

In het actief chemi-ionisatiepakket worden door één van de ionenbronnen moederionen geproduceerd (R^-), die door middel van de gasstroming in de stromingsbuis naar de massaspectrometer worden geleid. Op hun weg naar de massaspectrometer reageren de moederionen R^- met minderheidsgassen en geven aanleiding tot produktionen P^- .

In het eenvoudige geval waar de omzetting van de moederionen tot produktionen gebeurt door reactie met slechts één minderheidsgas S door de reactie (3.2)



met een reactiesnelheid k , kunnen we als differentiaalvergelijkingen voor produktie en verlies van R^- en P^- (3.3) en (3.4) neerschrijven.

$$\frac{dy_1}{dt} = -k[S] \cdot y_1 \quad (3.3)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = k[S] \cdot y_1 \quad (3.4)$$

Hierbij zijn y_1 , y_2 en $[S]$ de respectievelijke concentraties van R^- , P^- en S .

Integratie van dit eenvoudig stelsel levert (3.5) en (3.6). y_{10} is de beginconcentratie van R^- ter hoogte van de ionenbron.

$$y_1 = y_{10} \cdot \exp(-k[S]t) \quad (3.5)$$

$$y_2 = y_{10} \cdot [1 - \exp(-k[S]t)] \quad (3.6)$$

Hieruit volgt (3.7) voor een tijd $t = t_p$.

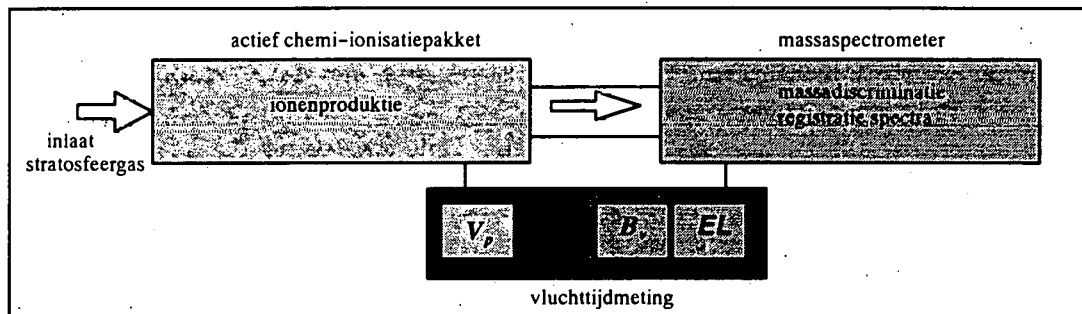
$$[S] = \frac{1}{k \cdot t_p} \cdot \ln\left(\frac{[P^-]}{[R^-]} + 1\right) \quad (3.7)$$

In de veronderstelling dat de signalen van de moeder- en produktionen gemeten met de massaspectrometer evenredig zijn met de concentraties $[R^-]$ en $[P^-]$ en dat de reactiesnelheid k gekend is, kan uit deze laatste formule de concentratie $[S]$ van het betrokken minderheidsgas afgeleid worden op voorwaarde dat de tijd t_p verlopen tussen het ontstaan van de moederionen en de detectie van zowel moeder- als produktionen (de vluchttijd) eveneens bekend is.

De rotatiesnelheid van de turbine bepaalt de snelheid van de gasstroom in de stromingsbuis en dus ook de vluchttijd van de ionen tussen bron en spectrometer. Vermits de draaisnelheid van de turbine vanaf een bepaald moment afneemt bij stijgende buitendruk moet op geregelde tijdstippen tijdens de vlucht (vooral in de daalfase) de vluchttijd gemeten worden.

3.7.2. De technische probleemstelling

Een vluchttijdmeting kan gerealiseerd worden door in één van de ionenbronnen in het actief chemi-ionisatiepakket een wolk van moederionen te lossen (de "ionenpuls") en na verloop van tijd de stroom op de inlaatflens van de spectrometer (de "stroompuls") op te meten. De tijdsperiode tussen ionenpuls en stroompuls is de vluchttijd van de ionen (t_p).



Figuur 3.41: De vluchttijdmeting met de elektrometer (EL) en de besturingsmodule (B) in het MOBC-deel en de gepulste ionenbron (V_p) in het CIMP-deel.

Voor het realiseren van een ionenpuls werd onder andere gedacht aan het plaatsen van een gepulst rooster aan de uitgang van de ionenbron in de stromingsbuis. In het labo bleken problemen van oplading van het rooster en te trage responstijden deze oplossing uit te sluiten. Daarom werd ervoor geopteerd de ionenbron zelf te pulsen door middel van een gepulste hoogspanningsvoeding.

In de praktijk stelt zich het probleem hoe het pulsen van de ionenbron die zich in het actief chemi-ionisatiepakket bevindt (beheerd door de CIMP), en het meten van de stroom op de inlaatflens van de massaspectrometer (beheerd door de MOBC) te coördineren. De stroommeting moet door de MOBC uitgevoerd worden omdat ze gekoppeld is met het aanbrengen van de iiv-spanning op de inlaatflens.

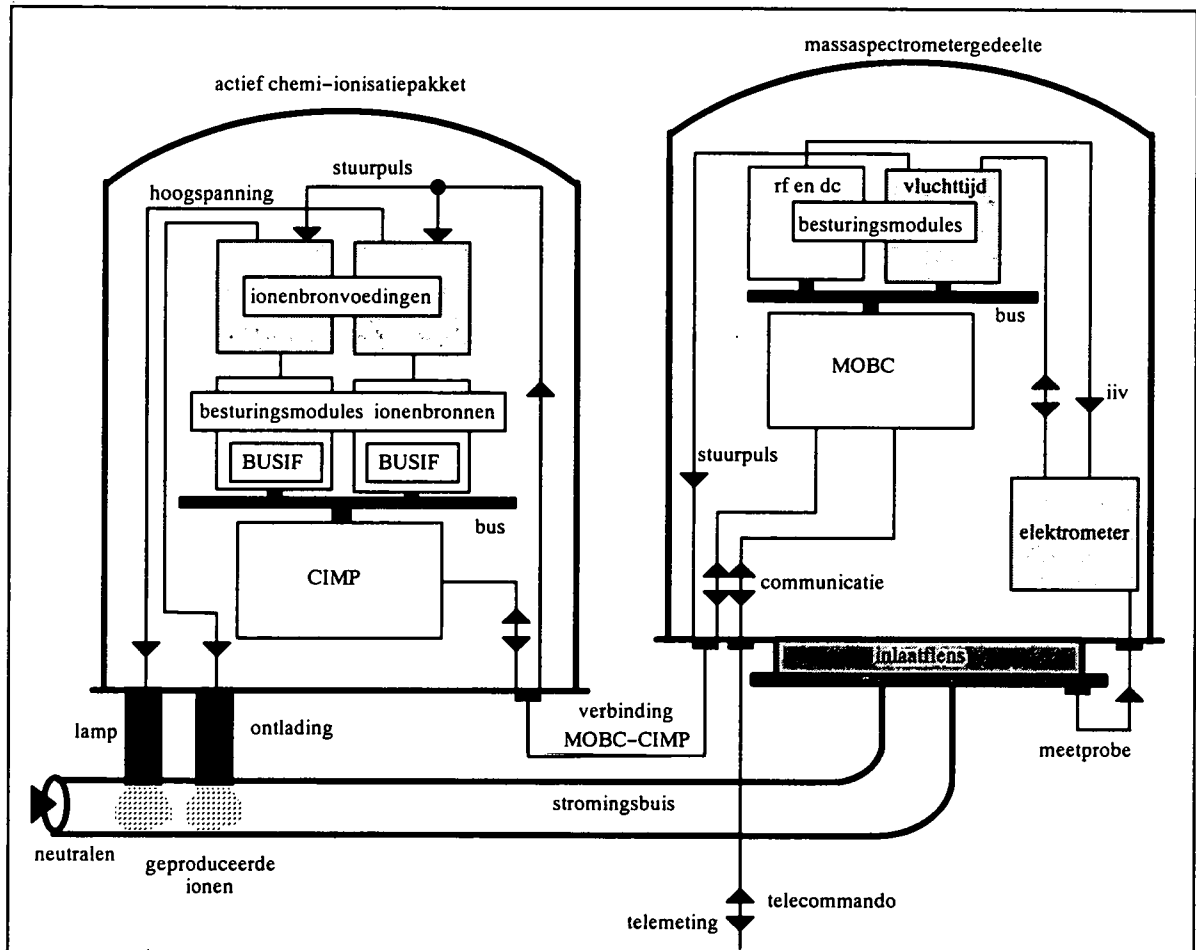
Voor de meting van de kleine stromen aan de inlaatflens werd een gevoelige elektrometer ontwikkeld die voldoende bescherming biedt tegen storende invloeden. De elektrometermodule bevat het meest gevoelige deel van de vluchttijdmeting: een operationele versterker, geschakeld als stroom-naar-spanningsconvector, die de "stroompuls" op de inlaatflens meet. In deze module werden de *lay-out* van de kaart, de plaatsing van de componenten, de bekabeling en de behuizing extra goed verzorgd om parasitaire invloeden te minimaliseren.

Het stroomprofiel op de inlaatflens moet met voldoende hoge resolutie kunnen bemonsterd worden om de vluchtduur van de ionen die bewegen in het centrale gedeelte van de stromingsbuis precies te kunnen bepalen.

Het SIDAMS/MACSIMS-instrument moet als het ware in twee totaal verschillende regimes kunnen werken: in de "spectrometermode" moet een continue ionenproductie gegarandeerd worden in het actief chemi-ionisatiepakket terwijl een massaspectrum wordt opgemeten, in de "elektrometermode" moet een ionenbron kortstondig gepulst worden en moet een gesynchroniseerde stroommeting verricht worden op de inlaatflens van de massaspectrometer.

In de SIDAMS/MACSIMS-configuratie blijkt 20 ms een typische waarde voor de vluchttijd te zijn. De gebruikelijke openingstijd voor de ionenbronnen is 1 ms, de stromen op de inlaatflens zijn van de orde van grootte van 10^{-10} A tot 10^{-8} A.

In figuur 3.42 worden alle elementen met betrekking tot de vluchttijdmeting schematisch weergegeven. De gepulste ionenbronnen werden reeds besproken in 3.6.3, hierna volgt een overzicht van de elektrometer en bijhorende besturingsmodule in het massaspectrometergedeelte (figuur 3.43).

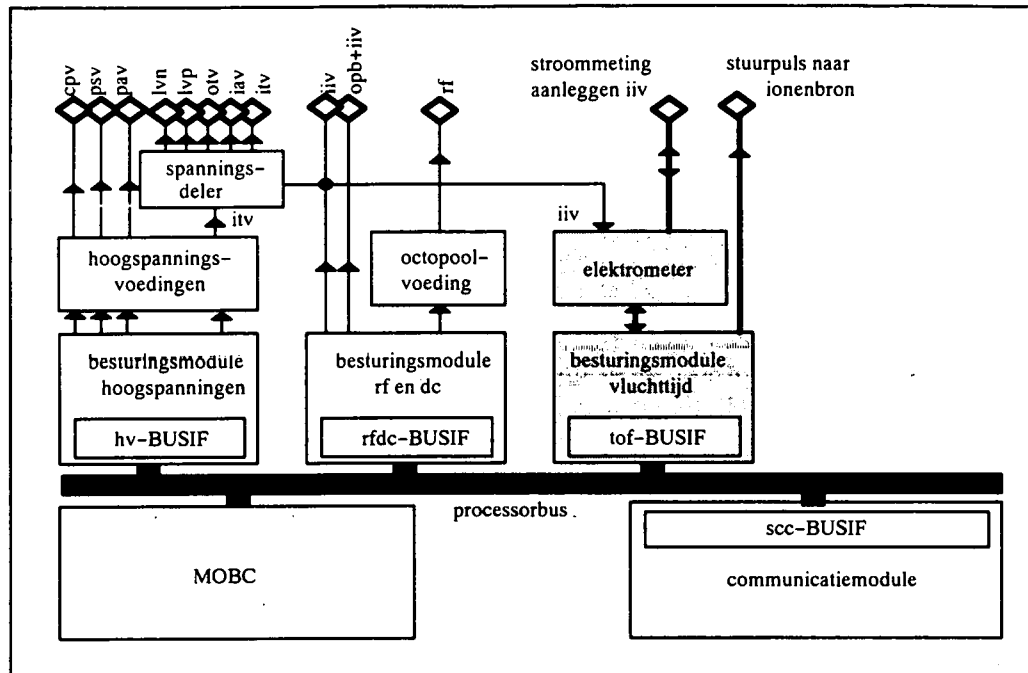


Figuur 3.42: Integratie van de vluchttijdelektronica in het instrument.

3.7.3. De elektrometer

3.7.3.1. De stroom-spanningsconversie

Voor de omzetting van de flensstroom naar een spanning wordt een traditionele elektrometerschakeling gebruikt waarin een operationele versterker wordt uitgerust met een zeer grote terugkoppelweerstand. De operationele versterker werd zorgvuldig gekozen. Hij is uitermate geschikt voor toepassingen waarin zeer kleine *bias*-ingangstromen (typisch 75 fA) en kleine *offset*-ingangsspanningen (typisch 0,3 mV) vereist zijn. Bovendien is bij deze operationele versterker ook de temperatuurdrift op de *offset*-ingangsspanning beperkt (typisch $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$). De DC/DC-converter die zorgt voor de voeding van de operationele versterker, wordt in de besturingsmodule geplaatst om mogelijke storingen van de elektrometer te vermijden.



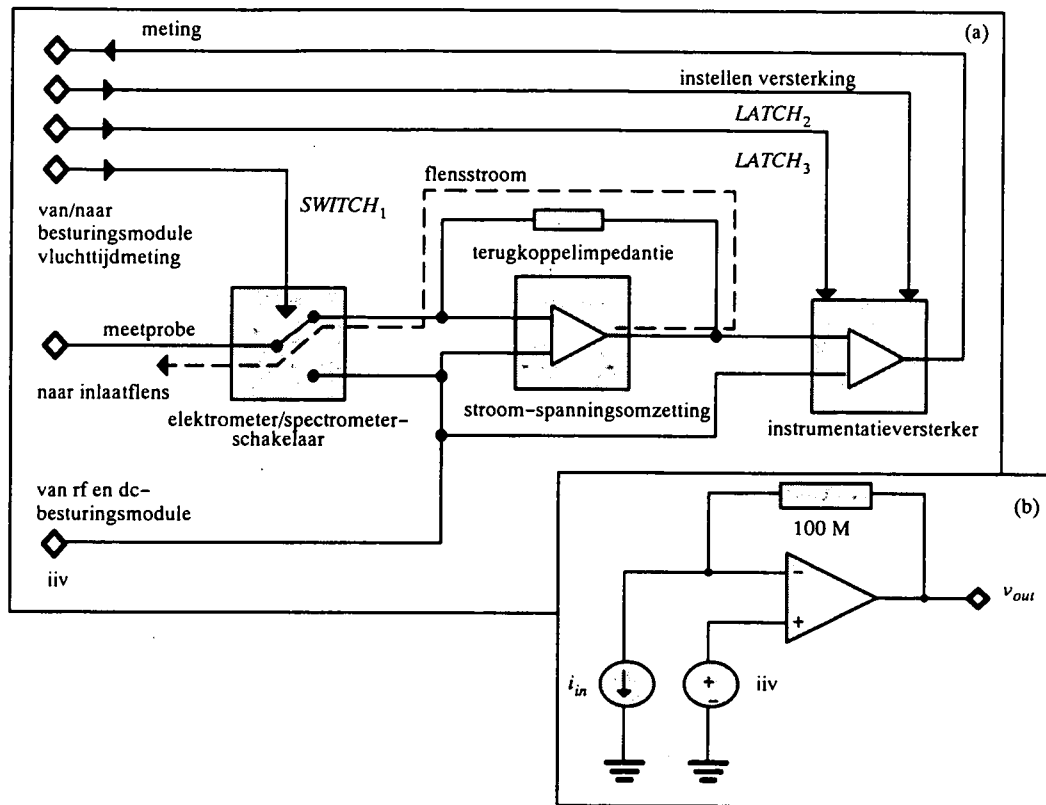
Figuur 3.43: De elektrometer- en bijhorende besturingsmodule in de MOBC.

Bij de bepaling van de terugkoppelweerstand dient in eerste instantie rekening gehouden te worden met het feit dat de schakeling bij een bepaalde *offset*-spanning zal functioneren. Immers, wanneer de massaspectrometer in zijn conventionele mode werkt (spectrometermode, elektrometer losgekoppeld) bevindt de inlaatflens zich op de *iiv*-spanning, die tussen +10 V en -10 V kan liggen. Wanneer nu vluchttijdmetingen uitgevoerd worden (elektrometermode) en de elektrometer aan de inlaatflens wordt gekoppeld, mag deze situatie niet veranderen: de *iiv*-spanning moet op de inlaatflens blijven. Daarom wordt de positieve ingangsklem van de operationele versterker ook aan *iiv* gelegd. Zolang de uitgang van de operationele versterker niet verzadigd is, zal door de enorme versterkingsfactor van de operationele versterker dezelfde spanningswaarde zich ook aan de negatieve ingangsklem bevinden, die verbonden is met de flens (figuur 3.44a).

De schakelaar die de keuze maakt tussen werken in spectrometer- of in elektrometermode en dus ofwel rechtstreeks de *iiv*-spanning op de flens brengt, ofwel de negatieve ingangsklem van de operationele versterker aan de flens legt, wordt bediend vanuit de besturingsmodule.

De uitgangsspanning van de stroom-spanningsomvormer kan voorgesteld worden als $V_{out} = R \cdot i_{in} + iiv$ (figuur 3.44b).

Wat betreft het dynamisch bereik van de elektrometer dient een compromis te worden gesloten. De uitgang van deze operationele versterker mag maximaal variëren tussen ongeveer -13 V en +13 V, wanneer hij gevoed wordt bij +/-15 V en met een hoge impedantie belast wordt (in dit geval de 10 M Ω ingangsimpedantie van een instrumentatieversterker). Aangezien *iiv* tussen -10 V en 10 V ligt, mag $R \cdot i_{in}$ nog schommelen tussen ongeveer -3 V en 3 V, wat een *feedback*-weerstand van 300 M Ω zou impliceren voor een ingangsstroom van 10⁻⁸ A. Een extra veiligheidsmarge wordt ingebouwd, opdat in het geval i_{in} toch hoger zou zijn, de operationele versterker niet overstuur zou worden en om zeker uit het gebied te blijven waar het gedrag van de operationele versterker mogelijk niet-lineair wordt. Als keuze voor $|R \cdot i_{in}|$ werd 1 V genomen, wat wil zeggen dat R 100 M Ω wordt.



Figuur 3.44: Blokschema van de elektrometer (a) en basisschema voor de stroom-spanningsomvorming van de elektrometer.

Het beperken van het dynamisch bereik van de elektrometer heeft uiteraard een vermindering tot gevolg van de bereikbare resolutie bij de conversie van het signaal naar digitale meetwaarden (analoog-naar-digitaalconversie in de besturingsmodule). Slechts een beperkt deel van het ingangsbereik van de ADC zal zo gebruikt worden. Hieraan wordt wel enigszins een mouw gepast door programmeerbare versterking te voorzien tussen de uitgang van de operationele versterker en de ingang van de ADC. Dit heeft dan weer als nadeel dat ook de ongewenste signaalbijdrage aan de elektrometerkant mee wordt versterkt.

Alleszins zal het nuttige meetsignaal tussen +1 V en -1 V liggen (iiv wordt immers naderhand afgetrokken). Voor kleine stromen van 10^{-10} A wordt nog een meetspanning van 10 mV bereikt, wat na versterking aanvaardbaar blijft voor de verdere verwerking.

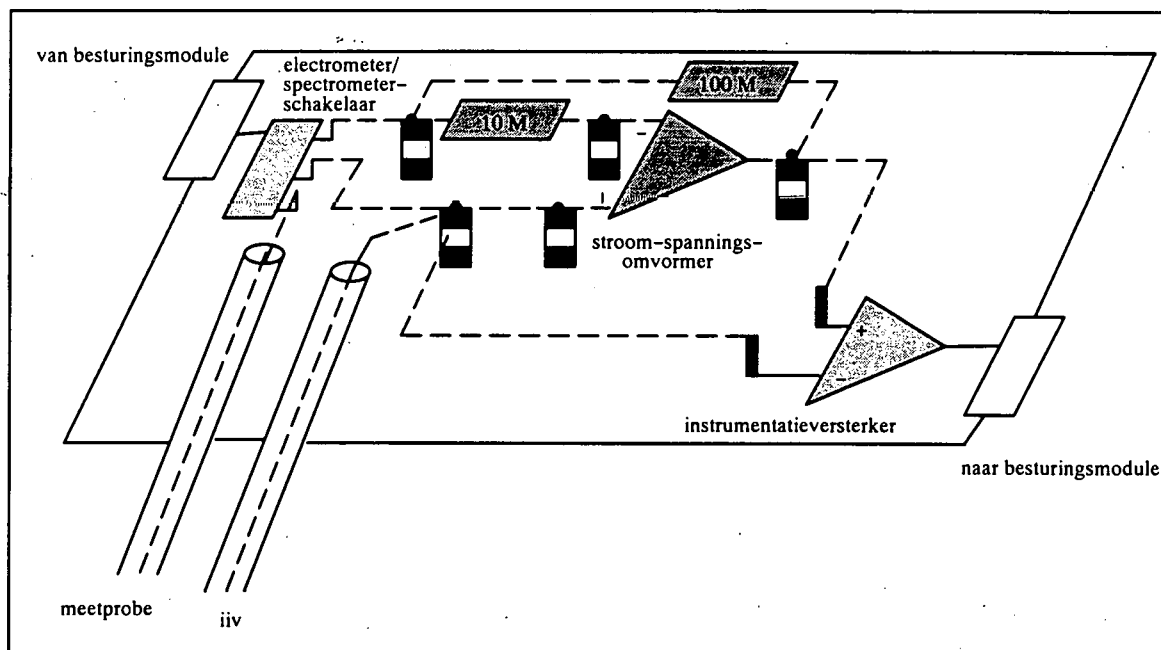
3.7.3.2. Bescherming tegen parasitaire invloeden

Een aantal maatregelen werden genomen opdat de kleine meetsignalen niet zouden overstemd worden door ongewenste bijdragen.

Het is goed de werkingstemperatuur zo laag mogelijk te houden. Alle bronnen van warmte (vermogen verbruikende componenten) worden best uit de buurt gehouden van de operationele versterker, want stijgende temperaturen betekenen ook hogere bias-ingangsstromen. De operationele versterker is trouwens zelf zodanig ontworpen (kleine ruststroom) dat zijn chip-temperatuur slechts 3 °C hoger ligt dan de omgevingstemperatuur (zonder belasting). Hoe

hoger de belasting, hoe groter het interne vermogenverbruik, hoe hoger de temperatuur in de *chip*, en hoe hoger bij gevolg ook de *bias*-ingangsstroom.

Een andere bron van parasitaire lekken is een te kleine weerstand tussen de inganglijnen van de operationele versterker en andere spanningvoerende lijnen op de kaart, bijvoorbeeld de voedingslijnen. Een isolatieweerstand van $10^{15} \Omega$ is minimaal vereist. De weerstand van PCB-materiaal is meestal niet groot genoeg. De ganse elektrometerschakeling wordt daarom zwevend opgesteld (figuur 3.45), dit wil zeggen, de operationele versterker en de terugkoppellus worden niet op de PCB gesoldeerd, maar op een reeks van isolerende Teflon steunvoetjes geplaatst. Zelfs in dit geval kan nog nagedacht worden over het gevaar van waterabsorptie door de steunvoetjes, waardoor de weerstandswaarde kan teruglopen, of over de invloed van mechanische spanningen in de voetjes, waardoor piëzo-elektrische of tribo-elektrische effecten kunnen optreden.



Figuur 3.45: Schematische voorstelling van de zwevende opstelling van de elektrometer.

Van de zwevende opstelling wordt ook gebruik gemaakt om de PCB eronder uit te voeren als scherm (koperen *guarding plane*) dat aan de analoge massa verbonden wordt. Samen met het verbinden van de behuizing van de operationele versterker en van de coaxiale kabelhulzen aan de analoge massa, wordt een goede afscherming gemaakt. Op deze manier wordt de parasitaire strooicapaciteit aan de ingang van de operationele versterker geminimaliseerd waardoor de schakeling stabiel wordt.

Het aantal overgangen van het zwevende deel naar de PCB wordt zo laag mogelijk gehouden en extra verzorgd. Externe verbindingen worden zoveel mogelijk coaxiaal uitgevoerd en zonder extra connecties in de elektrometermodule binnengevoerd.

De ganse elektrometerschakeling wordt opgesteld in een volledig gesloten aluminium afscherming, die geïsoleerd wordt opgesteld van de structuur van het instrument (5 mm Teflon). De elektrometer wordt ook zo kort mogelijk bij de "stroombron", de inlaatflens van de spectrometer, geplaatst om storingen te beperken. De kabels worden goed vastgelegd zodat ruis door bewegingen van de kabels wordt uitgesloten.

Een probleem vormt het feit dat de stroommeting gebeurt op de inlaatflens, die zich buiten de container bevindt van de massaspectrometer, terwijl de "elektrometer"-kaart zich best in de container bevindt, onder normale druk. De gehele verbinding wordt coaxiaal uitgevoerd. De koppeling aan de inlaatflens gebeurt door middel van een speciale connector, wiens scherm verbonden is met de mechanische structuur van het instrument.

De doorvoer in de klok vereist helaas een extra connector. Deze connector voert het signaal maar ook het scherm doorheen de basisflens van het instrument, zonder enige elektrische verbinding met de structuur, maar met een hermetische mechanische afsluiting. Het scherm wordt in de elektrometer aan de analoge massa gelegd. Hierdoor wordt de analoge massa tot op de plaats van de meting gebracht, via het scherm van de coaxiale verbinding, zodat het signaal goed afgeschermd is. Het feit dat geen bijkomende verbinding tussen de analoge massa en de mechanische structuur nodig is bij de basisflensdoorvoer, verkleint het risico op beïnvloeding door lusstromen via de structuur.

Het gebruik van een zeer grote terugkoppelweerstand verhoogt het effect van de ingangscapaciteit (zowel strooicapaciteit als die inherent aan de operationele versterker) op het AC-gedrag van de component, wat onder andere de stabiliteit van de schakeling niet ten goede komt. Dit kan verbeterd worden door in de terugkoppellus een capaciteit (typisch 1 pF) in parallel te plaatsen met de terugkoppelweerstand. De meest geschikte waarde voor deze capaciteit wordt proefondervindelijk getrimd.

De ingangsspanning moet voor deze operationele versterker tussen de waarden van de voedingsspanning blijven. Wordt de spanning groter dan kan de operationele versterker vernield of beschadigd worden met verlies van zijn goede eigenschappen. Daarom werd ter bescherming van de ingang een weerstand geplaatst van 10 M Ω . Gezien de zeer kleine *bias*-ingangstromen voor dit type operationele versterker, zal deze weerstand de lusversterking nauwelijks beïnvloeden.

3.7.3.3. De eerste versterking

De uitgangsspanning van de operationele versterker ligt, als de stromen inderdaad niet groter zijn dan 10^{-8} A, tussen +1 V en -1 V. Zoals eerder gezegd wordt zo niet het ganse bereik gebruikt van de analoog-naar-digitaalconverter die het signaal bemonstert. De mogelijkheid wordt daarom geboden het signaalbereik aan te passen aan het dynamisch bereik van de ADC, door het invoegen van een programmeerbare versterkertrap (maximale versterking 64) tussen operationele versterker en ADC.

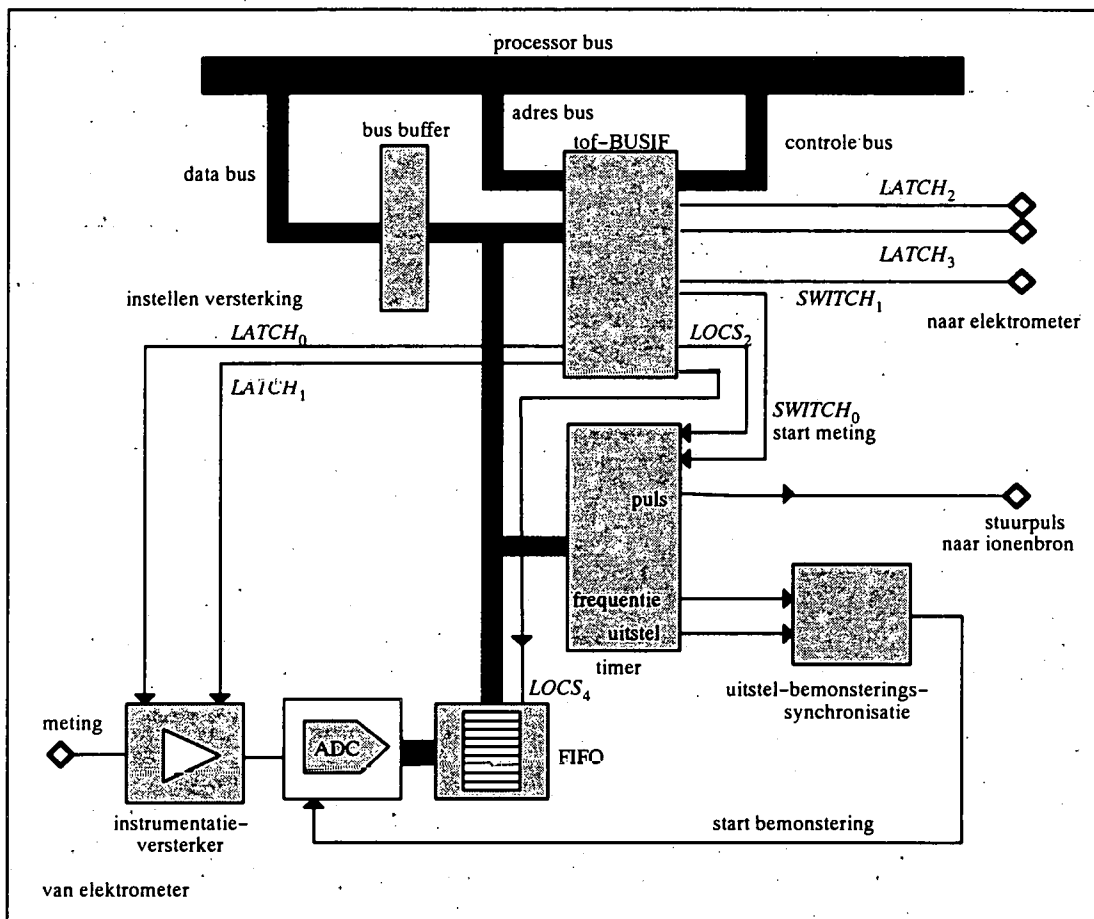
Ondanks alle in de elektrometer genomen ruis-, overspraak- en storingswerende maatregelen zal een gedeelte van het signaal toch nog ongewenst zijn. Uiteraard wordt ook het ongewenste deel van het signaal mee versterkt. De oorsprong van de ongewenste bijdrage tot het signaal situeert zich vooral in het stroom-spanningsomzetting gedeelte (de operationele versterkerschakeling en zijn verbindingen). Een ander deel ervan situeert zich echter in het transport naar de ADC. Gezien de aard van de opstelling (elektrometer dicht bij inlaatflens en ADC op een relatief grote afstand in de besturingsmodule) wordt de versterkertrap in twee delen opgesplitst. Een eerste versterking gebeurt, indien gewenst, in de elektrometermodule zelf, een tweede versterking kan gebeuren in de besturingsmodule.

De transfertfunctie van de instrumentatieversterker in de elektrometermodule is

$$V_{out_1} = (V_{in_1}^+ - V_{in_1}^-) \cdot G_1 + V_{ref_1}$$

De versterkingswaarden $G_1=1,2,4$ of 8 kunnen ingesteld worden vanuit de besturingsmodule. Vermits $V_{in_1}^+$ verbonden is met de uitgang van de operationele versterker, $V_{in_1}^-$ aan de iiv-spanning ligt en de referentie van de instrumentatieversterker de massa is, geldt $V_{out_1} = G_1 \cdot R \cdot i_{in}$ met $R=100 \text{ M}\Omega$.

3.7.4. De besturingsmodule voor de vluchttijdmeting - coördinatie van ionenpuls en stroommeting



Figuur 3.46: De besturingsmodule voor de vluchttijdmeting.

3.7.4.1. De tweede versterking

De besturingsmodule voor de vluchttijdmeting wijkt af van het standaard patroon (zie 3.4) hoewel ook in deze module een BUSIF-component (de tof-BUSIF) zorgt voor de interface tussen de eigenlijke vluchttijdmeting en de processor (figuur 3.46). $SWITCH_1$ van de tof-BUSIF schakelt om tussen de spectrometer- en de elektrometermode.

Het elektrometersignaal, dat mogelijk reeds een eerste versterking onderging ($G_1 = 1, 2, 4$ of 8) in de elektrometermodule, kan in de besturingsmodule een tweede versterking ondergaan ($G_2 = 1, 2, 4$ of 8). Waar de versterking van de instrumentatieversterker in de elektrometermodule wordt ingesteld via de lokale vergrendelde adreslijnen $LATCH_2$ en $LATCH_3$ (figuur 3.44) gebeurt dat in de besturingsmodule door $LATCH_0$ en $LATCH_1$. Er zijn dus 16 mogelijke combinaties om de totale versterking in te stellen op 7 verschillende waarden tussen 1 en 64.

Aangezien $V_{in_2}^-$ aan de analoge massa ligt en $V_{in_2}^+$ gelijk is aan V_{out_1} is de uitgangsspanning van deze instrumentatieversterker $V_{out_2} = G_2 \cdot V_{out_1} + V_{ref_2} = G_2 \cdot G_1 \cdot R \cdot i_{in} + V_{ref_2}$ met $R = 100 \text{ M}\Omega$.

3.7.4.2. *Het bemonsteren van het signaal*

Deze uitgangsspanning wordt dan aangelegd aan een analoog-naar-digitaalconverter die aan zijn ingang een spanning verwacht tussen 0 en 5 V. Vermits $G_2 \cdot G_1 \cdot R \cdot i_{in}$ zowel positief als negatief kan zijn, is het nodig de uitgang van de instrumentatieversterker aan de ingang van de ADC aan te passen door een *offset*-spanning in te voeren die het nulpunt van de versterkertrap projecteert op het middelpunt van de AD-ingang ($V_{ref_2} = 2,5 \text{ V}$).

De bemonsteringsfrequentie van de ADC kan door de gebruiker opgelegd worden (maximaal 1 MHz). Bij elke bemonstering wordt een digitale code in een FIFO-register opgeslagen. De adressering van de FIFO gebeurt via het lokale LOCS₄-signaal. De FIFO wordt steeds volledig opgevuld (1024 bemonsteringspunten). De minimale tijdsperiode die zo kan bekeken worden is ongeveer 1 ms. Zodra de FIFO helemaal vol is zendt hij de processor een *interrupt*-aanvraag waarna deze de FIFO uitleest.

3.7.4.3. *De synchronisatie tussen ionenpuls en stroommeting*

De SWITCH₀-lijn van de tof-BUSIF doet dienst als startsignaal voor de vluchttijdmeting. De duur dat een ionenbron geopend wordt kan door de gebruiker ingesteld worden evenals de uitsteltijd die zal verlopen tussen het openen van een ionenbron en het begin van de bemonstering van het elektrometersignaal.

Indien de vluchttijd van de ionen en ook de breedte van de stroompuls zelf tussen 20 en 30 ms ligt zouden om de 60 μs bemonsteringen moeten genomen worden om de ganse stroompuls op te meten. Alle bemonsteringen die de stroompuls voorafgaan zijn verloren. Door een uitsteltijd in te stellen die iets korter is dan de verwachte vluchttijd, kan ervoor gezorgd worden dat de eerste bemonsteringen pas genomen worden in de periode dat de stroompuls ook effectief op de inlaatflens verschijnt. De bemonsteringsfrequentie kan dan ook aangepast worden, zodat alle bemonsteringen tijdens de stroompuls worden genomen. De resolutie verhoogt op deze manier met een factor van ongeveer 4. Het bestaan van een uitsteltijd verzekert ook een veel grotere flexibiliteit in het geval van onverwachte of veranderende vluchttijd of stroomprofielen.

In een apart electronicablok, de uitstel-bemonsteringssynchronisatie genoemd, wordt het geven van de openingpuls aan de ionenbron en de start van de bemonstering van het elektrometersignaal aan de hand van de uitsteltijd gesynchroniseerd.

Om de lengte van de stuurpuls voor de ionenbron, de bemonsteringsfrequentie en de uitsteltijd te programmeren wordt gebruik gemaakt van een *timer*-circuit dat door de lokale adreslijn LOCS₂ wordt geadresseerd.

3.8. De bewaking van de omgevingsparameters en het instrument

3.8.1. Het nut van housekeeping

Het volgen van het verloop van een aantal omgevings- en instrumentparameters tijdens de vlucht is belangrijk voor de besturing van het instrument en voor de interpretatie van de gemeten gegevens. Tijdens de totaliteit van de vlucht worden de bewakingsgegevens van het instrument en van de omgeving aan een typische frequentie van 2 volledige bewakingspakketten per minuut naar de bedieningsterminal aan de grond doorgestuurd.

In het algemeen leveren de bewakingsgegevens van het instrument zelf een overzicht op van de goede werking. Zo kan bijvoorbeeld dadelijk nagegaan worden of bij het begin van de eigenlijke metingen de afsluitsystemen werden geopend, of de kranen die de gastoevoer regelen goed werden geschakeld, of de gevraagde debieten ook werkelijk werden ingesteld, of de turbine aan het gevraagde toerental draait, of de ionenbronnen in geleiding zijn, enz.

Daarom ook zal het sein voor de lancering pas op groen gezet worden wanneer de bewakingsgegevens volledig normaal zijn.

Tijdens de vlucht kan geverifieerd worden of de werkomstandigheden zoals de toestand van het vacuüm in de detector, de druk in de stromingsbuis, de druk in de kuipen en de temperatuur van bepaalde belangrijke instrumentonderdelen aanvaardbaar blijven. Een degraderend werkvacuüm aan het einde van de vlucht kan bijvoorbeeld tot het besluit leiden de metingen stop te zetten omdat het risico op beschadiging van de detector ten gevolge van doorslag van de hoogspanningen te groot wordt

De bewaking van kritische temperaturen kan enerzijds tot acties leiden tijdens de vlucht zelf. Wanneer bijvoorbeeld de temperatuur aan de kranen voor de gastoevoer tijdens de stijgfase te veel afneemt, kan de beslissing genomen worden ze af en toe even te openen en terug te sluiten om dichtvriezen te voorkomen. Anderzijds kan het registreren van deze temperaturen ook veel leren in verband met de noodzaak bepaalde onderdelen tijdens volgende vluchten minder of meer te isoleren.

Uit de bewaking van de buitendruk kan de hoogte van het instrument afgeleid worden. Het is zeer belangrijk dat deze parameter kan geassocieerd worden met de genomen massa- en vluchttijdspectra met het oog op de berekening van de dichtheidsprofielen van de waargenomen ionen en de hieruit afgeleide neutrale bestanddelen. De hoogte bekomen uit deze drukken kan vergeleken worden met de hoogtebepaling die door het CNES wordt uitgevoerd aan de hand van een GPS-ontvanger aan boord van de stratosferische ballon. De buitentemperaturen laten toe de opdeling van de atmosfeer te volgen in functie van het temperatuurverloop (zie 2.2.2), bijvoorbeeld de hoogte waarop zich de tropopauze op dat moment bevindt en de uitgebreidheid ervan.

Ook andere parameters uit de bewakingspakketten worden gebruikt bij de interpretatie van massa- en vluchttijdspectra (debieten, turbinesnelheid, enz.).

De kennis van de bewakingsgegevens is vaak de enige manier om uitsluitsel te krijgen over de oorzaak voor het uitblijven van spectra of voor opgetreden pannes in het instrument (het niet functioneren van de ionenproductie kan ontdekt worden dankzij de bewaking van de spanning en stroom in de ionenbron)

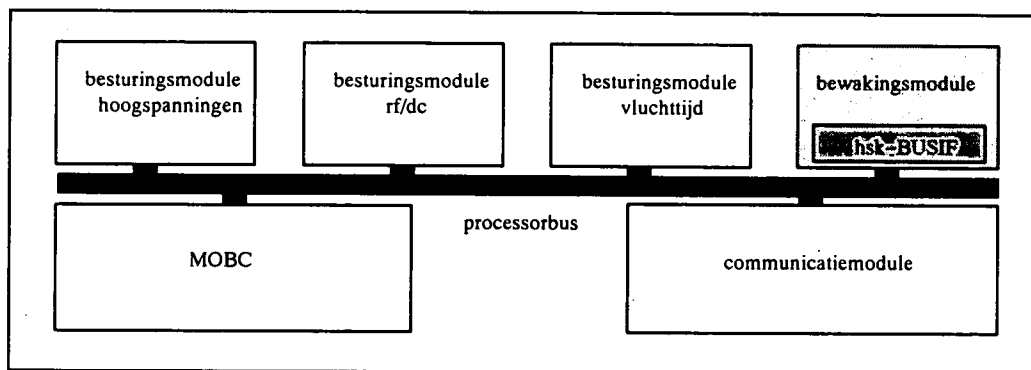
In hoofdstuk 6 worden bewakingsresultaten getoond uit de vlucht van 23 november 1995.

3.8.2. Verdeling van de verschillende bewakingstypes

In het SIDAMS/MACSIMS-instrument kunnen drie types bewakingsgegevens onderscheiden worden :

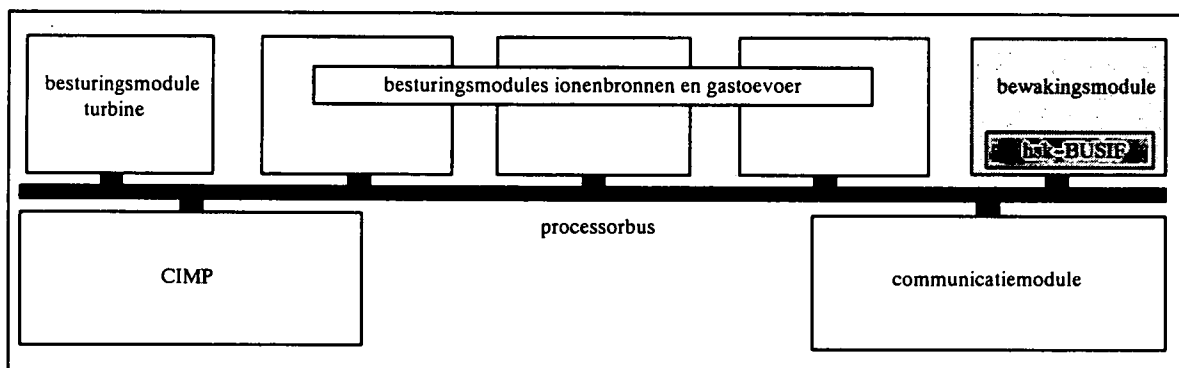
- de bewaking van de omgeving (*ambient housekeeping*);
- de bewaking van het massaspectrometergedeelte (*technological housekeeping*);
- de bewaking van het actief chemi-ionisatiepakket (*chemical housekeeping*).

Het is de MOBC die instaat voor de eerste twee types van *housekeeping*. Alle bewakingsgegevens worden hier verzameld via één bewakingsmodule (figuur 3.47).



Figuur 3.47: De bewakingsmodule op de processorbus van de MOBC.

De CIMP is verantwoordelijk voor de derde groep van bewakingsgegevens. Bewakingsdata zijn trouwens de enige die vanuit het actief chemi-ionisatiepakket worden doorgegeven aan de gebruiker. Het zijn de resultaten van metingen die op alle besturingsmodules werden uitgevoerd (controlefunctie van de modules), niet alleen op de bewakingsmodule. In de bewakingsmodule (figuur 3.48) van het CIMP-processorsysteem worden slechts enkele supplementaire metingen verricht. De controlefuncties van de verschillende besturingsmodules van de CIMP werden hiervoor al besproken. Hierna komt enkel de bewakingsmodule aan bod.



Figuur 3.48: De bewakingsmodule op de processorbus van de CIMP.

3.8.3. De bewakingsmodules

3.8.3.1. Het gemeenschappelijk deel

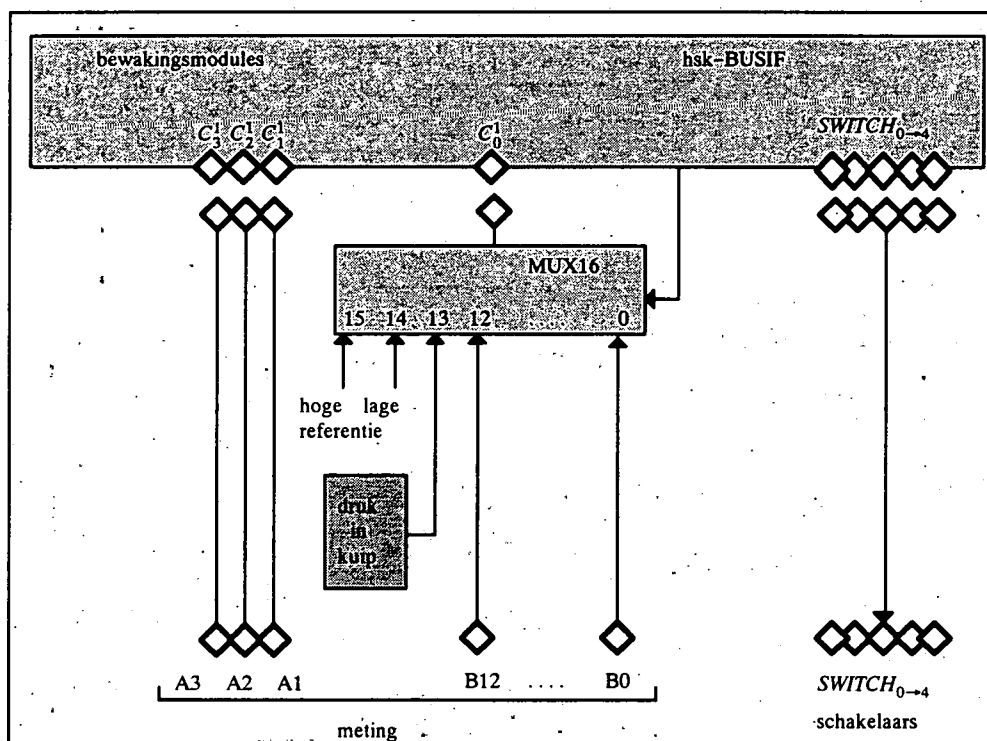
De bewakingsmodules in MOBC en CIMP zijn beiden opgebouwd volgens het standaard patroon van besturingsmodules (zie 3.4). Ze voorzien in schakelfuncties en hebben uitgebreide controle mogelijkheden, maar geen stuurfunctie. De interface tussen de processor- en de bewakingsmodule verloopt in beide gevallen via de businterface hsk-BUSIF.

Alle bewakingsgegevens worden verzameld via een analoog-naar-digitaalconverter met een inwendige 4-kanaalsmultiplexer. De ADC zet de meetsignalen om in 12 bits digitale codes voor de processor. De ADC wordt geselecteerd via de lokale selectielijn LOCS₂, de selectie van één van de vier ingangskanalen gebeurt door de lokale adreslijnen LOCA₁ en LOCA₂.

De eerste van de vier ingangen van de 4-kanaalsmultiplexer is verbonden met een 16-kanaalsmultiplexer. Het is het lokale vergrendelde 4-bits register (*latch*) dat bepaalt welk van de ingangen wordt doorgeschakeld naar de uitgang.

Aan ingangen 14 en 15 van de 16-kanaalsmultiplexer worden door middel van spanningsdelers welbekende referentiespanningen aangelegd, een "lage" en een "hoge" referentie. De gedigitaliseerde waarden van deze referentiesignalen zullen in de bedieningsterminal aan de grond gebruikt worden bij de berekening van de reële bewakingswaarden.

Aan ingang 13 wordt in de bewakingsmodules een druksensorcircuit verbonden voor de meting van de druk in de respectievelijke kuipen.



Figuur 3.49: Gemeenschappelijk deel van de MOBC- en de CIMP-bewakingsmodules.

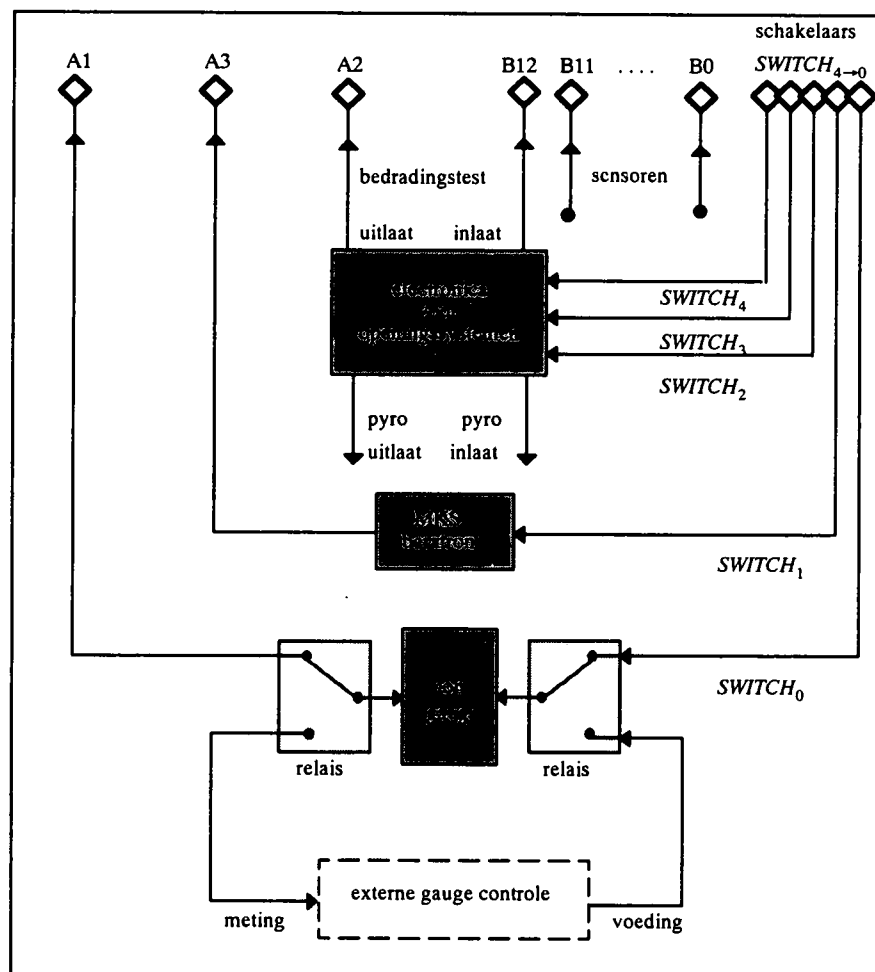
In totaal kunnen dus de drie overblijvende ingangen van de 4-kanaalsmultiplexer en de 13 overblijvende ingangen van de 16-kanaalsmultiplexer gebruikt worden voor bewakingsmetingen. De hsk-BUSIF biedt ook zijn 5 lokale schakellijnen aan voor eventueel aan- en afschakelen van meettoestellen.

In figuur 3.49 wordt het gedeelte voorgesteld dat gemeenschappelijk is voor de MOBC- en de CIMP-housekeeping-module. Figuur 3.50 toont hoe dit deel in de MOBC wordt aangevuld, figuur 3.51 in de CIMP.

3.8.3.2. De MOBC-bewakingsmodule

In de *housekeeping*-module van de MOBC worden de drie overblijvende ingangen van de 4-kanaalsmultiplexer gebruikt voor de meting van de omgevingsdruk, voor de meting van het werkvacuüm in de massascheider en voor de bedradingstest van het afsluitsysteem aan de uitlaat van de turbine.

De omgevingsdruk wordt gemeten door middel van een baratron van MKS, die een lineair bereik heeft tussen 0 en 100 mbar (MKS100). De druksensor is geplaatst in de stromingsbuis. Vanaf het moment van de opening van de afsluitsystemen geeft deze sensor aan bij welke druk (hoogte) het instrument zich bevindt.



Figuur 3.50: Vervollediging van de MOBC-bewakingsmodule.

Het werkvacuüm wordt gemeten door een *Compact Cold Cathode Gauge* van Balzers (*ion gauge*), met een niet-lineair meetbereik tussen 10^{-2} en $2 \cdot 10^{-9}$ mbar.

10 van de 13 overblijvende ingangen van de 16-kanaalsmultiplexer worden gebruikt voor temperatuurmetingen (4 in de omgeving, 6 inwendig in het massaspectrometergedeelte van het instrument). Verder wordt één ingang gebruikt voor de bedradingstest van het afsluitsysteem aan de ingang van de stromingsbuis, aan de twee laatste ingangen zijn de *reed*-schakelaars verbonden die de toestand aangeven van de beide afsluitsystemen.

In tabel 3.4 wordt een overzicht gegeven van de signalen die in de MOBC-bewakingsmodule worden opgemeten en wordt vermeld of ze thuishoren in de eerste groep (omgevingsbewaking) of in de tweede groep (instrumentbewaking van het massaspectrometergedeelte). Het pakket van instrumentbewakingsgegevens wordt nog aangevuld met de status van de afsluitklep tussen condensator en magneet in de massascheider. Deze meting gebeurt in de communicatiemodule (zie 3.9.2.4).

4-kanaalsmultiplexer (MOBC-bewakingsmodule)			
Ingang	Sensor	Plaats	Bewakingstype
0		uitgang 16-kanaalsmultiplexer	
1	druk	in de stromingsbuis (MKS100)	omgevingsbewaking
2	pyro	bedradingstest pyro voor uitlaat	instrumentbewaking MOBC
3	druk	in massascheider (<i>ion gauge</i>)	instrumentbewaking MOBC

16-kanaalsmultiplexer (MOBC-bewakingsmodule)			
Ingang	Sensor	Plaats	Parametertype
0	temperatuur	batterij (binnen)	instrumentbewaking MOBC
1	temperatuur	flens (binnen)	instrumentbewaking MOBC
2	temperatuur	octopoolvoeding (binnen)	instrumentbewaking MOBC
3	temperatuur	elektronica (binnen)	instrumentbewaking MOBC
4	temperatuur	noordzijde (buiten)	omgevingsbewaking
5	temperatuur	oostzijde (buiten)	omgevingsbewaking
6	temperatuur	zuidzijde (buiten)	omgevingsbewaking
7	temperatuur	westzijde (buiten)	omgevingsbewaking
8	positie	afsluitsysteem aan inlaat	instrumentbewaking MOBC
9	positie	afsluitsysteem aan uitlaat	instrumentbewaking MOBC
10	temperatuur	detectoroog A	instrumentbewaking MOBC
11	temperatuur	detectoroog B	instrumentbewaking MOBC
12	pyro	bedradingstest pyro voor inlaat	instrumentbewaking MOBC
13	druk	in de kuip	instrumentbewaking MOBC
14	weerstand	lage referentie	
15	weerstand	hoge referentie	

Tabel 3.4: De MOBC-bewakingssignalen.

Slechts twee van de lokale schakelaars worden voor bewakingsdoeleinden gebruikt, de andere drie voor de besturing van de afsluitsystemen (zie 3.6.2) :

- SWITCH₀ : het aan- en afschakelen van de drukmeter voor het werkvacuüm in het instrument (*ion gauge*);
- SWITCH₁ : het aan- en afschakelen van de buitendrukmeter (druk in de stromingsbuis) (MKS100);
- SWITCH₂ : het afvuren (*firing*) van het afsluitsysteem aan de uitlaat van de turbine;
- SWITCH₃ : het afvuren (*firing*) van het afsluitsysteem aan de inlaat van de stromingsbuis;
- SWITCH₄ : het activeren (*arming*) van de openingsprocedure voor in- en uitlaat.

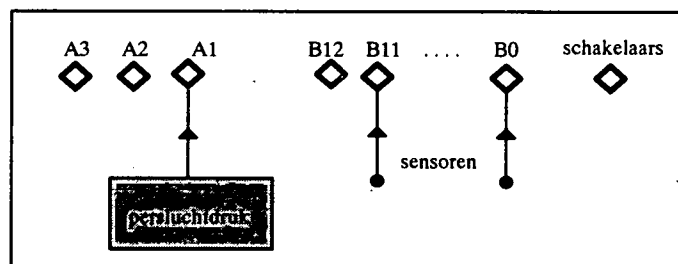
3.8.3.3. De CIMP-bewakingsmodule

In de bewakingsmodule van de CIMP worden naast de druk in de kuip nog 12 inwendige temperaturen gemeten via de 16-kanaalsmultiplexer en de druk van de perslucht voor de pneumatische kranen via de 4-kanaalsmultiplexer (tabel 3.5).

In tabel 3.6 wordt een volledig overzicht gegeven van de metingen die deel uitmaken van de instrumentbewaking van het actief chemi-ionisatiepakket. Deze tabel bevat dus zowel de metingen die via de bewakingsmodule gebeuren, als de parameters die op de besturingsmodules gecontroleerd worden en bij de bespreking van de respectievelijke modules vermeld werden.

Van de 5 lokale schakellijnen zijn er twee in gebruik, maar niet voor bewakingsdoeleinden :

- SWITCH₀ : het schakelen tussen gepulste en continue mode voor de ontladingsionenbron (zie 3.6.3.2);
- SWITCH₁ : het schakelen tussen gepulste en continue mode voor de foto-elektrische ionenbron.



Figuur 3.51: Vervollediging van de CIMP-bewakingsmodule.

4-kanaalsmultiplexer (CIMP-bewakingsmodule)			
Ingang	Sensor	Plaats	Bewakingstype
0		uitgang 16-kanaalsmultiplexer	
1	druk	van de perslucht	instrumentbewaking CIMP
2			
3			

16-kanaalsmultiplexer (CIMP-bewakingsmodule)			
Ingang	Sensor	Plaats	Parametertype
0	temperatuur	spoelkraan	instrumentbewaking CIMP
1	temperatuur	debietregelaar CI spoeling	instrumentbewaking CIMP
2	temperatuur	debietregelaar I spoeling	instrumentbewaking CIMP
3	temperatuur	debietregelaar CI	instrumentbewaking CIMP
4	temperatuur	debietregelaar I	instrumentbewaking CIMP
5	temperatuur	inlaatkraan CI	instrumentbewaking CIMP
6	temperatuur	inlaatkraan I	instrumentbewaking CIMP
7	temperatuur	boven in container	instrumentbewaking CIMP
8	temperatuur	onder in container	instrumentbewaking CIMP
9	temperatuur	flens	instrumentbewaking CIMP
10	temperatuur	motorlichaam turbine	instrumentbewaking CIMP
11	temperatuur	motorcontrole turbine	instrumentbewaking CIMP
12			
13	druk	in de container	instrumentbewaking CIMP
14	weerstand	lage referentie	
15	weerstand	hoge referentie	

Tabel 3.5: De gegevens afkomstig van de CIMP-bewakingsmodule.

Type	Functie
temperatuurmetingen	12 metingen in de bewakingsmodule (tabel 3.5) op het lichaam van de turbine
drukmetingen	2 metingen in de bewakingsmodule (tabel 3.5) van de hoge en lage druk aan de spoelgasontspanner van de hoge en lage druk aan beide moedergasontspanners
debietmetingen	van het chloormoedergas van het jodiummoedergas van het spoelgas aan de chloorzijde van het spoelgas aan de jodiumzijde
status van de kranen	de inlaat van het chloorgas naar de ionenbron de uitlaat van het chloorgas (lozing) de inlaat van het jodiumgas naar de ionenbron de uitlaat van het jodiumgas (lozing) de inlaat van het spoelgas naar de spoelleidingen
ionenbroncontrole	de werkspanning en stroom in de ontladingsionenbron de werkspanning en stroom in de foto-elektrische ionenbron (lamp)
turbinecontrole	de snelheid van de turbinemotor het stroomverbruik de voedingsspanning

Tabel 3.6: Overzicht van de instrumentbewaking van het actief chemi-ionisatiepakket.

3.9. De SIDAMS/MACSIMS-interfaces

3.9.1. Dialoog tussen vier processoreenheden

In figuur 2.33 werden de vier processorsystemen, de MOBC, de CIMP, de pixelprocessor en de bedieningsterminal aan de grond reeds aangeduid, samen met de onderlinge communicatieverbindingen. De MOBC vertolkt hier de rol van draaischijf, hij communiceert met elk van de andere eenheden en staat in voor 8 dialogen.

3.9.2. De interface tussen de MOBC en de bedieningsterminal aan de grond

3.9.2.1. Een infrastructuur voor de dialoog tussen gebruiker en instrument

Het communicatieknooppunt van het SIDAMS/MACSIMS-instrument ligt in de MOBC. Deze dialoogt aan boord met de twee achterliggende processorsystemen (de CIMP en de pixelprocessor) maar staat ook in voor de communicatie met de bedieningsterminal aan de grond via drie kanalen :

- een telecommandokanaal langs waar de gebruiker bevelen aan het instrument geeft onder de vorm van een ASCII-tekst (zie 4.2.2);
- een telecommando-echokanaal langs waar het instrument een kopij van de telecommando's en eventueel bijkomende informatie als ASCII-tekst terugstuurt naar de bedieningsterminal aan de grond;
- een telemetingkanaal langs waar alle wetenschappelijke data onder binaire vorm naar de bedieningsterminal aan de grond worden gezonden.

De interfaces voor telecommando- en telecommando-echo bevinden zich in de processormodule van de MOBC, de telemetinginterface maakt deel uit van een speciale communicatiemodule. De overgang tussen de CNES-infrastructuur en de MOBC-modules gebeurt in een aparte aanpassingsmodule (figuur 3.52).

3.9.2.2. De CNES-telecommandoinfrastructuur

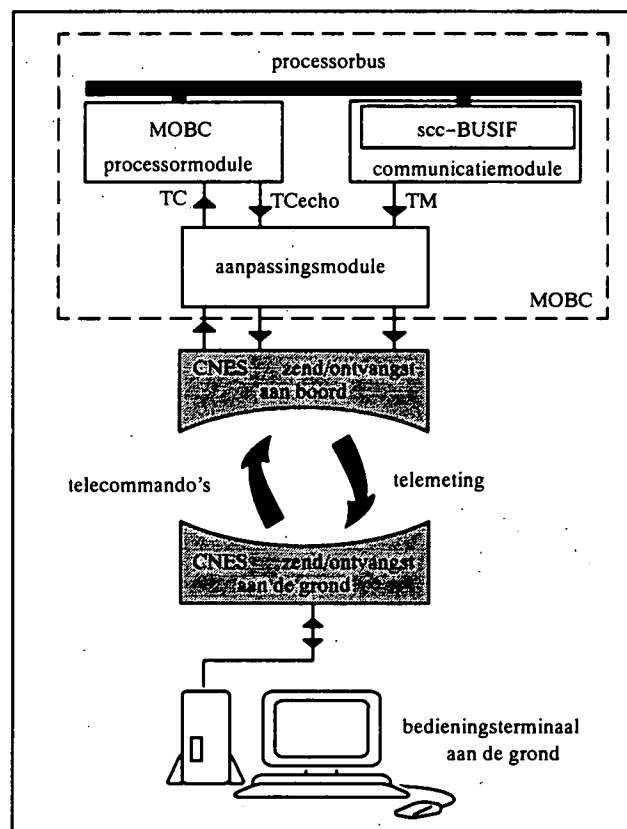
Het is de verantwoordelijkheid van het CNES de telecommando's die nodig zijn om het ballongedragen instrument te besturen vanaf de grond te verzenden [CNES 81]. De transmissie van de telecommando's gebeurt digitaal.

Vroeger werden aan boord van de ballon een aantal kanalen ter beschikking gesteld die elk uitgerust waren met een geheugenrelais. De relais werden aan de grond bediend vanuit rekken met telkens één schakelaar per kanaal (0 of 1).

Voor het besturen van een instrument werden gewoonlijk 9 zulke relaiskanalen gebruikt : één om het instrument aan of af te schakelen, de 8 anderen om de eigenlijke telecommando's te vormen. Met deze 8 kanalen konden maximaal 256 verschillende telecommando's gevormd worden.

Nadat de 8 telecommandoschakelaars waren ingesteld werd deze informatie in frequentie gemoduleerd op een draaggolf (444 MHz) en verzonden naar de ballon. Aan boord werd het gedemoduleerd signaal gebruikt om de geheugenrelais in te stellen. De stand van de 8 geheugenrelais duidde dan aan de processor in het instrument aan welk telecommando moest uitgevoerd worden.

Later werden schakelaars en geheugenrelais vervangen door parallelle 8 bits interfaces tussen de bedieningsterminal aan de grond en de CNES-zendinstallatie en tussen de aan boord CNES-ontvangstinstallatie en het instrument. Uiteindelijk wordt nu een seriële RS232-verbinding aangeboden tussen de zend- en ontvangstinstallatie van het CNES en de wetenschappelijke apparatuur aan boord en aan de grond.



Figuur 3.52: De telecommando- en telemetinginfrastructuur.

3.9.2.3. De CNES-telemetinginfrastructuur

Het CNES is ook verantwoordelijk voor het doorzenden van gegevens vanaf de ballon naar de basis aan de grond [CNES 76]. Het betreft hier zowel hun eigen navigatie-informatie als de wetenschappelijke data afkomstig van het instrument. Het CNES gebruikt hiervoor een analog telemetingkanaal.

Over zo'n analog kanaal kunnen een aantal datakanalen gelijktijdig en snel verzonden worden. Elk datakanaal wordt op een deeldraaggolf gemoduleerd bij een bepaalde frequentie. De frequenties worden zo gekozen dat kruismodulatie zo klein mogelijk blijft. De deeldraaggolven worden gesommeerd en dan weer gemoduleerd op een hoogfrequente hoofddraaggolf.

Dit modulatieprincipe wordt FM-FM of FM-PM genoemd al naar gelang de deeldraaggolven in frequentie of in fase gemoduleerd worden op de hoofddraaggolf.

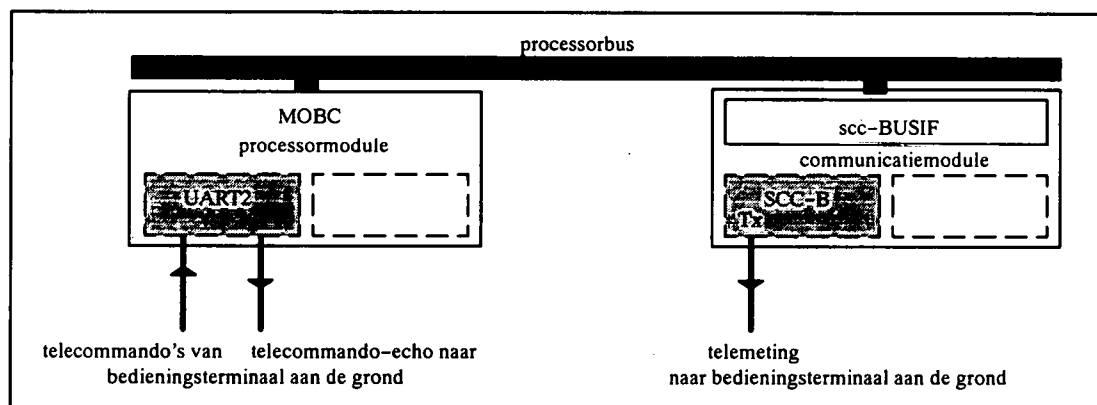
Om zo veel mogelijk uniformiteit te bekomen in de zendapparatuur aan boord en de ontvangstapparatuur aan de grond, wordt de analoge telemeting gereguleerd door de *Inter-Range Instrumentation Group* (IRIG). IRIG bepaalt ondermeer de frequenties van de deeldraaggolven die mogen gebruikt worden in het luchtruim [Bala 63].

Zowel het telecommando-echokanaal als het telemetingkanaal van het SIDAMS/MACSIMS-instrument worden, samen met een kanaal voor voedingsbewaking verzonden door middel van de CNES-telemetinginfrastructuur. Tijdens de vlucht van november 1995 werden voor het instrument zelf de volgende drie IRIG-kanalen gebruikt :

- kanaal E (439,8 kHz) voor de wetenschappelijke telemeting;
- kanaal A (138,2 kHz) voor het telecommando-echokanaal;
- kanaal 6 (10,68 kHz) voor de voedingsbewaking van het instrument.

De hoofddraaggolf had een frequentie van 470 MHz.

3.9.2.4. Infrastructuur voor seriële communicatie in de MOBC



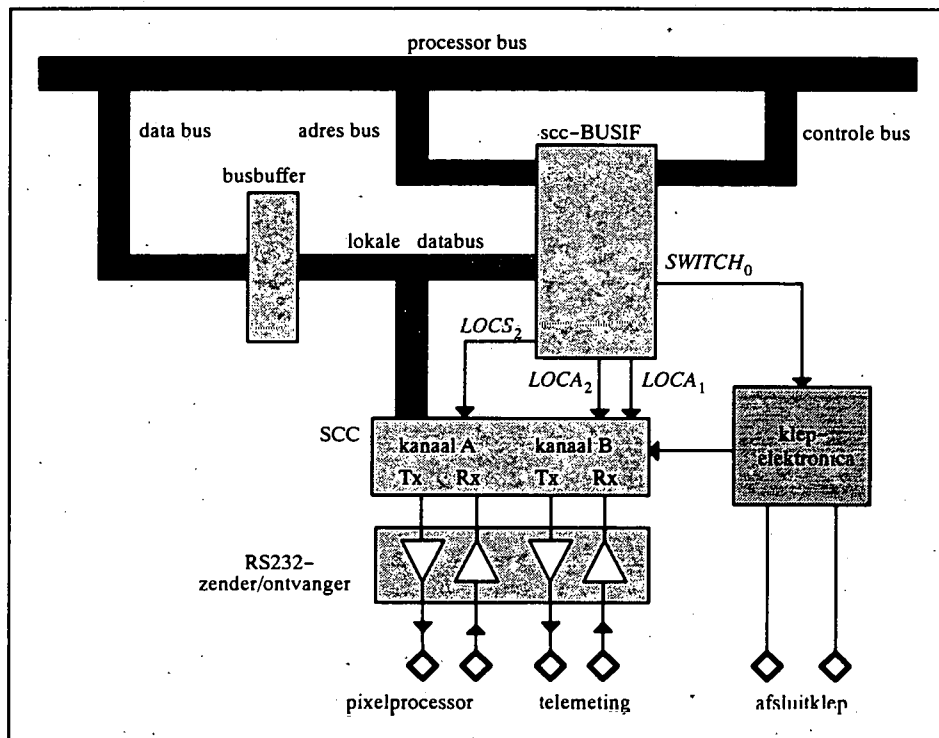
Figuur 3.53: De communicatie tussen de MOBC en de bedieningsterminal aan de grond.

De ontvangst van de telecommandotekens en de verzending van de telecommando-echo gebeurt via één van de twee seriële communicatiecircuits (UART's) in de processormodule. Beide kanalen gebruiken het RS232-protocol, de transmissiesnelheid bedraagt 1200 bits/s. Ontvangst en verzending verlopen *interrupt*-gestuurd. Het ontvangstkanaal genereert een *interrupt* zodra een teken het transmissieregister binnenkomt, het zendkanaal wanneer het zendregister geleedigd wordt.

Voor het verzenden van de wetenschappelijke data over het telemetingkanaal wordt gebruik gemaakt van een serieel communicatiecircuit, een *Serial Communications Controller* (SCC), dat zich in de communicatiemodule bevindt (figuur 3.53). Dit circuit bevat twee kanalen met telkens een ontvangst- en een zendregister voor seriële communicatie. De drie andere kanalen van de SCC worden gebruikt voor de ontvangst van telemeting uit de CIMP en voor de dialoog met de pixelprocessor.

De verzending van telemeting gebeurt eveneens *interrupt*-gestuurd : telkens een teken het zendregister verlaat wordt de processor daarvan op de hoogte gebracht door middel van een *interrupt*-signaal. De transmissiesnelheid op het telemetingkanaal bedraagt 4800 bits/s.

Voor de interface tussen de processor en de communicatiemodule wordt gezorgd door de businterface scc-BUSIF. De SCC wordt geselecteerd door middel van de lokale selectielijn $LOCS_2$ en verdere programmatie gebeurt via de lokale controle- en adressignalen $LOCRD$, $LOCWR$, $LOCA_1$ en $LOCA_2$. In figuur 3.54 wordt een blokschema van de communicatiemodule gegeven.



Figuur 3.54: Blokschema van de communicatiemodule.

3.9.2.5. De aanpassingsmodule tussen het instrument en de CNES-infrastructuur

3.9.2.5.1. Aan- en afschakelen van het instrument via het telecommandokanaal

3.9.2.5.1.1. Het nut van schakelen op afstand

In principe moet geen aanpassing gebeuren op de telecommandolijn die door de CNES-ontvanger aan boord wordt aangeboden aan het instrument. Het is een serieel signaal dat volledig compatibel is met de seriële interface in de MOBC.

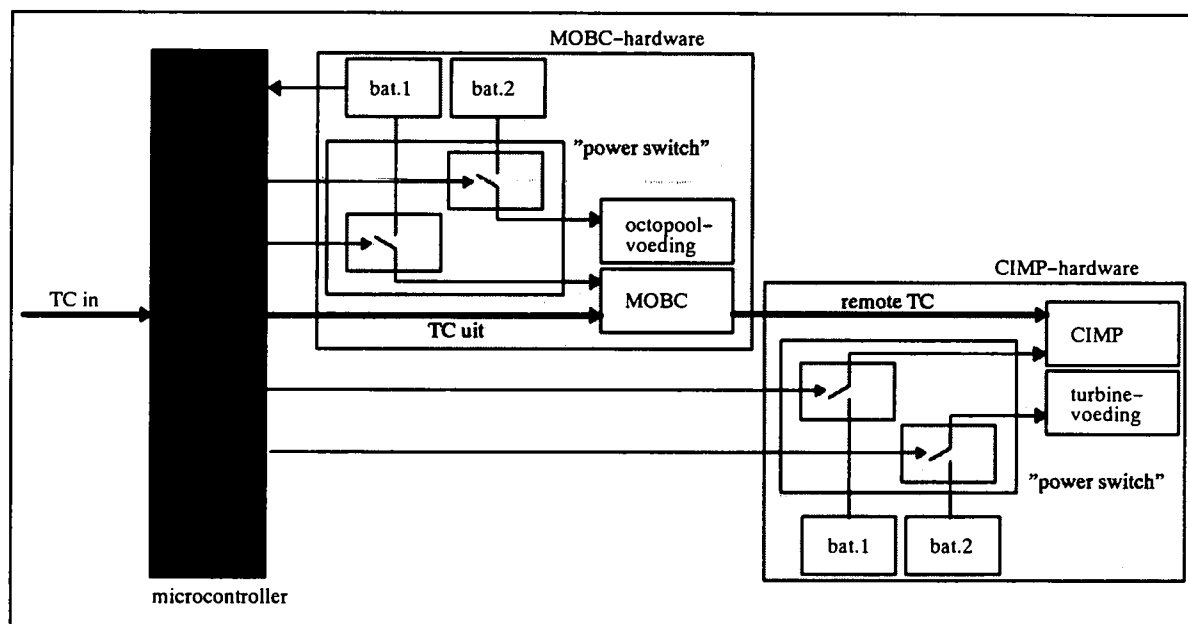
Doordat echter slechts één seriële lijn gebruikt wordt voor het besturen van het instrument stelt zich het probleem hoe het instrument, of beter de vier deelsystemen van het instrument (MOBC-elektronica, octopoolvoeding, CIMP-elektronica en turbinevoeding) aan of af te schakelen via dit telecommandokanaal.

In principe zouden de deelsystemen voor de lancering manueel aangeschakeld kunnen worden. Ze zouden dan pas na de landing, bij de recuperatie van het instrument terug kunnen afgezet worden. Er wordt echter naar gestreefd het instrument en dus ook de elektronica intact te houden om het zo snel en probleemloos mogelijk terug operationeel te maken.

Het is af te raden het instrument onder spanning te houden tijdens de meestal onzachte landing aan de parachute omdat het risico op kortsluitingen dan te groot is. Bovendien, als de deelsystemen niet vanop afstand kunnen aan- en afgeschakeld worden, bestaat de mogelijkheid niet in geval van nood (bijvoorbeeld bij een softwareprobleem) een *reset* uit te voeren van de hardware.

Daarom werd een systeem bedacht waardoor het eigenlijke instrument via het telecommandokanaal kan worden aan- en afgeschakeld wanneer de gebruiker dat wenst, zonder de controle over het niet gevoed instrument te verliezen. Het werd geïntegreerd in een aanpassingsmodule die zich bevindt tussen het instrument en de CNES-telecommando- en telemetinginfrastructuur (figuur 3.52). Het ligt voor de hand dat de voeding van deze aanpassingsmodule gescheiden moet zijn van die van het instrument. Ze wordt rechtstreeks en continu gevoed uit de batterij.

3.9.2.5.1.2. Detectie van schakelcodes op het telecommandokanaal



Figuur 3.55: Detectie en implementatie van schakelcodes.

De telecommandotekens worden in de aanpassingsmodule doorheen een *microcontroller* geleid alvorens ze aan de MOBC worden doorgegeven. Deze *microcontroller* komt enkel in actie wanneer hij een zeer specifieke opeenvolging van ASCII-tekens, een schakelcode, herkent in de telecommandostroom. Hij interpreteert deze code en schakelt naar gelang één van de deelsystemen aan of af (figuur 3.55).

De codes zijn dubbele 6 bytes *escape*-sequenties. In totaal zijn er 7 aan- en 7 afschakelcodes.

aanschakelen (set) :	switch ₀	<ESC>@!#s0<ESC>@!#s0

	switch ₆	<ESC>@!#s6<ESC>@!#s6
afschakelen (reset) :	switch ₀	<ESC>@!#r0<ESC>@!#r0

	switch ₆	<ESC>@!#r6<ESC>@!#r6

Alle tekens die deel uitmaken van één van deze 14 correcte sequenties worden uit de telecommandostroom gefilterd.

De sequentie <ESC>@!#s7<ESC>@!#s7 wordt niet gebruikt terwijl de sequentie <ESC>@!#r7<ESC>@!#r7 toelaat de *microcontroller* vanuit de bedieningsterminal aan de grond intern te *resetten*.

Een goede werking van dit *microcontroller*-systeem is cruciaal voor het SIDAMS/MACSIMS-instrument. Om de betrouwbaarheid ervan te verhogen werd een *supervisor*-circuit toegevoegd. Deze zorgt voor een ordelijke *reset* van de *microcontroller* bij het opstarten en afzetten en bij het afvallen van de spanning van de batterij. Verder biedt deze circuit een interessante *watchdog*-functie : indien de *microcontroller* niet op geregelde tijdstippen (om de 1,6 s) een signaal naar de *supervisor* zendt, zorgt deze laatste voor een automatisch *reset* van de *microcontroller*.

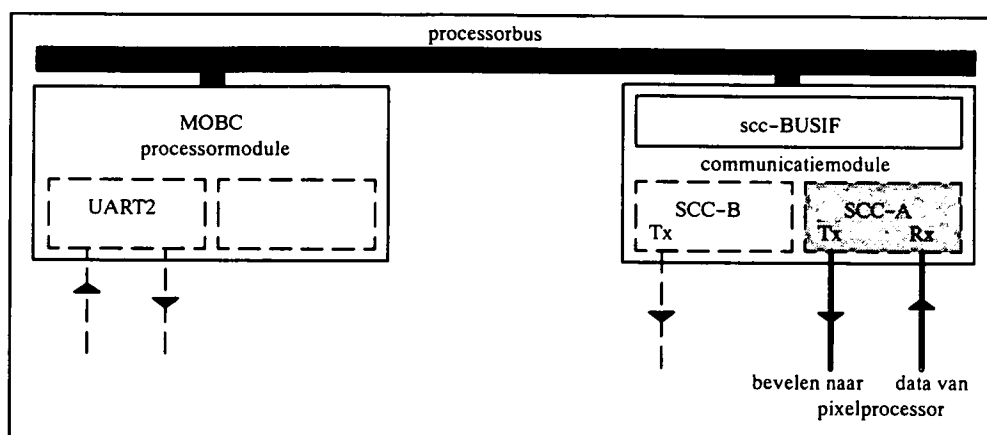
3.9.2.5.2. Aanpassing van telemetingsignalen aan de CNES-norm

De processor- en communicatiemodule bieden een telecommando-echo- en telemetingsignaal aan dat tussen -9 en 9 V ligt. Het niveau wordt aangepast tussen 0 en 2 V om te voldoen aan de norm die gehanteerd wordt in de CNES-telemetinginfrastructuur. Ook de 5 V-voedingsspanning in de aanpassingsmodule (rechtstreeks genomen uit de batterij) wordt tussen 0 en 2 V gebracht en als een telemetingsignaal (voedingsbewaking) verzonden naar de grond.

3.9.3. De interface tussen de MOBC en de pixelprocessor

De eigenlijke besturing van de elektro-optische ionendetector hoort niet tot de taken van de MOBC. Het was aangewezen dat daarvoor aan het PIUB een gescheiden processorsysteem (de pixelprocessor) ontwikkeld werd tezamen met de detector. De MOBC heeft in deze configuratie twee taken (figuur 3.56).

Telecommando's die specifiek met de uitlezing van de pixelprocessor te maken hebben, worden omgezet in begrijpbare bevelen en verzonden via het transmissieregister van kanaal A van de SCC. De gegevens die door de pixelprocessor worden teruggestuurd (datakanaal) worden ontvangen via het ontvangstregister van kanaal A en moeten daarna via het telemetingkanaal verzonden worden naar de grond. De communicatie tussen MOBC en pixelprocessor verloopt *interrupt*-gestuurd en aan een snelheid van 9600 bits/s.

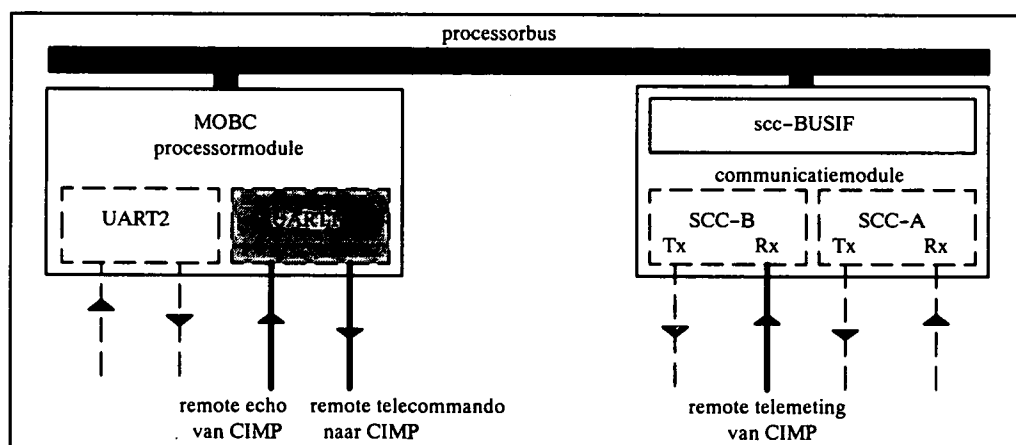


Figuur 3.56: De communicatie tussen MOBC en pixelprocessor.

3.9.4. De interface tussen de MOBC en de CIMP

De interface tussen MOBC en CIMP is vanuit het standpunt van de MOBC gezien het spiegelbeeld van de interface tussen MOBC en de bedieningsterminal aan de grond. Eigenlijk kan men zeggen dat de MOBC voor de CIMP is, wat de bedieningsterminal aan de grond is voor de MOBC, namelijk de bron van telecommando's en de bestemming voor telecommando-echo en telemeting.

De MOBC stuurt inderdaad de telecommando's die specifiek bestemd zijn voor het actief chemi-ionisatiepakket door naar de CIMP. De CIMP antwoordt hierop met een echo die op dezelfde manier is gestructureerd als de telecommando-echo van de MOBC naar de bedieningsterminal aan de grond. Bovendien verzendt de CIMP zijn wetenschappelijke data over een telemetingkanaal naar de MOBC. We kunnen stellen dat de CIMP als het ware *remote* bediend wordt vanuit de bedieningsterminal aan de grond (dit wil zeggen transparant voor de gebruiker via de MOBC).

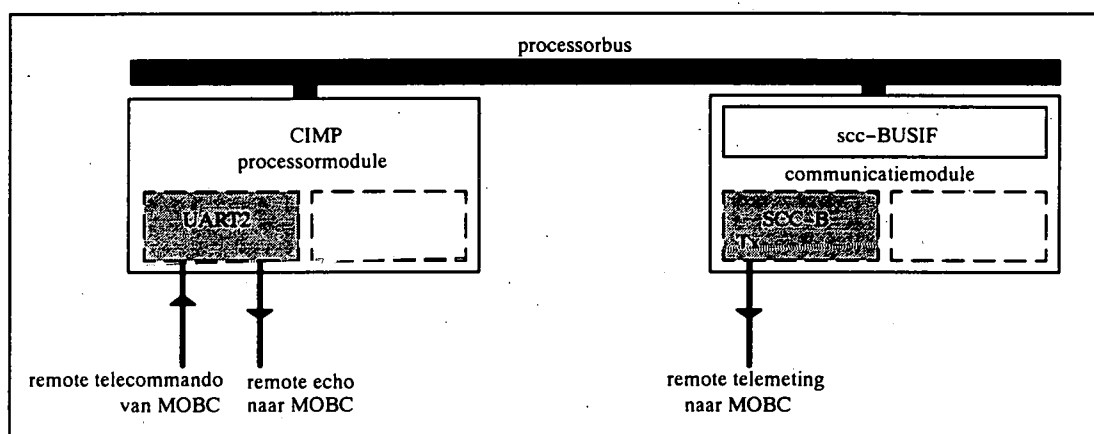


Figuur 3.57: De communicatie van de MOBC met de CIMP.

Tussen MOBC en bedieningsterminal aan de grond moeten de signalen aangepast worden aan het CNES-transmissiesysteem. Tussen MOBC en CIMP is dit niet nodig. De communicatie gebeurt over de 3 kanalen volgens het RS232-protocol (figuur 3.57). Voor de *remote* telecommando's en de *remote* echo worden de verzendings- en ontvangstkanalen van UART₁ gebruikt in de processormodule. De transmissiesnelheid bedraagt 1200 bits/s.

Voor de *remote* telemeting wordt het enige nog vrije kanaal gebruikt (ontvangst via B) van de SCC in de communicatiemodule. Hier bedraagt de transmissiesnelheid 4800 bits/s.

In de CIMP wordt voor de *remote* telecommando's en *remote* echo UART₂ gebruikt in de processormodule en voor de *remote* telemeting het verzendgedeelte van kanaal B van de SCC in de communicatiemodule (figuur 3.58).



Figuur 3.58: De communicatie van de CIMP met de MOBC.

3.10. Besluit

Zoals uit hoofdstuk 2 blijkt is het SIDAMS/MACSIMS-instrument een complexe combinatie van een massaspectrometergedeelte en een actief chemi-ionisatiepakket met een groot aantal te besturen instrumentparameters.

Voor het beheer van dit ballongedragen instrument werd specifieke elektronische apparatuur ontwikkeld met een dubbel ingebed processorsysteem. Het geheel is door de gebruiker vanaf de grond bestuurbaar dankzij een volledige integratie met de telecommando- en telemetinginfrastructuur van het CNES.

De besturing van de instrumentparameters werd volledig modulair uitgebouwd. Elke module bevat in principe drie essentiële functies (schakelen, sturen en controleren) en is opgebouwd rondom een speciale hardware businterface met de processor, gekoppeld aan een overzichtelijke softwarestructuur. Het gebruik van deze modules laat toe het instrument gemakkelijk uit te breiden, wat bewezen wordt door de toevoeging van besturingsmodules voor het ionenproductiegedeelte en de vluchttijdmeting aan de oorspronkelijk gerealiseerde massaspectrometerbesturing.

Voor de voeding van de instrumentonderdelen werden een aantal modules in huis of volgens opgelegde specificaties in de industrie ontworpen, omdat er geen kant en klare oplossingen voor bestaan : een hoogfrequente octopoolvoeding, stabiele hoogspanningsvoedingen voor de massascheider, gepulste ionenbronvoedingen en een turbine aandrijving.

Omdat de kennis van de tijd die moeder- en produktionen in het reactiemilieu verblijven belangrijk is voor het afleiden van de concentraties van interessante minderheidsgassen, werd een vluchttijdmeter gerealiseerd en met succes toegepast in de laatste ballonvlucht. Hierbij werd vooral aandacht besteed aan een elektrometer die ongevoelig is voor storende invloeden en aan een pulssysteem voor de ionenbronnen op basis van infrarood gevoelige hoogspanningsdiodes.

Bij het ontwerp van de hardware werd niet uit het oog verloren dat het instrument moet werken in een elektronica-onvriendelijke omgeving. Om het gedrag van het instrument, dat zich op grote afstand bevindt, in reële tijd te volgen werd daarom ook veel aandacht besteed aan de bewaking ervan.

Doordat de afstandsbediening van het instrument via een serieel kanaal gebeurt, moest een apart bedrijfszeker systeem, op basis van een *microcontroller*, ontwikkeld worden voor het aan- en afschakelen van de instrumentonderdelen.

Als aanvulling bij het algemeen overzicht van de opbouw van de SIDAMS/MACSIMS-instrumentatie in dit hoofdstuk verwijzen we voor een meer gedetailleerde beschrijving van de hardware, voor alle elektrische schema's en voor een complete kaart- en bekabelingsplattegrond naar appendix A.

Hoofdstuk 4

De software aan boord

4.1. Inleiding

De opbouw van een dubbele software werkomgeving aan boord van het SIDAMS/MACSIMS-instrument wordt besproken. Algemene principes voor de communicatie met het grondstation, zoals de telecommando- en de telemetingfilosofie, het interpreteren en groeperen van telecommando's, het beveiligen van data tijdens transport enz. worden uitgelegd. Verder wordt aangetoond hoe *multitasking* de werkomgeving veelzijdiger maakt en worden alle aspecten beschreven die bijdragen tot het bekomen van een gebruiksvriendelijk geheel.

Enige aandacht wordt ook besteed aan speciale softwaretechnieken die werden ontwikkeld voor een gemakkelijke bediening van bepaalde instrumentparameters. Aan de hand van de geïmplementeerde telecommando's wordt een overzicht gegeven van de besturingsmogelijkheden van het instrument.

Voor een uitgebreide bespreking van programma's, routines en telecommando's wordt verwezen naar appendix B.

4.2. De werkomgeving

4.2.1. De kern van de werkomgeving : VRTX-86 voor ingebedde 80C86 toepassingen

4.2.1.1. De kenmerken van VRTX-86

De noodzaak een reële tijd *multitasking* beheersysteem te gebruiken in het SIDAMS/MACSIMS-instrument werd reeds onderstreept : onmiddellijke implementatie van bevelen, snelle beschikbaarheid van meetgegevens, parallel behandelen van opdrachten, enz. Ter ondersteuning van reële tijd en *multitasking* toepassingen in ingebedde processorsystemen moet een stel basismechanismen ter beschikking staan. Eerder dan die zelf te ontwikkelen werd geopteerd voor het gebruik van het in de handel verkrijgbaar pakket VRTX-86 (*Versatile Real Time Executive* voor de 80C86-processor) [VRTX 84]. Het is een zogenaamde silicium software component, een kant-en-klare geassembleerde microprocessorcode.

De belangrijkste door VRTX-86 aangeboden elementen zijn : ondersteuning van *multitasking*, *interrupt*-gestuurde taakverdeling gebaseerd op prioriteit, synchronisatie van taken, communicatie tussen taken (*queues*, *mailboxes*), dynamische geheugentoewijzing, klokcontrole in reële tijd en *input/output* van tekens. Ze worden aan de gebruiker aangeboden onder de vorm van VRTX-oproepen. VRTX-86 beschikt over twee 64 bytes lange buffers, de *VRTX input* en de *VRTX output buffer*, die bestemd zijn voor I/O-doeleinden.

VRTX-86 heeft het grote voordeel onafhankelijk te zijn van de ontwikkelingsomgeving (*compiler*, *assembler*, *linker*, *loader*), van de doelomgeving (enkel een processor is nodig) en van de positie van het geheugen. Bovendien laat VRTX-86 zich gemakkelijk integreren in een toepassingsgerichte software-omgeving via een configuratie- en een "*interrupt vector*"-tabel.

4.2.1.2. De interface van VRTX-86 met het processorsysteem

VRTX-86 is de basis waarop de toepassingssoftware (het beheersysteem en de uitvoeringsroutines) zal worden opgebouwd. Samen met de *interrupt*-behandelingsroutines vormt VRTX-86 de overgangslaag tussen de hardware en de toepassingssoftware.

De interface tussen VRTX-86 en het microprocessorsysteem wordt geconfigureerd in een *Board Support Package* (BSP) die uit de volgende elementen bestaat.

- Een configuratietabel laat toe VRTX-86 te configureren naar eigen toepassingsnoden (systeemgeheugen, *multitasking* controle, *interrupt* ondersteuning, oproep van gebruikerssoftware bij bepaalde gebeurtenissen, enz. ...).
- Een "*interrupt vector*"-tabel bevat de adressen van *interrupt*-behandelingsroutines. Twee vectoren hebben een speciale betekenis, de ene wijst naar het startpunt van VRTX-86, de andere naar de top van de configuratietabel. De eigenlijke *interrupt*-behandelingsroutines maken geen deel uit van VRTX-86.
- De installatieroutines van de verschillende perifere componenten voor *interrupt*-behandeling, tijdcontrole, seriële communicatie.
- De definitie van VRTX-gebonden elementen zoals taken, geheugenpartities en *queues*.

Het begin van de configuratie wordt aan VRTX kenbaar gemaakt door de speciale VRTX-oproep VRTX_INIT. Aan het einde van het *Board Support Package* bevindt zich de VRTX-oproep VRTX_GO die het beheersysteem in werking stelt.

4.2.1.3. Interrupt-behandelingsroutines

De *interrupt*-behandelingsroutines (isr) maken geen deel uit van de VRTX-86-kern. Zodra een hardware *interrupt* door de processor wordt ontvangen zal deze de bijhorende *interrupt*-behandelingsroutine in de "*interrupt vector*"-tabel opzoeken en opstarten. Vermits de *interrupt*-behandelingsroutines asynchroon worden uitgevoerd moet ervoor gezorgd worden dat VRTX of lopende uitvoeringsroutines hierdoor niet verstoord worden. In elke *interrupt*-behandelingsroutine moet aan VRTX kenbaar gemaakt worden dat het niet gaat om een gewone uitvoeringsroutine maar wel om een *interrupt*-behandelingsroutine. De code van de routine wordt daarom geplaatst tussen de VRTX-oproepen UI_ENTER en UI_EXIT.

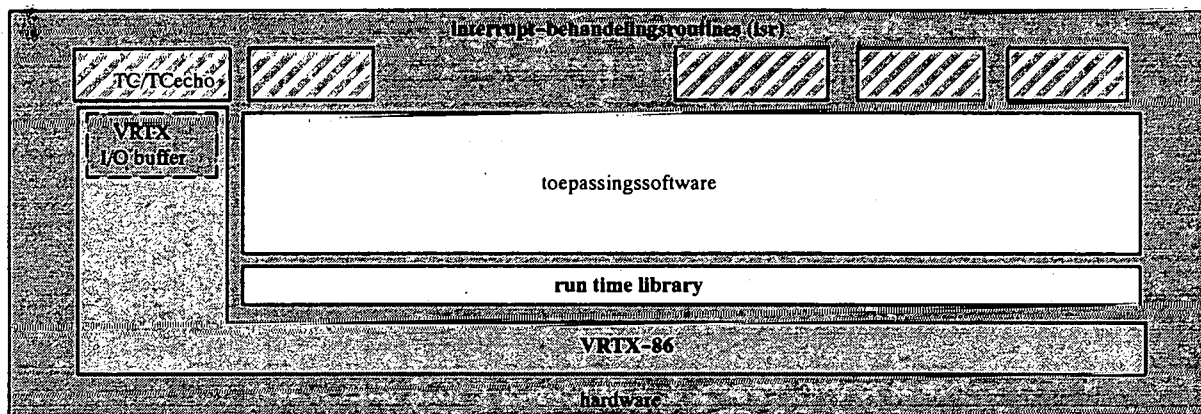
Het is wel mogelijk vanuit *interrupt*-behandelingsroutines *input/output*-gegevens uit te wisselen met taken (de speciale VRTX-oproepen UI_RXCHR en UI_TXRDY) of gebruik te maken van de VRTX-klok (de speciale VRTX-oproep UI_TIMER).

4.2.1.4. De interface van VRTX-86 met de toepassingssoftware

Bovenop VRTX wordt een speciale *run time library* (RTL) aangeboden, *Real Time C* (RTC) genaamd. Deze bibliotheek zorgt voor de integratie van het VRTX-beheersysteem en de ontwikkelingsomgeving (C-compiler). De bibliotheek bevat drie types van basisfuncties die vanuit in C geschreven routines kunnen opgeroepen worden :

- de wiskundige functies en bewerkingen op (grote) gehele getallen en op getallen in het vlottende-kommaformaat;
- de standaard *input/output*-functies (stdio), die werden aangepast om gebruik te maken van de *input/output*-mogelijkheden van VRTX-86;
- alle VRTX-oproepen worden in een C-compatibel formaat aangeboden.

Zoals VRTX-86 en de *interrupt*-behandelingsroutines de bovenliggende toepassingssoftware afschermen van typische hardwarekenmerken, zo schermt de *run time library* dan weer de hogere programmeertaal af van typische kenmerken van het VRTX-beheersysteem. In figuur 4.1 wordt de inplanting van VRTX-86, de *interrupt*-behandelingsroutines en de *run time library* schematisch weergegeven. Deze figuur zal verder gebruikt worden om de opbouw van de software te illustreren.



Figuur 4.1: Inplanting van VRTX-86, interrupt-behandelingsroutines en de run time library op de hardware.

4.2.2. De interface tussen de gebruiker en het instrument

4.2.2.1. Een ASCII-telecommandointerface

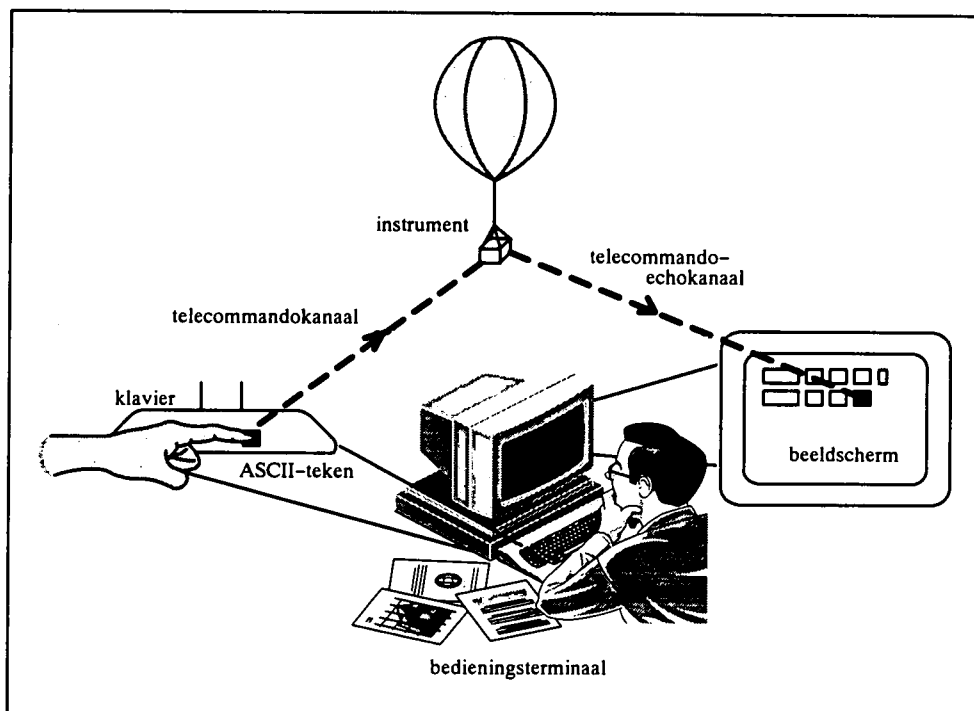
In 3.9.2.2 en 3.9.2.3 werden de vroegere en de actuele telecommando- en telemetinginfrastructuur van het CNES besproken.

Het nadeel van het oude telecommandosysteem (instellen van 8 schakelaars om één telecommando te vormen) was ongetwijfeld de moeilijke hanteerbaarheid voor de gebruiker. De kans een verkeerd telecommando te verzenden was niet denkbeeldig en de controle op de in het instrument ontvangen telecommando's moeilijk. Tijdens sommige vluchten werd de bediening van het instrument herleid tot de slopende taak voortdurend (de juiste) schakelaars over te halen.

Van het invoeren van een seriële verbinding tussen de CNES-telecommandoinstallatie en de wetenschappelijke apparatuur werd dan ook gebruik gemaakt om de SIDAMS/MACSIMS-telecommando-interface veel gebruiksvriendelijker te maken.

Als doel voor deze interface werd gesteld dat de gebruiker het instrument vanaf een computerterminaal moet kunnen bedienen. De telecommando's moeten via een klavier ingegeven worden onder de vorm van ASCII-tekengroepen. De gebruiker moet op een beeldscherm het ingeven van de tekens in reële tijd kunnen volgen. Hij mag niet merken dat het instrument met de aangesproken processor en zijn beheersysteem zich op honderden kilometers afstand kan bevinden. Het instrument moet kunnen bediend worden zoals een PC of een werkstation waarvan processor en werkomgeving zich binnen handbereik van de gebruiker bevinden (figuur 4.2).

Aangezien tijdens een ballonvlucht zowel aan boord als aan de grond de telecommando-interface met de CNES-apparatuur uit een RS232-verbinding bestaat, zal het instrument tijdens de voorbereidende fase zonder bijkomende hardware via een rechtstreekse seriële lijn kunnen bediend worden vanaf de bedieningsterminal.



Figuur 4.2: De SIDAMS/MACSIMS-ASCII-telecommando-interface.

4.2.2.2. De telecommandofilosofie

Indien we abstractie maken van de CNES-infrastructuur, kunnen we stellen dat de ganse ASCII-telecommando-interface steunt op het gebruik van een dubbele seriële verbinding tussen de bedieningsterminal en het instrument. Naast het eigenlijke telecommandokanaal tussen terminal en instrument, wordt nog een telecommando-echokanaal gebruikt vanuit het instrument naar de bedieningsterminal.

Een ASCII-teken dat door de gebruiker aan de terminal wordt ingebracht, wordt dadelijk via het telecommandokanaal naar het instrument verzonden. Een specifieke reeks van

opeenvolgende ASCII-teken (een ASCII-tekgroep) die bovendien een bepaalde betekenis heeft voor het instrument vormt dan een telecommando. Het aantal telecommando's dat zo kan gevormd worden is onbeperkt.

In het beheersysteem aan boord worden de ASCII-tekgroepen opgenomen voor verdere interpretatie en implementatie. Elk ontvangen teken wordt echter ook dadelijk na ontvangst teruggezonden naar de bedieningsterminal aan de grond via het telecommando-echokanaal en er afgebeeld op het beeldscherm.

De gebruiker communiceert zo in reële tijd met het instrument door vanaf het klavier een op het beeldscherm voorgestelde commandolijn in te vullen. Een reeks ASCII-teken, ingebracht op deze commandolijn wordt door het instrument als een telecommando beschouwd zodra ze afgesloten wordt met het "nieuwe lijn"-teken (NL). De echo van het "nieuwe lijn"-teken zorgt ervoor dat in de bedieningsterminal een nieuwe commandolijn wordt aangeboden.

Op de commandolijn kan de tekgroep nog gewijzigd worden (achterwaarts uitvegen) alvorens ze door het beheersysteem vastgelegd wordt als het volgende uit te voeren telecommando. De visuele terugkoppeling van de ingegeven karakters verkleint de kans op het doorgeven van foutieve telecommando's.

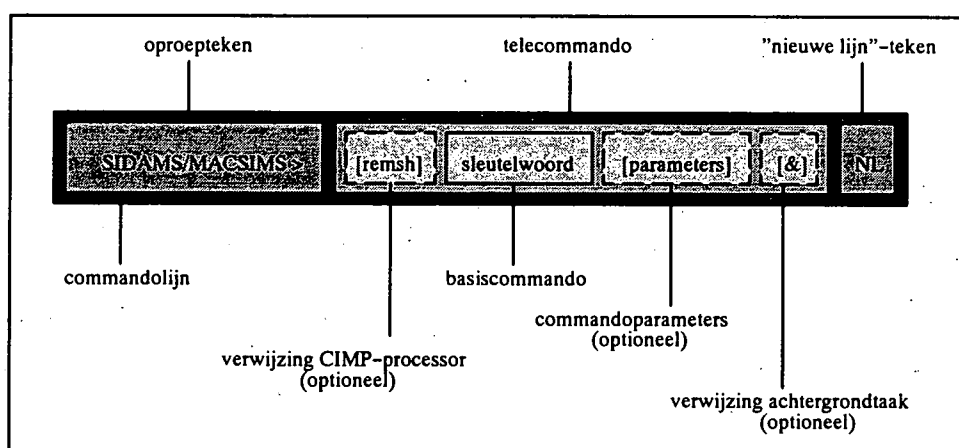
Bovendien zal bij de nieuwe ASCII-interface een syntactische fout in een telecommando slechts tot gevolg hebben dat het telecommando door het beheersysteem niet wordt begrepen. Dit in tegenstelling tot het oude systeem waar een verkeerde instelling van een schakelaar vaak tot gevolg had dat een ongewenst telecommando werd gegeven.

De telecommando-interface wordt nog aantrekkelijker gemaakt doordat het beheersysteem aan boord een oproepteken (*prompt*) invoert aan het begin van elke commandolijn. Het oproepteken wordt verzonden over de telecommando-echolijn telkens een volledig telecommando werd ontvangen en uitgevoerd.

Deze ASCII-telecommandofilosofie leent zich ook uitstekend voor integratie in een grafische interface op de bedieningsterminal (zie hoofdstuk 5).

Doordat geen discrete schakellijnen meer beschikbaar zijn, gebeurt ook het aan- of afschakelen van het instrument via het seriële telecommandokanaal (zie 3.9.2.5.1).

4.2.2.3. De syntaxis van telecommando's



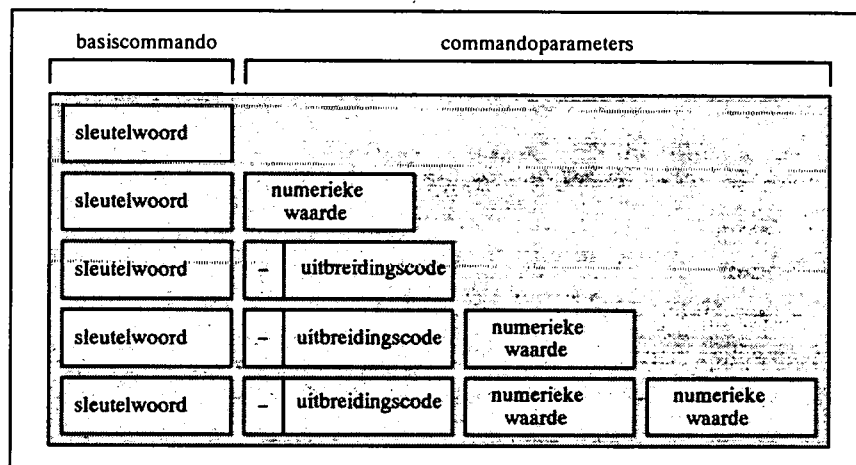
Figuur 4.3: De commandolijn en de algemene telecommandosyntaxis.

Een commandolijn bestaat uit een oproepteken dat door het beheersysteem van het instrument naar de bedieningsterminal wordt gezonden telkens een vorig telecommando uitgevoerd is. Achter het oproepteken kan de gebruiker het eigenlijke telecommando vormen. Elk telecommando wordt afgesloten met een "nieuwe lijn"-teken (NL) (figuur 4.3).

Een telecommando bevat steeds één element, het basiscommando of het sleutelwoord. Het basiscommando bestaat steeds uit een groep van twee tot vijf ASCII-tekens (meestal een afkorting) die staat voor de uitvoering van een bepaalde taak of voor een geheel van taken.

De meeste basiscommando's kunnen optioneel vergezeld worden van één of meerdere commandoparameters. De commandoparameters kunnen enerzijds numerieke waarden zijn voor de uitsturing van deelsystemen van het instrument. Het kunnen anderzijds ook één- of tweeletterige uitbreidingscodes zijn die toelaten één taak te kiezen in de groep van taken die door het basiscommando wordt aangeduid. Zo'n uitbreidingscode wordt steeds voorafgegaan door een verbindingsteken. In figuur 4.4 worden enkele voorbeelden gegeven van mogelijke telecommando-opbouw.

Indien het laatste teken van een telecommando een &-teken is (ampersand) betekent dit dat het telecommando in een achtergrondtaak moet uitgevoerd worden.



Figuur 4.4: Algemene voorbeelden van telecommando-opbouw.

4.2.2.4. De integratie van de CIMP binnen de telecommandofilosofie

De belangrijkste processor aan boord, de MOBC, staat in voor de volledige telecommando-interface tussen de bedieningsterminal aan de grond en het instrument. Hij ontvangt dus zowel de telecommando's voor het massaspectrometergedeelte als die voor het actief chemi-ionisatiepakket.

In telecommando's die specifiek bedoeld zijn voor het actief chemi-ionisatiepakket moet het basiscommando voorafgegaan worden door de uitdrukking *remsh* (figuur 4.3). Zulke telecommando's worden dan in de MOBC herkend en dadelijk doorgegeven aan de CIMP.

In principe zou het mogelijk geweest zijn twee gescheiden telecommando-interfaces te bouwen, één met de MOBC en één met de CIMP. De gebruiker zou dan echter twee instrumenten moeten bedienen waar het nu lijkt alsof hij slechts met één instrument communiceert. Bovendien zou de belangrijke synchronisatie tussen beide systemen dan veel moeilijker geweest zijn. De

produktie van ionen in het actief chemi-ionisatiepakket en het opnemen van massa- of vluchtijdspectra in het massaspectrometergedeelte kunnen nu in de MOBC op mekaar afgestemd worden.

4.2.2.5. *Interrupt-behandelingsroutines en de rol van VRTX-86 in het telecommandoconcept*

Zodra in het ontvangstregister van UART₂ in de MOBC-processor module een teken aankomt, signaleert deze dat onder de vorm van een *interrupt*-signaal aan de microprocessor. De processor roept dan de bijhorende *interrupt*-behandelingsroutine op, waar het teken in de *VRTX input buffer* wordt geplaatst. Het beheersysteem haalt de tekens op uit deze buffer.

Het verzenden van de telecommando-echotekens verloopt op een analoge manier. De tekens worden door het beheersysteem in de *VRTX output buffer* geplaatst. Daarin wordt, telkens een *interrupt*-signaal de processor verwittigt dat verzendregister van UART₂ is vrijgemaakt, een teken gelezen door een *interrupt*-behandelingsroutine en verstuurd.

Het versturen van het eerste teken, in feite het versturen van om het even welk teken wanneer de *VRTX output buffer* leeg is en het transmissiekanaal beschikbaar, kan niet volgens dit *interrupt*-mechanisme verlopen. Daarvoor bestaat een speciale *driver*-routine die een teken onder deze omstandigheden rechtstreeks verzendt. Nadat het teken door toedoen van de *driver*-routine het transmissieregister heeft verlaten, zal uiteraard wel een *interrupt* worden aangevraagd.

In figuur 4.1 zijn de *VRTX input* en *VRTX output buffer* en de *interrupt*-behandelingsroutines voor de ontvangst van telecommando's en voor de verzending van de telecommando-echo aangeduid.

4.2.3. *Het gebruik van shells in een multitasking-omgeving*

In het SIDAMS/MACSIMS-instrument moeten een aantal opdrachten gelijktijdig uitgevoerd worden. Instrumentparameters moeten ingesteld worden, gegevens moeten verzameld worden en verzonden naar de grond, bepaalde parameters moeten gedurende de ganse vlucht systematisch gecontroleerd worden, er moet geluisterd worden naar bevelen afkomstig van de besturingsterminal aan de grond, enz. Dit kan slechts gebeuren in een werkomgeving waar verschillende taken in parallel kunnen uitgevoerd worden. Het is bovendien nodig dat vooral opdrachten van lange duur in aparte taken kunnen uitgevoerd worden zonder dat andere opdrachten daardoor in het gedrang komen (achtergrondtaken).

Eén van de voornaamste opdrachten van het beheersysteem aan boord is het onderhouden van de telecommando-interface met de bedieningsterminal aan de grond. Het beheersysteem moet steeds openstaan voor de ontvangst van telecommando's. Deze permanente opdracht wordt uitgevoerd in een zogeheten *shell* (de geassocieerde taak in het beheersysteem is de *shell*-taak). De *shell* is in feite de laag van de werkomgeving langs waar de gebruiker toegang heeft tot het instrument.

In de *shell* wordt voortdurend nagegaan of zich telecommandotekens bevinden in de *VRTX input buffer*. Alle normale ASCII-tekens worden er opgehaald en opgenomen in de werkomgeving waar ze bijdragen tot de vorming van telecommando's, tenzij bij de aanwezigheid van bepaalde speciale tekens (bijvoorbeeld het "achterwaarts uitveeg"-teken).

De tekens worden er ook gekopieerd in de *VRTX output buffer*, vanwaar ze over het telecommando-echokanaal vertrekken naar de grond.

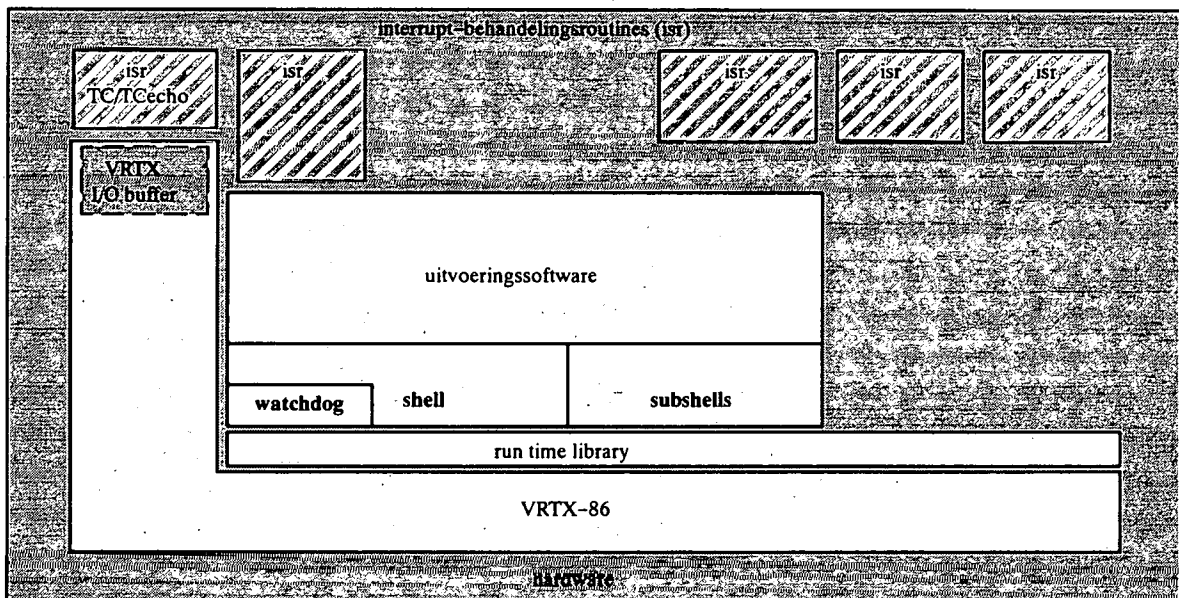
In de *shell* wordt ook onderzocht of bepaalde telecommando's in de achtergrond moeten uitgevoerd worden. Indien het telecommando eindigt met het *&*-teken wordt het doorgegeven aan één van drie *subshells*. Elke *subshell* werkt op haar beurt als een aparte taak (*subshell*-taak) van het *multitasking*-systeem, onafhankelijk van de *shell*-taak. De *subshell*-taken worden tijdens de vlucht typisch gebruikt voor het uitvoeren van langdurige bewakingsopdrachten.

Bij het opstarten van het beheersysteem wordt de *shell*-taak dadelijk actief. De gebruiker wordt er verwelkomd en een commandolijn wordt aangeboden onder de vorm van een oproepteken. De gebruiker kan indien gewenst op elk moment de drie bijkomende achtergrondtaken opstarten en zo vier opdrachten gelijktijdig laten uitvoeren.

Vanuit *shell* en *subshells* worden de telecommando's voor interpretatie doorgegeven aan de *parser* (zie 4.2.4) en ten uitvoer gebracht in uitvoeringsroutines.

Vanaf het ogenblik dat een telecommando wordt doorgegeven aan een *subshell* voor uitvoering in de achtergrond, beschikt de gebruiker reeds terug over de commandolijn voor introductie van nieuwe telecommando's. Wanneer het telecommando in de *shell* (voorgond) blijft, wordt pas een nieuw oproepteken over het telecommando-echokanaal naar de bedieningsterminal verstuurd wanneer het telecommando volledig werd uitgevoerd.

De *shell*- en *subshell*-taken vormen de basis voor de ganse *multitasking*-werkomgeving. Ze zijn rechtstreeks geënt op het *VRTX-86*-basisbeheersysteem (figuur 4.5).



Figuur 4.5: Inplanting van *shell*, *subshells* en *watchdog* in de *SIDAMS/MACSIMS*-werkomgeving.

4.2.3.1. Het opheffen van taken

Het moet voor de gebruiker van het instrument mogelijk zijn opdrachten die in uitvoering zijn in één van de *shells* te allen tijde te onderbreken. Zo kan het gebeuren dat een opgestarte

bewakingsopdracht in één van de *subshells* pas afloopt na twee uren, terwijl de gebruiker na één uur de opdracht wil aanpassen of vervangen door een andere. Anderzijds is het niet denkbeeldig dat een langlopende opdracht verkeerdelijk in de voorgrond werd opgestart. De gebruiker moet ze dan ook in de *shell* dadelijk kunnen opheffen.

Wanneer een achtergrondproces moet onderbroken worden kan de processor daarvan door middel van een telecommando (*kill*) op de hoogte gebracht worden via de *shell* die in principe beschikbaar is. Het basiscommando krijgt als commandoparameter het taaknummer mee van de te onderbreken taak. Daarop wordt, overeenkomstig het gevraagde taaknummer, een vlag hoog gebracht in een takentabel. Deze tabel wordt door het actieve proces op regelmatige tijdstippen bekeken om na te gaan of de vlag van de taak waarin het proces loopt hoog is. Indien dat het geval is wordt het proces dadelijk beëindigd en de vlag weer laag gebracht.

De moeilijkheid bij het afbreken van een proces dat in de voorgrond draait, bestaat erin de processor dit desondanks vanuit de bedieningsterminal aan de grond te laten weten. Daarom wordt een aparte taak voorzien die de hoogste prioriteit heeft (de *watchdog*-taak) (figuur 4.5) en waarin voortdurend wordt gecontroleerd of een onderbreking van het proces in de *shell*-taak wordt aangevraagd. Zo'n aanvraag gebeurt door de verzending van een speciaal teken (*control C*, ASCII-code ETX) dat in de normale telecommandotekst niet voorkomt. Zodra een "*control C*"-teken in de *watchdog*-taak wordt herkend, zal, net zoals bij het onderbreken van *subshell*-processen, een vlag in een tabel hoog gezet worden. Het proces dat dan in de *shell* draait, zal stoppen zodra het deze vlag heeft gezien.

Voor het onderbreken van de *shell*-taak in de CIMP wordt vanuit de bedieningsterminal een ASCII-sequentie "*remsh ^C*" opgestuurd, die door de MOBC wordt vervangen door de ASCII-code ETX alvorens verdere verzending naar de CIMP.

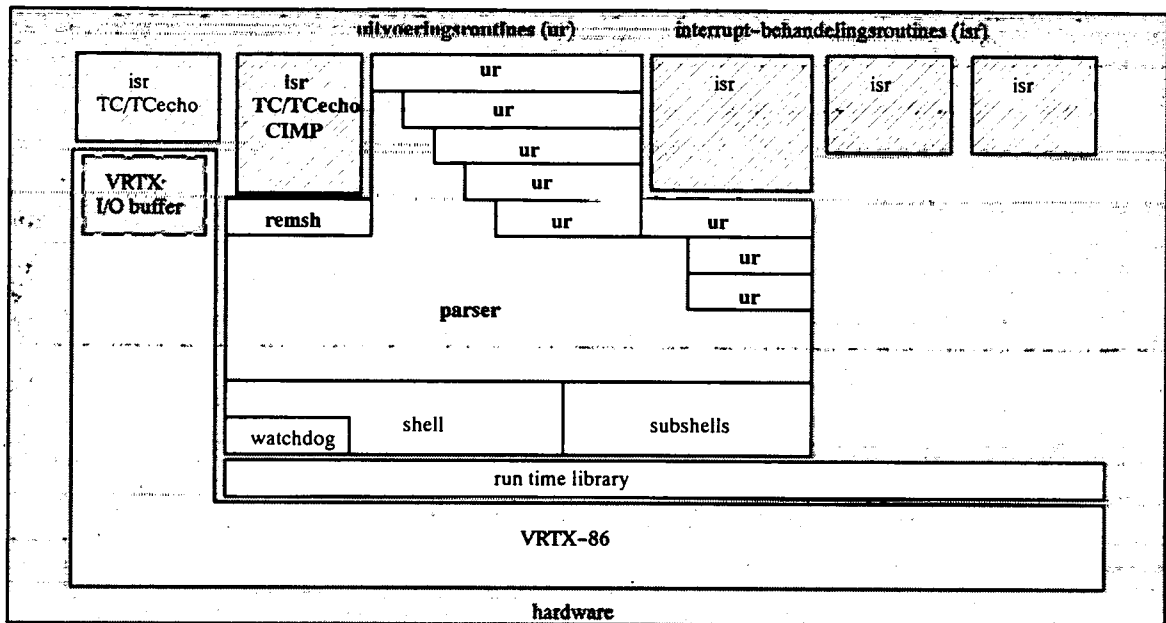
Het *kill*-commando laat verder nog toe een overzicht te vragen van alle taken, i.e. het taaknummer, de prioriteit en de huidige activiteit, ook van de *shell*-taak.

Syntaxis van het telecommando <i>kill</i>
Onderbreken van de taak met id 12 : <i>kill 12</i>
Overzicht van de toestand van alle taken : <i>kill -i</i>

4.2.4. De syntactische ontleding van de telecommando's in de parser

Of een telecommando nu in de voorgrond of in de achtergrond moet uitgevoerd worden, de syntactische ontleding ervan gebeurt steeds door middel van de *parser*. Dit is een routine die het basiscommando en de eventuele lijst van commandoparameters uit de commandolijn filtert. Aan de hand van het basiscommando wordt de uit te voeren routine geïdentificeerd. Deze routine wordt dan opgeroepen, met doorgave van de eventuele commandoparameters (figuur 4.6).

De parser van de MOBC heeft de bijkomende taak onderscheid te maken tussen telecommando's die bestemd zijn voor het massaspectrometergedeelte of voor het actief chemi-ionisatiepakket. Wanneer het prefix *remsh* in de commandolijn voorkomt, wordt de commandolijn, zonder het prefix, doorgegeven aan de CIMP (figuur 4.6). De CIMP zal een kopij van de ontvangen karakters terugzenden naar de MOBC. Deze telecommando-echo van de CIMP voegt zich bij die van de MOBC.



Figuur 4.6: Inplanting van de parser, de telecommandointerface met de CIMP en de uitvoeringsroutines in de SIDAMS/MACSIMS-werkomgeving.

4.2.5. *Het gebruik van plaatsafhankelijke parameters*

In de meeste gevallen staat één enkele uitvoeringsroutine in voor het implementeren van alle telecommando's met eenzelfde basiscommando. Opdat de juiste functie door deze routine zou worden uitgevoerd moet ze weten welke de eventuele commandoparameters zijn die het basiscommando vergezellen. Soms wordt één uitvoeringsroutine zelfs gebruikt voor de implementatie van telecommando's met verschillende basiscommando's, bijvoorbeeld wanneer de functionaliteit van de telecommando's zeer gelijklopend is. In dat geval moet de uitvoeringsroutine ook weten om welk basiscommando het gaat. Het resultaat is dat de parameterlijst van uitvoeringsroutines nu eens leeg zal zijn, dan weer meerdere parameters moet bevatten.

Het doorgeven van informatie aan uitvoeringsroutines werd daarom gestandaardiseerd. Het basiscommando en de commandoparameters van het telecommando worden als plaatsafhankelijke parameters doorgegeven. Hiervoor wordt een standaard structuur gebruikt met daarin het basiscommando, het aantal plaatsafhankelijke parameters die bij dit basiscommando horen (maximaal 10) en een tabel met de ASCII-tekengroepen van de commandoparameters in de volgorde van hun voorkomen in het telecommando (maximaal 50 tekens per commandoparameter).

Het volstaat nu het adres van deze structuur door te geven aan de uitvoeringsroutine opdat deze over alle nodige informatie zou beschikken om de juiste handelingen uit te voeren. De structuur kan in het algemeen op de volgende manier geschreven worden.

```

struct pos_par_descriptor {      char comm_name [15];    het basiscommando
                                int pp_nr;                het aantal parameters
                                char pp_table [10] [50];    de lijst van de commandoparameters
                                }
struct pos_par_descriptor *arg_struct;          het adres van de structuur

```

Het concept van plaatsafhankelijke parameters wordt ook toegepast bij het doorgeven van parameters aan *scripts* (zie 4.2.8).

4.2.6. Globale variabelen

4.2.6.1. Het concept van globale variabelen

Globale variabelen worden in de werkomgeving ingevoerd om de toekenning van waarden aan veel voorkomende parameters te vergemakkelijken. Dit kan het best uitgelegd worden aan de hand van een voorbeeld. Voor het opnemen van een massaspectrum met 500 accumulaties wordt het telecommando *msp 500* gebruikt (basiscommando *msp* met één commandoparameter). De gebruiker zou een globale variabele *NRACC* kunnen definiëren en deze de tekstwaarde 500 geven. Het telecommando *msp \$NRACC* zal nu ook een massaspectrum met 500 accumulaties opleveren.

Wanneer later massaspectra met een ander aantal accumulaties moeten genomen worden (b.v. 1000) volstaat het de tekstwaarde van de globale variabele *NRACC* te veranderen in 1000. De gebruiker kan het telecommando *msp \$NRACC* onverstoord blijven verder gebruiken. Het voordeel van globale variabelen wordt duidelijk bij parameters die regelmatig aangepast worden. Steeds zal de meest recente waarde voor de commandoparameter gebruikt worden.

Het grootste voordeel van globale variabelen wordt bekomen wanneer ze gebruikt worden in *scripts* (zie 4.2.8).

De globale variabelen worden bijgehouden in een tabel met maximaal 10 beschrijvingen. Een beschrijving bestaat uit de naam van de globale variabele (maximaal 15 tekens) en uit zijn ASCII-tekstwaarde (maximaal 50 tekens).

```

struct gv {      char name [15];          de naam van de globale variabele
                char value [50];        de tekstwaarde van de globale variabele
                }
struct gv gv_table [10];          de tabel van de globale variabelen

```

4.2.6.2. Het toekennen van een tekstwaarde en het gebruiken van globale variabelen

Stellen we een globale variabele voor met het algemene symbool *GV*. Een telecommando van de vorm *GV=(tekstwaarde)* maakt de globale variabele *GV* aan (indien ze niet bestaat) en kent

er een tekstwaarde aan toe. Het is gebruikelijk net na het opstarten van het beheersysteem alle globale variabelen die zullen gebruikt worden doorheen de vlucht op deze manier te definiëren.

Elk telecommando, of het wordt uitgevoerd vanaf de commandolijn of vanuit een *script*, kan één of meerdere commandoparameters hebben onder de vorm van een globale variabele. De verschijningsvorm van een globale variabele in een telecommando is *\$GV*.

Vooraleer de *parser* een uitvoeringsroutine oproept moet hij ervoor zorgen dat de namen van alle globale variabelen die eventueel als commandoparameters voorkomen in een telecommando worden vervangen door hun tekstwaarde. Globale variabelen worden in de *parser* herkend aan het feit dat hun naam steeds voorafgegaan wordt door het *\$*-teken.

Voorbeeld van een lijst van globale variabelen	
Naam	Tekstwaarde
<i>TAAK</i>	12
<i>OPTION</i>	-i
<i>TIME</i>	207 12 33 40
<i>DAY</i>	207
Voorbeelden van het gebruik van globale variabelen in telecommando's	
<i>kill \$TAAK</i> betekent <i>kill 12</i> <i>kill \$OPTION</i> betekent <i>kill -i</i> <i>date \$TIME</i> betekent <i>date 207 12 33 40</i> <i>date \$DAY 12 33 40</i> betekent <i>date 207 12 33 40</i>	

Een bijzondere toepassing van het concept van globale variabelen wordt gevonden in het aanmaken van het oproepteken (prompt). De nominale samenstelling van dit oproepteken is de datum en gebruikerstijd gevolgd door de vermelding "*MACSIMS*>". Indien de gebruiker dat wenst kan deze aanduiding vervangen worden. Het volstaat een globale variabele te definiëren met de naam *PROMPT* en er de gewenste tekstwaarde aan toe te kennen. Telkens de *shell*-taak een nieuw oproepteken afbeeldt wordt gekeken of een globale variabele met de naam *PROMPT* bestaat en wordt de standaardaanduiding vervangen indien dat het geval is.

4.2.6.3. Operaties met globale variabelen

Naast het definiëren van een globale variabele, kunnen via enkele basiscommando's een aantal operaties op globale variabelen verricht worden. Met het *let*-commando kunnen elementaire bewerkingen (optellen en aftrekken) uitgevoerd worden op globale variabelen, met *set* kan de lijst van de op dat moment gekende naam-tekstwaarde-associaties opgevraagd worden (figuur 4.7) en *unset* wordt gebruikt om één of alle globale variabelen te vernietigen.

Table of global variables	

TAAK :	12
TIME :	207 12 33 40
OPTION :	-i
DAY :	207
4 global variable(s) in use	
6 global variable(s) definable	

Figuur 4.7: Mogelijk resultaat van het set-commando.

Commandosyntaxis voor de toewijzing van een waarde aan een globale variabele
Definiëren van een globale variabele : $GV=(gv_waarde)$
Syntaxis van het telecommando <i>let</i>
$let\ GV = (lid_1)\ (operator)\ (lid_2)$ De operator kan "+" of "-" zijn. De leden lid_1 en lid_2 kunnen een numerieke waarde bevatten of de naam van een globale variabele ($\$GV_i$)
Syntaxis van het telecommando <i>set</i>
Geef de lijst van alle globale variabelen : <i>set</i>
Syntaxis van het telecommando <i>unset</i>
Wissen van alle globale variabelen : <i>unset</i> Wissen van de globale variabele met naam GV : <i>unset GV</i>

4.2.7. De weg van een ASCII-teken : volledig overzicht van de SIDAMS/MACSIMS-telecommando-interface

Bij wijze van samenvatting van de ASCII-telecommando-interface wordt in figuur 4.8 schematisch de stroom van ASCII-tekens en telecommando's in het SIDAMS/MACSIMS-instrument weergegeven.

Een ASCII-teken dat door de gebruiker op het klavier van de bedieningsterminal wordt ingegeven, wordt via de CNES-infrastructuur (zender aan de grond, ontvanger aan boord) tot bij het instrument gebracht.

Zodra het teken in het ontvangstregister van $UART_2$ aankomt wordt de microprocessor verwittigd middels een hardware *interrupt*. Via de "interrupt vector"-tabel wordt de gepaste *interrupt*-behandelingsroutine (isr TC) opgeroepen, die het teken overplaatst naar de *VRTX input buffer*.

De *shell*-taak maakt gebruik van een speciale I/O-routine die teken na teken uit de *VRTX input buffer* neemt en ze rekening houdend met mogelijke speciale tekens toevoegt aan het in opbouw

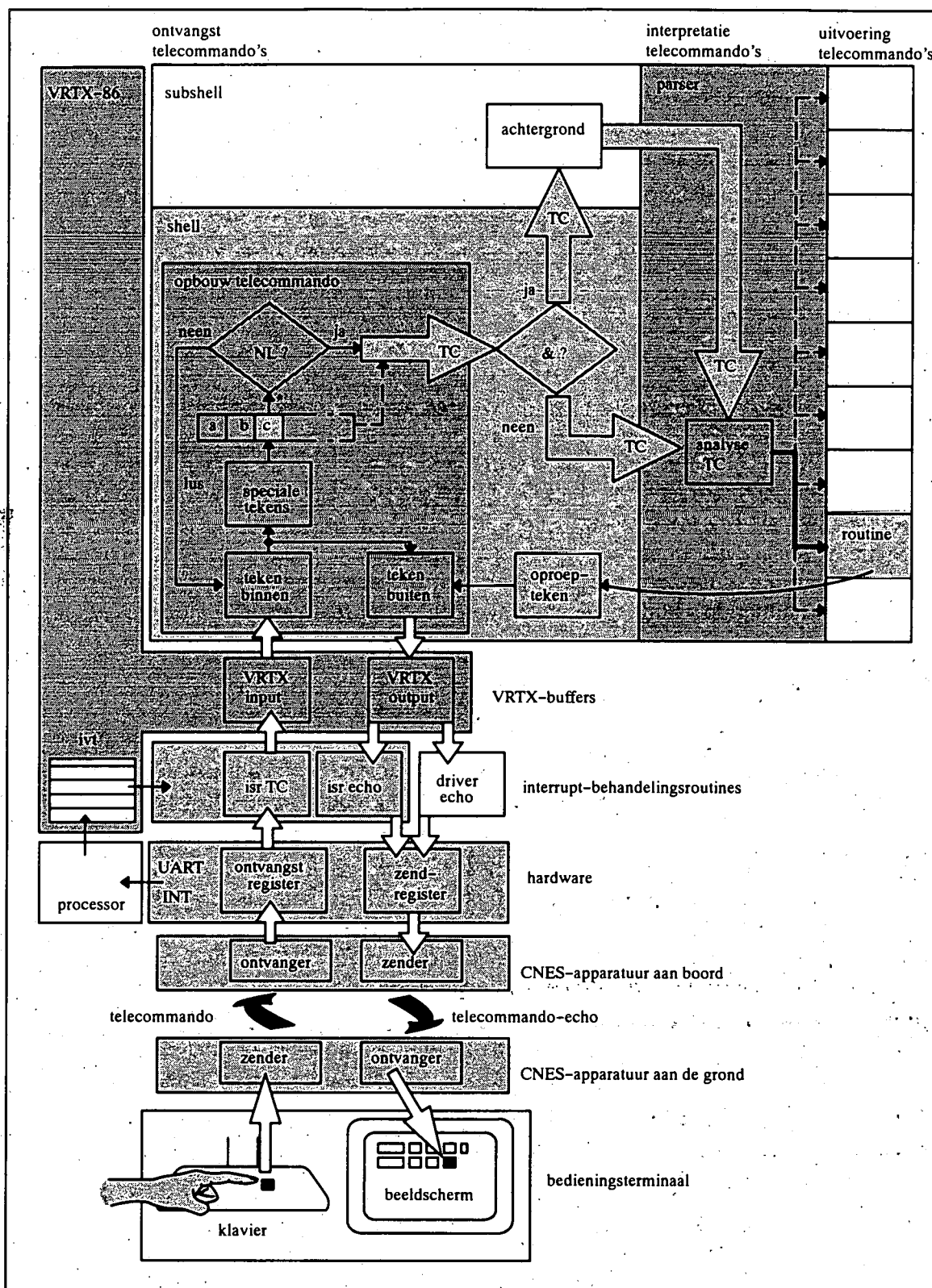
zijnde telecommando. Elk teken wordt ook weer in de *VRTX output buffer* en vandaar door een *interrupt*-behandelingsroutine (isr echo) of de transmissie-*driver* (eerste teken) in het transmissieregister van UART₂ geplaatst voor verzending via de CNES-apparatuur (zender aan boord, ontvanger aan de grond) naar het beeldscherm van de bedieningsterminal.

De ontvangst van het "nieuwe lijn"-teken betekent dat het telecommando volledig is. Als de *shell* merkt dat het telecommando eindigt met het &-teken wordt het telecommando doorgegeven aan een *subshell* voor uitvoering in de achtergrond, zo niet blijft het in de *shell* voor uitvoering in de voorgrond.

Het telecommando wordt zowel vanuit de *shell* als vanuit de *subshells* ter interpretatie doorgegeven aan de *parser*, waar bepaald wordt welke uitvoeringsroutine moet gebruikt worden.

In de uitvoeringsroutines zelf wordt het telecommando-echokanaal vaak gebruikt om de resultaten van metingen, commentaar of foutenboodschappen als ASCII-tekst naar de bedieningsterminal door te sturen.

Wanneer de uitvoeringsroutine beëindigd is zendt de *shell* via het telecommando-echokanaal een nieuw oproepteken naar de bedieningsterminal. De gebruiker kan nu een volgend telecommando ingeven.



Figuur 4.8: Overzicht van de telecommandostroom.

4.2.8. Scripts

4.2.8.1. Het nut van scripts

Scripts zijn lijsten van telecommando's die gegroepeerd onder een gekozen *script*-naam in een beschermd gedeelte van het geheugen worden opgeslagen. Elk *script* draagt een eigen naam. Die naam kan als een macro-telecommando gebruikt worden, waarna de lijst van telecommando's in het *script* sequentieel wordt uitgevoerd.

Werken met het SIDAMS/MACSIMS-instrument komt vaak neer op het steeds weer herhalen van reeksen van dezelfde telecommando's. Een veel terugkerend monotoon scenario tijdens een optimaal verlopende vlucht is het opmeten van massaspectra. De registratie van de massaspectra wordt steeds voorafgegaan door een aantal acties zoals het nemen van een achtergrondspectrum en het instellen van de ionenproductie in het actief chemi-ionisatiepakket. Gans deze sequentie van tientallen telecommando's wordt vastgelegd in een *script*.

Het gebruik van *scripts* levert een enorme tijdwinst op doordat de telecommando's mekaar op een ideale manier opvolgen, veel sneller dan de gebruiker ze zou kunnen ingeven via de commandolijn, en garandeert bovendien steeds foutloze telecommando's.

De toepassing van *scripts* wordt nog interessanter gemaakt doordat *script*-parameters kunnen doorgegeven worden, doordat globale variabelen in *scripts* kunnen gebruikt worden, doordat lussen van telecommando's kunnen gemaakt worden en doordat *nesting* van *scripts* mogelijk is.

4.2.8.2. Script-parameters

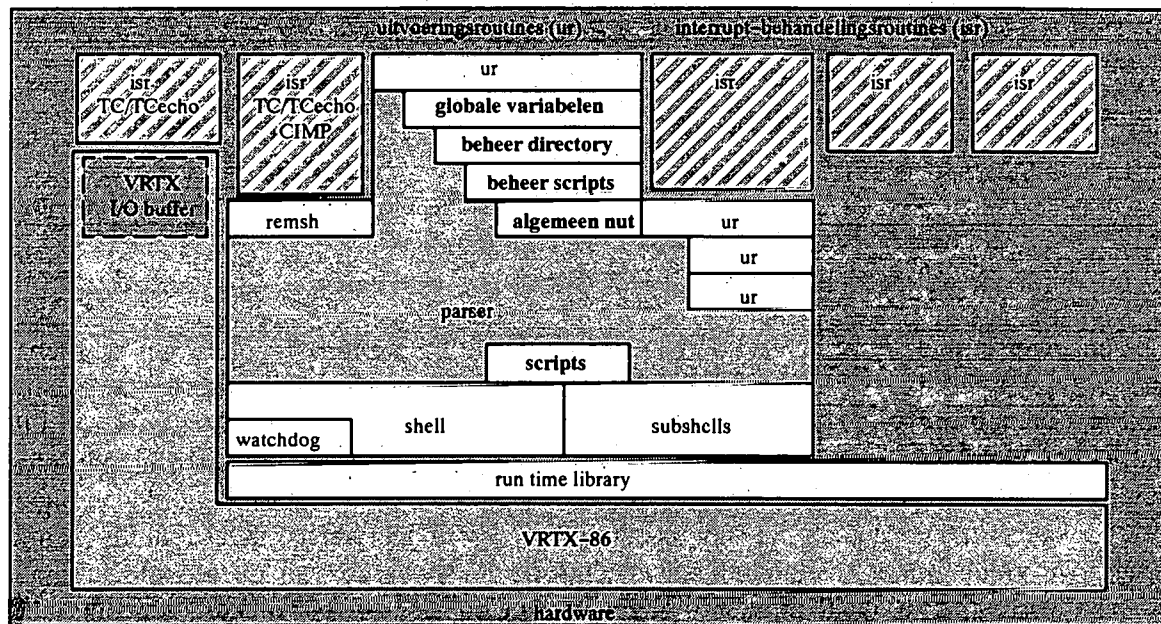
Aan de meeste basiscommando's kunnen commandoparameters gekoppeld worden opdat één welbepaalde functie in de uitvoeringsroutine zou geïmplementeerd worden (zie 4.2.5). Ook wanneer het basiscommando eigenlijk een *script*-oproep is kan hiermee een lijst van parameters geassocieerd worden.

Hierdoor wordt het gebruik van *scripts* zeer flexibel gemaakt. Niet alleen wordt een reeks van telecommando's vervangen door één enkel macrocommando, het wordt ook mogelijk eenzelfde *script* te gebruiken in verschillende werkomstandigheden. In het bovengenoemde voorbeeld, waar een *script* gebruikt wordt om massaspectra op te meten, kunnen bepaalde instrumentparameters (spanningen in de massaspectrometer, debieten in het actief chemi-ionisatiepakket, enz.) via de parameterlijst telkens andere waarden krijgen.

De gebruiker heeft zo een krachtig middel om, mits een weldoordachte opbouw van de *scripts* en mits een goede keuze van de parameters, een groot gedeelte van het routinewerk tijdens een vlucht te concentreren in enkele telecommando's.

4.2.8.3. Het uitvoeren van scripts

Wanneer de *parser* bij de syntactische ontleding van een telecommando een basiscommando vindt dat niet overeenkomt met één van de standaard basiscommando's, aanziet hij het als een *script*-oproep. Voor het uitvoeren van *scripts* werd een bijzondere uitvoeringsroutine gebouwd (figuur 4.9). Ze wordt opgeroepen uit de *parser*, waarna ze de telecommandolijnen waaruit het *script* is opgebouwd één na één uitvoert, door ze op haar beurt aan de *parser* aan te bieden.



Figuur 4.9: Inplanting van de routine voor de uitvoering van scripts, van uitvoeringsroutines voor het beheer van scripts en de directory, van routines voor het gebruik van globale variabelen en van algemeen nut.

Het is dan ook mogelijk dat één van de telecommandolijnen in het *script* zelf een *script*-oproep is. Zo is het mogelijk *scripts* te *nesten*, wat opnieuw voor een uitbreiding zorgt van de mogelijkheden van de werkomgeving. Tijdens de vlucht in november 1995 werden drie *scripts* met aangepaste parameterlijsten gebruikt voor het meten van massaspectra, één met de foto-elektrische ionenbron, één met een chloorgasstroom en één met een jodiumgasstroom door de ontladingsbron. De drie *scripts* werden opgeroepen vanuit één overkoepelend *script*. Met één telecommando, de *script*-oproep van dit totaal-*script*, werd het instrument geprogrammeerd voor een periode van 20 minuten, waarbinnen 54 spectra werden opgenomen. Het gebruik van *scripts* levert bijgevolg een optimale hoogteresolutie op voor het instrument.

Het doorgeven van de *script*-parameters aan het *script* of, met andere woorden, het doorgeven van de commandoparameters aan de *script*-uitvoeringsroutine, gebeurt opnieuw op basis van het concept van plaatsafhankelijke parameters (zie 4.2.5). Dezelfde structuur wordt gebruikt zodat ook hier maximaal 10 *script*-parameters kunnen doorgegeven worden.

In de telecommando's die samen de inhoud van een *script* vormen wordt verwezen naar deze plaatsafhankelijke parameters door een $\$$ -teken gevolgd door het volgnummer in de parameterlijst. In 4.2.8.6 wordt dit geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld.

Elk *script* moet steeds afgesloten worden door een telecommando dat alleen een punt bevat. De *script*-uitvoeringsroutine weet zo dat het laatste "echte" telecommando in het *script* werd uitgevoerd. De *shell* waarin de opdracht liep kan nu weer vrij gemaakt worden voor een nieuwe opdracht.

4.2.8.6. Overzicht van de mogelijkheden met scripts

We verduidelijken de structuur en de mogelijkheden van *scripts* (plaatsafhankelijke parameters, globale variabelen, lussen en *nesting*) aan de hand van een voorbeeld. Daarvoor gebruiken we bestaande telecommando's zonder dat hun betekenis op dit moment moet duidelijk zijn. In tabel 4.1 worden twee *scripts* *flowloop* en *hvloop* beschreven. We veronderstellen dat twee globale variabelen in het systeem gekend zijn : $NRACC=500$ en $DISCRI=5$. Het telecommando *flowloop 200 5* start het script *flowloop* op.

script flowloop - script-oproep : flowloop 200 5						
Telecommando's (TC)					Opmerkingen	
Basiscommando's	Commandoparameters (CP)					
<i>date</i>						TC zonder CP
<i>opb</i>	0.5					TC met 1 CP
<i>iiv</i>	\$2					CP verwijst naar 2 ^{de} <i>script</i> -parameter (\$2=5)
<i>rf</i>	\$1					CP verwijst naar 1 ^{ste} <i>script</i> -parameter (\$1=200)
<i>msh</i>	-1	\$DISCRI				CP is externe globale variabele (\$DISCRI=5)
<i>for</i>	\$FL	<i>in</i>	100	200	300	luscommando (\$FL is lusparameter)
<i>do</i>						begin lus
<i>flow</i>	CI	\$FL				CP is lusparameter (interne globale variabele)
<i>hvloop</i>	1000	\$NRACC				<i>script</i> -oproep
<i>done</i>						einde lus
						einde <i>script</i>

script hvloop - script-oproep hvloop 1000 \$NRACC						
Basiscommando's	Commandoparameters					Opmerkingen
<i>pav</i>	\$1					CP is 1ste <i>script</i> -parameter (\$1=1000)
<i>msh</i>	-b	\$2				CP is 2 ^{de} <i>script</i> -parameter (\$2=\$NRACC=500)
\$HV	=	100				definitie lusparameter (globale variabele)
<i>while</i>	<i>test</i>	\$HV	<i>lt</i>	1000		luscommando (\$HV is lusparameter)
<i>do</i>						begin lus
<i>itv</i>	\$HV					CP is lusparameter
<i>msh</i>	\$2					CP is 2 ^{de} <i>script</i> -parameter (\$2=\$NRACC=500)
<i>let</i>	\$HV	=	\$HV	+	100	aanpassen lusparameter \$HV (<i>let</i> -commando)
<i>done</i>						einde lus
						einde <i>script</i>

Tabel 4.1: Een voorbeeld van scripts.

4.2.8.7. De scripts-directory

Het werken met *scripts* wordt vergemakkelijkt doordat ze gecatalogeerd worden in een *scripts*-lijst of *directory*. De gebruiker kan zo op elk moment nagaan welke *scripts* bestaan in de werkomgeving.

Een gedeelte van het processorgeheugen is speciaal bestemd voor het bewaren van *scripts*. Een 10.000 bytes grote zone van dit *script*-geheugen wordt voorbehouden voor het opslaan van de inhoud van de *scripts* (*char script_file [10000]*).

De *scripts* in het *script*-geheugen zijn toegankelijk via een verwijzingstabel (de eigenlijke *directory*), waarin zich maximaal 20 *script*-beschrijvingen kunnen bevinden (*struct descriptor directory [20]*).

Een *script*-beschrijving bestaat uit een *script*-naam (maximaal 15 karakters), het adres van de plaats in het *script*-geheugen waar de inhoud van het *script* zich bevindt en het adres van de geheugenplaats waar de inhoud van het volgende *script* begint of kan beginnen :

```

struct descriptor {
    char name [15] ;           de naam van het script
    char *thisscript ;        het adres van de plaats waar het script zich
                              bevindt in het script-geheugen
    char *nextscript ;        het adres van de plaats waar het volgende
                              script zich bevindt in het script-geheugen
}

```

De toegang tot het *script*-geheugen wordt vergemakkelijkt door de definitie van twee *pointers*, één die wijst naar het beginpunt van de *directory* (**dir_address*) en één die wijst naar het begin van de opslagzone (**scrfile_address*).

```

struct descriptor *dir_address = directory;
char *scrfile_address = script_file;

```

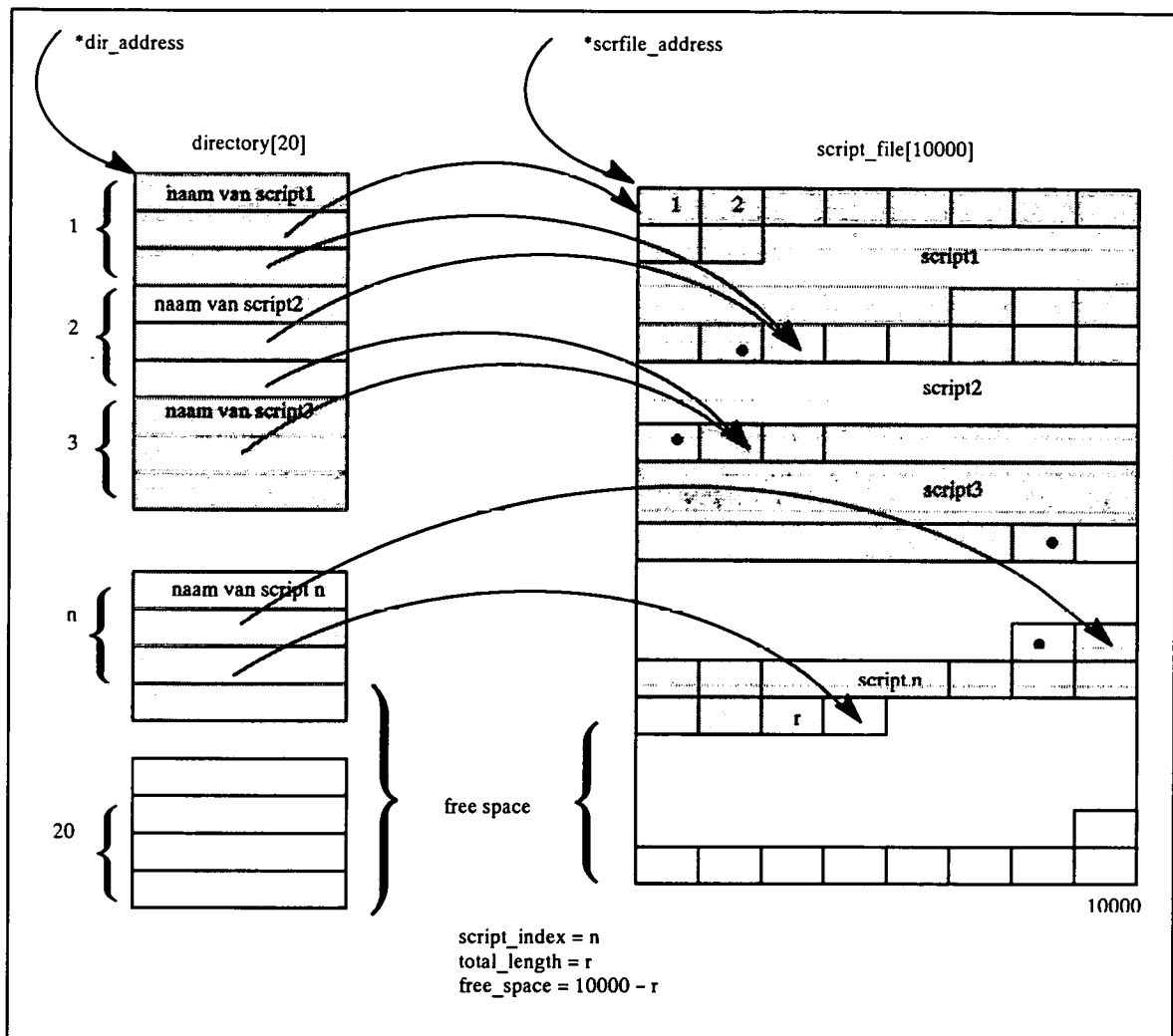
Verder wordt bij het manipuleren van *scripts* het aantal bestaande *scripts* (*script_index*) en het aantal gebruikte bytes in het *script*-geheugen (*total_length*) bijgehouden.

In figuur 4.10 wordt het *script*-geheugen schematisch voorgesteld.

4.2.8.8. Operaties met scripts

Er bestaan een aantal basiscommando's voor operaties met *scripts*. Met het *dir*-commando kan de lijst van bestaande *scripts* opgevraagd worden (*directory*). Voor elk *script* wordt de naam gegeven en zijn lengte (in bytes). Aan het einde van de lijst wordt het totaal aantal aanwezige *scripts* in de *directory* gegeven samen met het aantal gebruikte en het aantal beschikbare bytes in het *script*-geheugen. In figuur 4.11 wordt een voorbeeld gegeven waarbij zich twee *scripts* in de *directory* bevinden.

Het *rm*-commando dient om een *script* uit de *directory* te verwijderen, met *fsck* wordt de ganse *directory* uitgeveegd en met het *cp*-commando kunnen *scripts* gekopieerd worden.



Figuur 4.10: De organisatie van het script-geheugen.

```

Directory of scripts
*****
flowloop: 81 bytes
hskloop : 69 bytes

2 script(s) stored
150 bytes of script space occupied
9850 bytes of script space left
    
```

Figuur 4.11: Mogelijk resultaat van het dir-commando.

Syntaxis van het telecommando dir
Afprinten inhoud directory : dir

Syntaxis van het telecommando <i>rm</i>
Wissen van een <i>script</i> : <i>rm</i> (<i>scriptnaam</i>)
Syntaxis van het telecommando <i>fsck</i>
Wissen inhoud <i>directory</i> : <i>fsck</i>
Syntaxis van het telecommando <i>cp</i>
Kopiëren van een <i>script</i> : <i>cp</i> (<i>scriptnaam</i> ₁) (<i>scriptnaam</i> ₂) De inhoud van het <i>script</i> met naam <i>scriptnaam</i> ₁ wordt gekopieerd naar <i>scriptnaam</i> ₂ .

4.2.8.9. De beveiliging van het *script*-geheugen en andere belangrijke geheugensegmenten

Scripts die zich in het processorgeheugen aan boord bevinden mogen onder geen enkel beding verloren gaan of beschadigd worden. Het vlotte verloop van de metingen hangt af van het gebruik van deze *scripts*. Alternatieven zoals alle handelingen manueel uitvoeren, de *scripts* terug opbouwen of de *scripts* vanaf de grond terug opladen zijn weinig aantrekkelijk en tegen elke prijs te vermijden.

Om beschadiging van de *scripts* te voorkomen, wordt daarom een beveiligbaar geheugensegment gereserveerd voor het *script*-geheugen. Zowel de *directory*-tabel als de opslagzone bevinden zich in dit gedeelte van het geheugen.

Ook andere belangrijke delen van het geheugen worden beschermd. In de eerste plaats wordt gezorgd voor de beveiliging van de programmacode (20000h - 2FFFFh) maar ook voor de constantensegmenten en voor calibratietabellen die gebruikt worden voor de instelling en meting van hoogspanningen en rf- en dc-spanningen in het massaspectrometergedeelte en voor ionenbron- en debietparameters in het actief chemi-ionisatiepakket (tabel 4.2).

Beginadres	Eindadres	Inhoud (MOBC)
18000h	1AFFFh	<i>script</i> -geheugen
1B000h	1BFFFh	calibratietabellen voor hoogspanningen in massascheider
1C000h	1CFFFh	calibratietabellen voor de rf- en dc-spanningen
1D000h	1EFFFh	constanten

Beginadres	Eindadres	Inhoud (CIMP)
18000h	1AFFFh	<i>script</i> -geheugen
1B000h	1BFFFh	calibratietabellen voor ionenbronnen en debietregelaars
1D000h	1EFFFh	constanten

Tabel 4.2: Beveiligde zones in het MOBC- en CIMP-geheugen.

Na het opladen van een nieuwe programmacode met het emulatiesysteem worden al deze zones automatisch beveiligd.

Wanneer een wijziging moet aangebracht worden in het *script*-geheugen (schrijfoperaties bij het kopiëren of het aanmaken van een nieuw *script*, wisoperaties voor één of alle *scripts*) of wanneer de calibratietabellen moeten veranderd worden, moet de beschermende status van het geheugen worden opgeheven met een telecommando *insecure*. Na de operatie moet het geheugen terug beschermd worden met behulp van het telecommando *secure*.

Het *secure*-commando brengt het geheugen (DALLAS-RAM's) in ROM-mode, het telecommando *insecure* zet ze terug in RAM-mode.

Tenslotte kan door middel van het telecommando *check* de *checksum* berekend worden van alle beschermde segmenten. Het is aan te raden de *checksum* die gemaakt wordt zodra de geheugensegmenten voor de vlucht definitief zijn ingevuld als referentie te onthouden en ze daarna regelmatig te controleren.

Syntaxis van de beveiligingscommando's
Installeren van de geheugenbescherming : <i>secure</i>
Opheffen van de geheugenbescherming : <i>insecure</i>
Maken van een <i>checksum</i> van het beschermde geheugen : <i>check</i>

4.2.8.10. Het editeren van scripts

Voor het editeren van *scripts* wordt het telecommando *cat* gebruikt.

Wanneer het basiscommando *cat* direct wordt gevolgd door de naam van een *script* dan wordt een kopij van de inhoud van het *script* naar het telecommando-echokanaal gestuurd. De gebruiker kan in de bedieningsterminal aan de grond de inhoud van het *script* overlopen.

Wanneer tussen het basiscommando *cat* en de *script*-naam een "forward redirection"-teken (>) voorkomt, krijgt de gebruiker in de bedieningsterminal de mogelijkheid het *script* een nieuwe inhoud te geven. Voorafgaand aan zo'n telecommando moet de gebruiker zich alleszins toegang verschaffen tot het beveiligde deel van het geheugen waar zich het *script*-geheugen bevindt (commando *insecure*). Indien al een *script* bestaat met dezelfde naam als die van het nieuwe, dient ook eerst het oude *script* verwijderd te worden (*rm*-commando).

Het schrijven in een *script* kan gebeuren vanaf de commandolijn. Na het geven van het "cat >"-telecommando wordt de processor als het ware in de editeermode gebracht. Alle volgende telecommando's worden beschouwd als de lijnen van het *script*. Slechts wanneer de gebruiker het einde van het *script* aanduidt (een telecommandolijn die enkel een punt bevat) verlaat de processor de editeermode. Deze manier van werken is niet gebruiksvriendelijk. Wanneer het ingebrachte *script* een fout bevat kan de correctie enkel gebeuren door de inhoud van het *script* opnieuw helemaal in te brengen.

Gedurende testen in het labo wordt vaak een "niet-intelligente" bedieningsterminal gebruikt. Dan is deze manier van werken de enige mogelijke. Wanneer de interface met het instrument gebeurt vanaf een werkstation (bijvoorbeeld tijdens de vlucht) kan het aanmaken van *scripts* veel rationeler gebeuren. De gebruiker maakt in dat geval gebruik van een op het werkstation aanwezige *editor* om het *script* uit te schrijven in een foutloze versie en te bewaren in een bestand in een voorbehouden *directory* in het werkstation. De grafische telecommandointerface op het werkstation (zie hoofdstuk 5) biedt de mogelijkheid het bestand automatisch te verzenden naar het instrument vanuit een zogenaamde *File Dialog Box*. Alle bestanden moeten op de volgende manier gestructureerd zijn :

- een *insecure*-commando voor het ontgrendelen van het beveiligde *script*-geheugen;
- een *rm*-commando voor het eventueel verwijderen van een *script* dat dezelfde naam heeft als het nieuwe;
- het “*cat >*”-commando om de processor in de editeermode te brengen;
- de lijnen van het eigenlijke *script*, met als laatste een lijn die enkel “.” bevat;
- een *secure*-commando om het *script*-geheugen terug te beveiligen.

Syntaxis van het telecommando <i>cat</i>
Lezen van een <i>script</i> : <i>cat (scriptnaam)</i>
Schrijven in een <i>script</i> : <i>cat > (scriptnaam)</i>

4.2.8.11. Een bijzonder script

Run commands scripts (shrc) zijn *scripts* die altijd worden uitgevoerd bij het opstarten van de werkomgeving. De gebruiker plaatst in dit *script* telecommando's die nodig zijn om het instrument in een initiële situatie te brengen. Tijdens de vlucht in november 1995 bevatte de *shrc*-*scripts* in MOBC en CIMP de volgende acties :

- het in “gesloten lus”-mode plaatsen van de hoogfrequente octopoolvoeding;
- het instellen van de stuurspanningen voor de detectorhoogspanningen en de rf- en dc-spanningen op een lage waarde om te grote spannings sprongen te voorkomen bij het aanschakelen;
- het aanschakelen van de drukmeter voor meting van het vacuüm in het detectorgedeelte van de massascheider;
- het aanschakelen van de drukmeter voor meting van de druk in de stromingsbuis;
- het instellen van het gewenste aantal accumulaties bij het nemen van een massaspectrum via een globale variabele;
- het instellen van het discriminatieniveau dat gebruikt wordt wanneer de pixelprocessor in de digitale mode werkt (globale variabele);
- het controleren van de toestand van de afsluitkraan tussen de elektrostatische condensator en de magneet in de massascheider;
- het instellen van de standaard werkingsparameters voor de vluchttijdmeting;
- het aanschakelen van de drukmeters op de gasleidingen;
- het aanschakelen in de continue mode van de beide ionenbronnen met een nulinstelling;
- het aanmanen van de gebruiker de datum en het tijdstip dadelijk in te stellen;
- het nemen van een eerste stel bewakingsgegevens (*housekeeping*).

4.2.9. Verdere nuttige algemene telecommando's

Het dateren van alle gegevenspakketten is van het grootste belang in het SIDAMS/MACSIMS-instrument. Zo kunnen bijvoorbeeld massaspectra, vluchttijdspectra,

gegevens uit het actief chemi-ionisatiepakket en bewakingsgegevens van het instrument, die in afzonderlijke telemetingpakketten naar de grond worden verzonden, later met mekaar gecorreleerd worden. Om na de vlucht ook de gegeven telecommando's te kunnen associëren met de ontvangen data worden datum en tijd bij het oproepteken aan het begin van elke commandolijn gevoegd.

Het is raadzaam datum en tijd in de processorsystemen zo nauw mogelijk te laten aansluiten bij de actuele universele tijd (juliaanse dag en tijdstip van de dag). Dit is immers de tijd die het CNES gebruikt voor de datering van de eigen gegevens. In geval van nood kunnen dan bijvoorbeeld de drukmetingen van het CNES met de SIDAMS/MACSIMS-data geassocieerd worden.

Zodra de klok is ingesteld, kan de absolute tijd en de systeemtijd (dit is de tijd verstreken sinds de laatste processorstart) opgevraagd worden. Voor de initialisatie en het opvragen van dag en tijd werd een basiscommando (*date*) geïmplementeerd.

Syntaxis van het telecommando <i>date</i>
Opvragen van de tijd : <i>date</i> Instellen van de tijd : <i>date DDD HH MM SS</i>

Om een actieve taak gedurende een instelbare tijdsperiode in de slaapproestand te brengen is het telecommando *sleep* voorzien.

Het inlassen van pauzes tussen telecommando's heeft vele toepassingen, waarvan enkele hieronder worden opgesomd :

- in *scripts* voor de bewaking van het instrument is het nodig om het ritme te bepalen waarmee de metingen genomen worden (typisch om de 30 seconden);
- tussen het instellen van een spanning in de massaspectrometer en het nemen van een massaspectrum wordt een pauze ingelast als stabilisatietijd voor de spanning;
- na het instellen van de spanning voor de ionenbronnen wordt de pauze gebruikt om de produktie in de ionenbron te laten stabiliseren;
- bij het opdrijven van de hoogspanningen in het massaspectrometergedeelte worden pauzes ingelast tussen de verschillende stappen;
- ook bij het opdrijven van de turbinesnelheid naar haar nominale waarden worden pauzes ingelast tussen de verschillende stappen.

Syntaxis van het telecommando <i>sleep</i>
Inlassen van een pauze : <i>sleep (tijdsperiode)</i> De parameter "tijdsperiode" moet opgegeven worden in VRTX-kloktikken (10 ms).

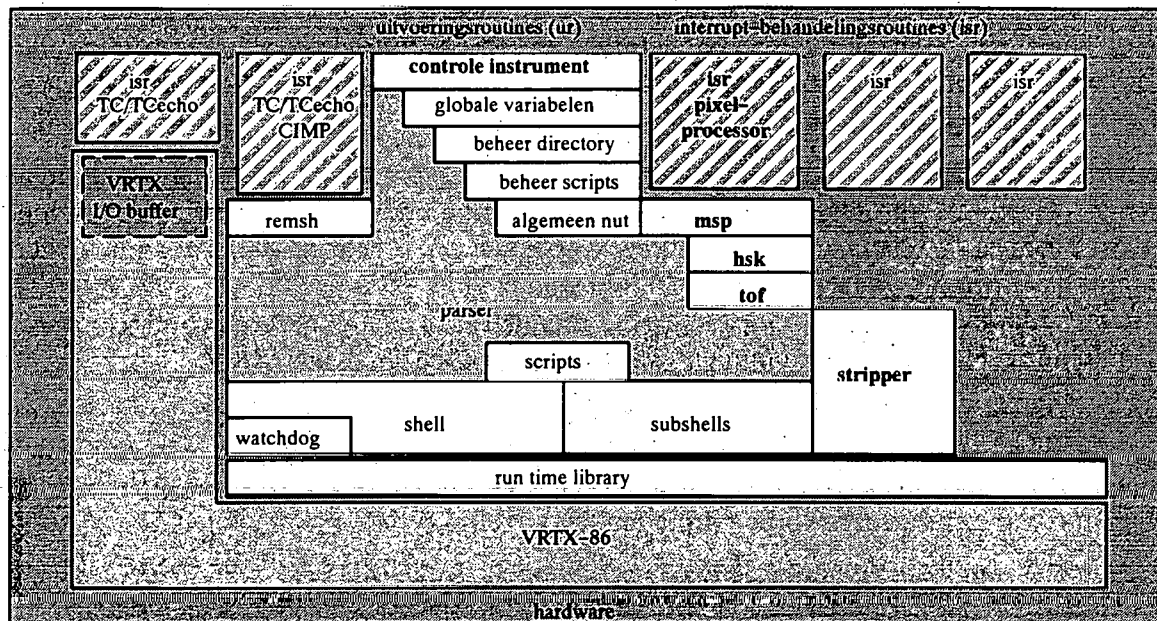
Tenslotte kan nog commentaar via het telecommando-echokanaal naar de bedieningsterminal aan de grond verzonden worden door middel van het telecommando *echo*.

Het *echo*-commando wordt meestal gebruikt in *scripts*. Het laat toe de uitvoering van een *script* te commentariëren. De gebruiker kan zo gemakkelijk volgen welk gedeelte van het *script* wordt uitgevoerd en kan verwittigd worden wanneer het *script* is beëindigd.

Syntaxis van het telecommando <i>echo</i>
Afdrukken van een commentaarlijn : <i>echo arg1 [arg2 ... [arg10]]]]]]]]]</i>

4.3. De besturing van de instrumentparameters

4.3.1. Uitvoeringsroutines



Figuur 4.12: Inplanting van de stripper-taak en de uitvoeringsroutines voor de besturing van het instrument in de SIDAMS/MACSIMS-werkomgeving.

Er bestaan een heleboel uitvoeringsroutines voor de besturing van het instrument (figuur 4.12). Het is in deze routines dat de overgang gemaakt wordt van telecommando's voor het schakelen, het sturen en het opmeten van instrumentparameters naar de schakel-, stuur- en controleoperaties op hardwareniveau in de besturingsmodules (zie 3.5 en 3.6).

4.3.2. Een methode voor de ijking van de sturing en de controle van instrumentparameters.

Alvorens het instrument in het laboratorium of in een ballonvlucht te gebruiken worden een aantal instrumentparameters geijkt. De bedoeling van deze ijking is de gebruiker de mogelijkheid te bieden de instrumentparameters te sturen in aangepaste en realistische eenheden in plaats van door digitale codes, en ook bij de controle van de instrumentparameters de meetwaarden in deze eenheden aangeboden te krijgen. Daardoor wordt de kennis van de achterliggende hardware (het type van DAC en ADC, het verband tussen de digitale code, de stuurspanning en de reële instelling) overbodig voor de besturing van het instrument.

Zo worden de rf- en dc-spanningen en de hoogspanningen in het massaspectrometergedeelte (sturing en controle in volts over het reële spanningsbereik), het toerental (toeren per seconde) en de stroombegrenzing van de turbine (ampère), de hoogspanningen voor de ionenbronnen (volt) en de debieten (scm) in het actief chemi-ionisatiepakket geijkt. De ijking van de itv-spanning verloopt bijvoorbeeld op de volgende manier.

In een eerste stap moet een werkingsgebied vastgelegd worden waarbinnen een lineair verband gegarandeerd wordt tussen de digitale code en de stuurspanning (en dus ook de reële instelwaarde). De DAC kan rechtstreeks geprogrammeerd worden met een digitale code door het basiscommando gevolgd door de commandoparameter *-r (raw)* en de digitale code. Het telecommando *itv -r 2600* programmeert de itv-DAC met de code 2600. Tegelijkertijd wordt met een meettoestel de bijhorende stuurspanning opgemeten en geassocieerd met een reële instelwaarde. Op deze manier kan een ondergrens en een bovengrens voor het werkingsgebied bepaald worden, voorgesteld door twee instelkoppels ($mini_{instel}$, $mini_{dac}$) en ($maxi_{instel}$, $maxi_{dac}$) elk bestaande uit een reële instellingswaarde en een digitale code.

Deze twee instelkoppels ($mini_{instel}$, $mini_{dac}$) en ($maxi_{instel}$, $maxi_{dac}$) kunnen per telecommando in het geheugen vastgelegd worden. Het basiscommando gevolgd door *-m* en het *mini*-instelkoppel legt de ondergrens vast, het basiscommando gevolgd door *-M* en het *maxi*-instelkoppel legt de bovengrens vast. In het geval van de itv-ijking zouden de telecommando's *itv -m 153 500* en *itv -M 1648 5500* het lineair werkingsgebied definiëren tussen de digitale codes 500 en 5500 die overeenkomen met reële itv-spanningen van respectievelijk 153 V en 1648 V.

Bij het vastleggen van de beide instelkoppels (*-m*- en *-M*-opties) wordt tegelijk ook een controle van de ingestelde waarde verricht. Bij elk instelkoppel wordt zo een ADC-code opgemeten, wat aanleiding geeft tot twee meetkoppels ($mini_{meet}$, $mini_{adc}$) en ($maxi_{meet}$, $maxi_{adc}$) die op hun beurt in het geheugen worden bijgehouden.

De helling S_{DAC} van de rechte door de twee instelkoppels is dan (4.1).

$$S_{DAC} = \frac{maxi_{dac} - mini_{dac}}{maxi_{instel} - mini_{instel}} \quad (4.1)$$

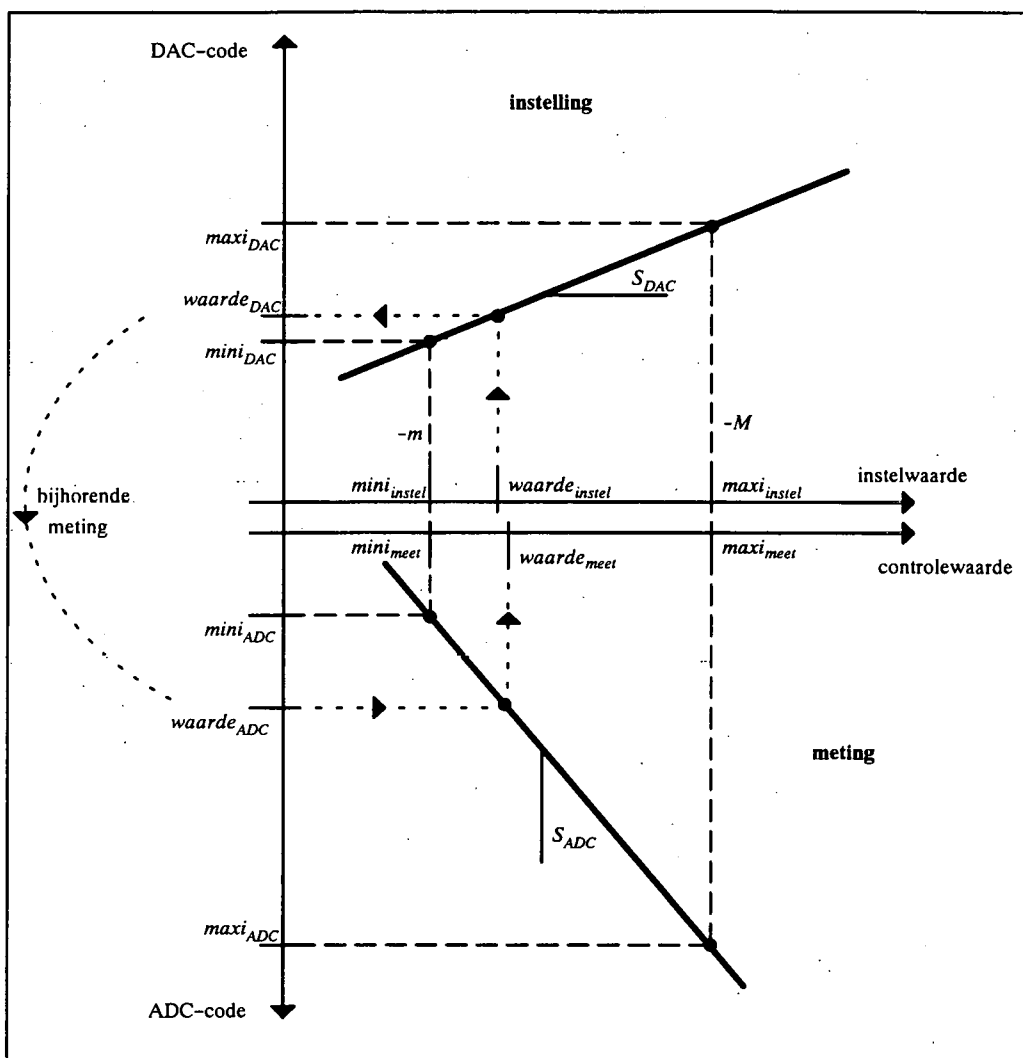
De helling S_{ADC} van de rechte door de twee meetkoppels wordt (4.2).

$$S_{ADC} = \frac{maxi_{meet} - mini_{meet}}{maxi_{adc} - mini_{adc}} \quad (4.2)$$

De beide ijkingsrechten kunnen op een gecombineerde grafiek voorgesteld worden met zowel de instelwaarde versus de DAC-code als de ADC-code versus de meetwaarde (figuur 4.13).

De twee hellingen worden samen met de twee instel- en de twee meetkoppels in het geheugen bewaard. Daarvoor is per te ijen instrumentparameter een zogeheten constantentabel voorzien die de volgende structuur heeft :

```
struct const_struct {
    int dacmin;      mini_dac
    int dacmax;     maxi_dac
    float min;      mini_instel
    float max;      maxi_instel
    float dacslope; S_DAC
    int adcmin;     mini_adc
    int adcmax;     maxi_adc
    float adcslope; S_ADC
}
```



Figuur 4.13: Grafiek met ijkingsrechten.

Deze constantentabel wordt bijgehouden in een beveiligd deel van het geheugen, waardoor de ijking bij het afschakelen van de elektronica niet verloren gaat.

Tijdens testen of in de vlucht kan de gebruiker de instrumentparameters per telecommando instellen in reële eenheden ($waarde_{instel}$). De itv-spanning kan bijvoorbeeld ingesteld worden op 1100 V door het telecommando *itv 1100*. Het is de bij itv horende uitvoeringsroutine die dan aan de hand van de ijkingswaarden in de constantentabel de overeenkomstige digitale code uitrekt ($waarde_{DAC}$) en de DAC ermee programmeert. Instelwaarden die buiten het werkingsgebied liggen worden niet aanvaard.

De berekening van de in te stellen code $waarde_{DAC}$ bij een gegeven gewenste instelwaarde $waarde_{instel}$ gebeurt door (4.3) (aflezen in de bovenste helft van de ijkingsgrafiek).

$$waarde_{DAC} = S_{DAC} \cdot (waarde_{instel} - mini_{instel}) + mini_{DAC} \quad (4.3)$$

Dit werkkoppel ($waarde_{instel}$, $waarde_{DAC}$) wordt in het geheugen opgeslagen in de zogenoemde waardentabel. Zo is het mogelijk later elementaire bewerkingen op de instelwaarde uit te voeren.

Aansluitend bij de instelling verricht de uitvoeringsroutine ook een meting : de ADC wordt uitgelezen ($waarde_{adc}$), deze meetcode wordt bij in de waardentabel geplaatst en gebruikt om de reële meetwaarde ($waarde_{meet}$) te bepalen.

De berekening van de meetwaarde $waarde_{meet}$ uit de opgemeten code van de ADC ($waarde_{ADC}$) gebeurt door (4.4) (aflezen in de onderste helft van de ijkingsgrafiek).

$$waarde_{meet} = S_{ADC} \cdot (waarde_{adc} - mini_{adc}) + mini_{meet} \quad (4.4)$$

Per instrumentparameter wordt een waardentabel bijgehouden van de volgende vorm :

```
struct val_struct {
    int dacvalue;      waarde_dac
    int adcvalue;      waarde_adc
    float val;         waarde_instel
    int print;         enkel waarde_adc of ook waarde_meet afprinten
}
```

4.3.3. Enkele nuttige commandoparameters

Telecommando's met de *-r*-optie zijn niet alleen nuttig bij het ijken zelf maar laten ook toe, zij het met meer moeite, de instrumentparameters te bedienen wanneer de ijking om één of andere reden verloren is gegaan. Bovendien wordt deze optie gebruikt om de instrumentparameter een effectieve nulinstelling te geven (de DAC programmeren met de digitale code 0). Vooral voor de hoogspanningen in de massascheider en in de ionenbronnen is zo'n nulinstelling van belang net voor het aanschakelen. De ondergrens van het werkingsgebied komt immers niet noodzakelijk overeen met een nulinstelling van de instrumentparameter. In het *itv*-voorbeeld levert het telecommando *itv 0* een werkelijke *itv*-spanning van 153 V op, het telecommando *itv -r 0* daarentegen geeft een reële *itv*-instelling van 0 V.

Met behulp van de "+"-optie kan een positieve of negatieve waarde opgeteld worden bij de eerder ingestelde waarde. Het telecommando *itv + 200* verhoogt de reële *itv*-spanning met 200 V. Dit kan enkel gebeuren wanneer de eerder ingestelde waarde onthouden wordt (in de waardentabel). Dit type van telecommando kan, wanneer uitgevoerd binnen een lus in een *script*, bijvoorbeeld gebruikt worden voor het stapsgewijs doorlopen van het instelbereik van een bepaalde instrumentparameter.

Voor het aan- en afschakelen van een instrumentparameter wordt het basiscommando vergezeld van de commandoparameter *on* of *off* (bijvoorbeeld *itv on*, *itv off*)

Door de commandoparameters *-pa* en *-px* kan voorafgaand aan een meting te kennen worden gegeven of enkel de ADC-code $waarde_{ADC}$ of ook de omgerekende meetwaarde ($waarde_{meet}$) aan de gebruiker moet getoond worden.

De gebruiker kan een overzicht opvragen van de inhoud van de waarden- en constantentabel horend bij een bepaalde instrumentparameter door de optie *-t* aan het basiscommando toe te voegen.

In tabel 4.3 wordt een overzicht gegeven van de syntaxis van besturingscommando's.

Commando's	Parameters	Actie
[commando]		Controlemeting van de spanning
	#	Instellen van de reële waarde # in het "vlottende komma"-formaat
	on	Aanschakelen van de voeding
	off	Afschakelen van de voeding
	-pa	Vlag zetten voor "uitgebreide" print van meting
	-px	Vlag zetten voor "beperkte" print van meting
	-t	Afbeelding van de waarden- en constantentabellen
	+ #	Verhogen van de ingestelde reële waarde met de waarde #
	-r #	Programmeren van de DAC met de code #
	-m # ₁ # ₂	Instellen van de lage ijkingswaarde : met de DAC-code # ₁ komt een spanning # ₂ overeen
	-M # ₁ # ₂	Instellen van de hoge ijkingswaarde : met de DAC-code # ₁ komt een spanning # ₂ overeen

Tabel 4.3: Algemene syntaxis van besturingscommando's.

4.4. De besturing van de massaspectrometer

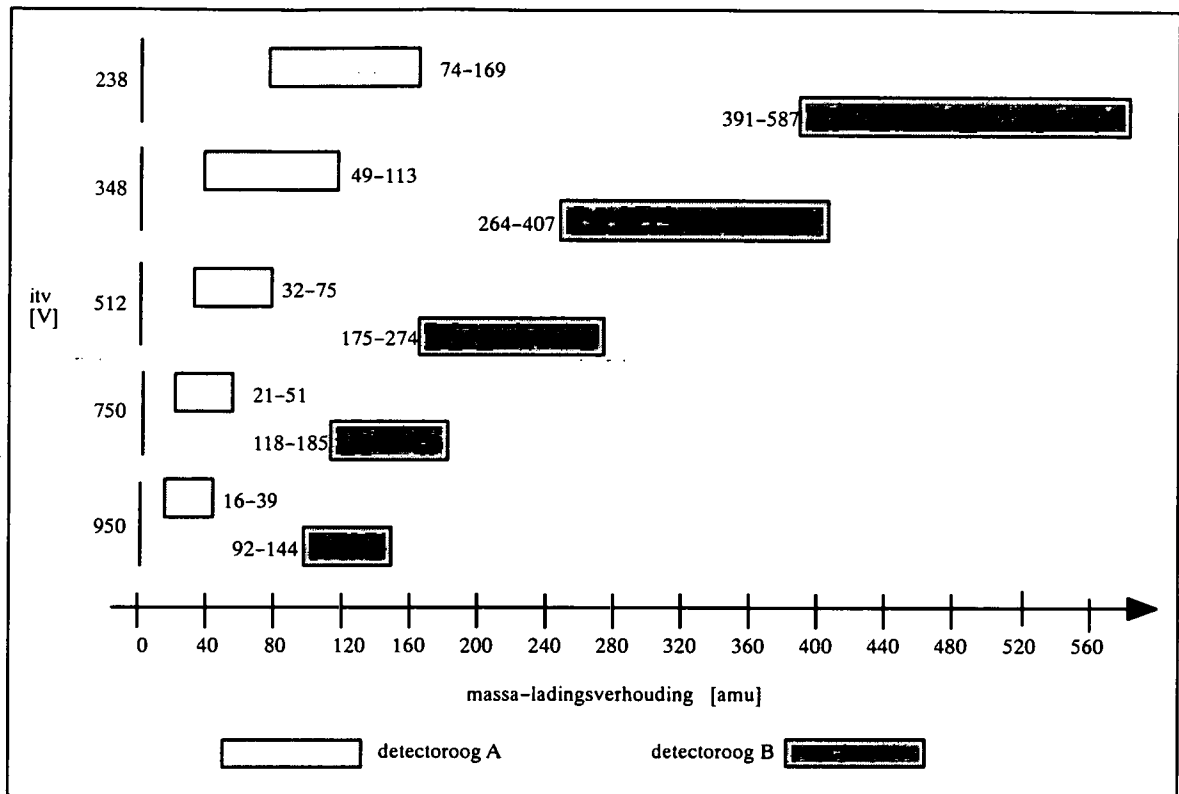
4.4.1. De inlaatsectie en het ionentransportsysteem

In de inlaatsectie en de octopool moeten drie instrumentparameters bestuurd worden : de *ion inlet voltage* (iiv), de *octopole bias* (opb) en de hoogfrequente rf-spanning. Hiervoor staan drie gelijknamige telecommando's ter beschikking : *iiv*, *opb* en *rf*. Elk van de basiscommando's kan eventueel vergezeld zijn van één of meerdere commandoparameters uit tabel 4.3.

Het schakelen, sturen en controleren van de iiv-, opb- en rf-spanningen wordt gerealiseerd door middel van de lokale adresserings- en dataverzamelmogelijkheden van de businterface (rfdc-BUSIF) in de rf- en dc-besturingsmodule (zie 3.5.1.2).

4.4.2. De bediening van de hoogspanningen in het lenzensysteem, de massascheider en de detector

De uiteindelijke bedoeling van de massaspectrometer is na te gaan hoeveel ionen in een bepaald tijdsinterval op een bepaald deel van de detector invallen. Door de keuze van de spanning iav (en dus itv) kan ervoor gezorgd worden dat ionen met massa-ladingsverhoudingen binnen een bepaalde waaier op de detector afgebeeld worden. Om een massabereik te bestrijken dat interessant is in het kader van de bestaande SIDAMS/MACSIMS-configuratie (bijvoorbeeld tussen 16 en 587 atoommassaeenheden) worden in de praktijk vijf instellingen van itv gebruikt (figuur 4.14). Het keer op keer doorlopen van het massabereik wordt vergemakkelijkt door het gebruik van lussen in *scripts* waarin afwisselend één van de vijf itv-waarden wordt ingesteld en een massaspectrum geregistreerd.



Figuur 4.14: De instelling van de massaschaal van de massascheider.

De waarden van pav , psv en cpv worden zo gekozen dat een optimale transmissie bekomen wordt zonder dat verzadiging optreedt.

Voor de besturing van de itv -spanning in ionenoptiek en massascheider en van de pav -, cpv - en psv -spanningen in het detectorgedeelte worden vier telecommando's gebruikt met dezelfde naam : itv , pav , cpv en psv . Dezelfde commandoparameters kunnen gebruikt worden als bij de rf- en dc-commando's (tabel 4.3). Voor de algemene voedingsschakelaar bestaat een apart basiscommando $hvgen$.

Syntaxis voor het algemene hoogspanningstelecommando

Algemeen aanschakelen van de hoogspanningsmodules : $hvgen\ on$

Algemeen afschakelen van de hoogspanningsmodules : $hvgen\ off$

De afsluitklep tussen condensator en magneet in de massascheider wordt bediend door het telecommando $valve$.

Syntaxis van het telecommando $valve$

Openen van de klep : $valve\ open$

Sluiten van de klep : $valve\ close$

Opvragen van de toestand van de klep : $valve\ status$

4.4.3. De integratie van de pixelprocessor in de werkomgeving

4.4.3.1. De functies en werkingsmodi van de pixelprocessor

Het SIDAMS/MACSIMS-instrument beschikt over twee werkingsmodi, een analoge mode en een digitale.

In de analoge mode wordt het detectorsignaal gedurende een zekere tijd in de pixelprocessor geaccumuleerd. In deze mode wordt niet gekeken naar afzonderlijke ioneninslagen, maar de lading van één of meerdere ioneninslagen wordt in de condensators van de pixels geïntegreerd tussen twee uitlezingen. Per pixel bekomt men zo een digitale waarde, de geaccumuleerde AD-code, die de som is van de AD-codes die in iedere uitleescyclus voor de betreffende pixel werden geregistreerd. Wanneer men ervan uitgaat dat de verwachte AD-code per ion (de "winst" van de detector) gekend is, kan de gemeten AD-code in een pixel omgezet worden in een aantal ionen.

De winst van de gehele elektro-optische ionendetector is het produkt van de elektronenversterking in de *microchannel*-plaat, de transmissie van de glasvezelverbinding, de gevoeligheid van het detector halfgeleidermateriaal, de voorversterking en de AD-verhouding van de AD-converter.

De gemiddelde winst voor het SIDAMS/MACSIMS-instrument ligt rond de 30 AD-codes per ion. Voor de interpretatie van de spectra moet de winst in functie van het pixelnummer gekend zijn. Deze winst is echter onderhevig aan statistische variaties, wat problemen kan geven wanneer er weinig ionen zijn.

Deze statistische variaties ontstaan doordat het vermenigvuldigingsproces van de elektronenwolk in de *microchannel*-plaat voor eenzelfde ion niet altijd op dezelfde manier verloopt. Een ioneninslag op een bepaalde plaats op de *microchannel*-plaat leidt dus niet altijd tot een oplading van dezelfde fotodiodecondensator. De statistische variatie in de gemiddelde winst per ioneninslag is evenredig met de vierkantswortel van het aantal impacten in een pixel. De signaal-ruisverhouding is dus lager bij een kleiner aantal ioneninslagen.

De tweede mode is de digitale mode. In deze mode gaan we ervan uit dat er per uitlezing en per pixel hoogstens één ioneninslag plaatsvindt. De statistische distributie van de winst per ioneninslag speelt nu een zeer grote rol. Ze moet zodanig zijn dat het merendeel van de ioneninslagen op één bepaalde plaats op de *microchannel*-plaat aanleiding geeft tot een ladingsverandering in de condensator van één bepaalde fotodiode die hoger ligt dan een instelbaar discriminatieniveau.

De analoge mode is dus het best geschikt wanneer hoge ionendichtheden moeten gemeten worden, bijvoorbeeld bij actieve chemi-ionisatie. De digitale mode leent zich beter tot meting van lage ionendichtheden, bijvoorbeeld voor de meting van de natuurlijke ionensamenstelling van de atmosfeer.

Accumulatie van spectra, hetzij in analoge, hetzij in digitale mode, is nodig omdat het onmogelijk is na elke scan het genomen (enkelvoudig) spectrum naar de bedieningsterminal aan de grond te verzenden over het telemetingkanaal. Slechts de gesommeerde spectra (het gewenste aantal accumulaties kan via telecommando worden ingesteld) worden naar de bedieningsterminal doorgestuurd.

De pixelprocessor is in staat geaccumuleerde spectra te maken door een door de gebruiker op te geven aantal scans op te tellen. De pixelprocessor houdt ook steeds het laatst geregistreerde

achtergrondspectrum in het geheugen. Indien gewenst kan het systematisch afgetrokken worden van alle daaropvolgende massaspectra. Wanneer de pixelprocessor in de digitale mode werkt moet een discriminatieniveau ingesteld worden. De geregistreerde spectra worden door de pixelprocessor doorgegeven aan de MOBC. Tenslotte kan de pixelprocessor op vraag van de gebruiker ook een testspectrum en een statuspakket aan de MOBC doorgeven.

4.4.3.2. De dialoog tussen de gebruiker en de pixelprocessor

De gebruiker kan niet rechtstreeks dialogeren met de pixelprocessor. De MOBC vervult de rol van tolk tussen beiden. Het is de bedoeling één enkel basiscommando te definiëren (*msh*) dat kan vergezeld zijn van een aantal commandoparameters om toe te laten alle functies van de pixelprocessor te exploiteren. De MOBC ontvangt zulke *msh*-commando's via het telecommandokanaal, vormt ze in een speciale uitvoeringsroutine (figuur 4.12) om in specifieke pixelprocessorbevelen en verzendt ze naar de pixelprocessor.

Elk pixelprocessorbevel heeft een codeletter (het type) die door de pixelprocessor begrepen wordt. Deze code wordt ondergebracht in een pakket, indien vereist samen met een commandoparameter en steeds met een *cyclic redundancy check* (zie 4.8.4). Voor bevelen zonder parameter wordt de softwarestructuur *comnd_1* gebruikt, voor bevelen met parameter structuur *comnd_2*.

```

struct comnd_1 { struct { char zero;
                  char type;      de codeletter
                } frame;
                unsigned int CRC;  de cyclic redundancy check
            };
struct comnd_2 { struct { char zero;
                  char type;      de codeletter
                  unsigned int parameter;
                                de commandoparameter
                } frame ;
                unsigned int CRC;  de cyclic redundancy check
            };

```

De pixelprocessor zal het bevel van de MOBC beantwoorden met het verzenden van een spectrumpakket, dat steeds een analoog en een digitaal deel bevat (de zogenaamde *mixed mode*) of van een statuspakket. Deze pakketten moeten ingepast worden in telemetingpakketten om naar de bedieningsterminaal aan de grond gezonden te worden.

De dialoog tussen MOBC en pixelprocessor verloopt via een *interrupt*-behandelingsroutine die hoort bij het gebruikte SCC-kanaal (figuur 4.12) en wordt onderworpen aan het SLIP-protocol (zie 4.8.3).

Bij het verzenden van massaspectra naar de bedieningsterminaal aan de grond wordt erop gelet dat de nuttige inhoud van de telemetingpakketten niet groter is dan 256 bytes. Indien een standaard spectrum (analoog + digitaal deel) als één geheel zou worden verzonden (4096 + 2048

bytes) zou het telemetingkanaal te lange tijd ingenomen worden door één type van informatie en zouden andere taken niet meer in staat zijn hun telemetingpakketten te versturen. Daarom worden de (4096 + 2048) bytes onderverdeeld in (16 + 8) blokken van 256 bytes, die ingepast worden in (16 + 8) telemetingpakketten. De datapakketten die de pixelprocessor produceert wanneer hij om zijn status wordt gevraagd of wanneer hij een discriminatieniveau heeft ingesteld, zijn steeds kleiner dan 256 bytes en worden in één telemetingpakket geplaatst.

Het opsplitsen van de massaspectra in telemetingpakketten gebeurt in een onafhankelijke taak van het *multitasking* beheersysteem, de *stripper*-taak (figuur 4.12).

Syntaxis van het telecommando <i>m</i> sp en geassocieerde pixelprocessorcommando's				
<i>m</i> sp-commando			Pixelprocessor-commando	
Telecommando	Parameter	Functie	Structuur	Type
<i>m</i> sp #	# : aantal accumulaties	standaardspectrum	<i>comnd_2</i>	'A'
<i>m</i> sp - <i>t</i>		testspectrum	<i>comnd_1</i>	'a'
<i>m</i> sp - <i>b</i> #	# : aantal accumulaties	achtergrondspectrum	<i>comnd_2</i>	'B'
<i>m</i> sp - <i>s</i>		T4-status	<i>comnd_1</i>	'E'
<i>m</i> sp - <i>sr</i>		T4-reset	<i>comnd_1</i>	'R'
<i>m</i> sp - <i>l</i> #	# : discriminatieniveau	instellen discriminatieniveau	<i>comnd_2</i>	'D'

4.5. De besturing van het actief chemi-ionisatiepakket

4.5.1. De stromingsbuis, de turbine en de afsluitsystemen

De besturing van de turbine gebeurt aan de hand van het telecommando *turbof* voor de toerentalregeling en van *turboi* voor de instelling van de stroombegrenzing. Dezelfde commandoparameters kunnen gebruikt worden als bij de rf- en dc- en de hoogspanningstelecommando's uit het massaspectrometergedeelte (tabel 4.3). Wanneer één van beide basiscommando's wordt gebruikt met de commandoparameter *on* of *off* wordt steeds de ganse turbinevoeding en -regeling geschakeld. Wanneer één van de basiscommando's zonder commandoparameter wordt gebruikt worden toch zowel het toerental als de geleverde stroom gemeten.

Schakelen, sturen en controleren van de turbine wordt gerealiseerd door middel van de lokale adresserings- en dataverzamelmogelijkheden van de businterface (turbo-BUSIF) in de besturingsmodule voor de turbine (zie 3.6.1.3).

De ijking van de sturing en de controle van toerental en stroombegrenzing gebeurt met de methode die in 4.3.2 werd besproken. Van beide regelingen wordt in het geheugen een waarden- en een constantentabel bijgehouden.

Het basiscommando voor de bediening van de beide afsluitsystemen is *cap*. Het gebruik van dit telecommando is onderworpen aan strenge veiligheidsmaatregelen. Het is niet geoorloofd dat het afsluitsysteem zich te vroeg opent of dat het helemaal niet open gaat. Daarom dient steeds een vaste procedure te worden gevolgd, waarvan op geen enkele manier mag worden afgeweken.

In het telecommando *cap open* zit een ingebouwde veiligheid die belet dat de afsluitsystemen worden geopend indien niet eerst de telecommando's *cap enable* en *cap confirm* (in die

volgorde) werden uitgevoerd. Het *cap enable* telecommando geeft de softwarestart aan van de openingsprocedure en brengt tegelijk de *arming*-transistor (figuur 3.33) in geleiding. Het *cap confirm* telecommando wordt gegeven als toestemming voor de verderzetting van de opgestarte procedure.

Deze beide telecommando's activeren elk een vlag. De *confirm*-vlag kan niet geactiveerd worden wanneer de *enable*-vlag niet actief is en de afsluitsystemen worden niet afgevuurd wanneer beide vlaggen niet gezet werden. Deze softwarevlaggen krijgen bovendien buitengewone waarden, om toevallige activering te vermijden. Pas wanneer beide vlaggen werden gezet kan het telecommando *cap open* de *firing*-transistor in geleiding brengen.

Wanneer van de juiste procedure wordt afgeweken worden de *arming*- en *firing*-transistors dadelijk uit geleiding gebracht en worden de beide softwarevlaggen geïnactiveerd. Dit kan ook op elk moment door de gebruiker zelf gedaan worden door middel van het telecommando *cap disable*.

De *cap*-telecommando's kunnen enkel manueel door de gebruiker ingegeven worden en niet vanuit een *script* of vanuit een in de grafische telecommandointerface aanwezige voorgeprogrammeerde telecommandolijst.

Aan het einde van een volledige en correcte openingsprocedure zal eerst het deksel aan de inlaat van de stromingsbuis verwijderd worden, één seconde later dat aan de uitlaat van de turbine.

Verder kunnen de resultaten van de bedradingstesten (telecommando *cap test*) en de stati van de afsluitsystemen zelf (open, gesloten of defect) (*cap*-telecommando zonder commandoparameter) opgevraagd worden.

Syntaxis van het telecommando <i>cap</i>
Software opstarten van de openingsprocedure en hardware <i>arming</i> : <i>cap enable</i>
Software bevestiging van de openingsprocedure : <i>cap confirm</i>
Ontsteking van de afsluitsystemen door hardware <i>firing</i> : <i>cap open</i>
Software beëindigen van de openingsprocedure en hardware inactiveren : <i>cap disable</i>
Uitvoeren van een bedradingstest : <i>cap test</i>
Opvragen van de toestand van de afsluitsystemen : <i>cap</i>

4.5.2. De ionenbronnen

De basiscommando's *dis* en *lamp* worden samen met de standaard commandoparameters voor besturingscommando's (tabel 4.3) gebruikt voor het schakelen, controleren en sturen van de hoogspanningen voor de ontladingsionenbron respectievelijk de foto-elektrische ionenbron. De ijkingswaarden worden voor beiden bijgehouden in de traditionele waarden- en constantentabellen.

De ionenbronnen moeten niet enkel aan en af maar ook nog tussen continue en gepulste mode kunnen geschakeld worden. De commandoparameter *off* wordt nog steeds gebruikt voor het afschakelen. De *on*-extensie vervalt echter. In de plaats komen de commandoparameters *cont* en *pulse* voor continue en gepulste mode.

Syntaxis voor het schakelen van de ionenbronnen
Ionenbron aanschakelen in de continue mode : <i>dis cont</i> en <i>lamp cont</i>
Ionenbron aanschakelen in de gepulste mode : <i>dis pulse</i> en <i>lamp pulse</i>
Ionenbron afschakelen : <i>dis off</i> en <i>lamp off</i>

4.5.3. De gastoevoer

Voor het bedienen van alle pneumatische kranen (schakelen en controleren status) in het actief chemi-ionisatiepakket werd één basiscommando (*valve*) voorzien, steeds vergezeld van twee commandoparameters. De eerste commandoparameter in het telecommando kiest de kraan of kranen die bediend moeten worden (*X* staat voor de spoelgaskraan, *Cl* voor het stel chloorkranen “chloor in” en “chloor uit” en *I* staat voor de jodiumkranen “jodium in” en “jodium uit”). De tweede commandoparameter bepaalt de te ondernemen actie (*open*, *close*, *in*, *out* of *status*). Tabel 4.4 geeft een overzicht.

De telecommando's “*valve Cl open*”- en “*valve I open*” werden niet geïmplementeerd. Zo'n telecommando zou de stromingsbuis rechtstreeks met de buitenlucht verbinden wat nooit is toegelaten.

Commando	par ₁	par ₂	“chloor in”	“chloor uit”	“jodium in”	“jodium uit”	“spoelgas”
<i>valve</i>	<i>Cl</i>	<i>in</i>	openen	sluiten			
	<i>I</i>	<i>in</i>			openen	sluiten	
	<i>Cl</i>	<i>out</i>	sluiten	openen			
	<i>I</i>	<i>out</i>			sluiten	openen	
	<i>Cl</i>	<i>close</i>	sluiten	sluiten			
	<i>I</i>	<i>close</i>			sluiten	sluiten	
	<i>X</i>	<i>close</i>					sluiten
	<i>X</i>	<i>open</i>					openen
	<i>Cl</i>	<i>status</i>	meting status				
	<i>I</i>	<i>status</i>			meting status		
	<i>X</i>	<i>status</i>					meting status

Tabel 4.4: Syntaxis van de telecommando's voor de pneumatische kranen.

Commando	par ₁	par ₂	Actie
<i>pres</i>	<i>I</i>		Meting hoge en lage druk jodiummoedergas
	<i>I</i>	<i>on</i>	Aanschakelen drukmeters jodiummoedergas
	<i>I</i>	<i>off</i>	Afschakelen drukmeters jodiummoedergas
	<i>Cl</i>		Meting hoge en lage druk chloormoedergas
	<i>Cl</i>	<i>on</i>	Aanschakelen drukmeters chloormoedergas
	<i>Cl</i>	<i>off</i>	Afschakelen drukmeters chloormoedergas
	<i>X</i>		Meting hoge en lage druk spoelgas en persluchtdruk
	<i>X</i>	<i>on</i>	Aanschakelen drukmeters spoelgas en perslucht
	<i>X</i>	<i>off</i>	Afschakelen drukmeters spoelgas en perslucht

Tabel 4.5: Syntaxis van de telecommando's voor de drukmetingen.

Dezelfde commandosyntaxis wordt aangehouden bij het *pres*-telecommando dat wordt gebruikt voor de drukmetingen in het actief chemi-ionisatiepakket (schakelen en controleren). Ook hier

duidt de eerste commandoparameter de plaats van de actie aan. Volgt er geen tweede commandoparameter dan wordt een drukmeting uitgevoerd, anders geeft de tweede parameter de uit te voeren schakelactie aan (tabel 4.5).

Tenslotte wordt het basiscommando *flow* gebruikt voor de regeling en controle van de debieten in het actief chemi-ionisatiepakket. De eerste commandoparameter geeft andermaal de plaats van de actie aan (*Cl* en *I* voor de respectievelijke moedergassen, *XCl* voor het spoelgas in de chloortak en *XI* voor het spoelgas in de jodiumtak). Aangezien voor de debietregelaars naast een schakel- en controlefunctie ook een stuurfunctie bestaat kunnen voor de tweede commandoparameter alle standaard commandoparameters gebruikt worden die voor besturingscommando's gelden (tabel 4.3) en worden voor elk van de vier debietregelaars de gebruikelijke ijkingstabellen bijgehouden.

4.6. De vluchttijdmeting

4.6.1. De flexibiliteit van de vluchttijdmeting

Voor het uitvoeren van vluchttijdmetingen wordt het basiscommando *tof* gebruikt. Dit telecommando laat niet alleen toe een vluchttijdmeting op te starten maar kan in combinatie met een aantal commandoparameters de vluchttijdparameters instellen. Zo is het mogelijk de openingsduur van de ionenbron, de bemonsteringsfrequentie, de uitsteltijd tussen ionenpuls en bemonstering en de individuele versterkingen in de elektrometer- en de besturingsmodule per telecommando te programmeren. Dit geeft de gebruiker een grote flexibiliteit wat zeer nuttig is gezien geen enkele ervaring bestond met reële vluchttijdmetingen tijdens een ballonvlucht.

Aangezien niet alle ionen in de hoofdstroom even snel bewegen is het interessant bij de bepaling van de exacte vluchttijd over de volledige vorm van de stroompuls te beschikken. Daarom werd geopteerd voor registratie van het volledige stroomprofiel in een zogenaamd vluchttijdspectrum, dat naar de bedieningsterminal aan de grond wordt doorgezonden. Het is een speciale uitvoeringsroutine (figuur 4.12) die enerzijds zorgt voor de implementatie van de telecommando's en anderzijds de vluchttijdspectra in telemetingpakketten inpast. De vluchttijdspectra worden bij verzending naar de grond voorafgegaan door een rapportpakket dat alle vluchttijdparameters bevat.

Syntaxis van de telecommando's voor vluchttijdmetingen		
Commando	Parameters	Actie
<i>tof</i>	#	Opstarten vluchttijdmeting met # accumulaties
	-r #	Instellen bemonsteringsperiode
	-p #	Instellen openingstijd ionenbron
	-d #	Instellen uitsteltijd
	-g #1 #2	Instellen versterking : eerste versterking met #1, tweede met #2

4.6.2. Meerdere accumulaties

Het opstarten van een vluchttijdmeting gebeurt door middel van het telecommando *tof*#. Hierin is # een aantal accumulaties, i.e. het aantal keer dat een bemonsteringsbeurt van het signaal (1024

bemonsteringen) wordt herhaald. Dit telecommando zorgt voor automatische omschakeling naar de elektrometermode voor de meting en terug naar de spectrometermode erna. Het is ook mogelijk door middel van de telecommando's *iiv on* en *iiv off* over te schakelen tussen spectrometer- en elektrometermode.

Syntaxis van de schakelcommando's tussen elektrometer- en spectrometermode
Instellen spectrometermode : <i>iiv on</i>
Instellen elektrometermode : <i>iiv off</i>

De gebruiker moet er steeds voor zorgen dat bij het begin van een vluchttijdmeting de ionenbronvoeding aangeschakeld is, dat ze uitgestuurd wordt naar de gewenste hoogspanning en dat ze in de gepulste mode wordt gezet.

Het herhalen van de bemonstering heeft een drastische vermindering tot gevolg van de ongewenste signaalbijdrage. Het is meestal zo dat het meetsignaal verdrinkt in de ruis wanneer slechts een enkelvoudige bemonstering wordt uitgevoerd. Daarom moet het aantal accumulaties zo gekozen worden dat de kwaliteit van het signaal voldoende verbetert, zonder de tijd uit het oog te verliezen die dat vergt.

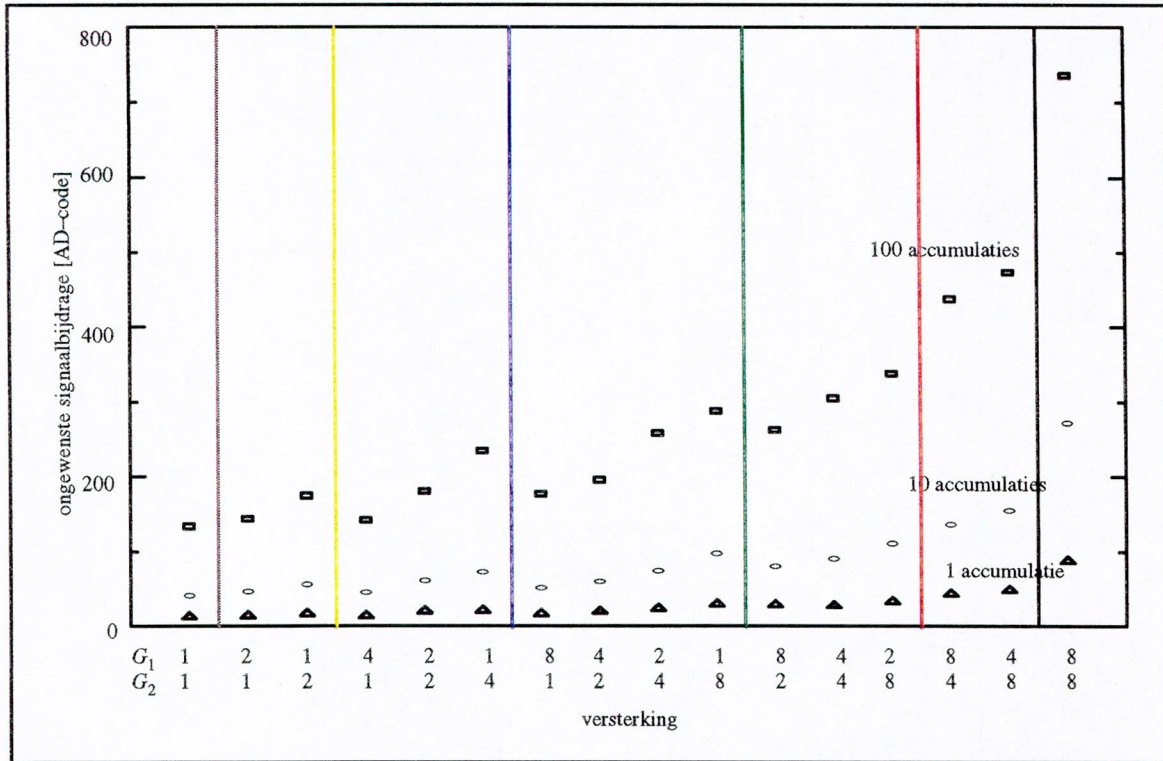
De rol van de twee versterkingswaarden G_1 en G_2 en het aantal accumulaties op de ongewenste signaalbijdrage werd onderzocht in het laboratorium. Er werden metingen verricht met verschillende (constante) ingangsstromen (tussen $5 \cdot 10^{-11}$ A en $2 \cdot 10^{-8}$ A), met alle versterkingscombinaties en met verschillende accumulatieaantallen. Als maat voor de ongewenste signaalbijdrage wordt het verschil genomen tussen de maximale en de minimale AD-waarde in een vluchttijdspectrum van 1024 bemonsteringen.

Het ongewenste deel van het meetsignaal blijkt haast niet afhankelijk te zijn van de amplitude van het signaal en is dus onafhankelijk van de grootte van de stroom. In figuur 4.15 wordt de ongewenste signaalbijdrage gegeven in functie van de versterkingscombinaties bij verschillende accumulatieaantallen.

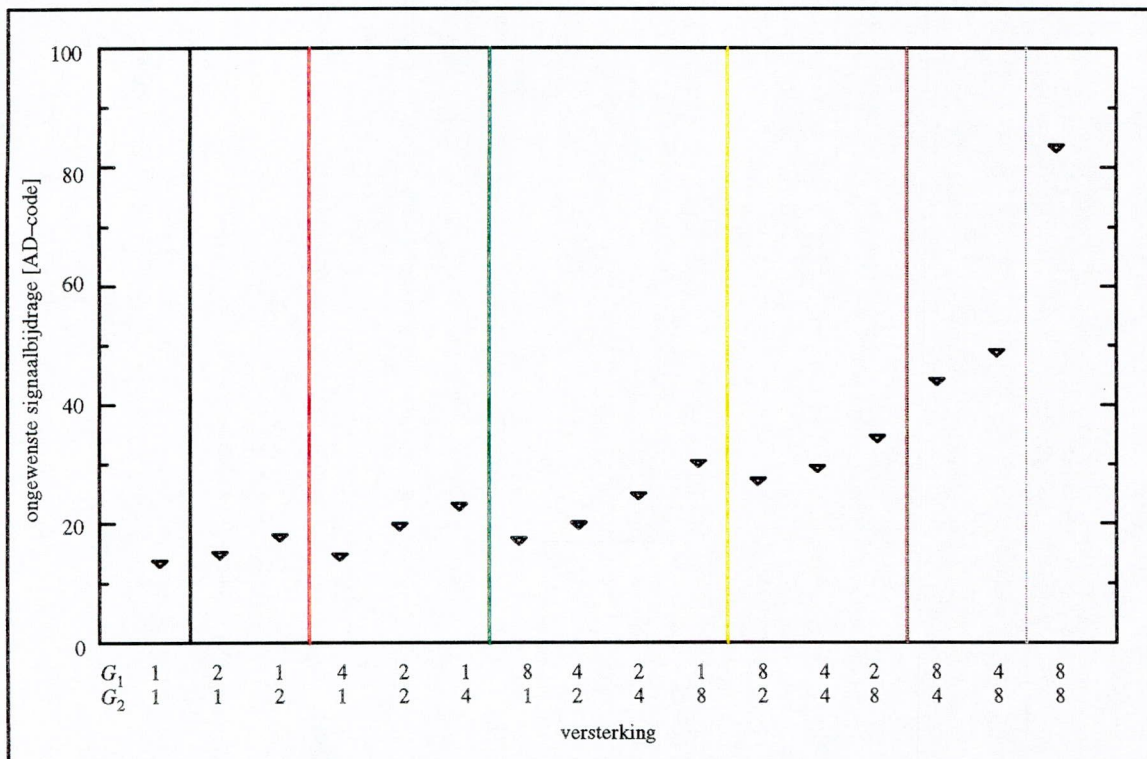
Bij toenemend aantal accumulaties blijkt de genormaliseerde ongewenste signaalbijdrage (teruggebracht tot 1 accumulatie) kleiner te worden met de vierkantswortel uit het aantal accumulaties. Figuur 4.16 geeft deze genormaliseerde ongewenste signaalbijdrage na uitmiddeling over het aantal accumulaties.

Het verhogen van G_2 levert een grotere ongewenste bijdrage op dan het verhogen van G_1 . Voor een zekere gewenste waarde G is het best eerst G_1 zo groot mogelijk te maken. De ongewenste bijdrage die opgepikt wordt tussen de uitgang van de eerste versterker en de ingang van de tweede (tijdens het transport van het signaal van de elektrometermodule naar de besturingsmodule) wordt dan zo klein mogelijk gehouden.

Alvorens de werkwaarde voor het aantal accumulaties in te stellen, is het nodig te verifiëren of geen verzadiging optreedt in de analoog-naar-digitaalconverter en in de elektrometer. Dit gebeurt best door een enkelvoudige bemonsteringsbeurt van het signaal uit te voeren ($\# = 1$). Indien één of meer van de 1024 bemonsteringen een waarde oplevert die groter is dan 255 moet de versterking teruggevoerd worden. Verzadigingsverschijnselen die niet zeer uitgesproken zijn, kunnen aan het oog ontsnappen in vluchttijdspectra met meerdere accumulaties wegens uitmiddeling ten gevolge van lichte variaties in het stroomprofiel.



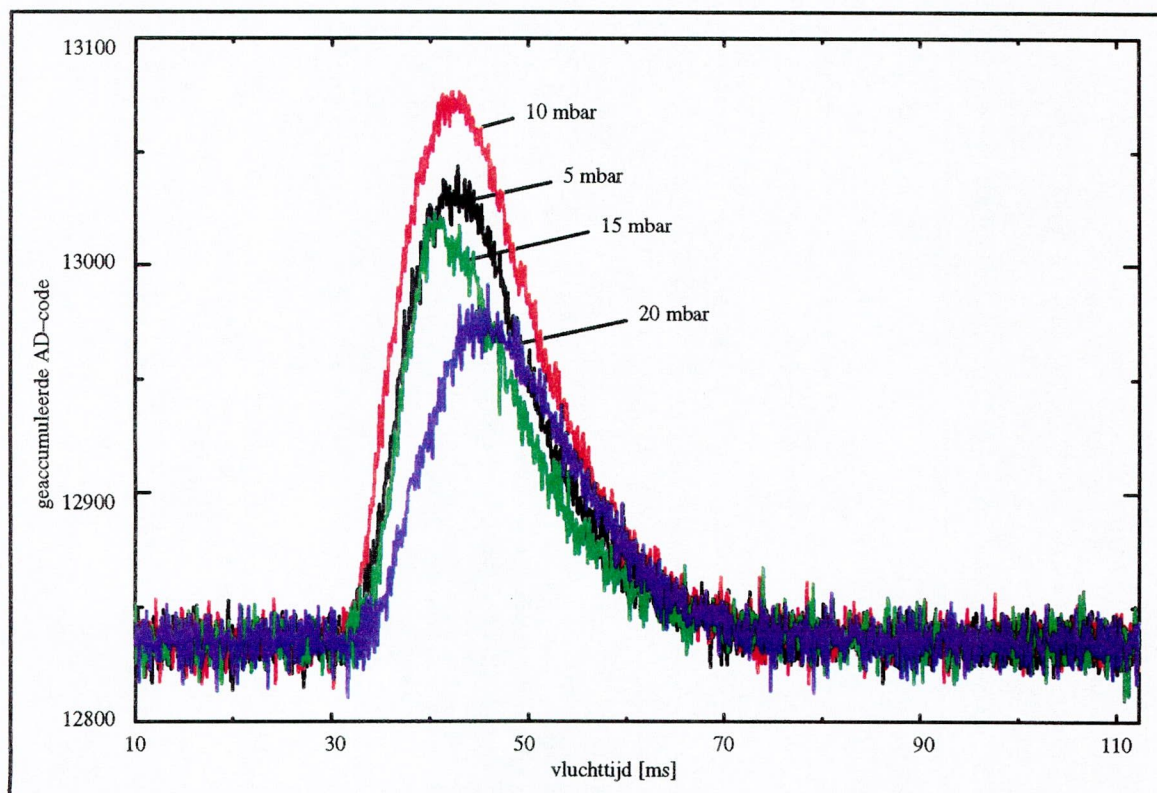
Figuur 4.15: De ongewenste signaalbijdrage in functie van de versterking bij verschillende accumulatieaantallen (uitmiddeling over metingen met verschillende ingangsstromen).



Figuur 4.16: De ongewenste signaalbijdrage in functie van de versterking (uitmiddeling over metingen met verschillende ingangsstromen en met verschillend aantal accumulaties).

In de praktijk wordt de eigenlijke vluchttijdmeting niet alleen voorafgegaan door deze zogenaamde verzadigingscontrole, maar ook door een meting van de stroom op de inlaatflens wanneer de ionenbron zich in de continue mode bevindt. Het geheel van de vluchttijdmeting (drie spectra) wordt uitgevoerd vanuit een *script* waarbij een aantal instrumentparameters door middel van globale variabelen en plaatsafhankelijke parameters worden ingesteld.

4.6.3. Realistische vluchttijdmeting in het labo



Figuur 4.17: Vluchttijdspectra opgenomen in het labo (18/08/1995).

In figuur 4.17 worden vier vluchttijdspectra voorgesteld die in het labo werden opgemeten met de volledige vluchtconfiguratie bij verschillende drukken in de stromingsbuis (18/08/1995). De werkingsomstandigheden waren de volgende : een chloorgasstroom (Cl_2 in Ar) van 150 sccm, een dubbele spoelgasstroom (Ar) van 200 sccm, 100 accumulaties, een uitsteltijd van 10 ms, een bemonsteringsperiode van 100 μs , een bronopeningstijd van 1 ms, een eenheidsversterking, een iiv-spanning van 5 V en een spanning van 1500 V over de ontladingsionenbron.

4.7. De bewaking van het instrument

4.7.1. Drie types van bewakingsgegevens

Er kunnen drie types van bewakingsgegevens onderscheiden worden (zie 3.8.2) : de omgevingsbewaking (*ambient housekeeping*) en de eigenlijke instrumentbewaking enerzijds in

het massaspectrometergedeelte (*technological housekeeping*) en anderzijds in het actief chemi-ionisatiepakket (*chemical housekeeping*).

Elk van deze groepen van *housekeeping* kan afzonderlijk door de gebruiker opgevraagd worden door middel van drie basistelecommando's : *ahk*, *thk* en *chk*. De eerste twee telecommando's zijn bestemd voor de MOBC, het *chk*-commando wordt door de MOBC doorgestuurd naar de CIMP.

De bewakingsgegevens kunnen op twee manieren de bedieningsterminal aan de grond bereiken, ofwel onder binaire vorm via het telemetingkanaal, ofwel als een ASCII-tekst via het telecommando-echokanaal. De eerste manier is de snelste en het meest aangewezen bij de continue bewakingsopdrachten die tijdens de vlucht in het instrument moeten uitgevoerd worden. Het zijn de belangrijkste parameters uit deze telemetingdata die na omzetting in reële eenheden op een anschouwelijke manier in de bedieningsterminal worden voorgesteld om de gebruiker toe te laten de werking van het instrument te controleren. De gebruiker dient in dit geval de commandoparameter *-tm* aan het basiscommando toe te voegen.

Omdat bepaalde *housekeeping*-parameters slechts van belang zijn tijdens de voorbereidende fase (bedradingstesten van de afsluitsystemen) of tijdens de vlucht maar één keer een verandering ondergaan (status van de afsluitklep en van de afsluitsystemen) worden ze niet grafisch voorgesteld in de bedieningsterminal (alhoewel ze zich wel in de telemeting bevinden). Bij deze parameters is alleen de gemeten digitale code beschikbaar, maar ook bij andere parameters kan deze interessanter zijn dan de naar reële eenheden omgezette waarde (ontwikkelings- en integratiefase). Daarom werd de mogelijkheid behouden de bewakingsgegevens onder de vorm van digitale codes over het telecommando-echokanaal te verzenden (basiscommando zonder commandoparameter).

Syntaxis van de bewakingcommando's
Opvragen van omgevingsbewaking via het telecommando-echokanaal : <i>ahk</i>
Opvragen van MOBC-bewaking via het telecommando echo-kanaal : <i>thk</i>
Opvragen van CIMP-bewaking via het telecommando echo-kanaal : <i>chk</i>
Opvragen van omgevingsbewaking via het telemetingkanaal : <i>ahk -tm</i>
Opvragen van MOBC-bewaking via het telemetingkanaal : <i>thk -tm</i>
Opvragen van CIMP-bewaking via het telemetingkanaal : <i>chk -tm</i>

4.7.2. *Het opmeten en verzenden van de bewakingsgegevens*

Wanneer één van de processors een *housekeeping*-commando ontvangt worden de bijhorende parameters één na één gemeten. Op de toestand van de afsluitklep in de massascheider na, worden in de MOBC alle bewakingsgegevens verzameld in de *housekeeping*-module door gebruik te maken van de lokale adresserings- en dataverzamelmogelijkheden van de businterface (hsk-BUSIF) in deze module (zie 3.8.3.1).

Het zelfde principe wordt toegepast in de *housekeeping*-module van de CIMP al is de bijdrage ervan eerder beperkt. De meeste bewakingsgegevens worden verzameld in de verschillende besturingsmodules van het actief chemi-ionisatiepakket zoals hiervoor werd besproken.

In de MOBC (*ahk*- of *thk*-commando) zal een opgemeten parameter, al naargelang de wens van de gebruiker, ofwel dadelijk via het telecommando-echokanaal naar de grond verstuurd worden ofwel bijgeplaatst worden in een telemetingpakket.

De CIMP zal bij ontvangst van een *chk*-commando de bewakingsgegevens opmeten en ze hetzij als een ASCII-tekst, hetzij binair doorgeven aan de MOBC. De MOBC laat ASCII-tekst

dadelijk door naar de grond, de binaire bewakingsgegevens worden eveneens in een telemetingpakket verzameld.

De MOBC beschikt voor de binaire verzending van de drie types bewakingsgegevens over drie verschillende telemetingpakketten die voldoen aan het algemene telemetingformaat (zie 4.8.2).

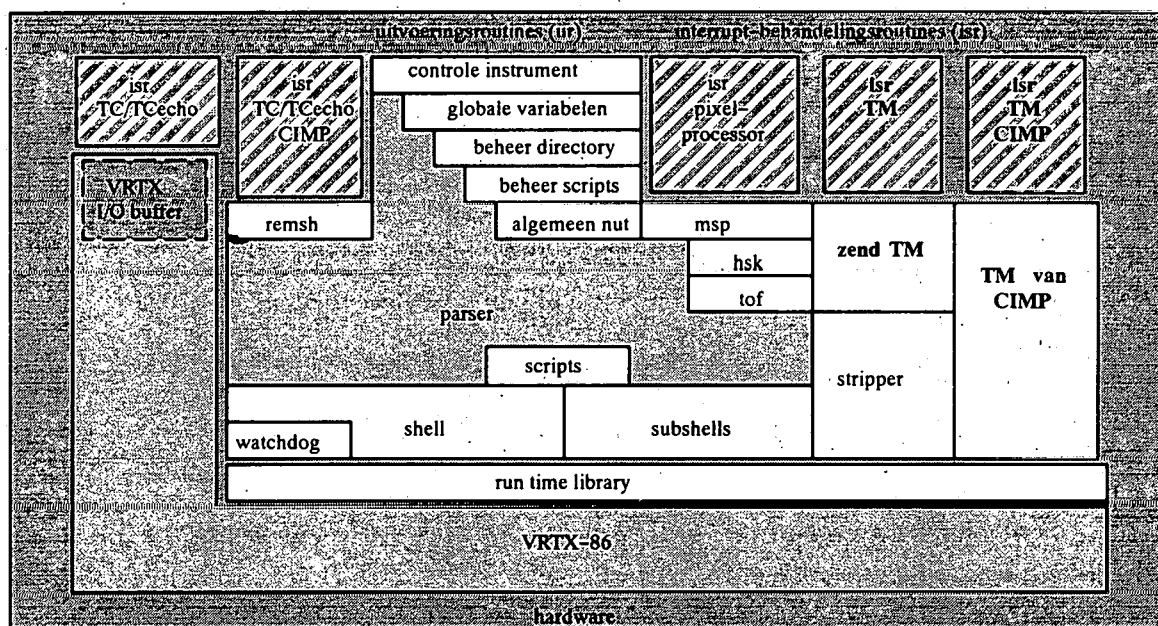
4.7.3. Aanverwante telecommando's

In de MOBC kunnen de telecommando's *gauge* en *mks100* gebruikt worden voor het aan- en afschakelen van de drukmeting in het hoog-vacuümgedeelte van de massaspectrometer en in de stromingsbuis.

Syntaxis van het telecommando <i>gauge</i>
Aanschakelen van de drukmeting in het hoog-vacuümgedeelte : <i>gauge on</i>
Afschakelen van de drukmeting in het hoog-vacuümgedeelte : <i>gauge off</i>
Syntaxis van het telecommando <i>mks100</i>
Aanschakelen van het baratron in de stromingsbuis : <i>mks100 on</i>
Afschakelen van het baratron in de stromingsbuis : <i>mks100 off</i>

4.8. Telemeting

4.8.1. Het kanaal voor de wetenschappelijke data



Figuur 4.18: Inplanting van de telemeting in de SIDAMS/MACSIMS-werkomgeving.

De telemeting staat volledig los van de telecommando-interface. Het is een volledig gescheiden verbinding tussen het instrument (de MOBC) en de bedieningsterminal aan de grond langs waar alle wetenschappelijke gegevens onder binaire vorm worden verzonden. In de bedieningsterminal worden ze zodanig voorgesteld dat de gebruiker gedurende de ganse vlucht een duidelijk overzicht heeft van wat zich in het instrument afspeelt.

De MOBC verzamelt de wetenschappelijke data uit het ganse instrument : massaspectra en statuspakketten uit de pixelprocessor (zie 4.4.3.2), bewakingsgegevens uit de CIMP en eigen bewakingsgegevens van het massaspectrometergedeelte (zie 4.7.2) en vluchttijdspectra (zie 4.6.1).

Voor de ontvangst van de wetenschappelijke data uit de CIMP gebruikt de MOBC een aparte taak van het beheersysteem, de *cimp*-taak (figuur 4.18). In deze taak wordt voortdurend uitgekeken naar de komst van datapakketten uit de CIMP. Zulke pakketten worden dadelijk ingepast in telemetingpakketten, klaar voor verdere verzending naar de grond. Het invoeren van een aparte taak past in de volledige scheiding van de telemetinginterface en de besturing van het instrument. De ontvangst van data uit de CIMP verloopt via een *interrupt*-behandelingsroutine die hoort bij het gebruikte SCC-kanaal. De ontvangen informatie wordt in het geheugen opgeslagen waar ze door de *cimp*-taak kan worden opgepikt.

Voor de verzending van telemetingpakketten wordt een speciale zendroutine gebruikt (figuur 4.18). Deze routine kan vanuit meerdere taken worden aangesproken : vanuit *shell* en *subshells* voor het verzenden van bewakingsgegevens van het massaspectrometergedeelte en van vluchttijdspectra, vanuit de *stripper*-taak voor het verzenden van massaspectra en vanuit de *cimp*-taak voor het verzenden van de data uit het actief chemi-ionisatiepakket. De reden voor het opsplitsen van de massaspectra in kleinere telemetingpakketten in de *stripper*-taak wordt hier duidelijk : het telemetingkanaal mag niet te lang in beslag genomen worden door één taak om de andere taken ook de kans te geven het kanaal te gebruiken.

Door het gebruik van *VRTX-mailboxes* krijgt een taak pas toegang tot de verzendroutine wanneer deze niet gebruikt wordt door een andere taak. De verzending van de telemetingpakketten naar de grond verloopt opnieuw via een *interrupt*-behandelingsroutine, geassocieerd aan het gebruikte kanaal van de SCC.

4.8.2. De structuur van telemetingpakketten

De telemetinggegevens worden ingepast in telemetingpakketten die allen dezelfde vorm hebben:

```
struct { # hoofding #
    char      id;           identiteit van het pakket
    char      flags;       optionele vlaggen
    unsigned int seqcount;  het volgnummer van dit pakkettype (id)
    unsigned long timetag;  het tijdstip waarop het pakket werd opgevuld
    # wetenschappelijke inhoud #
    # checksum #
    unsigned int crc;      de cyclic redundancy check
};
```

Elk pakket bestaat uit een hoofding, de wetenschappelijke inhoud en een *checksum*.

De pakketten kunnen in de bedieningsterminal aan de grond onderscheiden worden aan de hand van de pakketidentiteit in de hoofding. De hoofding van elk telemetingpakket bevat verder een volgnummer dat aangeeft hoeveel keer een pakket met die bepaalde identiteit werd verstuurd en een aanduiding van het tijdstip waarop het pakket werd opgevuld.

In het geval van massa- en vluchtijdspectra wordt net voor de verzending van de telemetingpakketten die het eigenlijke spectrum bevatten een rapportpakket verzonden. Deze rapportpakketten voldoen ook aan de algemene structuur voor telemetingpakketten en bevatten bijkomende informatie aangaande de spectra (spectrumnummer, aantal accumulaties, ingestelde spanningen en andere parameters).

4.8.3. Het SLIP-protocol

Alle telemetingpakketten die door de MOBC naar de bedieningsterminal aan de grond worden verzonden of door de CIMP naar de MOBC, maar ook alle pakketten die uitgewisseld worden tussen MOBC en pixelprocessor (commandopakketten van MOBC naar pixelprocessor en datapakketten van pixelprocessor naar MOBC) worden onderworpen aan het SLIP-protocol (*Serial Line Internet Protocol*). Het SLIP komt uit de wereld van de synchrone protocollen, zoals die bijvoorbeeld gebruikt worden in netwerken tussen computersystemen.

Dit protocol bestaat er eenvoudigweg in elk pakket te beginnen en te beëindigen met een "frame end"-karakter (*FEND* = 0xC0h), met het oog op het onderscheiden van twee op mekaar volgende pakketten. De eerste *FEND* laat toe alle voorgaande irrelevante karakters zonder meer te vergeten.

Aangezien het in de telemetingpakketten om binaire data gaat is het mogelijk dat één of meerdere karakters in één van de datablokken toevallig de waarde van *FEND* hebben. Dat wordt voor verzending onderzocht en in dat geval wordt het karakter vervangen door een sequentie van twee SLIP-karakters : een "frame escape" (*FESC* = 0xDBh) en een "transposed frame end" (*TFEND* = 0xDCh). Zo ook zal een karakter in een datablok dat toevallig de waarde van *FESC* heeft vervangen worden door een "frame escape" (*FESC*) en een "transposed frame escape" (*TFESC* = 0xDDh).

Aan de ontvangtzijde zal de eerste *FEND* een opslagbuffer openen, een tweede *FEND* zal deze weer sluiten en het teken zijn dat de processor mag verwittigd worden dat een volledig pakket is aangekomen. Wordt het *FESC*-karakter ontmoet dan gaat de ontvanger in "escape mode". Indien het eerstvolgende karakter *TFEND* is, dan wordt *FEND* in de buffer geplaatst, indien het eerstvolgend karakter *TFESC* is, wordt *FESC* in de buffer geplaatst. Een ander karakter na *FESC* is onmogelijk, tenzij door een fout. *TFESC* en *TFEND*, niet voorafgegaan door *FESC*, worden als gewone karakters behandeld.

In het SIDAMS/MACSIMS-instrument worden 8 telemetingpakketten gebruikt die allen een verschillende lengte hebben. Het voordeel van het SLIP-protocol is dat het toelaat frames van variabele lengte te verzenden, zonder dat de ontvanger à priori de lengte van het verzonden frame kent. Bovendien is het dankzij dit protocol mogelijk bij verstoring van de transmissie snel weer te synchroniseren met de verzonden datapakketten. Anderzijds is de lengte van het verzonden frame niet gelijk aan de nuttige datalengte. Ze bedraagt minstens twee karakters meer (*FEND* vooraan en achteraan) en maximaal de dubbele lengte van het datablok plus twee karakters (bijvoorbeeld, wanneer het ganse datablok de waarde *FEND* of *FESC* heeft).

4.8.4. Controle na ontvangst : de cyclic redundancy check

Om fouten op te sporen tijdens de telemetingcommunicatie tussen de MOBC en de bedieningsterminal aan de grond en tussen CIMP en MOBC wordt voor elk verzonden pakket een *checksum*, een *cyclic redundancy check* (crc) berekend. Ook voor de pakketten die worden uitgewisseld tussen MOBC en pixelprocessor wordt zo'n *checksum* berekend.

De *cyclic redundancy check* resulteert in een 16 bits waarde, die aan het einde van het pakket wordt toegevoegd en meegestuurd. Bij ontvangst wordt weer een *cyclic redundancy check* uitgevoerd. De dan bekomen waarde moet dezelfde zijn als de verstuurde. Zo niet is tijdens de transfer een fout in het pakket geslopen [Ritt 86].

Het datapakket wordt in het crc-algoritme als een groot getal aanzien dat gedeeld wordt door een generatorpolynoom. We gebruiken als polynoom $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$, een 16^{de} orde polynoom die *crc-ccitt* wordt genoemd (*Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique*). De rest van de deling (16 bits) is de crc-waarde die als controle dienst zal doen. Dit crc-algoritme is in staat 99,998 % van de mogelijke fouten te ontdekken. Enkel fouten die de data zodanig wijzigen dat de rest van de deling dezelfde is dan bij het onaangetaste pakket, kunnen niet gedetecteerd worden.

4.9. Besluit

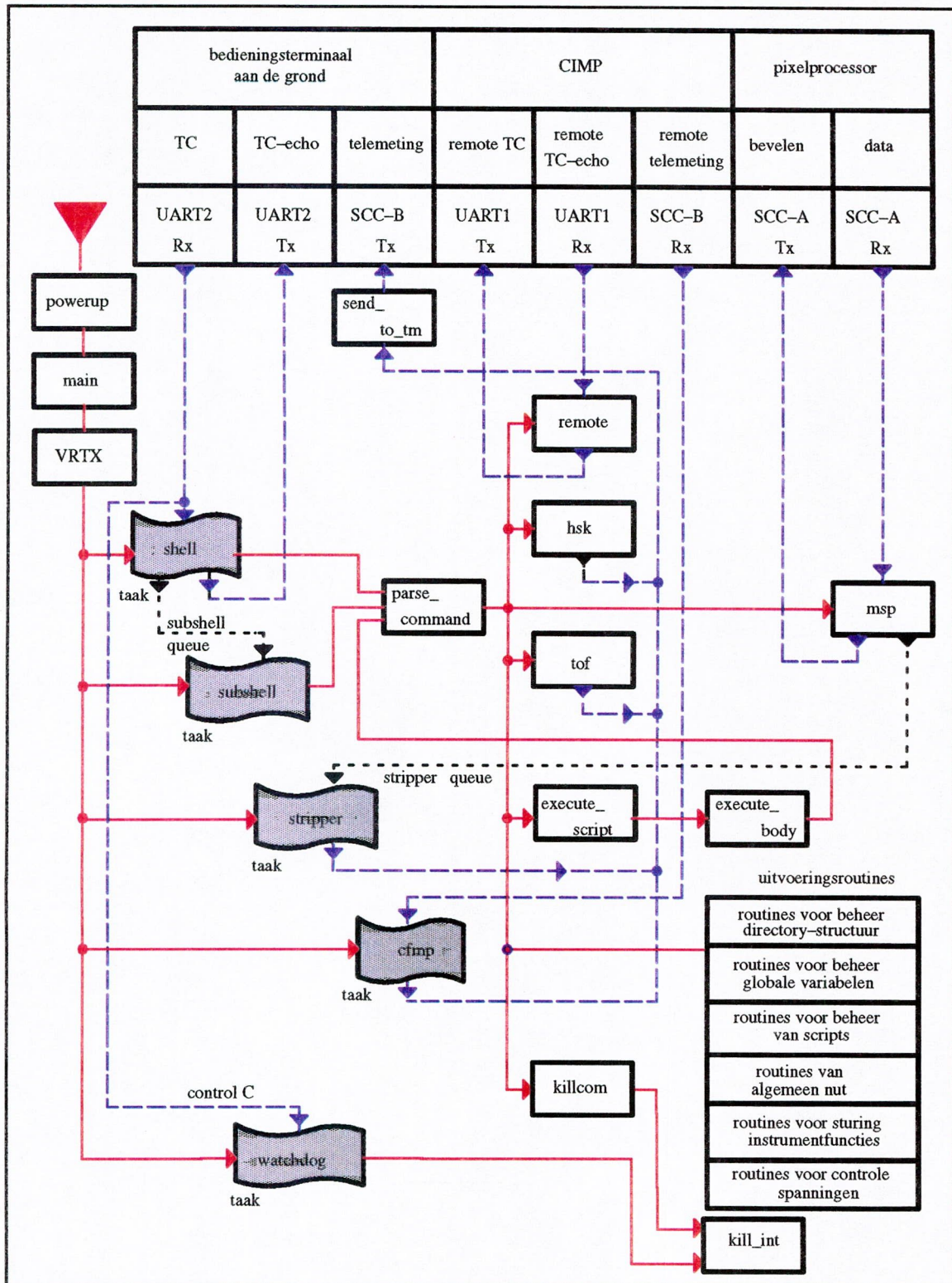
De ontwikkeling van een software werkomgeving aan boord is erop gericht het SIDAMS/MACSIMS-instrument op een gemakkelijke manier te besturen zonder dat daarvoor de kennis van de achterliggende elektronische hard- en software noodzakelijk is. De aanwezigheid van drie processors aan boord is bijvoorbeeld volledig transparant voor de gebruiker.

In de eerste plaats werd daarom een tekstgerichte telecommando-interface ontwikkeld, waardoor interactief met het instrument kan gecommuniceerd worden. Via deze interface en een uitgebreid stel van telecommando's kunnen de verschillende mogelijkheden van een op maat van het instrument gemaakt reële tijd *multitasking* beheersysteem geëxploiteerd worden (gebruik van *scripts*, globale variabelen, plaatsafhankelijke parameters, enz.) en kunnen alle instrumentparameters ingesteld en gecontroleerd worden. De specifieke eigenschappen die werden ingebouwd in de werkomgeving verveelvoudigen de mogelijkheden van het instrument : ze vergroten de snelheid van uitvoering, bieden een grote flexibiliteit in de besturing en de mogelijkheid tot parallelisatie van verschillende taken in voor- en achtergrond, resulteren in een grote toename van de bereikbare hoogteresolutie, brengen informatie in reële tijd aan de grond, enz.

Voor een aantal instrumentparameters werd een telecommando gebaseerde ijkingsprocedure uitgewerkt waardoor de parameters kunnen ingesteld en gecontroleerd worden in reële fysische eenheden.

Voor het openen van de afsluitsystemen aan de ingang van de stromingsbuis en de uitgang van de turbine werd een veilige procedure uitgewerkt.

In figuur 4.19 wordt het algemene organigram gegeven van de MOBC-software dat als basis kan dienen bij het lezen van de gedetailleerde softwarebeschrijving in appendix B.



Figuur 4.19: Overzicht van de programmastructuur van de MOBC.

Programmastructuur : volle rode lijnen ; data- en telecommandostroom tussen de programma's en naar de buitenwereld : blauwe onderbroken lijnen.

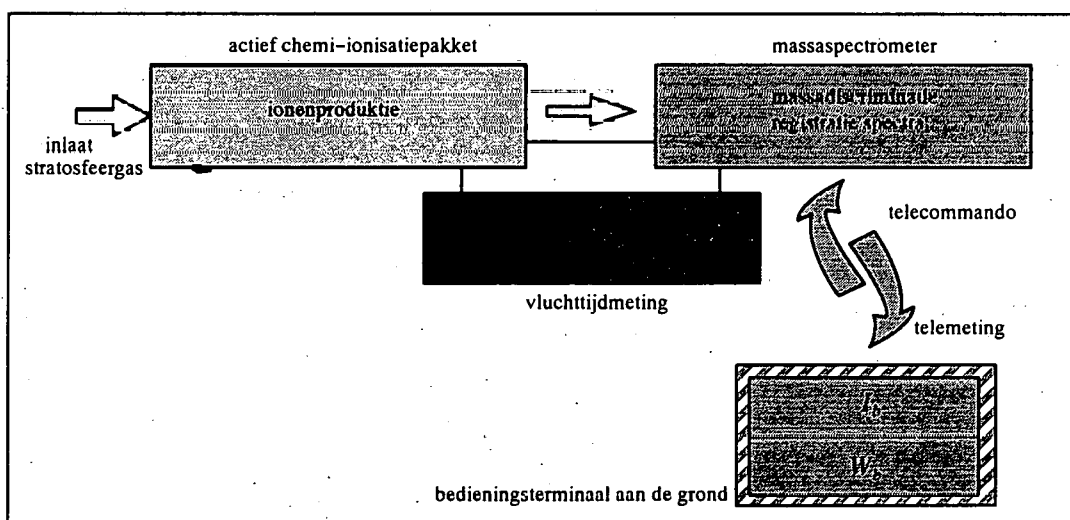
Hoofdstuk 5

De bedieningsterminal aan de grond

5.1. Inleiding

In de vorige hoofdstukken werd ter vereenvoudiging het begrip “bedieningsterminal aan de grond” gebruikt om de infrastructuur aan te duiden waarover de gebruiker in het grondstation beschikt om te communiceren met het instrument dat zich op grote afstand in de atmosfeer bevindt.

In dit hoofdstuk wordt toegelicht dat hierachter een uitgebreide hardwareconfiguratie schuilgaat, uitgerust met verschillende grafische softwareinterfaces (figuur 5.1) die tot doel hebben de dialoog met het SIDAMS/MACSIMS-instrument zo gebruiksvriendelijk mogelijk te laten verlopen.



Figuur 5.1: De bedieningsterminal aan de grond : de hardware interface (I_h) en de grafische softwaremodules (W_h).

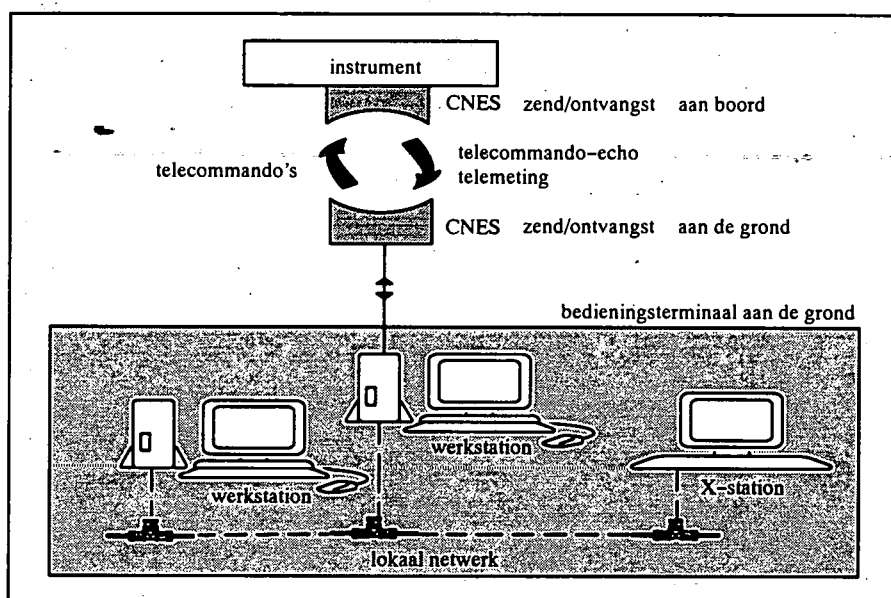
5.2. De hardware samenstelling van de bedieningsterminaal

De bedieningsterminaal aan de grond kan op verschillende manieren samengesteld worden. Een minimale vereiste om het instrument te bedienen is een "niet-intelligente" terminaal (klavier en scherm). De telecommando's worden dan vanaf het klavier ingebracht en als een stroom van ASCII-tekens naar het instrument gestuurd terwijl de ASCII-telecommando-echo van het instrument op het scherm wordt afgebeeld. Deze configuratie wordt vooral gebruikt tijdens laboratoriumtesten vanwege de gemakkelijke verplaatsbaarheid van de bedieningsterminaal. Eventuele telemeting gaat hier wel verloren.

Tijdens de vlucht wordt een veel uitgebreidere configuratie gebruikt. De bedieningsterminaal bestaat dan uit één werkstation dat instaat voor de communicatie met het instrument via de zend- en ontvangstinfrastructuur van het CNES (telecommando, telecommando-echo en telemeting) en een ander werkstation dat samen met nog een X-terminaal helpt bij de aanschouwelijke voorstelling van de verschillende types van telemeting (figuur 5.2).

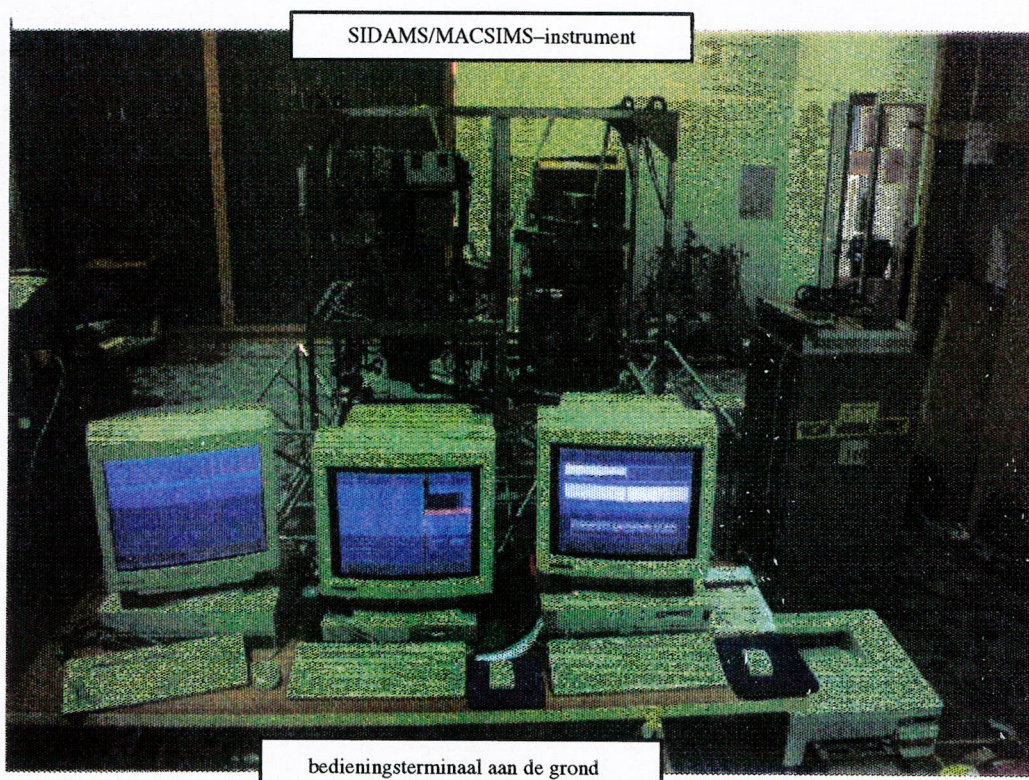
Het werkstation dat instaat voor de communicatie met het instrument moet uitgerust zijn met twee seriële poorten om compatibel te zijn met de CNES-infrastructuur. Eén van de seriële kanalen moet bidirectioneel werken : bijvoorbeeld de verzending van telecommando's en de ontvangst van telecommando-echo op de eerste en de ontvangst van telemeting op de tweede seriële poort. De uitgaande telecommando's kunnen vanaf de seriële poort rechtstreeks onder de RS232-vorm aan de CNES-zender aangeboden worden (zie 3.9.2.2). De telecommando-echo- en telemetingsignalen bereiken de CNES-ontvanger aan de grond via een analogo telemetingkanaal (zie 3.9.2.3). Voor de ontvangst van het telemetingsignaal wordt de demodulator zo afgesteld dat de signalen tussen -10 en 10 V komen te liggen, zodat de signaalniveaus compatibel worden met de RS232-standaard.

Door de toenemende hoeveelheid voor te stellen informatie moet het centrale werkstation met minstens twee X-terminalen uitgebreid worden zodat het mogelijk is alle binnenkomende telemetingpakketten gelijktijdig te visualiseren. Het is zeer storend indien de gebruiker tijdens de vlucht voortdurend vensters moet activeren om de gewenste informatie in beeld te krijgen.



Figuur 5.2: De hardwareconfiguratie van de bedieningsterminaal aan de grond.

Een praktische en veilige configuratie, is die waarbij een centraal werkstation gebruikt wordt als interface met de zend- en ontvanginstallatie van het CNES, maar waarbij die taak onmiddellijk kan worden overgenomen door een tweede gelijkaardig werkstation dat zich samen met het eerste in een lokaal netwerk bevindt. In nominale werking zal het tweede werkstation de rol van X-terminaal vervullen en slechts helpen bij het overzichtelijker grafisch voorstellen van de gegevens. Met dit doel wordt ook nog een extra X-terminaal in het lokale netwerk opgenomen waardoor de grafisch afbeeldingscapaciteit van de configuratie nog wordt uitgebreid. Zodoende wordt de visuele interface met het instrument uitgesmeerd over drie grote beeldschermen, wat de overzichtelijkheid van belangrijke data tijdens de vluchten veel verbetert, en beschikt de gebruiker over enige redundantie in het geval een onderdeel uit de configuratie defect geraakt (figuur 5.3).



Figuur 5.3: Foto van de bedieningsterminal aan de grond in vluchtconfiguratie (León, november 1995).

5.3. De software werkomgeving van de bedieningsterminal

5.3.1. De nood aan een multitasking werkomgeving

De software werkomgeving in de bedieningsterminal aan de grond is het HP-UX UNIX-beheersysteem, versterkt met de grafische *Motif*-stijl, een bibliotheek die zelf gebruik maakt van het *X-windows* protocol (X11), en met tweedimensionale toepassingen uit de grafische *HP Starbase*-bibliotheek. Bovendien werd voor het op maat aanmaken van de grafische software interfaces tussen gebruiker en instrument het "bouwprogramma" *UIM/X* (*Interface Architect*) geïnstalleerd.

De bedieningsterminal moet een aantal opdrachten gelijktijdig kunnen uitvoeren.

- Telecommando's die door de gebruiker via een grafische softwareinterface kunnen ingeven worden moeten opgevangen worden en via de seriële uitgangspoort aan de CNES-zendapparatuur doorgegeven worden.
- Telecommando-echo die binnenkomt op één van de seriële ingangen moet opgevangen en voorgesteld worden.
- De telemetingstroom op de andere seriële ingang moet eveneens opgevangen worden en in verschillende grafische softwareinterfaces aanschouwelijk voorgesteld worden.
- De softwareinterfaces moeten gelijktijdig toegankelijk zijn, sommigen voor *input* van de gebruiker (telecommando's), andere voor *input* van het instrument (telecommando-echo en telemeting).

Het is duidelijk dat een DOS-beheersysteem (PC) niet in staat is al deze taken in parallel uit te voeren, tenzij aan elke taak en aan elke softwareinterface afzonderlijk een PC wordt gekoppeld. Dit is om voor de hand liggende redenen praktisch gezien niet realiseerbaar. Daarom werd voor een configuratie gekozen met machines die uitgerust zijn met het *multitasking* beheersysteem UNIX.

UNIX ondersteunt wel het in parallel uitvoeren van taken en biedt bovendien een sterke *script*-taal die kan gebruikt worden voor het instellen van de parameters van de seriële poorten, voor het opstarten van de verschillende taken, voor de verdeling van de taken over de verschillende machines, voor het beheren van de opslagbestanden voor de gegevens, enz. UNIX biedt een goede netwerkondersteuning en het gebruik van het *X-windows* protocol laat toe via het lokale netwerk grafische vensters te openen op andere machines.

5.3.2. Modulariteit van de taken

Er werd ook gestreefd naar volledige modulariteit van de uit te voeren opdrachten. De communicatie via het telecommando-, het telecommando-echo- en het telemetingkanaal is strikt gescheiden en kan volledig onafhankelijk uitgevoerd worden. Maar ook binnen deze groepen worden de verschillende taken toegekend aan aparte modules. De afwezigheid van één of andere module is nooit een probleem voor de goede werking van de anderen.

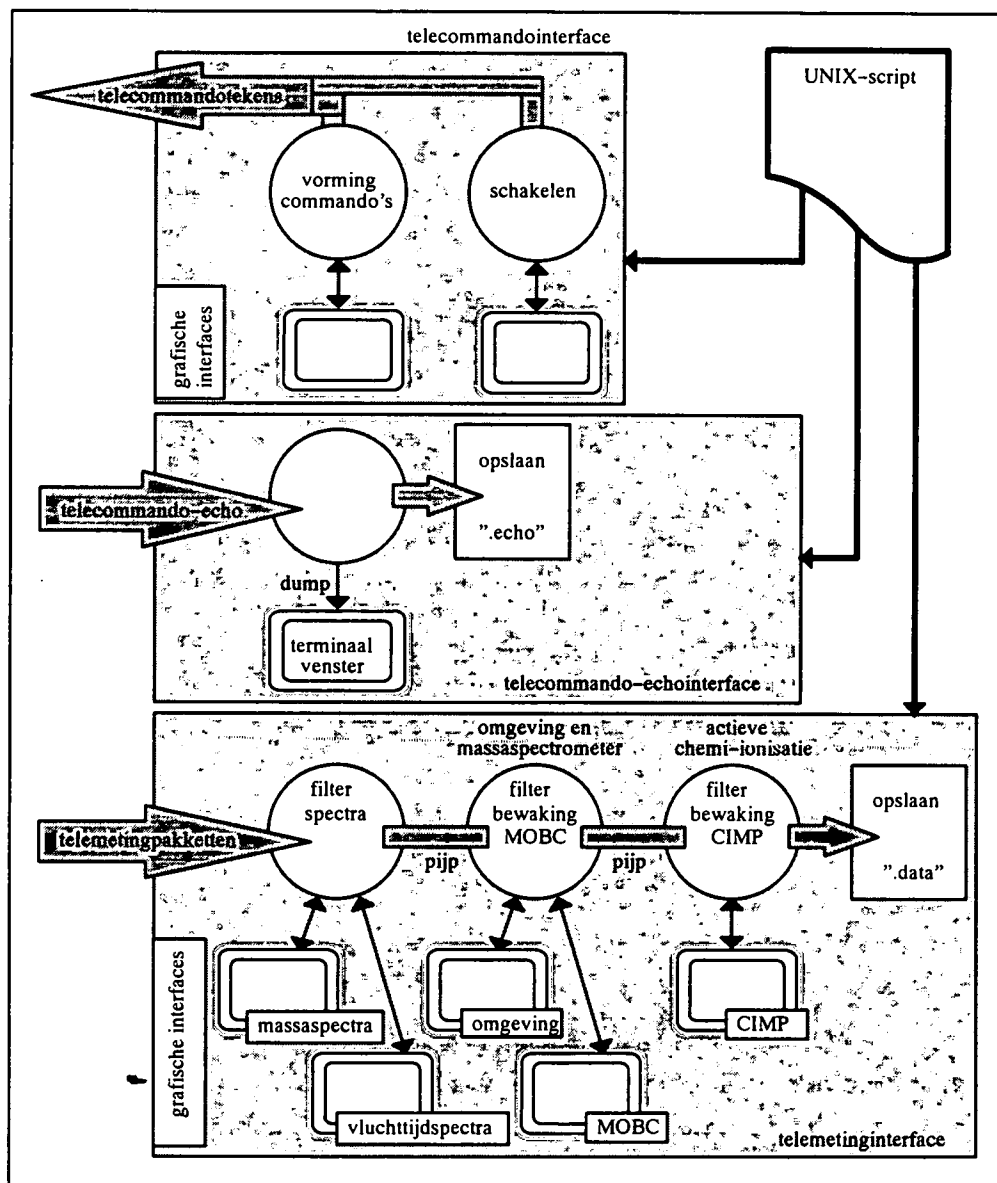
UNIX biedt een handig hulpmiddel bij het streven naar modulariteit. Het laat toe softwaremodules met mekaar te verbinden via een pijp (*pipe*-concept) waarlangs gegevens kunnen worden doorgegeven.

Uiteindelijk werd een situatie geschapen waarin op de bedieningsterminal ingesteld kan worden welke kanalen worden ondersteund, welke telemetingpakketten worden voorgesteld en hoe al deze taken verdeeld worden over de aanwezige machines in het lokale netwerk.

5.3.3. Organisatie van de uit te voeren taken

Tijdens de vlucht moet de bedieningsterminal dus drie hardware interfaces met het instrument ondersteunen : telecommando, telecommando-echo en telemeting (figuur 5.4).

Binnen de telecommando-interface worden twee grafische bedieningspakketten aangeboden, één voor het vormen van de telecommando's en één voor het aanmaken van de speciale ASCII-sequenties voor het aanschakelen van de instrumentonderdelen (zie 3.9.2.5.1). Beide pakketten plaatsen hun *output* op de seriële telecommandolijn.



Figuur 5.4: Script-structuur voor de organisatie van de bedieningstaken.

De ASCII-telecommando-echostroom wordt enerzijds eenvoudigweg gedumpt in een terminaalvenster, maar anderzijds ook opgeslagen in een bestand (".echo"-bestand).

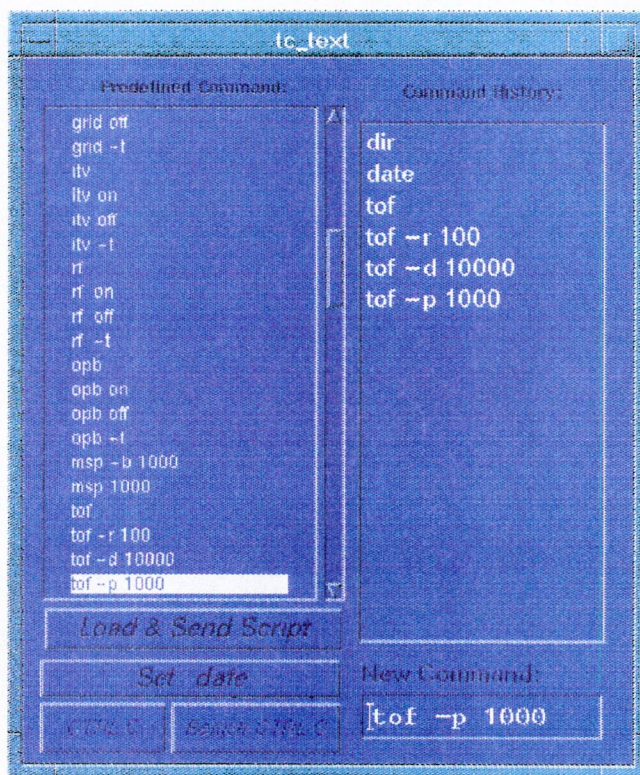
Drie filtermodules analyseren de telemetingstroom en pikken er welbepaalde pakketten uit, die ze dan kunnen doorspelen aan vijf grafische voorstellingsmodules (één voor massaspectra, één voor vluchtijdspectra en drie voor bewakingsgegevens, namelijk de omgevingsbewaking en de *housekeeping* uit het massaspectrometergedeelte en uit het actief chemi-ionisatiepakket). De filtermodules geven de telemetingdata aan mekaar door via UNIX-pijpen. Aan het einde van de pijp worden de gegevens opgeslagen in een bestand (".data"-bestand).

Een typische verdeling van de grafische softwareinterfaces over de hardwareconfiguratie is die waarbij het centrale werkstation naast de interface met het instrument ook de grafische voorstelling verzorgt van de spectra (massaspectra en vluchttijdspectra). Het tweede werkstation staat dan in voor het grafisch voorstellen van alle bewakingsgegevens. De grafische interfaces voor het vormen van telecommando's en schakelcodes en voor de ontvangst van telecommando-echo worden getoond via de X-terminaal.

5.4. De grafische bedieningspakketten

5.4.1. De telecommandointerface

5.4.1.1. Het vormen van een telecommando



Figuur 5.5: De grafische telecommandomodule.

De grafische telecommandomodule (figuur 5.5) bestaat uit twee menu's. In het linkse menu worden de meest voorkomende telecommando's in een lijst geplaatst (*Predefined Command*). Een aangeklikt telecommando wordt rechtstreeks onder RS232-vorm aan de CNES-zendinfrastructuur doorgegeven.

Elk zo uitgevoerd telecommando wordt ook opgenomen in een lijst in het rechtse menu en vormt er met alle vroeger uitgevoerde telecommando's een *history list* (*Command History*). Ook in deze lijst kan een telecommando opnieuw uitgevoerd worden door een dubbele klik op de gewenste lijn.

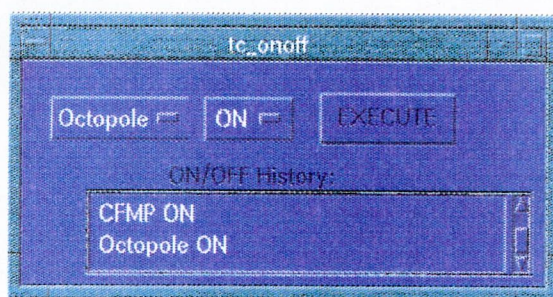
Een enkele klik op een lijn in het linkse of rechtse menu brengt de inhoud van de lijn in een editeerbaar venster (*New Command*). Hier kunnen eventueel wijzigingen of toevoegingen aangebracht worden, waarna het telecommando ook weer kan verzonden worden naar het instrument door een eenvoudige *enter*-operatie.

Verder zijn in deze telecommandomodule nog twee druktoetsen voorzien waarmee de MOBC en de CIMP kunnen onderbroken worden, de respectievelijke “*control C*”- en “*remsh control C*”-bevelen.

Een “*Set date*”-toets zorgt er bij indrukken voor dat datum en uur zowel in de MOBC als in de CIMP worden gezet overeenkomstig de klok van het werkstation.

Voor het opladen van *scripts* naar het instrument werd een “*Load & Send Script*”-toets voorzien. Deze roept bij indrukken een *File Dialog Box* op, een grafische interface met toegang tot de *directory*-structuur van het UNIX-beheersysteem. De basis-*directory* voor dit venster is de *directory* waarin zich de *scripts* bevinden voorzien voor de lopende vlucht, de vlucht in voorbereiding of de actuele testperiode. De inhoud van het aangeduide *script* wordt verzonden naar het instrument en wordt er opgenomen in de *script directory* van de MOBC of de CIMP.

5.4.2. Het versturen van een schakelbevel



Figuur 5.6: De grafische module voor het versturen van schakelbevelen.

In deze module zitten achter twee druktoetsen menu's verscholen waarin zich enerzijds de namen bevinden van de onderdelen van het instrument die kunnen geschakeld worden en anderzijds de uit te voeren actie (*on* voor aanschakelen en *off* voor afschakelen). In beide menu's moet één lijn aangeklikt worden, waardoor de overeenkomstige schakelsequentie automatisch wordt samengesteld. Het schakelbevel wordt pas doorgezonden zodra de *execute*-toets wordt ingedrukt. In een apart venster worden de doorgegeven schakelbevelen bijgehouden (*ON/OFF History*). Hierdoor kent de gebruiker ten allen tijde de status van de instrumentonderdelen.

Een typische samenstelling voor het eerste menu is : “*MOBC*”, “*octopole*”, “*CIMP*” en “*turbo*”.

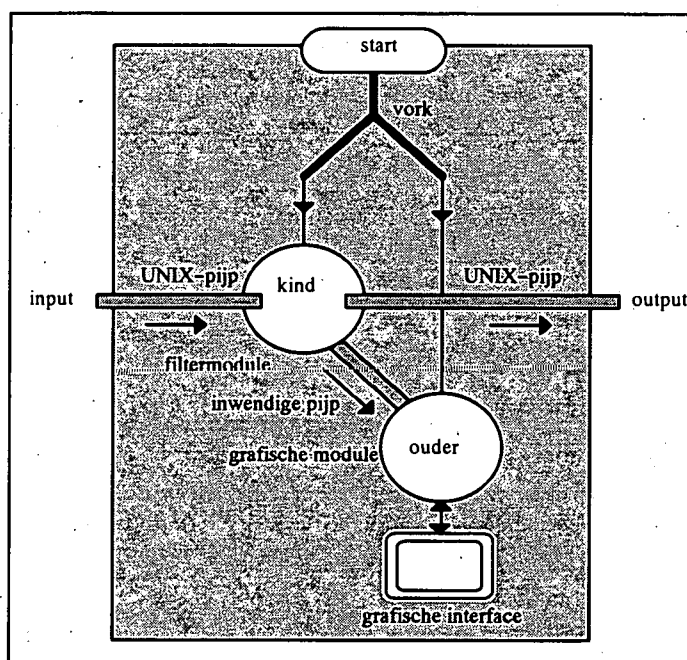
5.4.3. De telemetinginterface

5.4.3.1. Het basisprincipe

De verwerking van telemetinggegevens gebeurt in drie verschillende blokken, één voor spectra en twee voor bewakingsgegevens (figuur 5.4), die met mekaar verbonden zijn met een

UNIX-pijp. Het eerste blok ontvangt de telemetingstroom (standaard *input*), filtert er de relevante pakketten uit en geeft de stroom door aan het volgende blok (standaard *output*), waar weer wordt gefilterd, enz. Na het laatste blok worden alle pakketten opgeslagen.

De opbouw van deze telemetingblokken wordt in figuur 5.7 in meer detail weergegeven. Zo een blok wordt geconcretiseerd in een hoofdprogramma waarin door middel van een vork twee processen in parallel opgestart worden (*forking*-concept) : een ouder- en een kindproces (*child* en *parent*).



Figuur 5.7: Verwerking van telemetinggegevens.

In het kindproces, dat in dit geval de hoogste prioriteit meekrijgt, is de filtermodule actief die zorgt voor het oppikken van de juiste telemetingpakketten uit de telemetingstroom. De pakketten worden eerst ontdaan van de aanwezige SLIP-tekens (inverse SLIP-protocol) en dan via een inwendige pijp doorgegeven aan het ouderproces.

In het ouderproces is de module werkzaam voor de eigenlijke grafische voorstelling door middel van een grafische interface naar de gebruiker toe. Elk binnenkomend telemetingpakket overschrijft de inhoud van de betrokken grafische interface.

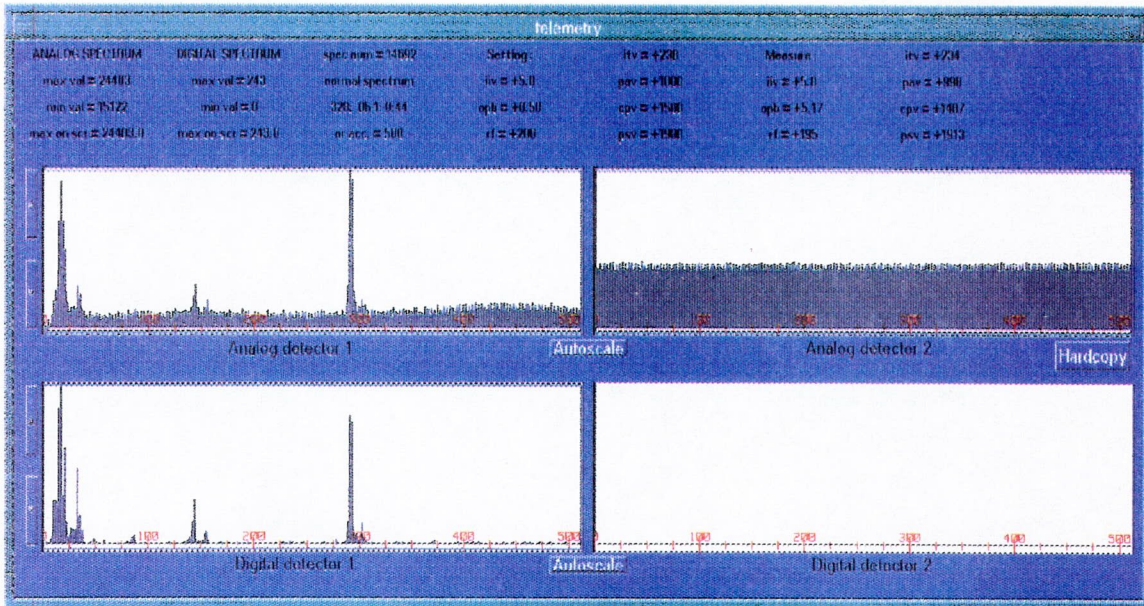
Door het gebruik van een ouder- en kindproces, verbonden door een pijp, kan de (tijdrovende) grafische voorstelling van data gebeuren zonder de telemetingstroom uit het oog te verliezen.

5.4.3.2. Voorstellen van massaspectra

De grafische interface voor de voorstelling van massaspectra is opgedeeld in drie horizontale zones (figuur 5:8). De bovenste zone bevat alle informatie die bij dit spectrum hoort zoals het spectrumtype, het spectrumnummer, de tijd, het minimum en het algemeen maximum van het spectrum, zowel voor het digitaal als voor het analoog gedeelte, het maximum op het scherm voor beide gedeelten (kan verschillen van het algemeen maximum omdat *scaling* van het

spectrum mogelijk is), de 4 ingestelde hoogspanningswaarden, de 4 gemeten hoogspanningswaarden, alsook de 4 ingestelde en de 4 gemeten rf- en dc-spanningen en het aantal accumulaties.

In de tweede zone van de interface wordt het analoge spectrum afgebeeld, in de derde zone het digitale gedeelte : links het eerste detectoroog A (pixels 1 tot 512), rechts detectoroog B (pixels 513 tot 1024).



Figuur 5.8: De grafische interface voor de voorstelling van massaspectra.

De mogelijkheid bestaat, via druktoetsen het spectrum op te blazen of te reduceren (*scaling*). Een klik op de druktoets verdubbelt of halveert het maximum op het scherm. Het belangrijkste nut van deze *scaling* in een reële tijd grafische applicatie is het snel bekijken van de kleinere massapijken in spectra met dominante pieken. Terugkeren naar de oorspronkelijke schaal gebeurt door aanklikken van de *autoscale*-toets.

Verder kan door aanklikken van een piek in het spectrum, het bijhorende pixelnummer, de piekhoogte en de massa van het ion dat verantwoordelijk is voor de piek, bekomen worden. De berekening van de massa is mogelijk doordat de empirische vergelijking $m = f(\text{pix})$ (de massa in functie van het pixelnummer, rekening houdend met de gebruikte itv- en iiv-spanning) voor beide detectorogen in de grafische module is opgenomen.

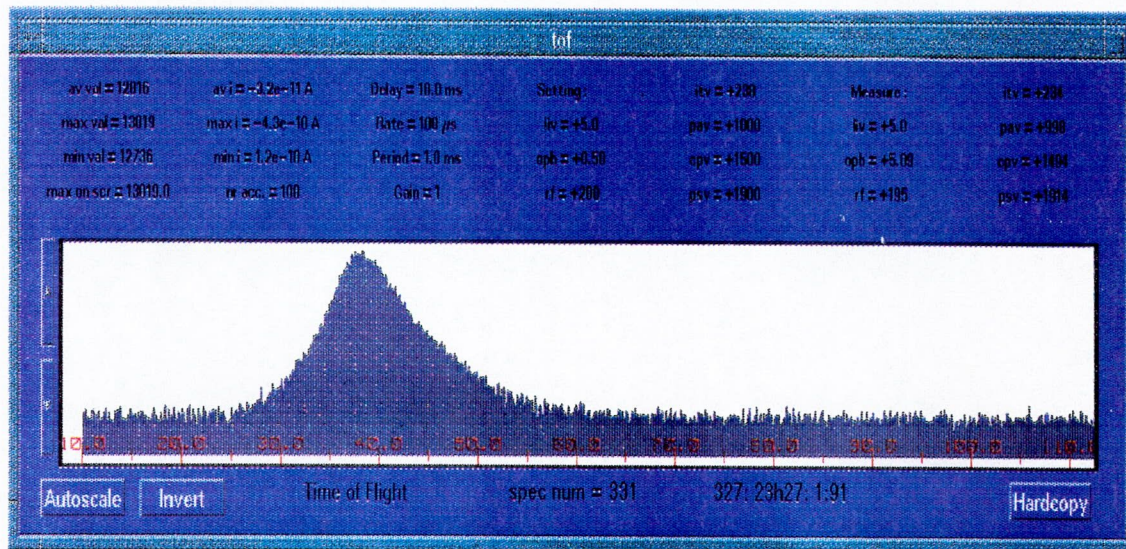
Tenslotte kan door eenvoudige druktoetsbediening een *hardcopy* van de ganse grafische telemetinginterface gemaakt worden.

5.4.3.3. Voorstellen van vluchtijdspectra

Deze grafische interface bestaat uit twee zones (figuur 5.9). De bovenste zone bevat parameters zoals het spectrumnummer, de tijd, de minimum en maximum waarde van de meting (zowel digitale code als reële waarde), het maximum op het scherm (digitale code), de 4 ingestelde vluchtijdsparameters (de bemonsteringsperiode, de uitsteltijd, de openingstijd van de ionenbron

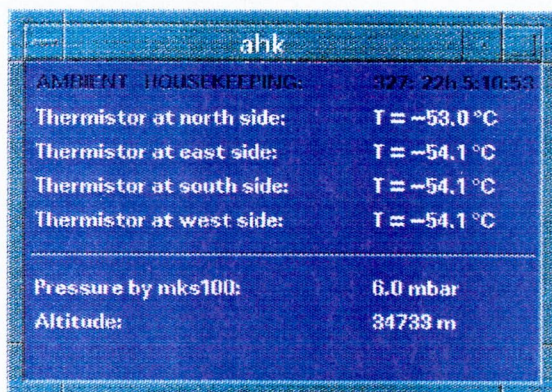
en de versterking), de gemeten en ingestelde waarden voor de rf- en dc- en hoogspanningen. De tweede zone bevat het eigenlijke vluchtijdspectrum van 1024 bemonsteringen.

Ook in deze interface bestaat de mogelijkheid tot *scaling* en tot het maken van een *hardcopy*.



Figuur 5.9: De grafische interface voor de voorstelling van vluchtijdmetingen.

5.4.3.4. Voorstellen van omgevingsbewakingsgegevens

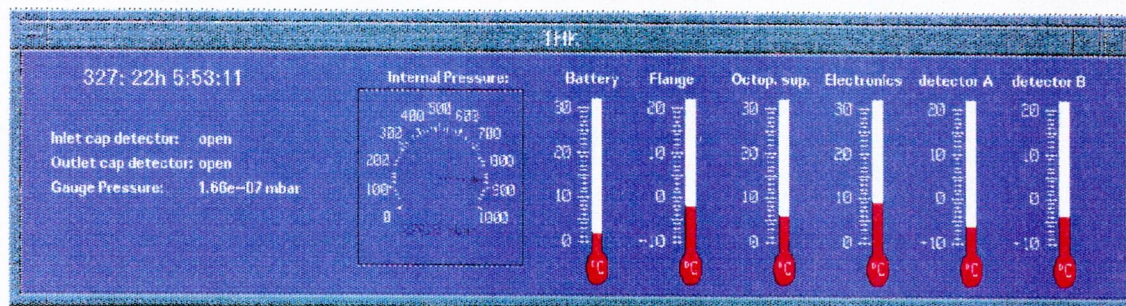


Figuur 5.10: De grafische interface voor de voorstelling van omgevingsbewakingsparameters.

De belangrijkste taak van grafische bewakingsmodules is de digitale waarden in de telemetingpakketten om te zetten naar reële waarden aan de hand van calibratietabellen en na te gaan of deze waarden binnen bepaalde realistische grenzen liggen.

De omgevingsparameters (vier buitentemperaturen en de druk in de stromingsbuis) worden in de grafische interface voorgesteld samen met de uit de druk berekende hoogte. In dit geval werd geopteerd voor een tekstuele voorstelling.

5.4.3.5. Voorstellen van bewakingsgegevens uit het massaspectrometergedeelte



Figuur 5.11: De grafische interface voor de voorstelling van de bewakingsgegevens van het massaspectrometergedeelte.

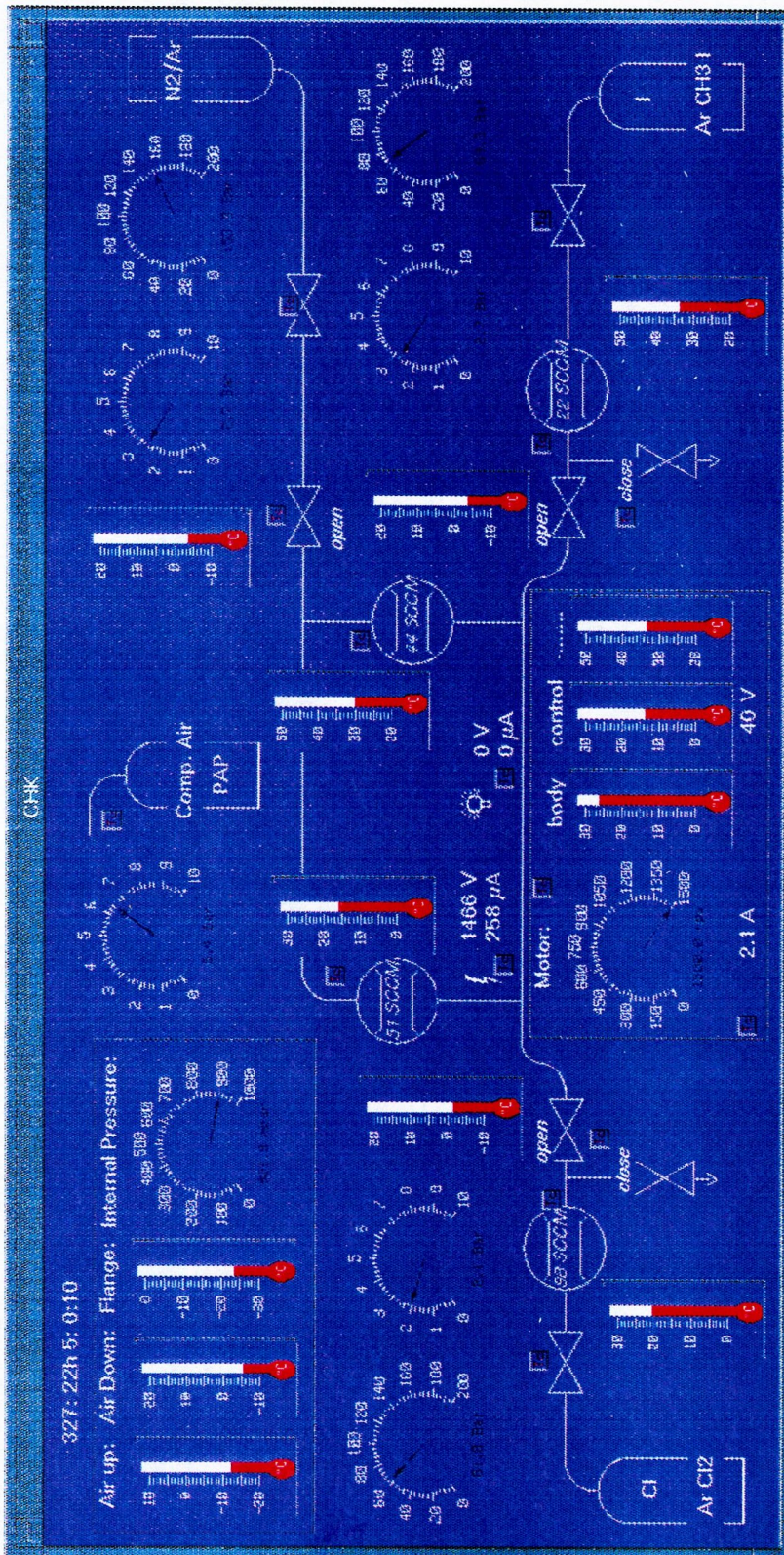
In de interface voor de bewakingsgegevens van het massaspectrometergedeelte worden voorgeprogrammeerde functies gebruikt voor de voorstelling van de temperaturen en de druk in de kuip. Het werkvacuüm en de status van de afsluitsystemen worden tekstueel voorgesteld.

5.4.3.6. Voorstellen van bewakingsgegevens uit het actief chemi-ionisatiepakket

De grafische interface voor de bewakingsgegevens van het actief chemi-ionisatiepakket is in feite een schematische voorstelling van de leidingen van de ionenproductie-eenheid, waarop op een zeer overzichtelijke manier alle instrumentparameters worden aangeduid (figuur 5.12) :

- de 3 ontspanners (chloormoedergas, jodiummoedergas en spoelgas) met vermelding van de bijhorende lage en hoge druk (drukmeters in *widgets*);
- de 4 debietregelaars met de actuele waarde van het gasdebiet (debietmeters in *widgets*);
- de 5 kranen met hun actuele toestand;
- de parameters van de ionenbronnen : de spanning en het stroomverbruik;
- de 4 turbineparameters : het toerental (toerenteller in *widget*), het stroomverbruik, de batterijspanning en de temperatuur (thermometer in *widget*);
- de druk van de perslucht (drukmeter in *widget*);
- de druk in de kuip (drukmeter in *widget*);
- alle temperatuurmetingen (thermometers in *widgets*).

Telkens een nieuw telemetingpakket uit het actief chemi-ionisatiepakket de bedieningsterminal aan de grond bereikt, worden de waarden van alle voorgestelde instrumentparameters automatisch aangepast.

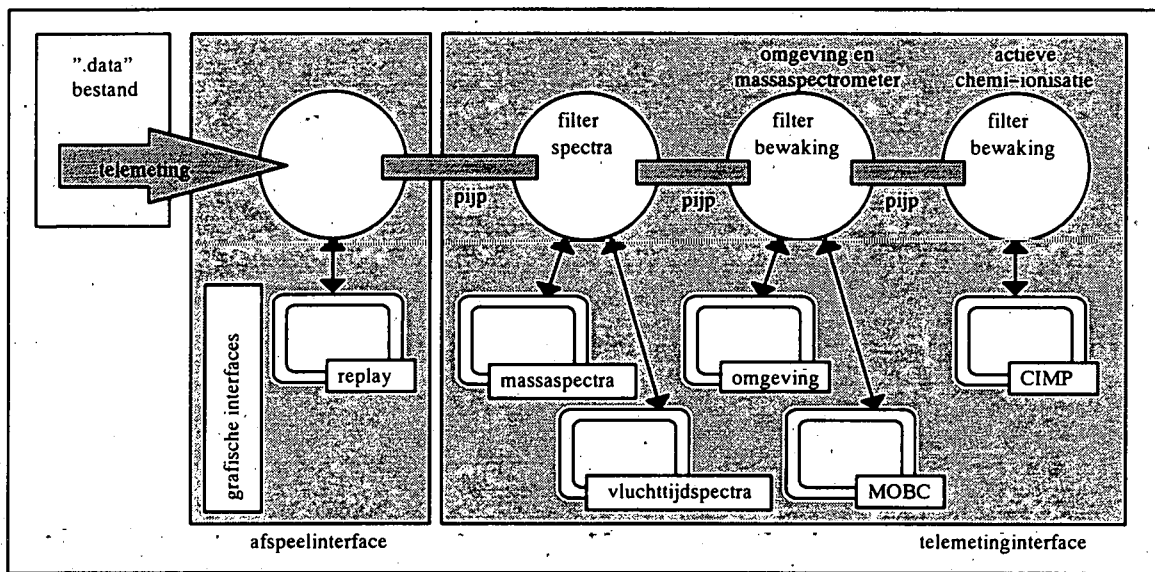


Figuur 5.12: De grafische interface voor de voorstelling van bewakingsgegevens uit het actief chemi-ionisatiepakket.

5.4.4. Opslag en verwerking van de gegevens

Zowel de telecommando-echo- als de telemetingstroom worden op harde schijf opgeslagen, onder een automatisch bestandbenamingssysteem ("datum.echo"- en "datum.data"-files).

De telecommando-echobestanden kunnen achteraf als ASCII-bestanden nagelezen worden. De telemetingbestanden kunnen na de vlucht terug afgespeeld worden doorheen de hierboven beschreven grafische telemetinginterface (figuur 5.4). Daarvoor wordt een kleine bijkomende grafische module (*replay*) ontworpen die de gebruiker in de mogelijkheid stelt enerzijds het gewenste ".data"-bestand te selecteren (*File Dialog Box*) en anderzijds het gekozen bestand te doorlopen in grotere of kleinere stappen. Dankzij het gebruik van UNIX-pijpen kan de gebruiker zelf kiezen welke modules hij opneemt in de *replay*-ketting (figuur 5.13)



Figuur 5.13: Het afspelen van in bestanden opgeslagen telemetinggegevens.

5.5. Besluit

De inspanningen die werden geleverd om de mogelijkheden van het SIDAMS/MACSIMS-instrument zelf uit te breiden door hardware- en softwaretechnieken aan boord kunnen slechts vruchten afwerpen als voor de nodige ondersteuning gezorgd wordt aan de grond.

De bedieningsterminal aan de grond, die in een te kleine configuratie beperkend zou werken, werd zodanig uitgebreid dat de gebruiker enerzijds met een minimum aan handelingen een maximum aan rendement behaalt waar het de telecommandointerface met het instrument betreft en dat hij anderzijds in reële tijd en op een overzichtelijke manier de gemeten spectra en bewakingsgegevens kan overzien.

Het feit dat aan boord telecommando, telemeting en instrumentbewaking volledig onafhankelijk functioneren en dat bovendien meerdere operaties gelijktijdig verlopen, verplicht de bedieningsterminal aan de grond tot een even grote functionaliteit en flexibiliteit.

De interface met het instrument is volledig grafisch uitgebouwd en wordt tijdens ballonvluchten uitgevoerd op een combinatie van werkstations en X-terminalen waardoor een gemakkelijke

besturing mogelijk is, een goed overzicht van alle grafische data behouden blijft en hardware redundantie verzekerd is in geval van defekt.

Hoofdstuk 6

Resultaten en gegevensverwerking

6.1. Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken werd het SIDAMS/MACSIMS-instrument voorgesteld en werd de instrumentatie besproken die voor dit instrument werd ontwikkeld, zowel aan boord als aan de grond, en zowel wat betreft hardware als wat betreft software.

Op 23 november 1995 werd het instrument vanuit León (Spanje) gelanceerd. Deze vlucht werd een volledig succes. In een eerste deel van dit hoofdstuk worden dan ook resultaten uit deze vlucht getoond bij wijze van illustratie en als een validatie van de ontwikkelingen in dit doctoraat. We doen dit aan de hand van de bespreking van de bewakingsgegevens van het instrument tijdens deze vlucht en we tonen ook massa- en vluchttijdspectra die werden geregistreerd.

In een tweede deel behandelt dit hoofdstuk een algoritme dat bijdraagt tot een snellere en geautomatiseerde verwerking van de gegevens.

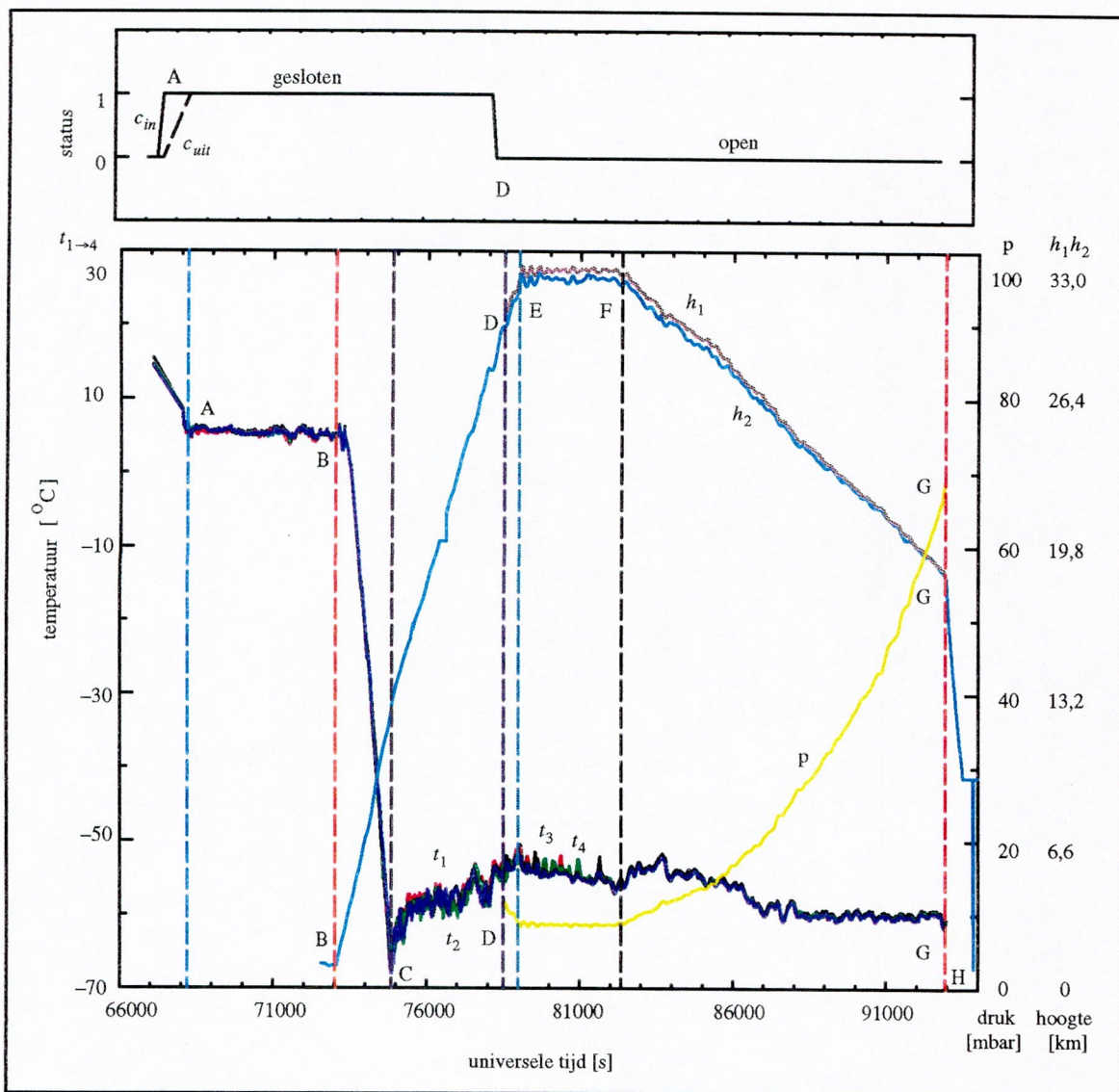
6.2. Resultaten uit de vlucht van november 1995

6.2.1. De instrumentbewaking

6.2.1.1. Het vluchtprofiel aan de hand van de omgevingsbewaking

Op 23 november 1995 werd het SIDAMS/MACSIMS-instrument met behulp van de lanceringsinfrastructuur van het CNES gelanceerd vanaf een luchtmachtbasis in La Virgen del Camino nabij León (Spanje) onder de hoede van het INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Het volume van de ballon bedroeg 100.000 m³ voor een instrumentgewicht van 422 kg. De voorbereiding van de lancering gebeurde volgens het volgende schema (vergelijk met 2.5) :

- 16h30 UT : briefing meteo voor begin heliumvulling;
- 17h00 UT : start heliumvulling;
- 17h30 UT : briefing meteo voor begin klaarzetten CNES-materiaal;
- 17h45 UT : materiaal CNES naar lanceerstrook;
- 18h00 UT : definitieve integratie telecommando-telemeting;
- 19h00 UT : instrument naar lanceerstrook;
- 19h30 UT : ontplooiën ballon;
- 20h10 UT : begin opblazen grote ballon;
- 20h30 UT : lancering.



Figuur 6.1: Voorstelling van de omgevingsbewaking tijdens de vlucht.

In figuur 6.1 worden de omgevingsbewakingsgegevens voorgesteld. Op basis van deze gegevens is het mogelijk het verloop van de vlucht te volgen. Dit vluchtprofiel kan vergeleken worden met het standaard profiel dat werd besproken in 2.5.

De curves t_1 , t_2 , t_3 en t_4 geven het verloop aan van de vier buitentemperaturen. De buitentemperaturen vertonen weinig afwijkingen onderling wat zeker voor een nachtvlucht te verwachten is. Dit temperatuurverloop kan vergeleken worden met het onderste deel van de theoretische temperatuurcurve uit figuur 2.1 op basis waarvan de atmosfeer wordt opgedeeld in verschillende lagen.

De curve p geeft het verloop van de druk aan in de stromingsbuis en curve h_1 de daaruit afgeleide hoogte. Het begin van deze curves ligt bij het moment dat de afsluitsystemen werden geopend en de druk in de stromingsbuis overeenkomt met de buitendruk. In het bovenste venster van figuur 6.1 wordt de status van de openingssystemen aangegeven (C_{in} voor het afsluitsysteem aan de inlaat van de stromingsbuis en C_{uit} voor dat aan de uitlaat van de turbine).

De hoogtecurve h_1 die werd opgemeten in het instrument kan vergeleken worden met curve h_2 die de hoogtemeting van het CNES voorstelt. Deze curve begint uiteraard reeds vanaf de lancering.

In figuur 6.1 werden enkele belangrijke momenten in het vluchtprofiel aangeduid. Om 18h56 UT (punt A) werd het instrument naar de lanceerstrook gebracht. De temperatuur zakt van 15 °C (labotemperatuur) naar 5 °C (buitentemperatuur). Net voor het verlaten van het labo werden de afsluitsystemen elektrisch verbonden ("gesloten"-status vanaf punt A). Dit wordt zo lang mogelijk uitgesteld om het risico dat door een verkeerde handeling de afsluitsystemen zich zouden openen zo klein mogelijk te houden. Dit zou het vacuüm in het instrument verbreken en een lancering onherroepelijk uitsluiten.

Om 20h18 UT had de lancering plaats (punt B). Vanaf punt B kan de hoogte van het instrument op de h_2 -curve afgelezen worden. Vanaf dat punt daalt de temperatuur ook systematisch tot -68 °C bij het punt C. Het punt C duidt de lokale tropopauze aan. Ze wordt om 20h47 UT bereikt en ligt op een hoogte van 13,3 km. Vanaf punt C stijgt de temperatuur terug maar gezien de zon reeds onder is gegaan is de stijging niet uitgesproken.

Om 21h12 UT en bij een buitendruk van 15 mbar werden de afsluitsystemen geopend (punt D). Rond 21h57 UT bereikt de ballon zijn plafondhoogte (32 km, 10 mbar) (punt E). Na een uurtje (22h52 UT) wordt de afdaling ingezet (punt F) met een snelheid van ongeveer 1,2 m/s.

Om 1h49 UT worden de metingen beëindigd (punt G). Op dat moment bevond de ballon zich nog op ongeveer 19 km hoogte (65 mbar). Het instrument bereikte terug de grond om 2h07 UT. De landing vond plaats in de omgeving van Soría, in vogelvlucht 320 km van León verwijderd.

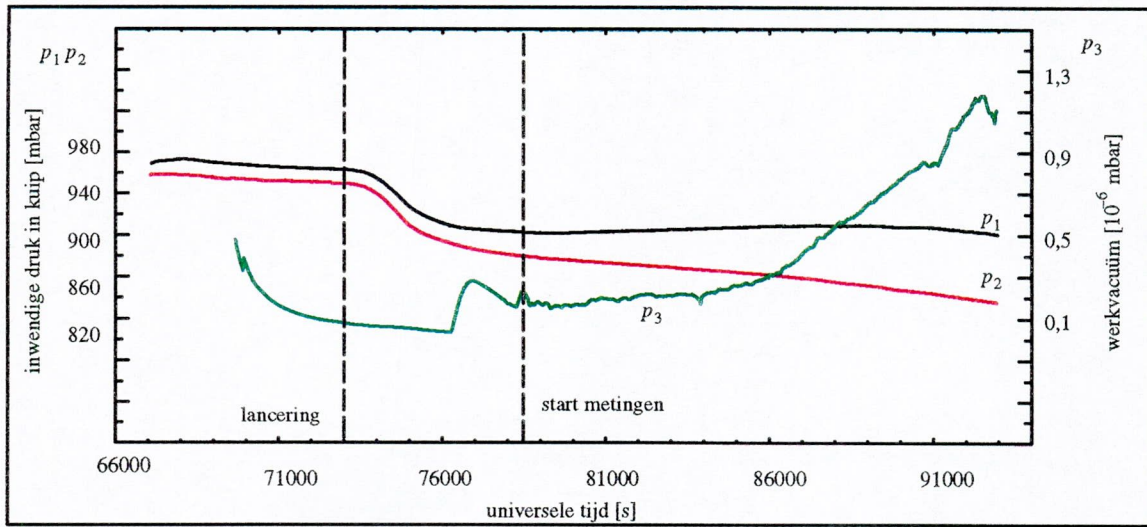
De totale vluchtduur bedroeg 5h49' waarvan gedurende 4h37' metingen werden verricht.

6.2.1.2. *De bewakingsgegevens van het massaspectrometergedeelte*

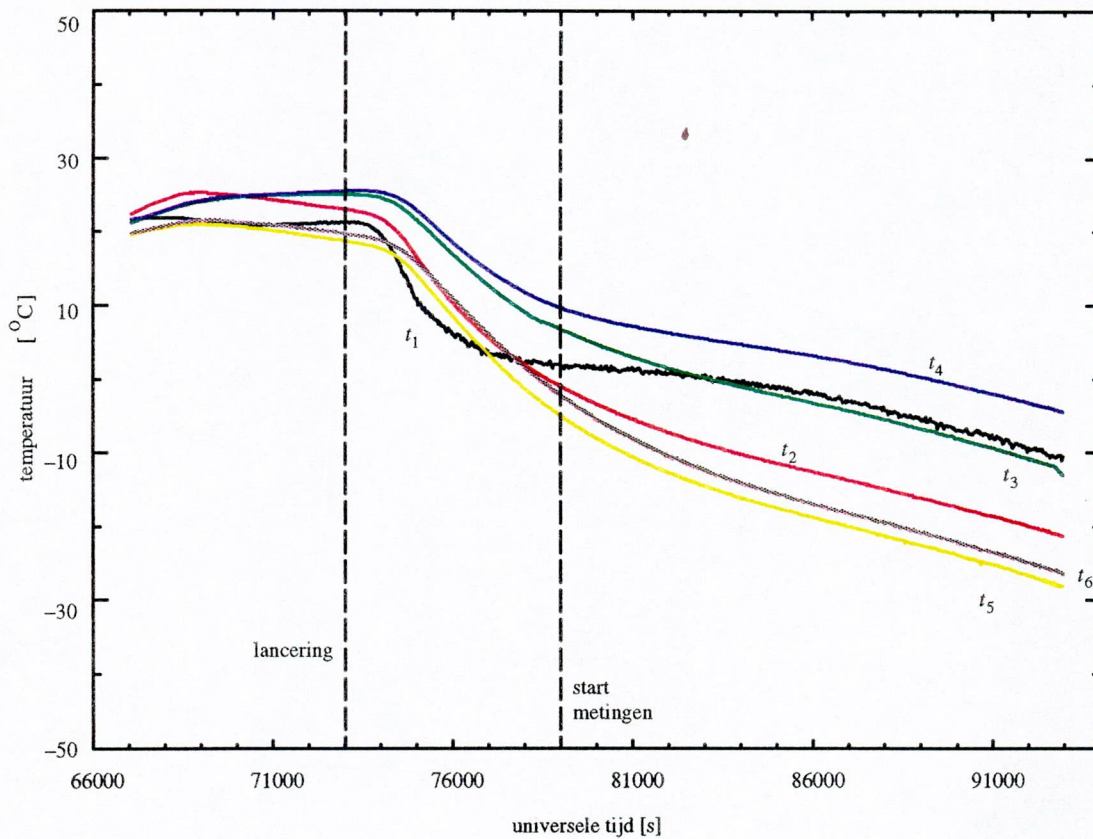
Curve p_3 in figuur 6.2 geeft de druk aan in het hoog-vacuüm detectorgedeelte van het instrument. Het werkvacuüm blijft goed gedurende de ganse vlucht. Het bedraagt $2 \cdot 10^{-7}$ mbar bij de aanvang van de metingen en degradeert na het openen van de afsluitsystemen door het extra lek naar de atmosfeer tot $1,2 \cdot 10^{-6}$ mbar.

Curves p_1 en p_2 geven de druk aan in de kuipen van het massaspectrometergedeelte en het actief chemi-ionisatiepakket. Voor de lancering ligt de druk in de kuipen rond 1000 mbar. Door de

grote afkoeling van het instrument daalt de druk tot onder de 900 mbar. Beide kuipen waren hermetisch afgesloten.



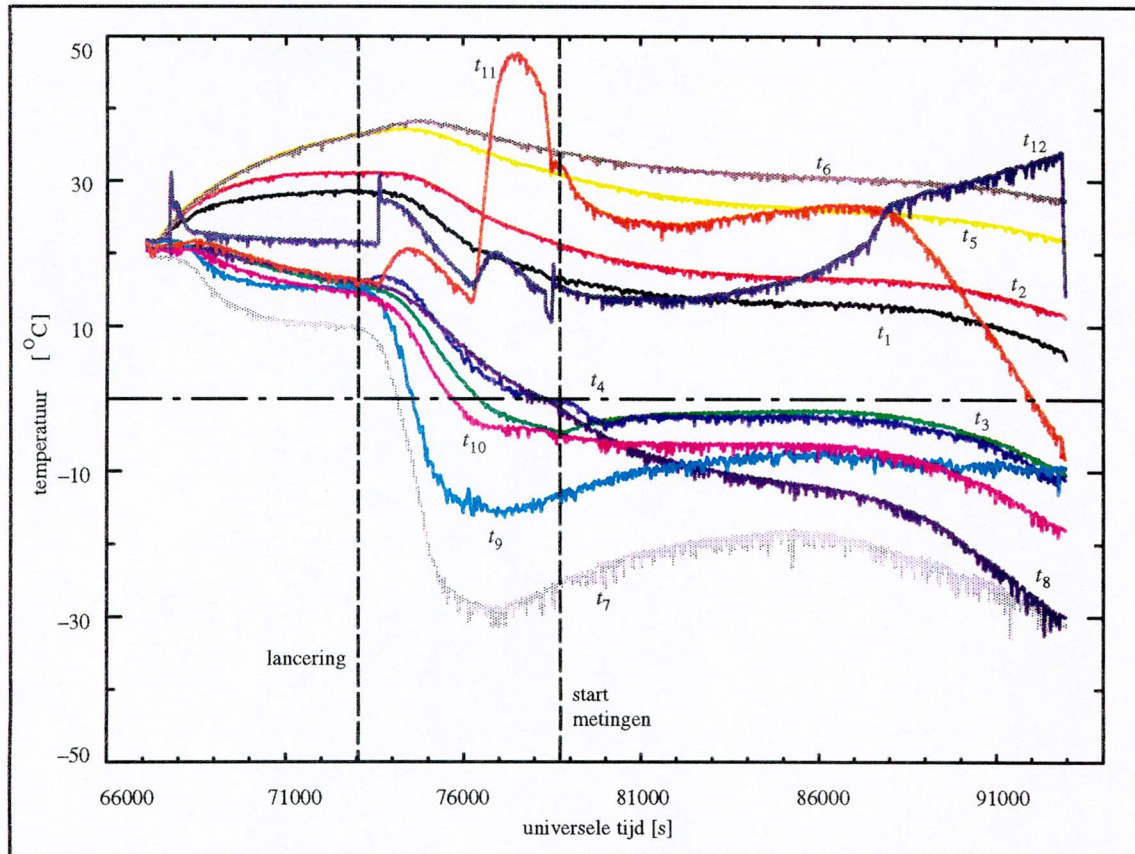
Figuur 6.2: De bewaking van inwendige drukken tijdens de vlucht.



Figuur 6.3: De bewaking van inwendige temperaturen in het massaspectrometergedeelte.

In figuur 6.3 worden de 6 inwendige temperatuurmetingen in het massaspectrometergedeelte voorgesteld. Alle thermistoren bereiken negatieve waarden bij het einde van de vlucht. De temperatuur in de elektronicamodules (t_4) daalt slechts enkele graden onder nul. Aan de batterij (t_1) en de octopoolvoeding (t_3) wordt het $-10\text{ }^\circ\text{C}$, aan de basisflens (t_2) $-20\text{ }^\circ\text{C}$. De detectorogen (t_5 en t_6) worden het koudst. Tijdens de meetperiode daalt hun temperatuur van $-7\text{ }^\circ\text{C}$ tot $-27\text{ }^\circ\text{C}$. Ze vertonen slechts een kleine onderlinge afwijking.

6.2.1.3. De bewakingsgegevens van het actief chemi-ionisatiepakket



Figuur 6.4: De bewaking van inwendige temperaturen in het actief chemi-ionisatiepakket.

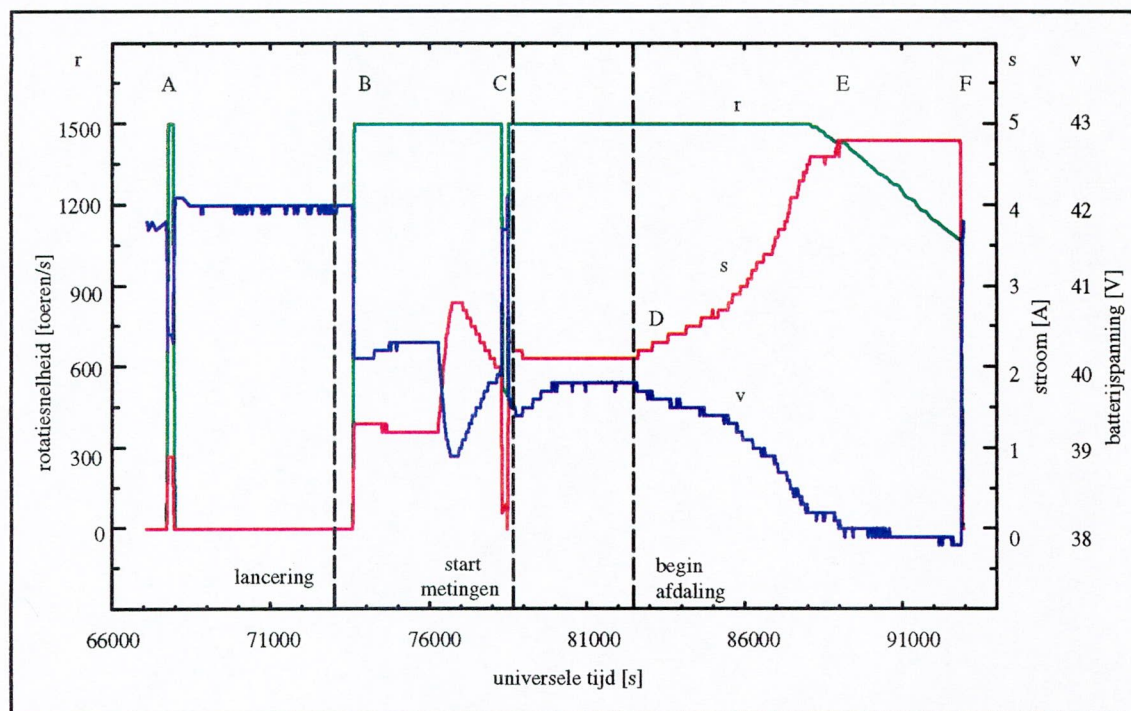
In figuur 6.4 worden de 12 temperaturen uit het actief chemi-ionisatiepakket afgebeeld. De temperaturen aan de vier debietmeters (chloorgas t_2 , jodiumgas t_6 en spoelgas aan chloorzijde t_1 en aan jodiumzijde t_5) blijven allen ruim positief hoewel de lucht in de kuip reeds tijdens de stijgfase zowel bovenaan (t_9) als onderaan (t_{10}) sterk afkoelt. De lucht bovenaan warmt weer op zodra het instrument werkt. De geproduceerde warmte van ondermeer de turbine (t_{11}) stijgt in de kuip. De lucht onderaan blijft verder afkoelen, zij het trager, door de koude die via de flens (t_7) wordt binnengebracht.

De temperatuur van de turbinevoeding (t_{12}) loopt op naarmate de druk in de stromingsbuis stijgt en meer vermogen moet geleverd worden om de draaisnelheid constant te houden.

Tijdens de stijgfase moet erop gelet worden dat de niet werkende gaskranen niet vastvriezen (inlaat chloor t_4 , inlaat jodium t_8 , spoelgas t_3). Aangezien de temperatuur aan de spoelgaskraan

negatief werd voor de aanvang van de eigenlijke metingen, werd deze kraan enkele keren kort geopend.

In figuur 6.5 wordt de bewaking van de turbineparameters getoond. Curve *r* geeft de rotatiesnelheid aan van de turbine, curve *s* de door de turbinevoeding geleverde stroom en curve *v* de spanning van de batterij die alleen voor de turbinevoeding wordt gebruikt.



Figuur 6.5: De bewaking van de turbineparameters.

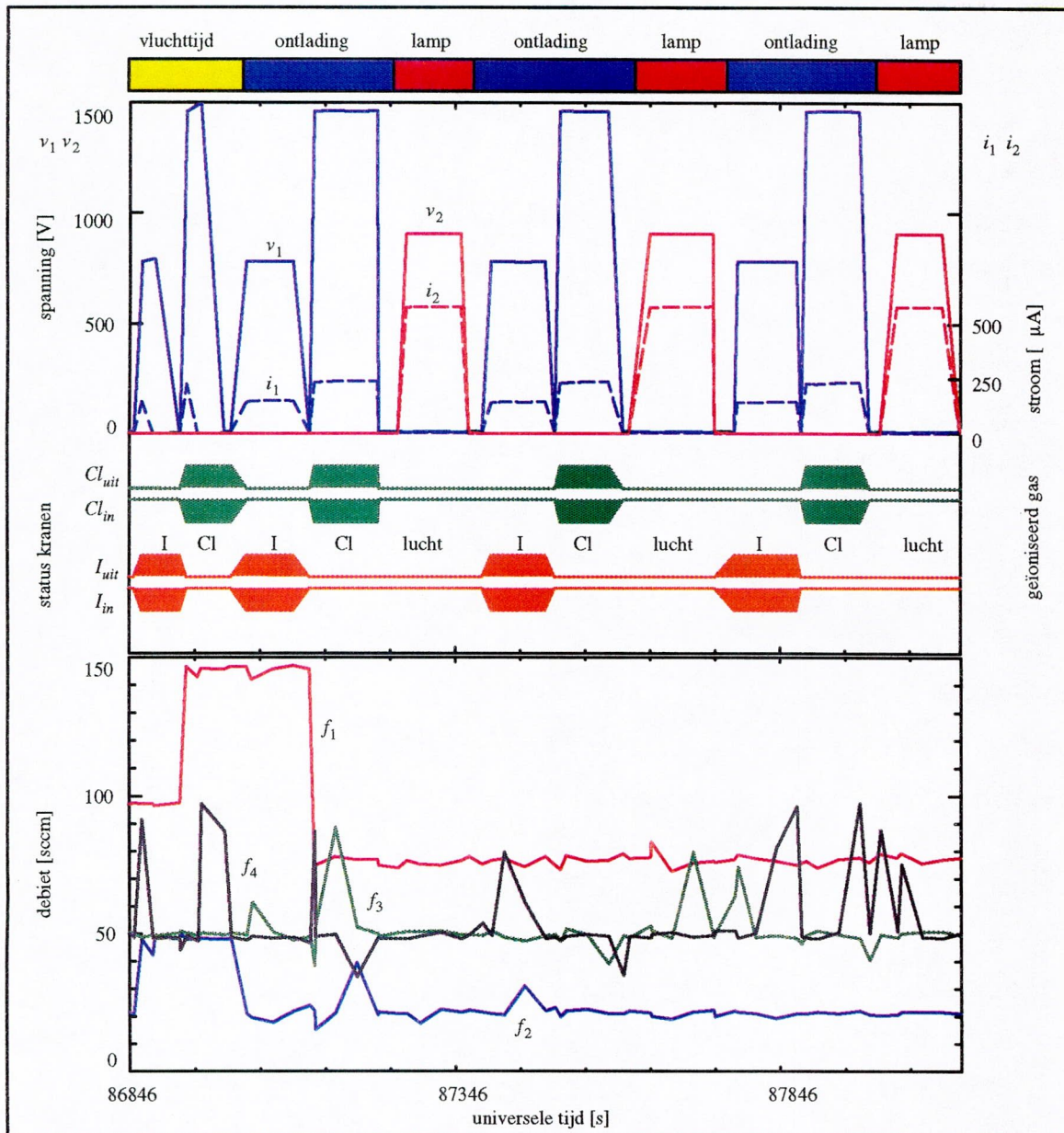
Een typisch gedrag bij het opstarten van de turbine is een stijging van het toerental naar de nominale waarde van 1500 tr/s, gepaard gaand met een stijging van het stroomverbruik en een lichte afname van de batterijspanning. Dit gedrag wordt in figuur 6.5 waargenomen bij een voorbereidende test (punt A), bij het aanschakelen net na de lancering (punt B) en bij het terug aanschakelen net na de opening van de afsluitsystemen (punt C). Uit veiligheidsoverwegingen wordt de turbine net voor het verwijderen van de afsluitsystemen in een regime gebracht met laag toerental (mogelijke drukschok).

Zodra de buitendruk toeneemt bij het begin van de afdaling, stijgt ook het stroomverbruik (punt D). De turbinevoeding levert meer stroom om bij de hogere drukken de nominale draaisnelheid te onderhouden. Met toenemend stroomverbruik gaat een afnemende batterijspanning gepaard.

Bij een buitendruk van ongeveer 30 mbar bereikt de turbinevoeding de ingestelde stroombegrenzing (5 A) (punt E). De stroom kan niet verder toenemen, de draaisnelheid neemt af. Aangezien de stromingssnelheid in de stromingsbuis vanaf dit moment systematisch afneemt, wordt een regelmatige meting van de vluchttijd zeer belangrijk. Bij het einde van de metingen wordt de turbine afgezet (punt F). De batterijspanning neemt terug haar onbelaste waarde van 42 V aan.

Het gedrag van de ionenproductie in het actief chemi-ionisatiepakket wordt in figuur 6.6 weergegeven. Tijdens de vlucht werd met behulp van *scripts* repetitief een bepaalde meetcyclus

herhaald. Zo'n cyclus duurde bijna 22 minuten en bestond uit twee elektrometercycli en drie spectrometercycli.



Figuur 6.6: De bewaking van de ionenproductie in het actief chemi-ionisatiepakket.

Een elektrometercyclus bestaat uit drie registraties (vluchttijdspectra) (zie 4.6) : een stroommeting op de inlaatflens waarbij de ionenbron zich in de continue mode bevindt, gevolgd door een verzadigingscontrole en de eigenlijke vluchttijdmeting met de ionenbron in de gepulste mode. De eerste elektrometercyclus wordt genomen met methyljodide in de bron, de tweede met chloor.

Tijdens één spectrometercyclus worden 15 massaspectra geregistreerd in groepen van vijf (vijf verschillende instellingen van de itv-spanning). De eerste vijf spectra worden genomen met methyljodide, de volgende vijf met chloor in de ontladingsionenbron. De laatste vijf spectra

worden genomen terwijl de omgevingslucht door de foto-elektrische ionenbron (lamp) wordt geïoniseerd.

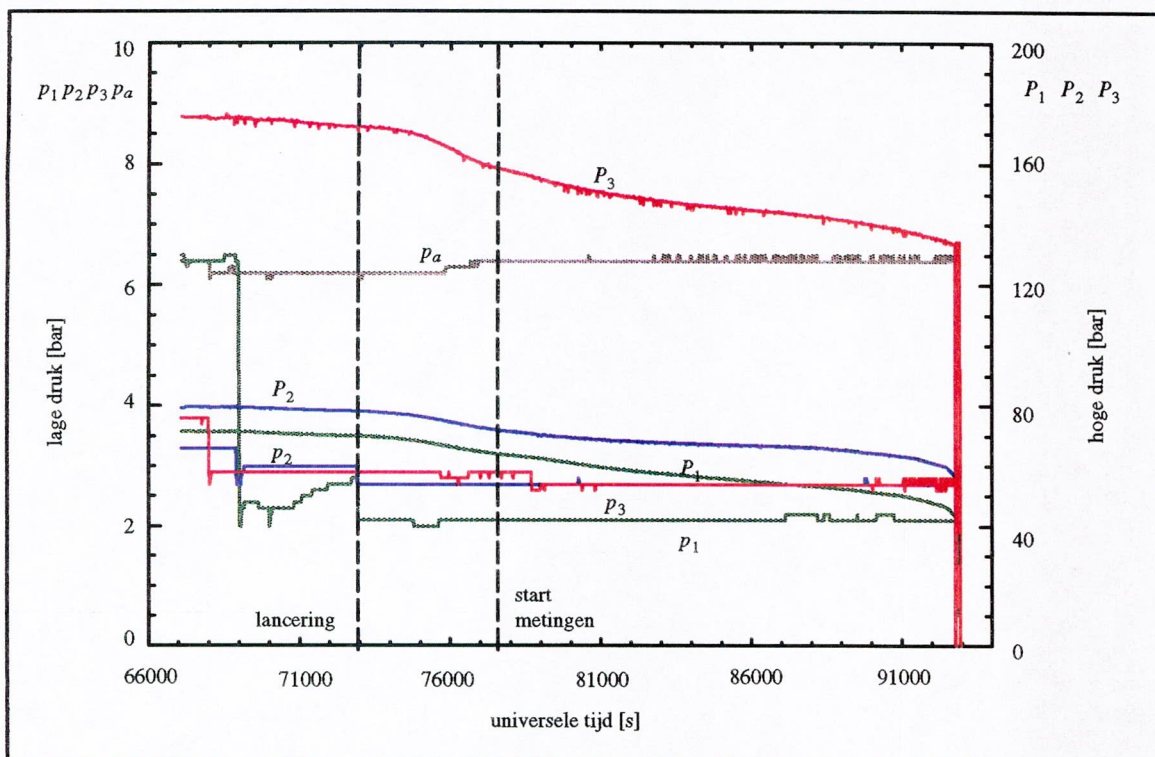
Bovenaan figuur 6.6 worden het spanningsverloop over en het stroomverloop in de ionenbronnen tijdens een volledige meetcyclus van 22 minuten voorgesteld (de blauwe curves v_1 en i_1 voor de ontlading, de rode curves v_2 en i_2 voor de lamp).

In het midden van de figuur wordt de status van de vier kranen aangeduid die bepalen welk gas de ionenbron binnenkomt. Wanneer Cl_{uit} en I_{in} gesloten zijn en Cl_{in} en I_{uit} open wordt het chloormoedergas geïoniseerd in de ontladingsionenbron (v_1 1500 V en i_1 ongeveer 160 μA). Wanneer I_{uit} en Cl_{in} gesloten zijn en I_{in} en Cl_{uit} open wordt het jodiummoedergas er geïoniseerd (v_1 800 V en i_1 250 μA). Wanneer Cl_{in} en I_{in} gesloten zijn en Cl_{uit} en I_{uit} open loopt geen moedergas in de ontladingsionenbron. In deze periode ioniseert de lamp de binnenstromende omgevingslucht in de stromingsbuis (v_2 1000 V en i_2 550 μA).

Voor de vluchttijdmetingen met Cl en I worden ook 1500 resp 800 V aan de ontladingsionenbronn gelegd. In de figuur is duidelijk te zien dat de stroom slechts kan gemeten worden wanneer de ionenbron in de continue mode werkt, dus enkel tijdens het opmeten van het eerste spectrum in elke elektrometercyclus.

In deze meetcyclus wordt ongeveer om de 6'30" een massaspectrum genomen in eenzelfde instrumentconfiguratie. Tijdens de vlucht werd in de daalfase (1,2 m/s) zo een hoogteresolutie bekomen van ongeveer 500 m. Hierbij dient niet uit het oog verloren dat in dit interval het volledige massadomein drie maal wordt bestreken (chloor, jodium en omgevingslucht). De hoogteresolutie van de vluchttijdmetingen bedraagt ongeveer 1500 m.

De onderste helft van figuur 6.6 stelt de debieten voor van het chloormoedergas (f_1), het jodiummoedergas (f_2) en het spoelgas aan de chloorzijde (f_3) en aan de jodiumzijde (f_4).



Figuur 6.7: De bewaking van de drukken in de gasleidingen in het actief chemi-ionisatiepakket.

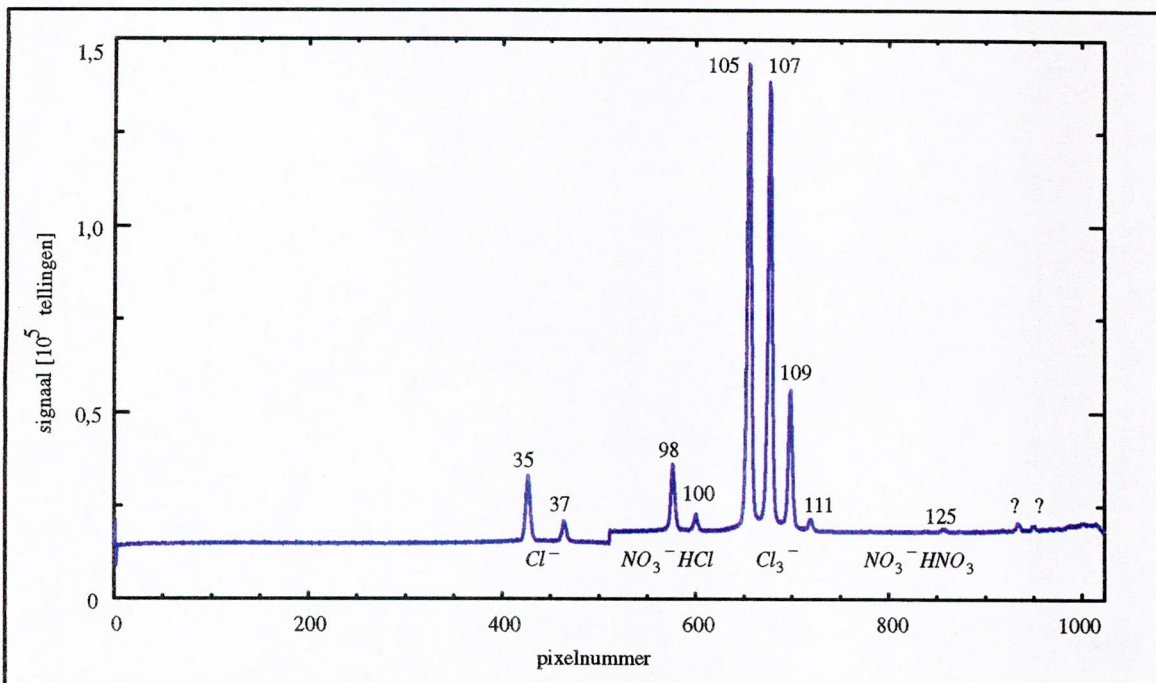
In figuur 6.7 wordt de druk voor en na de gasontspanner op de aanvoerleiding van het chloormoedergas (P_1 en p_1), van het jodiummoedergas (P_2 en p_2) en van het spoelgas (P_3 en p_3) gegeven. De curve p_a stelt de druk voor van de perslucht voor het bedienen van de gaskranen.

6.2.2. Massaspectra

Er werden tijdens deze vlucht 563 massaspectra en 41 achtergrondspectra geregistreerd. In figuren 6.8, 6.9 en 6.10 worden drie typische spectra voorgesteld. In de figuren worden de gedetecteerde ionen aangeduid met hun massa. Bij pieken waarvan de identificatie niet zeker is of helemaal niet gekend werd een vraagteken geplaatst.

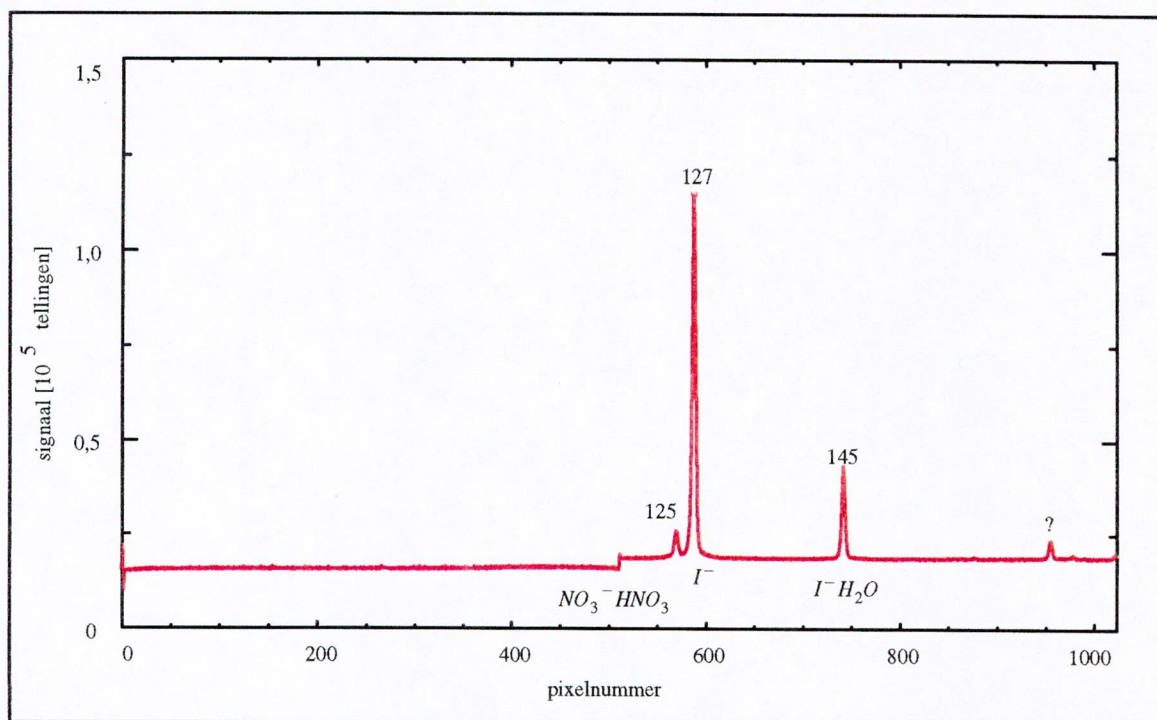
Figuur 6.8 toont spectrum 14346 dat bij een buitendruk van 9,1 mbar (22h55'44" UT) werd opgenomen terwijl het chloormoedergas in de ontladingsionenbron werd geïoniseerd. De itv-spanning in de massaspectrometer bedroeg 950 V, de spanning in de ionenbron 1500 V en het debiet van het chloormoedergas 100 sccm bij een spoelgasdebiet van 50 sccm.

Het spectrum toont de isotopen van de moederionen Cl^- (massa 35 en 37) en Cl_3^- (105, 107, 109 en 111) en de produktionen NO_3^-HCl (98, 100) en $NO_3^-HNO_3$ (125). De kleine pieken rechts in het spectrum zouden isotopen kunnen zijn van $Cl_2^-HNO_3$ of van $Cl^-HCl.HNO_3$.



Figuur 6.8: Massaspectrum 14346 uit de vlucht van 23 november 1995 (ontlading in chloormoedergas).

In figuur 6.9 wordt het spectrum met nummer 14806 voorgesteld, dat werd opgenomen bij een buitendruk van 24,8 mbar (0h23'40" UT). Er werd gewerkt met een debiet van 50 sccm van het jodiummoedergas in de ontladingsionenbron. Het spoelgasdebiet bedroeg andermaal 50 sccm. De ontladingspanning in de bron was 800 V en de itv-spanning 750 V.



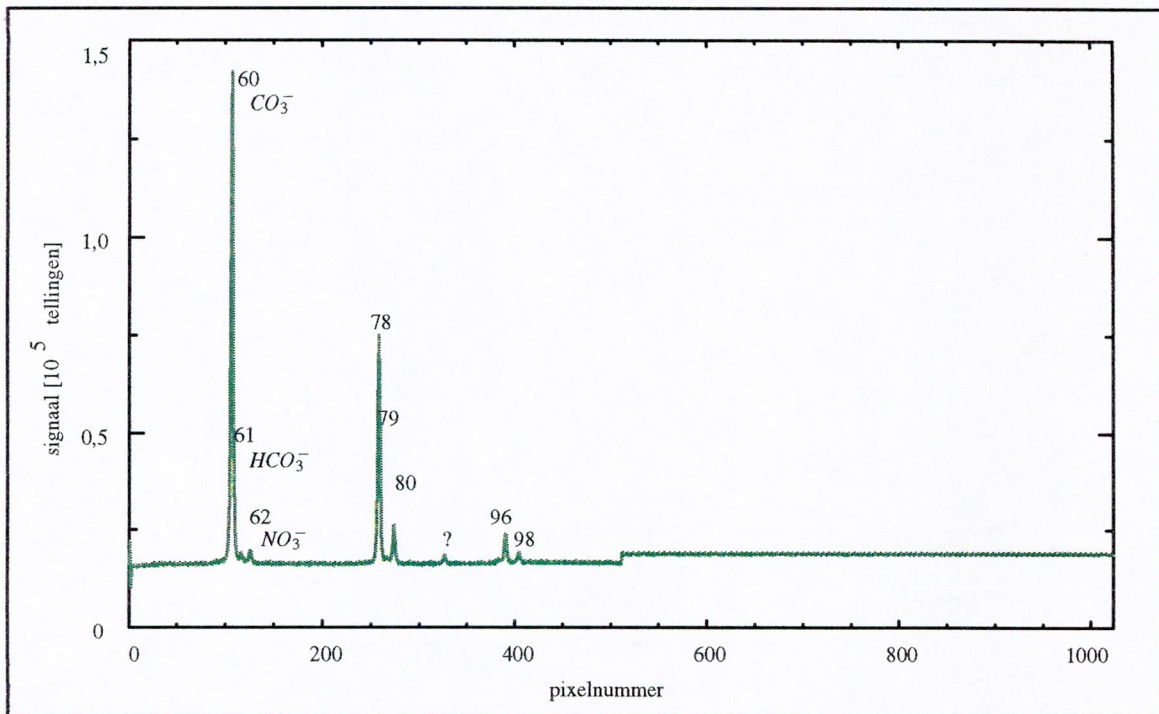
Figuur 6.9: Massaspectrum 14806 uit de vlucht van 23 november 1995 (ontlading in jodiummoedergas).

In dit spectrum is het moederion I^- (massa 127) zichtbaar samen met produktionen zoals $NO_3^- HNO_3$ (125) en $I^- H_2O$ (145). De piek rechts werd nog niet geïdentificeerd.

Het spectrum in figuur 6.10 draagt nummer 14924. Het werd geregistreerd bij een buitendruk van 32,3 mbar (0h46'31'') en terwijl de foto-elektrische ionenbron de omgevingslucht in de stromingsbuis ioniseerde. De ionenbronspanning bedroeg 1000V, de itv-spanning in de massaspectrometer 348 V.

Ionisatie van de omgevingslucht levert CO_3^- -ionen op (massa 60) en zijn waterstof- en waterverbindingen HCO_3^- (61), $CO_3^- H_2O$ (78), $HCO_3^- H_2O$ (79) en $CO_3^- (H_2O)_2$ (96) (zie 2.3.2). Verder worden NO_3^- (62), $NO_3^- H_2O$ (80) en $NO_3^- (H_2O)_2$ (98) gedetecteerd. Tussen de H_2O - en de $(H_2O)_2$ -clusters bevindt zich een piek die niet eenduidig werd geïdentificeerd maar bijvoorbeeld $CO_3^- HCN$ (87) zou kunnen zijn.

Met de gegevens uit deze vlucht werden hoogteproufielen opgesteld voor alle ionen. In een eerste stadium van de analyse werden ook al hoogteproufielen opgesteld voor het sporegas HNO_3 . De proufielen werden bekomen op basis van spectra die werden opgenomen terwijl chloor in de ontladingsionenbron werd geïoniseerd en op basis van spectra genomen tijdens de foto-elektrische ionisatie. Deze proufielen zijn in goede overeenstemming met gegevens uit de literatuur [WMO16]. De technieken die gebruikt worden om sporegasproufielen af te leiden uit de ionenproufielen vereisen een gedetailleerde kennis van de reactievergelijkingen en labometingen voor de bepaling van de reactiesnelheden. Deze onderwerpen vallen buiten het kader van dit werk maar zullen behandeld worden in de doctoraatstheses van C. Amelynck (BIRA) en C. Guimbaud (LPCE).

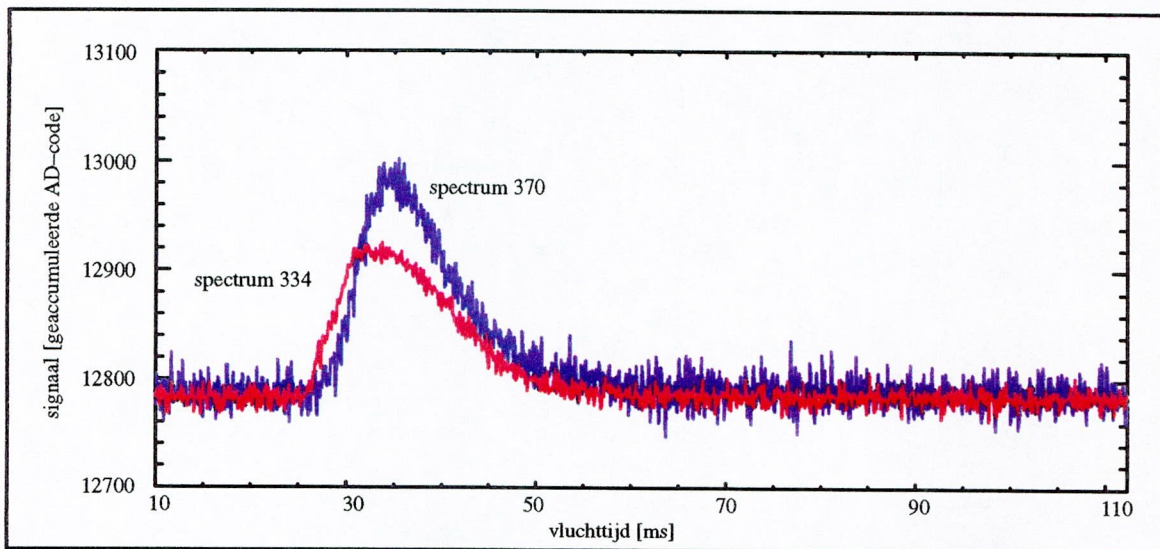


Figuur 6.10: Massaspectrum 14924 uit de vlucht van 23 november 1995 (foto-elektrische ionisatie van de omgevingslucht).

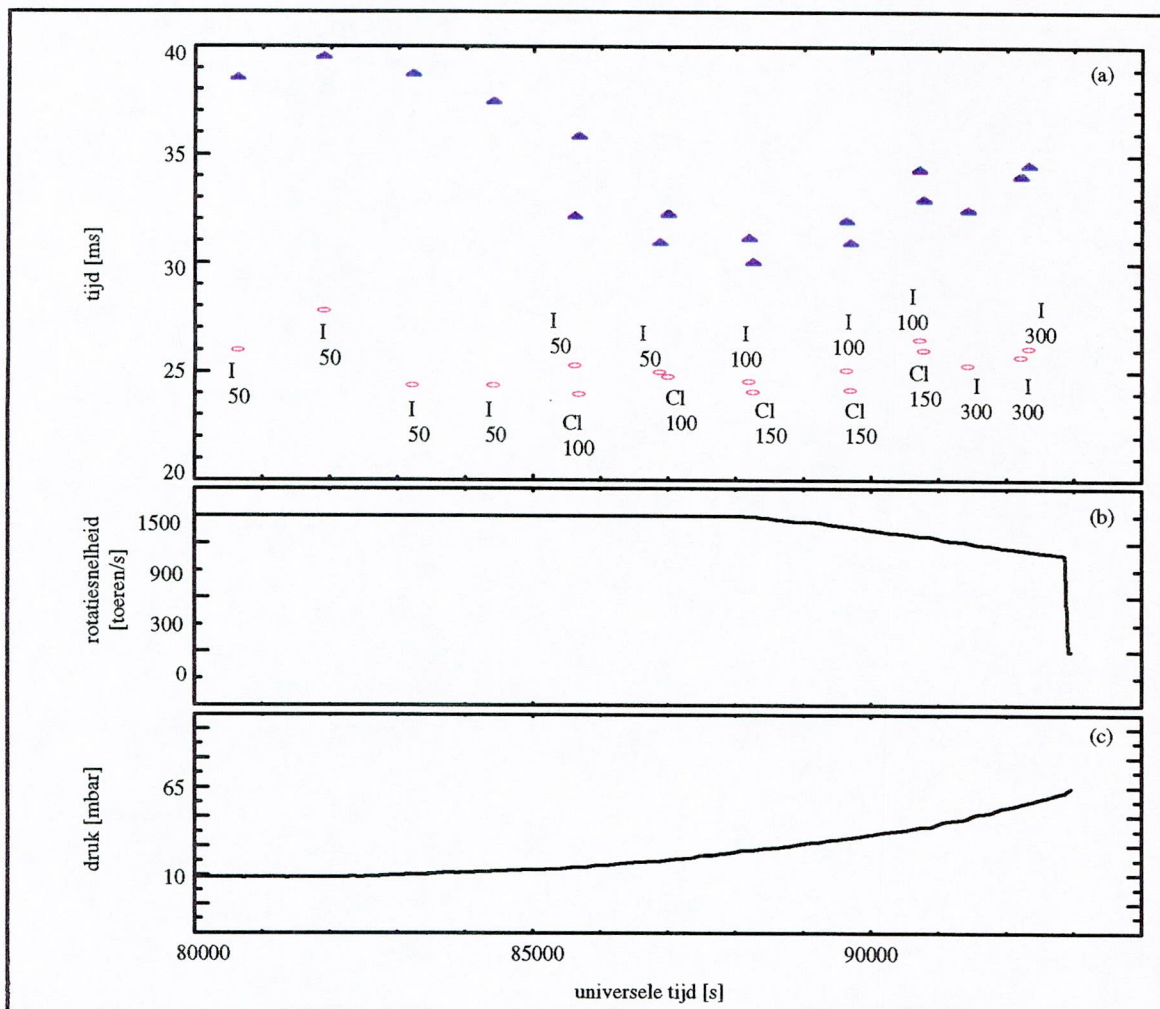
6.2.3. Vluchttijdspectra

Tijdens deze vlucht werden 17 vluchttijdspectra geregistreerd. In figuur 6.11 worden er twee getoond. Het spectrum met nummer 334 werd opgemeten bij een buitendruk van 18 mbar, met een debiet van 100 sccm chloor in de ionenbron en een nominale turbinedraaisnelheid van 1500 tr/s. Het spectrum met nummer 370 werd geregistreerd toen het instrument zich bij een buitendruk van 55 mbar bevond, met 300 sccm jodium in de bron en bij een turbinesnelheid van 1100 tr/s.

De onderste rij meetpunten (rood) in figuur 6.12a geeft in functie van de buitendruk de tijd aan tussen het openen van de ionenbron en het verschijnen van de stroompuls op de inlaatflens (de linkervoet van het stroomprofiel). In de bovenste rij (blauw) wordt het moment aangeduid waarop de top van de stroompuls in de elektrometer wordt gedetecteerd. Bij elk punt wordt de aard en het debiet van het moedergas (in sccm) vermeld. Als referentie worden het verloop van de turbinesnelheid (figuur 6.12b) en de druk in de stromingsbuis (figuur 6.12c) afgebeeld.



Figuur 6.11: Twee vluchttijdspectra uit de vlucht van 23 november 1995.



Figuur 6.12: Tijdmeting van de linkervoet en de top van alle opgemeten stroomprofielen.

6.3. De automatisering van de gegevensverwerking

6.3.1. Probleemstelling

Voorafgaand aan de eigenlijke wetenschappelijke analyse van de massaspectra uit het SIDAMS/MACSIMS-instrument moeten alle spectra een individuele behandeling ondergaan. In deze fase worden in eerste instantie correcties uitgevoerd die moeten compenseren voor afwijkend instrumentgedrag : achtergrond-, niet-uniformiteit- en itv-correctie. Vervolgens moet van alle pieken in de spectra de oppervlakte berekend worden. Deze is een maat voor de concentratie van dat bepaald ion. Deze informatie dient dan als startpunt voor de verdere analyse met uiteindelijk doel het opstellen van hoogteprofielen voor een aantal interessante minderheidsgassen.

Het komen tot tabellen met piekoppervlakten voor alle pieken in alle spectra is uitermate geschikt voor automatisering. Toch moet in deze fase ook een minimum aan visuele inspectie gegarandeerd blijven, omdat een aantal artefacten in sommige spectra (o.a. spookpieken [Rytz 93], onverwacht gedrag van de achtergrond, enz.) moeilijk kunnen gevat worden in een geautomatiseerd proces. Verder zal steeds moeten gewaakt worden over de geldigheid en de representativiteit van gebruikte spectra en correctietabellen.

Hierna wordt een volledig algoritme uitgewerkt voor deze eerste fase van de gegevensverwerking. Het op basis van dit algoritme geïmplementeerde uitvoeringsprogramma werd ingebed in een gebruiksvriendelijke grafische omgeving voor gebruik op een werkstation. Hierbij werd bijzondere aandacht geschonken aan een probleemloze overgang tussen de ruwe ".data"-bestanden die in de bedieningsterminal aan de grond worden aangemaakt tijdens meetsessies (zie 5.3.3) en het verwerkingsprogramma. Het gebruik van het algoritme levert een enorme tijdswinst op.

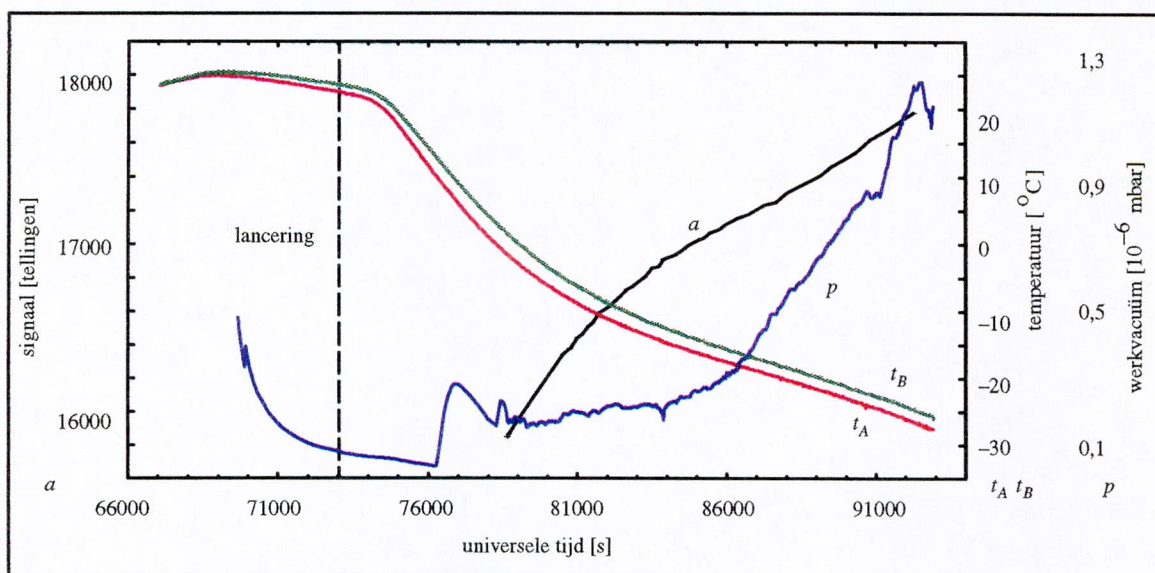
Om het algoritme te illustreren worden alle bewerkingen uitgevoerd op het spectrum met nummer 14346 uit de vlucht van 23 november 1995 (figuur 6.8).

6.3.2. De achtergrondcorrectie

Elk spectrum $S[i]$ ($i = 0, \dots, 1023$) dat geregistreerd wordt met het SIDAMS/MACSIMS-instrument moet bij de analyse ontdaan worden van het achtergrondsignaal. Het achtergrondsignaal bestaat onder meer uit de donkerstroom in de detectorpixels, elektronische *offset*, signaaloverspraak en ruis en mogelijke spontane ionenproductie.

Tijdens de registratie van een achtergrond spectrum $B[i]$ wordt de ionenproductie in het actief chemi-ionisatiepakket stil gelegd en worden de iiv- en opb-spanningen zodanig ingesteld dat de resterende of natuurlijke ionen de massaspectrometer niet kunnen betreden. Het kan zelfs nodig zijn ook de hoogspanningen in de massascheider zelf te verlagen.

In de vlucht van 23 november 1995 en in alle voorgaande vluchten blijkt de gemiddelde waarde van de achtergrond hoger te worden naarmate de vlucht vordert (de temperatuur aan de twee detectorogen daalt, de druk van het detectorvacuüm stijgt) (figuur 6.13).



Figuur 6.13: Het verloop van het gemiddeld achtergrondniveau (curve a) tijdens de vlucht van november 1995. Curve p is de druk in het detectorgedeelte van de massaspectrometer, curves t_A en t_B de temperatuur aan de twee detectorogen.

Gezien de evolutie van het achtergrondsignaal in de tijd is het opnemen van één achtergrond spectrum voor elke 5 geregistreerde massaspectra noodzakelijk om een relevante achtergrondcorrectie te kunnen uitvoeren.

De achtergrondcorrectie van spectrum $S[i]$ levert een nieuw spectrum $S^B[i] = S[i] - B[i]$ op.

In figuur 6.14a wordt het deel uit het spectrum $S_{14346}[i]$ aangeduid (tussen pixel 610 en 750) waarin zich vier isotopen bevinden van het Cl_3^- -ion (massa's 105, 107, 109 en 111). Figuur 6.14b toont dit deel in detail. In figuur 6.14c is het bijhorende achtergrond spectrum $B_{14334}[i]$ gegeven en in figuur 6.14d het detail uit het gecorrigeerde spectrum $S_{14346}^B[i]$.

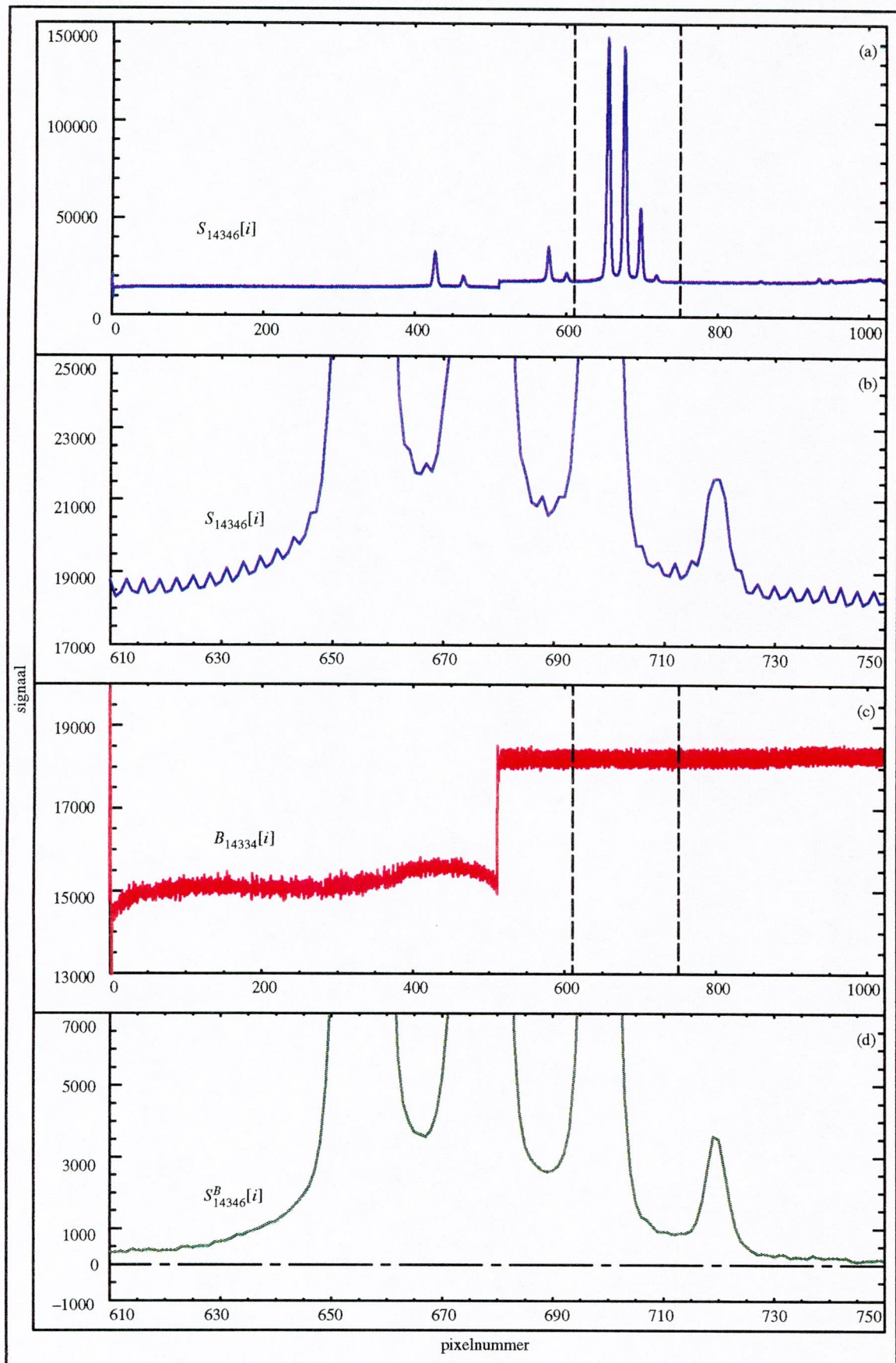
6.3.3. De niet-uniformiteitscorrectie

Onvolmaaktheid in het halfgeleidermateriaal van de fotodiodelijn en spreiding met bijkomende slijtage of beschadigingen aan de *microchannel*-plaat en het fosforscheerm kunnen bijdragen tot een niet-uniforme respons van de detector.

Tijdens labometingen wordt vaak bij steeds weerkerende waarden van de itv-spanning gewerkt. De *microchannel*-plaat wordt zo steeds op dezelfde plaats met ionen gebombardeerd waardoor de elektronen-emissieve stof op de wanden van de buisjes op die plaatsen meer wordt aangetast en het rendement van de *microchannel*-plaat er lager wordt. Ook het fosforscheerm wordt zo steeds op dezelfde plaatsen door elektronen geraakt. Een inhomogeen rendement van de *microchannel*-plaat en de fosfor is vooral nadelig wanneer ionenpieken op verschillende plaatsen op de detector moeten vergeleken worden.

Het is aan te bevelen net voor de vlucht een niet-uniformiteitsspectrum $U[i]$ op te nemen. Daarmee kunnen alle massaspectra uit de vlucht dan gecorrigeerd worden op de volgende

manier : $S^{BU}[i] = S^B[i] \cdot \frac{U[i]}{U_{\min}}$ met $U_{\min} = \min\{U[i], i = 0, \dots, 1023\}$.



Figuur 6.14: Achtergrondcorrectie op spectrum 14346.

Figuur 6.15a geeft het niet-uniformiteitsspectrum dat gebruikt wordt om de massaspectra uit de vlucht van november 1995 te corrigeren. De correctie werd dus ook toegepast op $S_{14346}^b[i]$ en in figuur 6.15b staat een detail uit het spectrum $S_{14346}^{BU}[i]$ (spectrum $S_{14346}[i]$ na achtergrond- en niet-uniformiteitscorrectie).

6.3.4. Correctie in functie van de gebruikte itv-spanning

De transmissie van de massaspectrometer is afhankelijk van de gebruikte itv-spanning. Een zelfde ion zal bij verschillende itv-waarden resulteren in pieken op de detector met verschillende oppervlakten. Om de verschillende gemeten intensiteiten terug te voeren tot één waarde dient een ijking uitgevoerd te worden in functie van de itv-waarde.

De ijking bestaat erin het gebruikte itv-gebied (tussen 200 en 1100 V) in kleine stappen (bijvoorbeeld 10 V) te doorlopen, waarbij voor elke instelling van itv een spectrum wordt opgenomen onder dezelfde omstandigheden wat betreft instrumentparameters en ionenproductie. Om eventueel verschuiven van de instrumentparameters tijdens de lange ijkingsperiode (enkele uren) op te vangen, wordt tussen twee itv-instellingen een referentiespectrum genomen bij een bepaalde niet veel gebruikte itv-waarde.

Door het volgen van de evolutie van de piek van enkele ionen kan een correctiecurve opgesteld worden die het ganse itv-bereik beslaat. Een spectrum $S^{BU}[i]$ dat bij een bepaalde itv-waarde wordt opgemeten moet met de overeenkomstige correctiefactor vermenigvuldigd worden : $S^{BU}[i] = S^{BU}[i].C_{itv}$

De itv-correctie beïnvloedt enkel de relatieve interpretatie van pieken uit spectra die werden opgenomen met een verschillende itv-waarde. Wanneer gewerkt wordt met piekverhoudingen uit eenzelfde spectrum moet in principe geen itv-correctie uitgevoerd worden.

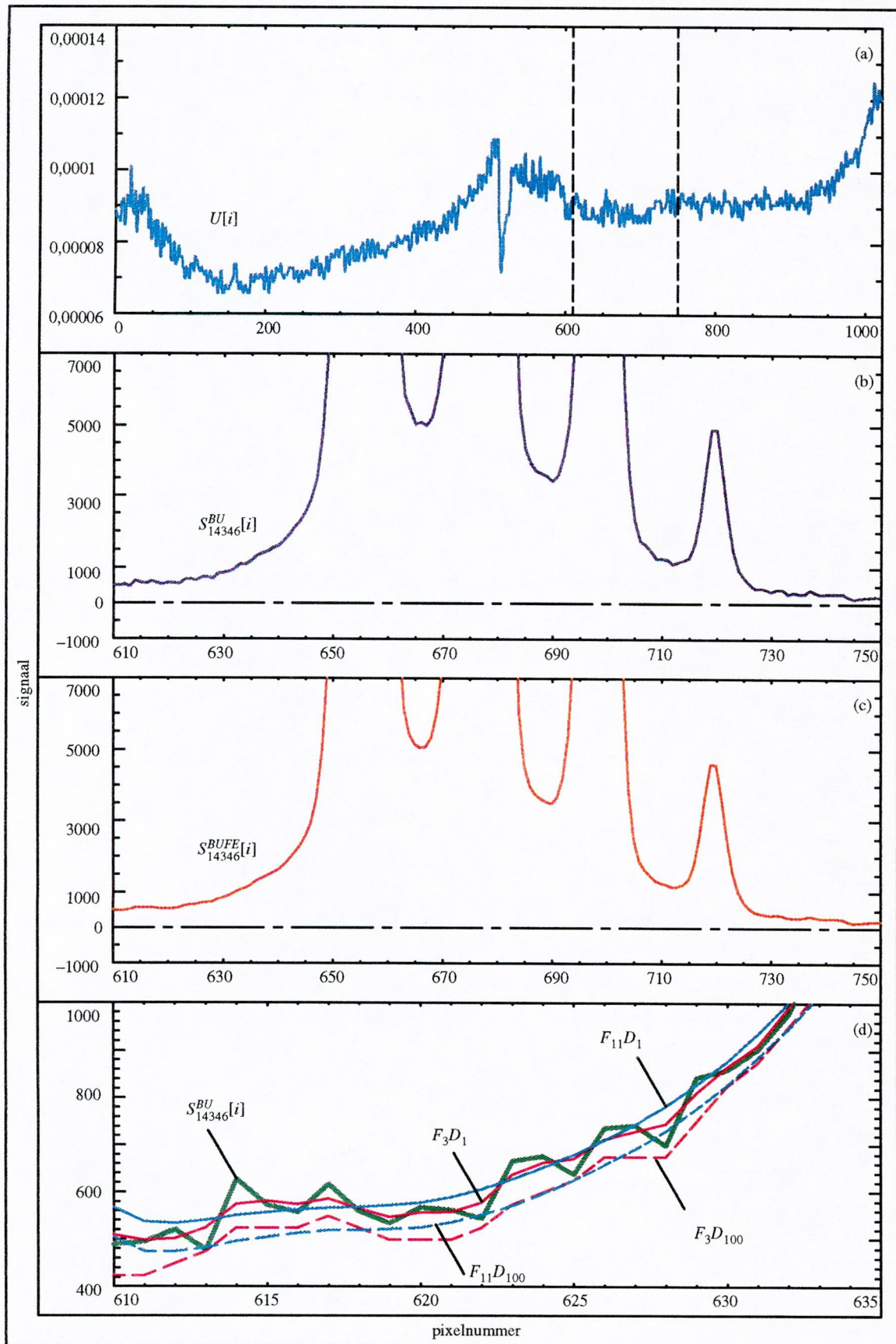
6.3.5. De top- en grensbepaling van de pieken

6.3.5.1. Het definiëren van de pieken

Ondanks de achtergrond- en niet-uniformiteitscorrectie kan het zoeken naar de grenzen van een piek belemmerd worden door schommelingen over één of een klein aantal pixels. Daarom kan de gebruiker van het algoritme het spectrum $S^{BU}[i]$ eventueel onderwerpen aan een tijdelijke *smoothing* alvorens over te gaan tot de top- en grensbepaling. Daarvoor werden twee technieken geïmplementeerd : kwantificering en filtering.

Bij kwantificering wordt elke pixelwaarde gedeeld door een instelbare waarde D, ontdaan van het breukgedeelte en terug vermenigvuldigd met D ($S^{BUID}[i] = D \cdot \text{integer} \left[\frac{S^{BU}[i]}{D} \right]$). Voor de filtering wordt een genormaliseerd lijnfilter $F_b = \left[1, \dots, \frac{b+1}{2}, \dots, 1 \right]$ met instelbare breedte b gebruikt dat over het spectrum glijdt en in een interval van b pixels rond de centrale pixel een gewogen

$$\text{sommatie uitvoert : } S^{BUIDF}[i] = \frac{\sum_{j=-\frac{b-1}{2}}^{\frac{b-1}{2}} \left(\frac{b+1}{2} - |j| \right) \cdot S[i+j]}{\left(\frac{b+1}{2} \right)^2} \quad (\text{b is steeds oneven}).$$



Figuur 6.15: Niet-uniformiteitscorrectie en filtertechnieken op spectrum 14346.

De gebruiker kan er steeds voor opteren geen filtering ($b=1$) en/of geen kwantificering ($D=1$) te gebruiken.

Op de randen van elk detectorroog kan het spectrum ontgaan worden van een te kiezen aantal randpixels (r). Uit het achtergrondspectrum in figuur 6.14c blijkt bijvoorbeeld dat de pixelwaarden in de randpixels sterke afwijkingen kunnen vertonen.

Het deelspectrum $S^{BUIDFE}[i]$ ($i = r + 1, \dots, 512 - r - 1, 512 + r + 1, \dots, 1023 - r - 1$) zal uiteindelijk gebruikt worden voor verdere verwerking. De indices duiden op de achtereenvolgende acties die werden uitgevoerd op het basisspectrum $S[i]$ (achtergrond- [B], niet-uniformiteits- [U] en itv-correctie [I] gevolgd door eventuele kwantificering [D], filtering [F] en randzuivering [E]).

In figuur 6.15c wordt spectrum $S_{14346}^{BUIFE}[i]$ getoond. Hier werd slechts een lijnfilter met een breedte van 3 pixels gebruikt (F_3) en geen kwantificering. In figuur 6.15d wordt daarentegen het effect getoond van *smoothing*-combinaties met lijnfilterbreedtes van 3 en 11 pixels en kwantificering met $D=1$ en $D=100$ op een deel van het spectrum $S_{14346}^{BU}[i]$ (de aanloop van de eerste piek uit het Cl_3^- -viertal tussen pixels 610 en 635).

Voor elke ionenpiek in het voorbehandelde spectrum $S^{BUIDFE}[i]$ moet de plaats bepaald worden van de top (p_m), de linker- (p_l) en de rechtergrens (p_r). In een spectrum met n_p ionenpieken zal de j^{de} piek door een coördinatentriplet $[p_m(j), S^{BUIDFE}[p_m(j)]]$, $[p_l(j), S^{BUIDFE}[p_l(j)]]$, $[p_r(j), S^{BUIDFE}[p_r(j)]]$ kunnen voorgesteld worden ($j = 1, \dots, n_p$).

Het opzoeken van de pieken begint bij de grootste. Telkens een coördinatentriplet is toegewezen aan de piek wordt hij van het spectrum afgetrokken behalve in een instelbaar aantal pixels aan de randen (overlapping o), zodat ook voor de volgende pieken de beste grenswaarden kunnen bepaald worden.

Pas wanneer het ganse spectrum werd doorgelicht en alle pieken gedefinieerd zijn, worden pieken met onvoldoende contrast geëlimineerd ($S^{BUIDFE}[p_m(j)] - S^{BUIDFE}[p_r(j)] \leq p$ of $S^{BUIDFE}[p_m(j)] - S^{BUIDFE}[p_l(j)] \leq p$ met p een instelbare parameter) en worden overlappende grenzen ($p_r(j) > p_l(j + 1)$ of $p_l(j) < p_r(j - 1)$) aangepast.

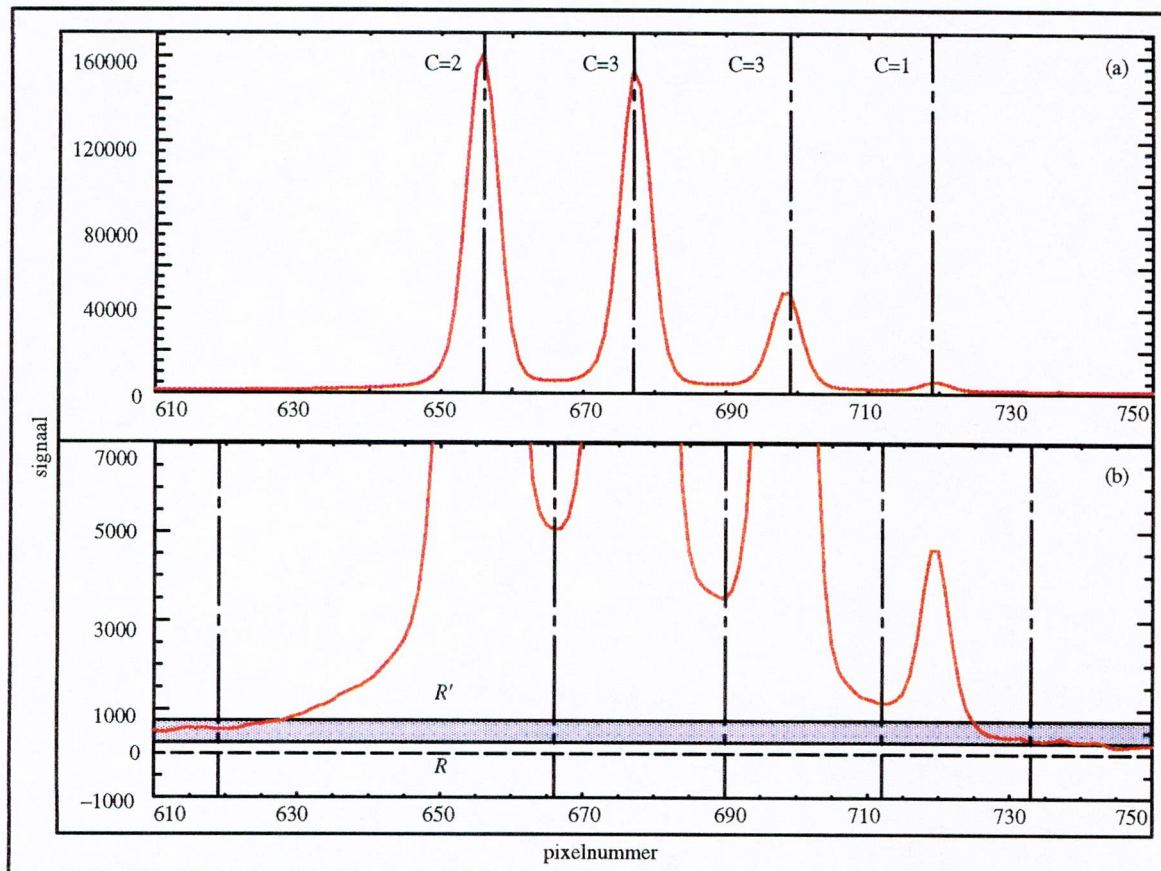
6.3.5.2. Het grenszoekalgoritme

Vanaf elke piektop $[p_m(j), S^{BUIDFE}[p_m(j)]]$ wordt aan de linker- en rechterkant naar een piekgrens gezocht. Zolang de volgende pixelwaarde kleiner is (de getallenreeks is monotoon dalend) wordt de grens naar die pixel verlegd.

Is de volgende pixelwaarde niet kleiner dan wordt op dat punt een bijkomende test uitgevoerd. Voor de w volgende pixels (w is instelbaar) wordt nagegaan hoeveel er toch nog aan het daalcriterium voldoen. Ligt het zo bekomen percentage hoger dan een instelbaar niveau l , dan wordt de grens opgeschoven naar de volgende pixel, al voldeed het basisvergelijkingscriterium op dit punt niet, en wordt het zoeken naar de grens verder gezet.

Indien gewenst kan de gebruiker een ruisniveau R instellen. Het grenszoekalgoritme zal steeds beëindigd worden op de plaats waar het ruisniveau wordt bereikt.

In figuur 6.16a en b wordt het top- en grenszoekalgoritme geïllustreerd op de 4 isotopenpieken van het Cl_3^- -ion in spectrum $S_{14346}^{BUIDFE}[i]$.



Figuur 6.16: Top- en grensbepaling in het spectrum 14346.

6.3.6. De catalogering van de pieken

Op basis van de gevonden grenzen wordt aan elke piek j een code $C(j)$ toegekend die aangeeft of de piek al dan niet overlapt met één of beide buren (0 voor niet-overlappende of enkelvoudige pieken, 1 voor links-, 2 voor rechtsoverlappend en 3 voor pieken die aan beide zijden overlappen) (figuur 6.16a).

Een piek wordt verondersteld te overlappen met een buur als zijn grens boven een instelbaar drempelniveau R' ligt (hoger dan het ruisniveau R) (figuur 6.16b). Voor pieken die volgens dit criterium slechts aan één zijde lijken te overlappen met een buur wordt bijkomend geëist dat het verschil tussen de pixelwaarden aan beide grenzen groter is dan een instelbare factor F_{disseq} .

Na een eerste catalogering krijgen pieken die als overlappend worden gecatalogeerd maar waarvan de grenzen toch enkele pixels uit mekaar liggen een gemeenschappelijke grens en worden anomalieën verbeterd (een piek met $C(j)=1$ kan nooit gevolgd worden door een piek met $C(j)=3$, enz.). De catalogering wordt hernomen tot geen anomalieën meer voorkomen.

Om op een efficiënte manier het hierna volgend oppervlaktebepalingsalgoritme te kunnen uitvoeren worden de pieken op basis van de definitieve catalogering gegroepeerd in clusters. Een cluster kan bestaan uit één enkelvoudige piek ($C(j)=1$) of uit een aaneenschakeling van overlappende pieken ($[C(j) C(j+1) \dots C(j+k-1) C(j+k)]=[2 3 \dots 3 1]$ met k het aantal pieken in de cluster). De vier Cl_3^- -isotopenpieken uit $S_{14346}^{BUIDFE}[i]$ worden door het algoritme als één cluster beschouwd.

6.3.7. De oppervlaktebepaling van de pieken

6.3.7.1. Probleemstelling

Als doel wordt vooropgesteld het reële gewicht of aandeel van een ion in een spectrum zo goed mogelijk in te schatten. Het gevaar bestaat namelijk dat door verkeerde relatieve waarden van de piekoppervlakten ook onjuiste concentratieverhoudingen worden bekomen. Dit probleem stelt zich in het bijzonder bij overlappende pieken, waar niet duidelijk kan uitgemaakt worden welke de individuele bijdrage is van de afzonderlijke pieken. Vooral wanneer een groot onevenwicht bestaat in het gewicht van de pieken in clusters kunnen grote afwijkingen bekomen worden.

Ook bij het volgen van de evolutie van een bepaald ion doorheen verschillende spectra kunnen de resultaten vervormd worden indien de ionenpiek deel uitmaakt van een cluster waarin de onderlinge gewichten veranderen van spectrum tot spectrum.

Een oplossing voor dit probleem is de vorm van de pieken in dit instrument zo goed mogelijk mathematisch te omschrijven en van deze informatie gebruik te maken om de individuele bijdragen van de pieken in een cluster te berekenen.

Een eerste schatting van de oppervlakte wordt gemaakt door de sommatie van alle pixelwaarden

tussen de linker- en rechtergrens van de piek : $O_{ruw}(j) = \sum_{i=p(j)}^{p_f(j)} S^{BUIDFE}[i]$.

Voor enkelvoudige pieken is de zo bekomen waarde een goede maat voor de intensiteit van het ion. Deze reeks "ruwe" oppervlakten $O_{ruw}(j)$ zal dienst doen als referentie bij de validatie van de resultaten bekomen met het fittingalgoritme.

6.3.7.2. De karakteristieke vorm van de ionenpieken - algemeen

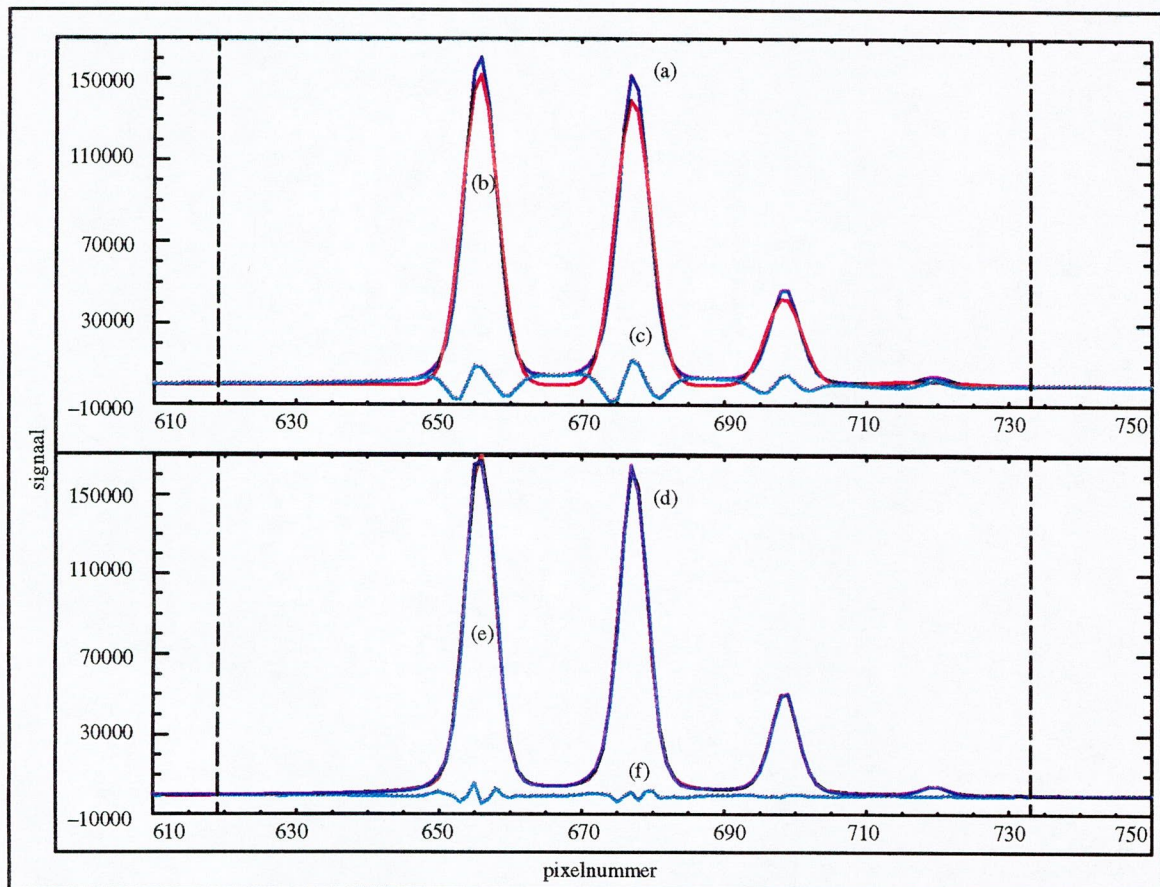
De pieken in de SIDAMS/MACSIMS-massaspectra ontstaan doordat een elektronenbundel uit een *microchannel*-plaat een fosforscherm bombardeert en de zo ontstane lichtvlek door een halfgeleider detector wordt geregistreerd.

Aan de hand van een reeks van 100 pieken samengesteld uit spectra genomen in verschillende meetsessies, met verschillende meetconfiguraties en uit de vluchten wordt nagegaan of een Gauss-profiel kan gebruikt worden als karakteristieke vorm voor de ionenpieken. Alle pieken in de selectie waren enkelvoudig, vertoonden zo weinig mogelijk asymmetrie maar hadden wel verschillende breedten en hoogten. Ook werden te kleine pieken niet in de reeks opgenomen. Ondanks de zeer selectieve keuze van de pieken blijkt een Gauss-benadering niet te voldoen.

In figuur 6.17 wordt de Cl_3^- -cluster uit $S_{14346}^{BUIDFE}[i]$ getoond (a) samen met een Gauss-fit van de

vorm $f_G(x; a_G) = A_G \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - M_G}{\sigma_G} \right)^2 \right]$ (b) en het verschil tussen beiden (c). De parametervector

$a_G = [A_G \ M_G \ \sigma_G]$ (amplitude, midden, sigma) wordt geoptimaliseerd door middel van de Marquardt-Levenberg-methode (zie 6.3.7.3).



Figuur 6.17: Gauss- en Gauss-Lorentz-fits aan spectrum 14346

De snellere verbreding van de pieken aan hun basis is mogelijk te wijten aan de emulsie van het fosforscheerm en wordt beter gefit door een Lorentz-profiel van de vorm $f_L(x; a_L) = \frac{A_L}{1 + \left(\frac{x - M_L}{\sigma_L}\right)^2}$

($a_L = [A_L \ M_L \ \sigma_L]$ is de parametervector).

Als karakteristieke kromme wordt daarom de som van een Gauss- en een Lorentz-profiel vooropgesteld $f_{GL}(x; a_{GL}) = f_G(x; a_G) + f_L(x; a_L)$ ($a_{GL} = [A_G \ A_L \ M_G \ M_L \ \sigma_G \ \sigma_L]$ is de parametervector).

In figuur 6.17 wordt het gefitte Gauss-Lorentz-profiel (e) getoond en het verschil (f) met het spectrum $S_{14346}^{BUIDFE}[i]$ (d). Voor dit voorbeeld, maar ook voor 97 van de 100 pieken in de onderzochte reeks, bleek bij vergelijking van de absolute waarde van de verschilcurve een gecombineerd profiel een betere fit op te leveren dan een zuiver Gauss-profiel.

Uit de systematische analyse van de reeks pieken blijkt dat het aanvaardbaar is de parameters M_G en M_L , i.e. de middelpunten van het Gauss- resp Lorentz-profiel, steeds gelijk te houden ($M_{GL} = M_G = M_L$). Slechts bij zeer kleine pieken kunnen voor M_G en M_L opmerkelijk verschillende waarden gevonden worden wanneer de parametervector wordt geoptimaliseerd.

Elke piek in een spectrum wordt dus voorgesteld door een Gauss-Lorentz-profiel (6.1) waarin vijf parameters $a_{GL} = [A_G \ A_L \ M_{GL} \ \sigma_G \ \sigma_L]$ worden geoptimaliseerd.

$$f_{GL}(x; a_{GL}) = A_G \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - M_{GL}}{\sigma_G} \right)^2 \right] + \frac{A_L}{1 + \left(\frac{x - M_{GL}}{\sigma_L} \right)^2} \quad (6.1)$$

6.3.7.3. Het Marquardt-Levenberg-fittingalgoritme

Aan een cluster die de pieken j_1, \dots, j_k bevat wordt een k -voudig Gauss-Lorentz-profiel gefit en dit voor alle clusters in het spectrum $S^{BUl}[i]$:

$$f_{GL}^k(x; a_{GL}^k) = \sum_{m=j_1}^{j_k} f_{GL}^m(x; a_{GL}^m) \text{ met } a_{GL}^k = [a_{GL}^{j_1} \dots a_{GL}^{j_k}] = [A_G^{j_1} A_L^{j_1} M_{GL}^{j_1} \sigma_G^{j_1} \sigma_L^{j_1} \dots A_G^{j_k} A_L^{j_k} M_{GL}^{j_k} \sigma_G^{j_k} \sigma_L^{j_k}].$$

De cluster kan voorgesteld worden als een reeks punten $i = p(j_1), \dots, p(j_k)$ uit het spectrum. $p(j_1)$ is de linkergrens van de linkerpiek j_1 in de cluster, $p(j_k)$ is de rechtergrens van de rechterpiek j_k in de cluster.

Clusters met vier, vijf of meer pieken zijn niet denkbeeldig. Het fittingalgoritme moet dan ook met tussen 20 en 30 parameters op een snelle en zekere manier convergeren naar de beste fit. In de literatuur wordt voor het optimaliseren van een stel parameters met een niet-lineair verband als standaard de Marquardt-Levenberg-methode voorgesteld als zijnde een robuuste en toch efficiënte fittingmethode. Zoals in de meeste fittingalgoritmen wordt ook in deze methode het fittingprobleem vervangen door een minimalisatieprobleem. Daarvoor wordt een χ^2 -evaluatiefunctie gedefinieerd. De optimale parametervector is deze waarvoor de χ^2 -functie uit (6.2) minimaal wordt.

$$\chi^2(a_{GL}^k) = \sum_{i=p(j_1)}^{p(j_k)} \left[\frac{S^{BUl}[i] - f_{GL}^k(i; a_{GL}^k)}{\sigma_i} \right]^2 = \sum_{i=p(j_1)}^{p(j_k)} \left[\frac{S^{BUl}[i] - \sum_{m=j_1}^{j_k} f_{GL}^m(i; a_{GL}^m)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (6.2)$$

In tegenstelling tot lineaire problemen moet de minimalisatie van de χ^2 -functie iteratief gebeuren. Er wordt vertrokken van een initiële parametervector $a_{GL_0}^k$, die steeds verbeterd wordt tot $\chi^2(a_{GL}^k)$ niet langer "noemenswaardig" verkleint.

In de Marquardt-Levenberg-methode worden twee basisminimalisatiemethodes afwisselend gebruikt, naar gelang de situatie zich ertoe leent: de inverse Hessiaanse methode en de steilste hellingmethode [Pres 92].

Als initiële parameters voor een piek j worden de volgende waarden vooropgesteld: $A_{G_0}^j = 0,7 \cdot S^{BUl}[p_m(j)]$, $A_{L_0}^j = 0,3 \cdot S^{BUl}[p_m(j)]$, $M_{GL_0}^j = p_m(j)$ en $\sigma_{G_0}^j = \sigma_{L_0}^j = \sigma_0^j$. Omdat bij overlappende pieken de aanwezigheid van de burens de symmetrie van de piek vervormt, wordt voor σ_0^j de linkerbreedte op halve hoogte genomen in het geval van een rechts- en de rechterbreedte op halve hoogte voor een links-overlappende piek. Voor enkelvoudige of dubbel overlappende pieken wordt het gemiddelde van beiden genomen. We merken wel op dat deze afwijkingen meestal niet van die aard zijn dat het Marquardt-Levenberg-algoritme niet tot een goede oplossing zou convergeren indien deze voorzorgsmaatregelen niet genomen worden.

In de uitdrukking voor de χ^2 -functie wordt aan elk te fitten punt $S^{BUl}[i]$ een individueel gewicht toegekend onder de vorm van een sigmawaarde σ_i . Het is mogelijk deze waarde constant te nemen voor alle punten in het te fitten gebied. Logischer is het echter het gewicht functie te maken van de pixelwaarde, zodat aan pixelwaarden in de grensgebieden, waar de invloed van ruis veel groter is relatief gezien minder belang gehecht wordt dan rond de piektop.

De parametervector $a_{GL_{min}}^k$ die het Marquardt-Levenberg-algoritme als oplossing aanbiedt bevat dus k sets van 5 parameters, één set voor elke piek in de cluster:

$$a_{GL_{min}}^k = [a_{GL_{min}}^{j_1} \dots a_{GL_{min}}^{j_k}] = [A_{G_{min}}^{j_1} A_{L_{min}}^{j_1} M_{GL_{min}}^{j_1} \sigma_{G_{min}}^{j_1} \sigma_{L_{min}}^{j_1} \dots A_{G_{min}}^{j_k} A_{L_{min}}^{j_k} M_{GL_{min}}^{j_k} \sigma_{G_{min}}^{j_k} \sigma_{L_{min}}^{j_k}].$$

Voor een piek j kan nu het Gauss-Lorentz-profiel (6.3) geschreven worden met bijhorend oppervlakte (6.4).

$$f_{GL}(x; a_{GL_{\min}}^j) = A_{G_{\min}}^j \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - M_{GL_{\min}}^j}{\sigma_{G_{\min}}^j} \right)^2 \right] + \frac{A_{L_{\min}}^j}{1 + \left(\frac{x - M_{GL_{\min}}^j}{\sigma_{L_{\min}}^j} \right)^2} \quad (6.3)$$

$$O_{fit}(j) = \sum_{i=p(j_1)}^{pr(j_k)} f_{GL}(x; a_{GL_{\min}}^i) \quad (6.4)$$

Op deze manier wordt de bijdrage van elke individuele piek (lees ion) in de cluster in rekening gebracht.

6.3.7.4. De karakteristieke vorm van de ionenpieken - specifiek

Het voorgaande fittingalgoritme werd uitvoerig uitgetest op een willekeurige keuze van 265 pieken uit de spectra die in het SIDAMS/MACSIMS-instrument werden geregistreerd tussen 18/01/1994 en 20/04/1994. Het stel bevat zowel grote als kleine pieken (figuur 6.18a geeft de waarden $S^{bu}[p_m(j)]$ bij de top), zowel enkelvoudige als overlappende pieken, verspreid over de ganse detector (figuur 6.18b geeft de pixelposities $p_m(j)$ van de top) en opgenomen bij verschillende itv-waarden.

In figuur 6.18c wordt voor elke piek de relatieve Gauss-bijdrage $\frac{A_G^i}{(A_G^i + A_L^i)}$ getoond aan het gefitte profiel. Bij geen enkele piek is de Lorentz- groter dan de Gauss-bijdrage. De gemiddelde procentuele waarde voor de Gauss-bijdrage blijkt ongeveer 76% te zijn.

Figuren 6.18d resp 6.19a geven σ_G^j resp σ_L^j . σ_G^j varieert tussen ongeveer 1,7 en 3,3 pixels en is zo beter voorspelbaar dan σ_L^j dat varieert tussen 1,3 en 7,9 pixels. De gemiddelde waarden voor beide grootheden liggen wel vrij dicht bij mekaar, namelijk rondom 2,6 pixels.

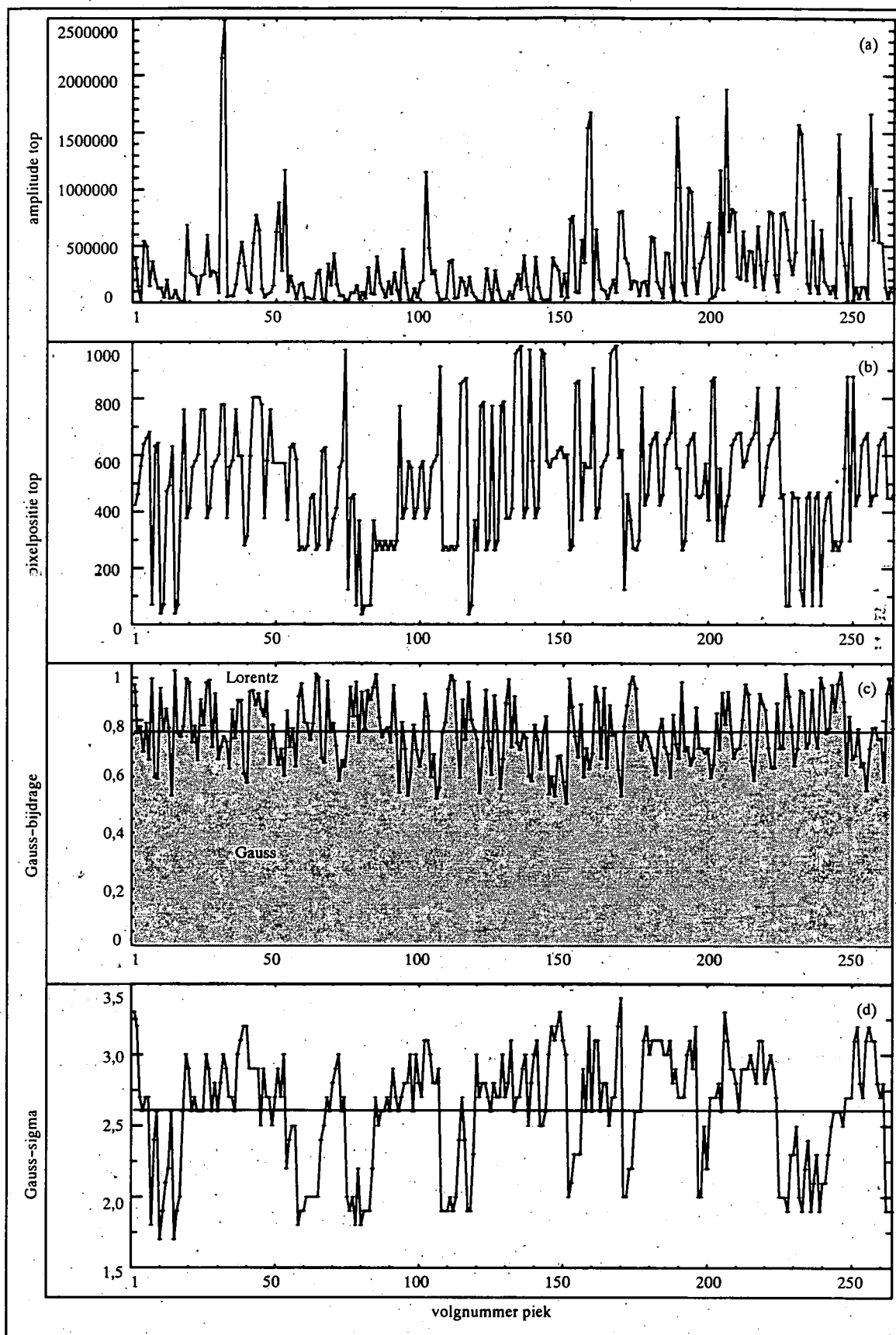
Wanneer reeksen van spectra worden bekeken die genomen werden over veel kortere perioden blijken de gevonden parameters nog coherenter te zijn. In figuren 6.19b, 6.19c en 6.19d worden $\frac{A_G^i}{(A_G^i + A_L^i)}$, σ_G^j en σ_L^j getoond voor de ionenpiek van massa 93 uit 148 spectra opgemeten op 19/04/1994.

In het algemeen lijkt de tendens te bestaan dat wanneer de bijdrage van het Gauss-profiel tot de amplitude toeneemt, de Lorentz-sigma vergroot bij gelijkblijvende Gauss-sigma.

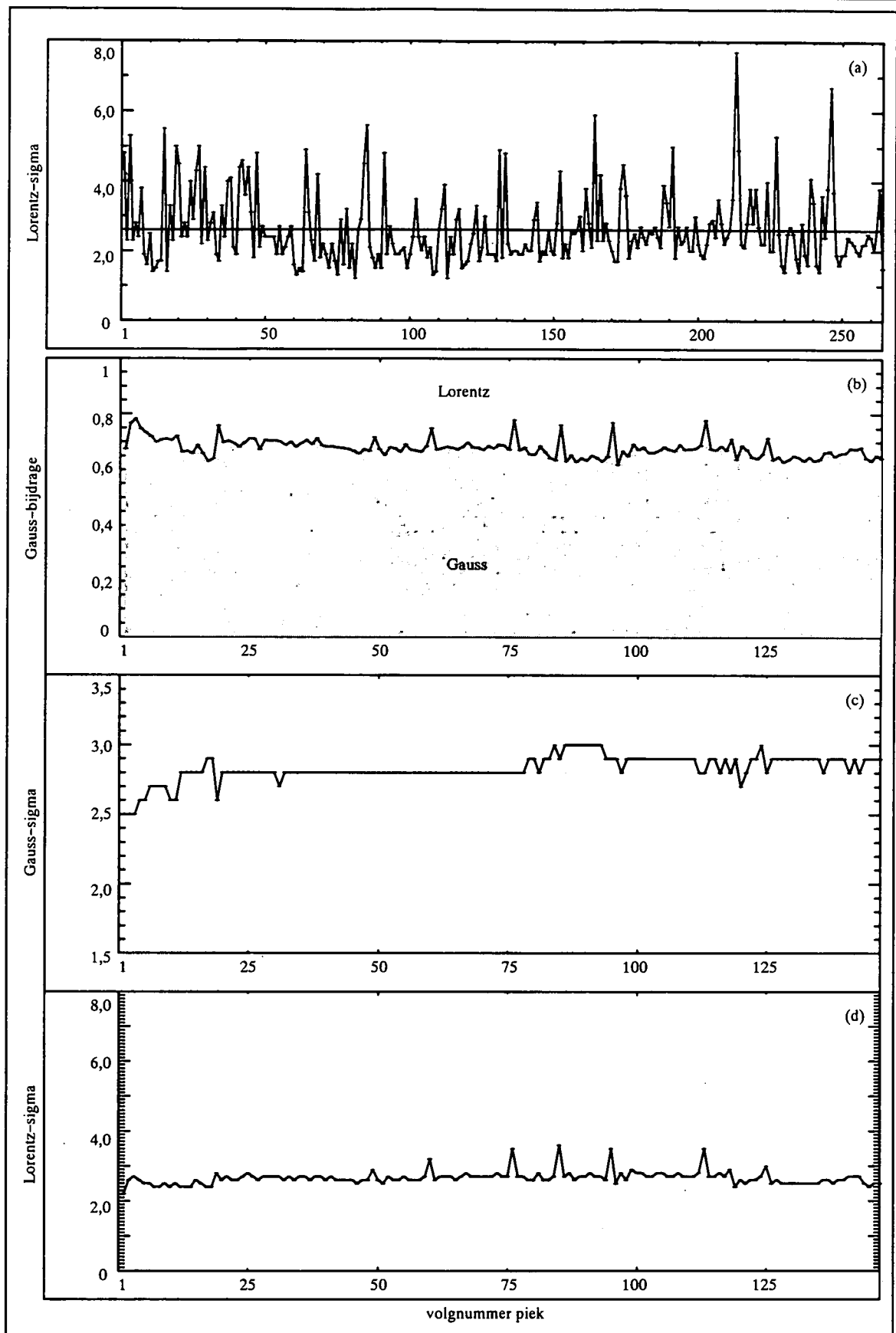
Een piek j in een SIDAMS/MACSIMS-spectrum kan dus in goede benadering beschreven worden als (6.5).

$$f(x) = 0,76 \cdot S[p_m(j)] \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - p_m(j)}{2,6} \right)^2 \right] + \frac{0,24 \cdot S[p_m(j)]}{1 + \left(\frac{x - p_m(j)}{2,6} \right)^2} \quad (6.5)$$

Hierbij kunnen $p_m(j)$ (het pixelnummer van de piektop) en $S[p_m(j)]$ (de pixelwaarde bij de top) eenvoudig afgelezen worden uit het spectrum.



Figuur 6.18: Implementatie van het fittingalgoritme op niet-selectieve groepen.



Figuur 6.19: Implementatie van het fittingalgoritme op niet-selectieve groepen.

6.3.8. Validatie van de methode aan de hand van synthetische dubbelpieken

Er werd een reeks van 21 synthetische spectra samengesteld die elk bestaan uit 1024 punten en 1 cluster bevatten met twee overlappende Gauss-Lorentz-pieken $f_{GL}(x; \alpha_{GL}^1)$ en $f_{GL}(x; \alpha_{GL}^2)$.

De eerste piek j_1 heeft in alle spectra een constante parametervector, namelijk $\alpha_{GL}^1 = [A_G^1 \ A_L^1 \ M_{GL}^1 \ \sigma_L^1 \ \sigma_G^1] = [1000 \ 300 \ 600 \ 2,5 \ 2,0]$

De oppervlakte van deze piek, gesommeerd over de 1024 punten in het spectrum, is (6.6).

$$O(j_1) = \sum_{i=1}^{1024} f_{GL}(i; \alpha_{GL}^1) = \sum_{i=1}^{1024} \left[1000 \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{i-600}{2,5} \right)^2 \right] + \frac{300}{1 + \left(\frac{i-600}{2,0} \right)^2} \right] = 6779,78 \quad (6.6)$$

De parameters van de tweede piek j_2 krijgen in de 21 spectra een andere waarde. Alleen het piekmidden M_{GL}^2 wordt vastgehouden op 611 ($\alpha_{GL}^2 = [A_G^2 \ A_L^2 \ 611 \ \sigma_L^2 \ \sigma_G^2]$). In figuur 6.20a worden de parameters van piek j_2 schematisch weergegeven (brede bruine blokken voor Gauss-, smalle rode voor Lorentz-parameters, volle blokken voor de amplitude, onderbroken blokken voor sigma).

De oppervlakte van piek j_2 wordt voor elk van de 21 spectra uitgerekend door ook hier weer te sommeren over de 1024 punten in het spectrum (6.7).

$$O(j_2) = \sum_{i=1}^{1024} f_{GL}(i; \alpha_{GL}^2) = \sum_{i=1}^{1024} \left[A_G^2 \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{i-611}{\sigma_G^2} \right)^2 \right] + \frac{A_L^2}{1 + \left(\frac{i-611}{\sigma_L^2} \right)^2} \right] \quad (6.7)$$

De trapcurve (zwart) in figuur 6.20b geeft de exacte procentuele verhouding aan van de oppervlakte van piek j_1 ten opzichte van deze van piek j_2 in de 21 spectra ($100 \cdot \frac{O(j_2)}{O(j_1)}$).

Elk van de 21 spectra werd vervolgens behandeld met het hiervoor beschreven Marquardt-Levenberg-fittingalgoritme (geen achtergrond-, niet-uniformiteits- of itv-correcties en geen kwantificering of filtering) met als uiteindelijk resultaat een Gauss-Lorentz-fit tussen de linkergrens van piek j_1 en de rechtergrens van piek j_2 . De

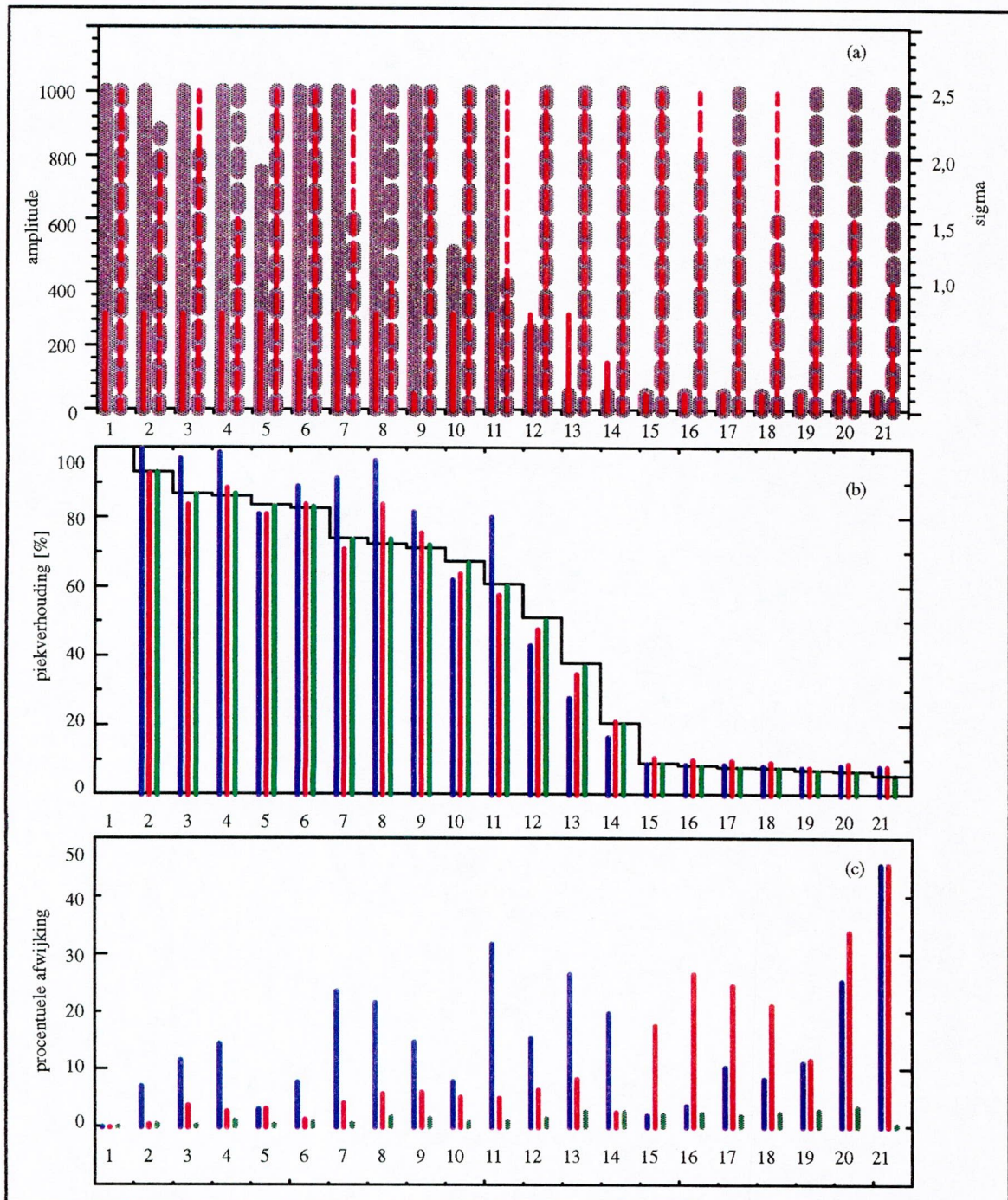
oppervlakten van de pieken onder de gefitte curve zijn dan : $O_{fit}(j_1) = \sum_{i=p(j_1)}^{p(j_2)} f_{GL}(i; \alpha_{GL_{min}}^1)$ en

$$O_{fit}(j_2) = \sum_{i=p(j_1)}^{p(j_2)} f_{GL}(i; \alpha_{GL_{min}}^2).$$

In figuur 6.20b worden de procentuele verhoudingen ($100 \cdot \frac{O_{fit}(j_2)}{O_{fit}(j_1)}$) van deze oppervlakten voorgesteld (groene balkjes). Ze kunnen er vergeleken worden met de reële verhoudingen ($100 \cdot \frac{O(j_2)}{O(j_1)}$). Ter vergelijking worden in figuur 6.20b ook de procentuele verhoudingen gegeven van de piekmaxima (blauwe balkjes) en van de zogeheten ruwe oppervlakten ($100 \cdot \frac{O_{ruw}(j_2)}{O_{ruw}(j_1)}$) (rode balkjes). Deze laatste twee worden ook wel eens gebruikt als schatter voor verhoudingen van

ionenpieken. De ruwe oppervlakten zijn de oppervlakten die bekomen worden door de somming van de gefitte waarden tussen de piekgrenzen van de individuele pieken :

$$O_{ruw}(j_1) = \sum_{i=p_l(j_1)}^{p_r(j_1)} f_{GL}(i; a_{GL_{min}}^1) \text{ en } O_{ruw}(j_2) = \sum_{i=p_l(j_2)}^{p_r(j_2)} f_{GL}(i; a_{GL_{min}}^2).$$



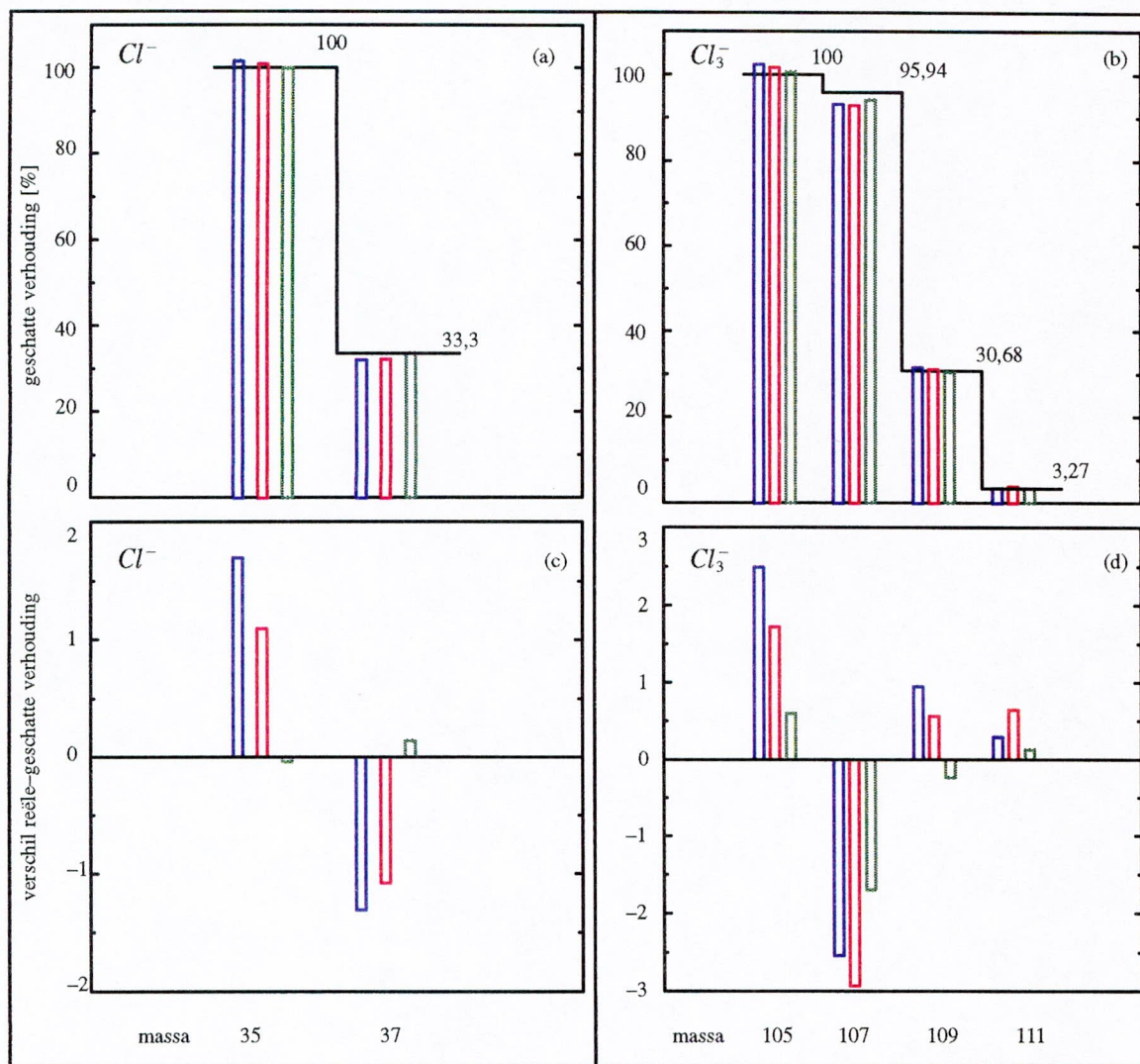
Figuur 6.20: Validatie van het fittingalgoritme met behulp van synthetische spectra.

Figuur 6.20c geeft voor elk van de drie benaderende piekverhoudingen de procentuele fout ten opzichte van de reële oppervlakteverhouding. Hieruit blijkt duidelijk dat het gebruik van de piekmaxima resp van de ruwe oppervlakten als schatter voor de verhouding van twee pieken leidt

tot een gemiddelde fout van meer dan 10% (15,62 resp 11,84 %). De gemiddelde fout die wordt gemaakt door de gefitte oppervlakten te gebruiken bedraagt slechts 1,44%. De grootste fout die met de gefitte oppervlakten werd gemaakt bedroeg 3,3%.

6.3.9. Validatie van de methode aan de hand van isotopenverhoudingen

Om te bewijzen dat het gebruik van het piekanalysealgoritme ook in de praktijk goede resultaten oplevert, worden in figuur 6.21 gemiddelde waarden getoond van de verhoudingen van de piekmaxima (blauw), de ruwe (rood) en de gefitte oppervlakten (groen) van de isotopenpieken van Cl^- en Cl_3^- zoals ze voorkomen in de spectra van de vlucht van 23 november 1995 (het spectrum in figuur 6.8 is er één van). In figuren 6.21(a) en (b) worden de gevonden gemiddelde verhoudingen vergeleken met de reële isotopenverhouding (100/33,33 voor Cl^- en 100/95,94/30,68/3,27 voor Cl_3^-) (zwarte trapcurve), in figuren 6.21 (c) en (d) wordt telkens het verschil uitgezet tussen de berekende en de reële isotopenverhoudingen.

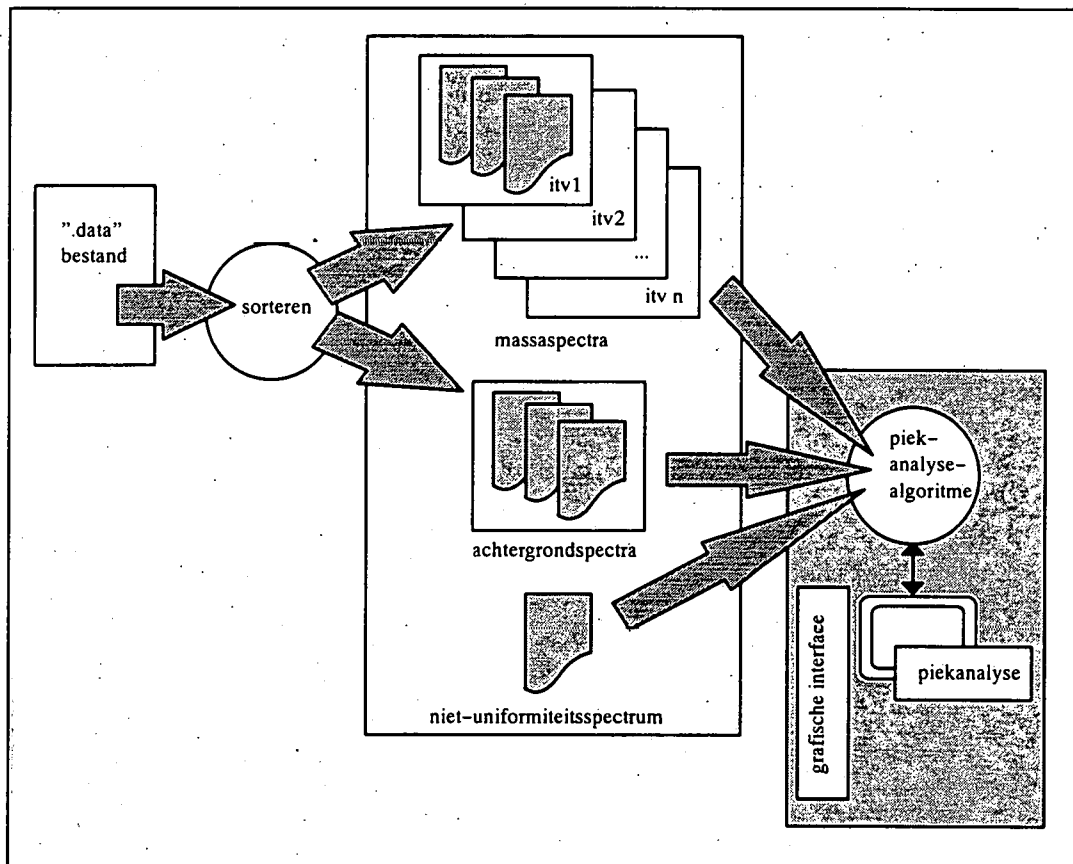


Figuur 6.21: Validatie van het fittingalgoritme met behulp van isotopenverhoudingen.

6.3.10. Integratie van het algoritme in een grafische interface

Het piekanalysealgoritme werd volledig geautomatiseerd en, naar analogie met de grafische interfaces in de bedieningsterminal aan de grond (zie 5.4), gekoppeld aan een gebruiksvriendelijke grafische interface.

Achter deze grafische interface gaan twee modules schuil (figuur 6.22). Een eerste module staat in voor de sortering van de gegevens. Het oorspronkelijke telemetingbestand uit de vlucht (".data"-bestand) wordt er volledig ontrafeld. De spectra worden geklasseerd in een *directory*-structuur al naargelang de itv-waarde waarbij ze werden opgenomen. Achtergrondspectra worden apart bewaard en het stel gegevens wordt vervolledigd door een niet-uniformiteitsspectrum.



Figuur 6.22: Van telemetingbestand tot piekanalyse.

In de tweede module wordt het eigenlijke piekanalysealgoritme uitgevoerd op een spectrum dat door de gebruiker wordt geselecteerd in de *directory*-structuur (*File Dialog Box* achter de "Select New Spectrum Input File/Run"-druktoets). De module zoekt zelfstandig in de *directory*-structuur naar het bijhorende achtergrond- en niet-uniformiteitsspectrum.

Met deze drie spectra en de kennis van de hiervoor aangehaalde intrinsieke algoritmeparameters (filterbreedte b , kwantificeringswaarde D , overlap o , piekcontrast p , intervalbreedte w , dalingspercentage l , randpixels r , ruisniveau R , drempelniveau R' , onevenwichtsfactor F_{diseq} en het aantal Marquardt-Levenberg-iteraties) als *input* levert het algoritme een lijst van de gevonden pieken. Van elke piek worden in een terminalvenster de pixelpositie en de

pixelwaarde van top, linker- en rechtergrens, de ruwe en gefitte oppervlakte, de status in de catalogus (links-, rechts-, dubbel- of niet-overlappend) en de geassocieerde ionenmassa opgesomd. Indien gewenst kunnen ook de vijf geoptimaliseerde Gauss-Lorentz-parameters voor elke piek voorgesteld worden ("Output"-druktoets).

Het algoritme beschikt over een standaard stel parameters (*default*) maar die kunnen door de gebruiker gewijzigd worden in functie van de te verwerken data (een editeerbaar menu met alle algoritmeparameters verschijnt bij het aanklikken van de "Change Parameters/Save Parameters/Run fit"-druktoets).

Naast de tekstuele lijst van pieken wordt het gefitte Gauss-Lorentz-spectrum ook grafisch voorgesteld. Bij elke piek in het beeld verschijnt een volgnummer dat verwijst naar de pieklijst. Achter de "View"-druktoets gaat een menu schuil van waaruit de drie *input*-spectra (ruw massaspectrum, achtergrond- en niet-uniformiteitspectrum) en een aantal intermediaire spectra (na achtergrondcorrectie, na niet-uniformiteitscorrectie, na filtering en/of kwantificering) individueel of tezamen grafisch kunnen in beeld gebracht worden. Ook het verschil tussen het ruwe en gefitte spectrum kan gevisualiseerd worden.

Op de afgebeelde spectra kan ingezoemd worden volgens beide assen (met de muis afbakenen van de gewenste zone voor X, schuifbalken voor Y) en weergekeerd naar de oorspronkelijke schaal ("Autoscale"-druktoetsen).

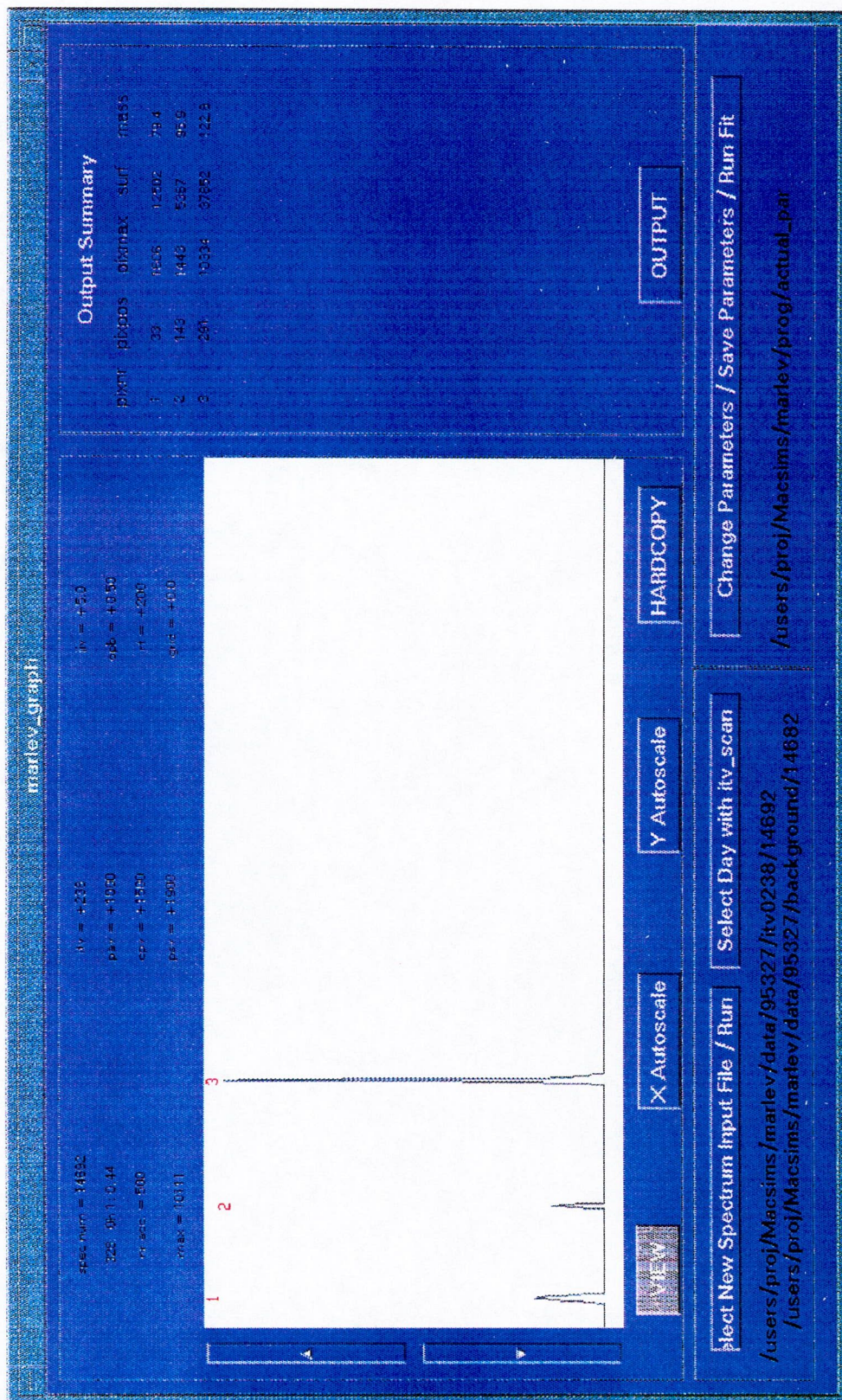
Elk spectrum wordt op het scherm vergezeld door de informatie die ook tijdens de vlucht in de bedieningsterminal aan de grond bij elk spectrum wordt vermeld, namelijk : het spectrumnummer, de tijd, het aantal accumulaties, de maximum waarde in het spectrum, de 4 hoogspannings- en de 4 rf- en dc-spanningswaarden. In figuur 6.23 wordt de grafische interface getoond.

Het is de uiteindelijke bedoeling het piekanalysealgoritme niet slechts op één maar op een groep van spectra uit te voeren ("Select Group"-druktoets). Pas dan kan men spreken van automatisering en zal een grote tijdwinst geboekt worden. Zo werden de 563 massaspectra uit de vlucht van 23 november 1995 gelijktijdig verwerkt. Na automatisch triëren van de spectra in de *directory*-structuur werd eerst manueel een stel van optimale algoritmeparameters bepaald aan de hand van enkele willekeurig gekozen spectra. Deze parameters werden behouden voor alle behandelde spectra. In totaal werden 4985 pieken gedetecteerd en behandeld in een tijdsperiode van ongeveer 1 uur. Bij inspectie achteraf bleek het aantal anomalieën klein te zijn en konden ze volledig weggewerkt worden door kleine wijzigingen aan de algoritmeparameters aan te brengen.

6.3.11. Opmerkingen bij toepassing op reële spectra

Voor de meeste pieken en clusters levert het programma een goede grensbepaling op, een juiste catalogering en uitstekende fits. Toch houdt het algoritme geen rekening met artefacten die in bepaalde spectra voorkomen. Deze artefacten zijn veelal ook moeilijk automatisch op te sporen : bijvoorbeeld spookpieken, piekvormen die abnormale proporties aannemen, plateaus met gesuperponeerde pieken, enz. Het is duidelijk dat voor het ontdekken van deze afwijkingen visuele inspectie nodig blijft. Een studie van dit probleem en het zoeken naar automatische opsporingsmethoden blijft tot de mogelijkheden behoren.

Ook de mogelijkheid dat na achtergrondcorrectie een aantal spectrumwaarden negatief worden, waardoor ingestelde parameters zoals het ruisniveau R en het drempelniveau R' niet relevant zijn, kan problemen opleveren.



Figuur 6.23: De grafische interface voor het piekanalysealgoritme.

Sommige spectra vertonen zeer veel pieken, die dan ook, terecht, door het programma worden gecatalogeerd in clusters met 6, 7, 8 of meer pieken. Voor zulke clusters wordt het aantal te

optimaliseren parameters in het Marquardt–Levenberg–algoritme te groot, zodat geen convergentie meer optreedt.

In zulke gevallen zou het algoritme kunnen verlicht worden door bijvoorbeeld de parameter M_{cl} vast de pixelwaarde van het piekmaximum mee te geven of door te stellen dat de Gauss- en de Lorentz-sigma gelijk moeten blijven. Een andere manier zou de artificiële opsplitsing zijn van de cluster op de meest aangewezen plaats (bijvoorbeeld daar waar de laagste gemeenschappelijke piekgrens tussen twee overlappende pieken ligt), vervolgens de verschillende delen afzonderlijk te fitten en uiteindelijk te voorzien in een aanpassing en correctie aan de splitsing.

Alleszins blijft een belangrijke vereiste voor goede resultaten de aanwezigheid van representatieve achtergrond-, niet-uniformiteits- en itv-correctiespectra.

6.4. Besluit

De uiterst geslaagde ballonvlucht van 23 november 1995 en de grote hoeveelheid aan verzamelde wetenschappelijke resultaten illustreren de geldigheid van de technische realisaties en gebruikte hardware- en softwaretechnieken, zowel wat de productie van ionen, de registratie van massa- en vluchttijdspectra als de besturing en bewaking van het instrument betreft.

Het piekanalysealgoritme zorgt voor automatisering van de eerste tijdrovende stap van de gegevensverwerking na de vlucht : detectorcorrecties, top- en grensbepaling en oppervlakteberekening kunnen op uitgebreide datasets uitgevoerd worden zonder manuele tussenkomst.

Zonder naar een fysische verklaring te zoeken stellen we vast dat het overgrote deel van de ionenpieken kan voorgesteld worden door een Gauss–Lorentz-profiel met gemeenschappelijk centrum en waarvan de respectievelijke sigmawaarden in eerste benadering gelijk zijn, maar waarin de Gauss-bijdrage tot de amplitude driemaal groter is dan de Lorentz-bijdrage. Van deze kennis wordt gebruik gemaakt om de bijdrage van individuele pieken in clusters van overlappende pieken op een realistische manier te onderscheiden.

Het algoritme houdt momenteel geen rekening met speciale fenomenen zoals spookpieken of onverwacht gedrag van het achtergrondniveau. Toch werd het met succes toegepast bij de analyse van de vluchtgegevens van 23 november 1995.

Hoofdstuk 7

Algemeen besluit

De doelstelling van het SIDAMS/MACSIMS-project is het bepalen van concentraties van sporegassen zoals HNO_3 en N_2O_5 in de stratosfeer omdat ze er een belangrijke rol spelen in de afbraak van ozon. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de techniek van actieve chemi-ionisatie in combinatie met een massaspectrometer die in staat is simultaan ionen te detecteren. De instrumentatie die nodig is voor de besturing van het massaspectrometergedeelte en het actief chemi-ionisatiepakket werd volledig opgebouwd.

De ontwikkelde hard- en software, zowel aan boord als aan de grond, zorgen in eerste instantie voor een correct functioneren van het SIDAMS/MACSIMS-instrument en helpen zo de gestelde wetenschappelijke doelstellingen te realiseren. Daarenboven werd getracht het intrinsiek complexe instrument te laten schuilgaan achter een eenvoudige en duidelijke interface naar de gebruiker toe.

Om wetenschappelijk en technologisch waardevol te zijn moet het SIDAMS/MACSIMS-instrument een aantal functies gelijktijdig en/of goed gesynchroniseerd kunnen uitvoeren (bewaking, ionenproductie, massascheiding, registratie van spectra, vluchttijdmetering, enz.), moet het resultaten in reële tijd aan de gebruiker kunnen aanbieden (telemetering) en moet het ondertussen te allen tijde toegankelijk blijven voor interventies van de gebruiker (telecommando). Het SIDAMS/MACSIMS-instrument voldoet aan al deze eisen doordat het steunt op vijf fundamenteën.

Een eerste pijler is de integratie van drie processorsystemen, die onderling met mekaar communiceren, maar naar de gebruiker toe als één geheel worden geprofileerd. Twee processors worden uitgerust met een volledig op maat van het instrument ontworpen beheersysteem dat in reële tijd werkt en parallelisatie van taken mogelijk maakt.

Een tweede steunpunt is de modulaire opbouw van de besturingselektronica. Het algemeen concept waarbij een besturingsmodule wordt uitgerust met drie basisfuncties voor het schakelen, het uitsturen en het controleren van instrumentparameters en waarbij een speciale hardware-softwarecombinatie zorgt voor een gestandaardiseerde interface met de processor wordt veelvuldig toegepast.

Als derde pijler werd een gebruiksvriendelijke tekstgerichte telecommandointerface uitgebouwd en geïntegreerd in de telecommunicatie-infrastructuur van het CNES. Deze interface brengt het instrument tijdens de vlucht als het ware binnen handbereik van de gebruiker. Daarbij komt nog de ontwikkeling van een software werkomgeving met UNIX-kenmerken

zoals het gebruik van *scripts*, globale variabelen, plaatsafhankelijke parameters en andere nuttige eigenschappen, waardoor het instrument zeer flexibel wordt in het gebruik, waardoor de uitvoeringssnelheid en daarmee de bereikbare hoogteresolutie toeneemt en waardoor het instrument tijdens een vlot verlopende vlucht quasi automatisch kan werken.

Het vierde steunpunt is een ijkingsmethode die het mogelijk maakt instrumentparameters in te stellen en op te meten gebruik makend van reële fysische eenheden. Op deze manier wordt de kennis van de achterliggende hard- en software overbodig voor de besturing van het instrument.

Tenslotte werd er in de bedieningsterminal aan de grond voor gezorgd dat alle functies die het instrument vervult eveneens in reële tijd en gelijktijdig ondersteund worden. Zowel de telecommando- als de telemetinginterfaces worden grafisch uitgewerkt, wat de sturing van het instrument vergemakkelijkt en een goed overzicht geeft van de toestand van het instrument aan de hand van bewakingsgegevens en van de opgemeten spectra.

Voor de voeding van een aantal instrumentonderdelen moesten speciale modules op maat ontwikkeld worden : stabiele hoogspanningsvoedingen in de massaspectrometer (de stabiliteit van de itv-voeding werd extra verzorgd om een goede massa-resolutie te bekomen), een hoogfrequente octopoolvoeding, een voeding voor de turbine en ionenbronvoedingen die kunnen gepulst worden teneinde vluchtmetingen uit te voeren.

Wanneer men concentraties van minderheidsgassen in de atmosfeer wil bepalen gebruik makend van de methode van de actieve chemi-ionisatie moeten in de eerste plaats geproduceerde moederionen en ontstane produktionen opgemeten worden in een massaspectrometer. De realisaties in deze thesis maken het enerzijds mee mogelijk voor de nodige ionenproduktie en anderzijds voor simultane ionendetectie te zorgen. Toch is de kennis van de verhouding van bepaalde ionenconcentraties niet voldoende voor de bepaling van de sporegasconcentraties. Uiteraard moeten ook de betrokken reacties en reactiesnelheden gekend zijn, maar verder ook de verblijftijd van de ionen in het reactiemidden, in dit geval de stromingsbuis. De ontwikkeling in deze thesis van een vluchtmeting, bestaande uit een gevoelige elektrometer en een pulssysteem voor de ionenbronnen, lost deze laatste onbekende op voor het SIDAMS/MACSIMS-instrument.

Bij de ontwikkeling van instrumentatie moest voortdurend rekening gehouden worden met de werkomgeving van dit ballongedragen instrument. Aangezien het in een breed temperatuurdomein goed moet blijven functioneren, werden de gebruikte componenten zorgvuldig gekozen en wordt tijdens de vluchten een uitgebreide instrument- en omgevingsbewaking in reële tijd voorzien. De afsluitsystemen die nodig zijn om het intern vacuüm in het instrument tijdens de stijgfase van een ballonvlucht te beschermen werden voorzien van een bedrijfszekere en goed beveiligde openingsprocedure. Ook voor het veilig transport van data naar de grond en het aan- en afschakelen van instrumentonderdelen, problemen die gekoppeld zijn aan het op afstand bedienen van het instrument, werden oplossingen gevonden.

De succesvolle vlucht van 23 november 1995 heeft bewezen dat het instrument volledig functioneel is. De ontwikkelde instrumentatie werkt naar behoren, zowel in het actief chemi-ionisatiepakket als in het massaspectrometergedeelte. Bovendien werden voor het eerst vluchtijdspectra genomen. De data van deze vlucht worden momenteel binnen de wetenschappelijke teams van de drie deelnemende partners aan dit project geanalyseerd. Dit leverde onder andere al hoogtopprofielen op voor HNO_3 .

Het eerste deel van de gegevensverwerking dat vroeger manueel gebeurde werd geautomatiseerd in een piekanalysealgoritme. Dit houdt in dat detectorcorrecties en het bepalen van toppen, grenzen en oppervlakten voor alle pieken in alle spectra van een meet sessie, bijvoorbeeld een

volledige vlucht, tegelijk uitgevoerd worden. In de SIDAMS/MACSIMS-spectra worden vaak clusters aangetroffen van overlappende pieken. Om hun individuele bijdrage beter te bepalen werd een algemene karakterisering van de pieken uitgevoerd. Een combinatie van een Gauss- en een Lorentz-profiel blijkt in de meeste gevallen de beste resultaten op te leveren. Het piekanalysealgoritme werd met succes uitgevoerd op meer dan 560 massaspectra uit de laatste ballonvlucht.

Referenties

- [Amel 94] C. Amelynck, D. Fussen, E. Arijs, "Reactions of nitric acid with di- and tri-chloride ions and with CO₂ in the gas phase", Int. J. Mass Spectr. Ion Proc., vol. 133, pp. 13-28, 1994.
- [Amel 95a] C. Amelynck, "Studie van ion-molecule reacties van halogeenionen met stratosferische minderheidsgassen en implicaties voor actieve chemi-ionisatiemethodes in de stratosfeer", Verslag van het werkjaar oktober 1994 - september 1995.
- [Arij 80] E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, "Unambiguous mass determination of major stratospheric positive ions", Nature, vol. 288, pp. 684-686, december 1980.
- [Arij 82] E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, "Stratospheric positive ion composition measurements, ion abundances and related trace gas detection", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 44, nr. 1, pp.43-53, 1982.
- [Arij 83a] E. Arijs, "Positive and negative ions in the stratosphere", Annales Geophysicae, vol. 1, pp.149-152, 1983.
- [Arij 83b] E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, P. Frederick, "Sulfuric acid vapour derivations from negative ion composition data between 25 and 34 km", Geophys. Res. Lett., vol. 10, nr. 4, pp. 329-332, april 1983.
- [Arij 83c] E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, "Positive ion composition measurements and acetonitrile in the upper stratosphere", Nature, vol. 303, pp. 314-316, mei 1983.
- [Arij 85] E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, P. Frederick, "Recent stratospheric negative ion composition measurements between 22 and 45 km altitude", J. Geophys. Lett., vol. 90, nr. D4, pp. 5891-5896, 1985.

- [Arij 86] E. Arijs, G. Brasseur, "Acetonitrile in the stratosphere and implications for positive ion composition", J. Geophys. Res., vol. 91, nr. D3, pp. 4003-4016, maart 1986.
- [Arij 92] E. Arijs, "Stratospheric ion chemistry : present understanding and outstanding problems", Planet. Space Sci., vol. 40, pp. 255-270, 1992.
- [Arno 80] F. Arnold, R. Fabian, G. Henschen, W. Joos, "Stratospheric trace gas analysis from ions : H₂O and HNO₃", Planet. Space Sci., vol.28, pp. 681-685, 1980.
- [Arno 87] F. Arnold, G. Knop, "Stratospheric trace gas detection using a new balloon-borne ACIMS method", Int. J. Mass Spec. Ion Proc., vol. 81, pp. 33-44, 1987.
- [Bala 63] A. Balakrishnan, "Space Communications", McGraw-Hill, 1963.
- [Bank 73] P.M. Banks, G. Kockarts, "Aeronomy", Part A & B, Academic Press, 1973.
- [Brac 89] P. Bracher, U. Jenzer, "T4 SIDAMS pixel processor, Hardware manual", Physikalisches Institut Universität Bern, december 1989.
- [Bras 84] G. Brasseur, S; Solomon, "Aeronomy of the middle atmosphere", D. Reidel Publishing Company, 1984.
- [CNES 76] "Les Lancements de ballons, Guide à l'usage des expérimentateurs", CNES, 1976.
- [CNES 81] "Nouveaux équipements de télécommande. Spécification des interfaces", CNES, 1981.
- [Crut 86] P. Crutzen, F. Arnold, "Nitric acid cloud formation in the cold Antartctic stratosphere : a major cause for the springtime 'ozone hole'", Nature, vol. 324, pp. 651-655, december 1986.
- [Fehs 75] F. Fehsenfeld, C. Howard, A. Schmeltekopf, "Gas phase ion chemistry of HNO₃", J. Chem. Phys, vol. 63, nr. 7, pp. 2835-2841, oktober 1975.
- [Font 95] D. Fonteyn, J.-F. Müller, N. Larsen, "Modelling polar stratospheric clouds and their influence on ozone", N.S.T., vol.13, nr. 2/3/4, pp. 147-154, 1995.

- [Font 96] D. Fonteyn, N. Larsen, "Detailed PSC formation in a two-dimensional chemical transport model of the stratosphere", Ann. Geophysicae 14, pp. 315–328, 1996.
- [Fuss 89] D. Fussen, E. Arijs, D. Nevejans, "The effect of collisionally dissociation in balloon borne stratospheric mass spectrometry of positive ions", Int. J. Mass Spectr. Ion Proc., vol. 91, pp. 301–316, 1989.
- [Hägg 86a] C. Hägg, I. Szabo, "New ion-optical devices utilizing oscillatory electric fields, III. Stability of ion motion in a two-dimensional octopole field", Int. J. Mass Spectr. Ion Proc., vol. 73, pp. 277–294, 1986.
- [Hägg 86b] C. Hägg, I. Szabo, "New ion-optical devices utilizing oscillatory electric fields, IV. Computer simulations of the transport of an ion beam through an ideal quadrupole, hexapole and octopole operating in the rf-only mode", Int. J. Mass Spectr. Ion Proc., vol. 73, pp. 295–312, 1986.
- [Hans 91] D. Hanson, R. Ravishankara, "The reaction probabilities of ClONO₂ and N₂O₃ on polar stratospheric cloud material", J. Geophys. Res., vol. 96, nr. D3, pp. 5081–5090, maart 1991.
- [Hedd 91] D. Heddle, "Electrostatic lens systems", Adam Hilger, 1991.
- [Inge 78] J. Ingels, E. Arijs, D. Nevejans, H. Forth, G. Schäffer, "Liquid helium cryopump and reliable opening device for balloon borne mass spectrometer", Rev. Sci. Instr., vol. 49, pp. 782–784, 1978.
- [Inge 87] J. Ingels, D. Nevejans, P. Frederick, E. Arijs, "Acetonitrile and sulfuric acid concentrations derived from ion composition measurements during the MAP/GLOBUS 1983 campaign", Planet. Space Sci., vol. 35, nr. 5, pp. 685–691, 1987.
- [Jaya 66] R. Jayaram, "Mass spectrometry, Theory and applications", Plenum Press, 1966.
- [Jenz 90] U. Jenzer, "T4 SIDAMS pixel processor, Software manual", Physikalisches Institut Universität Bern, februari 1990.
- [Knop 87] G. Knop, F. Arnold, "Atmospheric acetonitrile measurements in the tropopause region using aircraft-borne active chemical ionization mass spectrometry", Planet. Space Sci., vol. 35, nr. 2, pp. 259–266, 1987.
- [McEl 86] M. McElroy, R. Salawitch, S. Wofsy, J. Logan, "Reductions of Antarctic ozone to synergistic interactions of chlorine and bromine", Nature, 321, 759–762, 1986.

- [Möhl 91] O. Möhler, F. Arnold, "Flow reactor and triple quadrupole mass spectrometer investigations of negative ion reactions involving nitric acid : implications for atmospheric HNO₃ detection by chemical ionization mass spectrometry", J. Atmosph. Chem., vol. 13, pp. 33-61, 1991.
- [Moli 87] L. Molina en M. Molina, "Production of Cl₂O₂ from self-reaction of the ClO-radical", J. Phys. Chem., 91, 433, 1987.
- [Moli 91] M. Molina, "Heterogeneous chemistry on polar stratospheric clouds", Atmospheric Environment, vol. 25A, nr. 11, pp. 2535-2537, 1991.
- [Moor 89a] R. Moor, "Massenanalysator und Detektor des Atmosphären-Massespektrometers SIDAMS : Entwicklung und Tests im Labor", Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde, Physikalisches Institut Universität Bern, 1989.
- [Moor 89b] R. Moor, E. Kopp, U. Jenzer, H. Ramseyer, U. Wälchli, E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, D. Fussen, A. Barassin, C. Reynaud, "A double focussing mass spectrometer for simultaneous ion measurements in the stratosphere", in Proceedings of ESA-PAC symposium on European rocket and balloon programmes and related research, ESA-SP-219, pp. 129-134, ESA, Lahnstein, Duitsland, april 1989.
- [Murc 94] F. Murcray, J. Starkey, W. Williams, W. Matthews, U. Schmidt, P. Aïmedieu, C. Camy-Peyret, "HNO₃ profiles obtained during the EASOE campaign", Geophys. Res. Lett., vol. 21, nr. 13, pp. 1223-1226, juni 1994.
- [Neve 79] D. Nevejans, "Detectie van positieve ionen in de stratosfeer", Aeronomica Acta, Acta A nr. 210, 1979.
- [Neve 82] D. Nevejans, P. Frederick, E. Arijs, "Microprocessor based data acquisition and control system for a balloon borne quadrupole mass spectrometer", Bull. Cl. Sci. Acad. Roy. Belg., vol. 67, pp. 314-332, 1982.
- [Neve 85] D. Nevejans, J. Ingels, E. Arijs, "Measurement and identification of stratospheric ions with balloon borne instruments", in Handbook for MAP, vol. 15, (D.G. Murcray ed.) pp. 124-138, ICSU Scientific Committee on SCOSTEP, Urbana, Illinois, VS, 1985.
- [Nico 75] M. Nicolet, "On the production of nitric oxide by cosmic rays in the mesosphere and stratosphere", Planet. Space Sci., 23, 637, 1975.

- [Ölha 94] H. Öhlaf, T. von Clarmann, H. Fischer, F. Friedl-Vallon, C. Fritzsche, A. Linden, C. Piesch, M. Seefeldner, W. Völker, "Stratospheric ClONO_2 and HNO_3 profiles inside the Arctic vortex from MIPAS-B limb emission spectra obtained during EASOE", Geophys. Res. Lett., vol. 21, nr. 13, pp. 1263-1266, juni 1994.
- [Pres 92] W. Press, W. Vetterling, S. Terikolsky, B. Flannery, "Numerical recipes. The art of scientific computing", Cambridge University Press, 1992.
- [Rams 86] H. Ramseyer, "Messung der Ionenzusammensetzung in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre während der CAMP-Kampagne vom August 1982", Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde, Physikalisches Institut Universität Bern, 1986.
- [Ritt 86] T. Ritter, "The Great CRC Mystery", Dr. Dobb's Journal, pp. 26-34, pp. 76-83, february 1986.
- [Rose 81] J. Rosen, D. Hofmann, "Balloon-borne measurements of the small ion concentration", J. Geophys. Res., 86, 7399-7405, 1981.
- [Rytz 88] C. Rytz, "Oktopol zur Führung von Ionen in einer Kryopompe nach der Gasexpansion", Lizentiatarbeit, Physikalisches Institut Universität Bern, mei 1993.
- [Rytz 93] C. Rytz, "Stratosphären-Massenspektrometer SIDAMS : Auswertung des Erstflugs zur Messung positiver Ionen und Entwicklung der Konfiguration für Negativen Ionen", Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde, Physikalisches Institut Universität Bern, 1993.
- [Rytz 94] C. Rytz, E. Kopp, P. Eberhardt, "Simultaneous ion detection mass spectrometer for the measurement of stratospheric trace gases", Int. J. Mass Spec. Ion Proc., vol. 137, pp. 55-66, 1994.
- [Sala 93] R. Salawitch, S. Wofsy, E. Gottlieb, L. Lait, P. Newman, M. Schöberl, M. Löwenstein, J. Podolske, S. Strahan, M. Proffitt, C. Webster, R. May, D. Fahey, D. Baumgardner, J. Dye, J. Wilson, K. Kelly, J. Elkins, K. Chan, J. Anderson, "Chemical loss of ozone in the arctic polar vortex in the winter of 1991-1992", Science, vol. 261, pp. 1146-1149, augustus 1993.
- [Spr 94] S. Spreng, F. Arnold, "Balloon-borne mass spectrometer measurements of HNO_3 and HCN in the winter Arctic stratosphere - Evidence for HNO_3 -processing by aerosols", Geophys. Res. Lett., vol. 21, nr. 13, pp. 1251-1254, juni 1994.

- [Spre 93] M. Sprecher, "Feld- und Bahnberechnungen am SIDAMS-Analysatorsystem und Vergleichsmessungen am negativen Balloninstrument", Lizentiatarbeit, Physikalisches Institut Universität Bern, mei 1993.
- [Tolb 88] M. Tolbert, M. Rossi, D. Golden, "Antarctic ozone depletion chemistry : reactions of N_2O_5 and HCl on ice surfaces", Science, vol. 240, pp. 1018-1021, mei 1988.
- [Toon 86] O. Toon, P. Hamill, R. Turco, J. Pinto, "Condensation of HNO_3 and HCl in the winter polar stratospheres", Geophys. Res. Lett., vol. 13, nr. 12, pp. 1284-1287, november 1986.
- [Vigg 83] A. Viggiano, F. Arnold, "Stratospheric sulfuric acid vapor : new and updated measurements", J. Geophys. Res., vol. 88, nr. C2, pp. 1457-1462, februari 1983.
- [Vigg 94] A. Viggiano, R. Morris, J. Van Doren, "Ion chemistry of $ClONO_2$ involving NO_3^- core ions : a detection scheme for $ClONO_2$ in the atmosphere", J. Geophys. Res., vol. 99, nr. D4, pp. 8221-8224, april 1994.
- [VRTX 84] "VRTX/86, Versatile Real-Time Executive for the iAPX86 Family", User's Guide, Version 3.0, Ready Systems, 1984.
- [Wälc 91] U. Wälchli, "Entwicklung der Einlassoptik und Eichung des Stratosphären-Massenspektrometers SIDAMS", Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde, Physikalisches Institut Universität Bern, 1991.
- [Webs 93] C. Webster, R. May, D. Toohey, L. Avallone, J. Anderson, P. Newman, L. Lait, M. Schöberl, J. Elkins, K. Chan, "Chlorine chemistry on polar stratospheric cloud particles in the Arctic winter", Science, vol. 261, pp. 1130-1133, augustus 1993.
- [Wetz 95] G. Wetz, T. von Clarmann, H. Öhlf, H. Fischer, "Vertical profiles of N_2O_5 , along with CH_4 , N_2O and H_2O in the late Arctic winter retrieved from MIPAS-B infrared limb emission measurements", J. Geophys. Res (Atmos.), 100, 23173-23181, 1995.
- [Whit 86] F. White, G. Wood, "Mass spectrometry, Applications in science and engineering", John Wiley and sons, 1986.
- [WMO16] "Global ozone research and monitoring project", WMO, report 16, p. 573.

Publicaties

- [Amel 95b] C. Amelynck, E. Arijs, E. Neefs, W. Vanderpoorten, E. Kopp, H. Reinhard, A. Barassin and C. Gimbaud, "New method for the derivation of stratospheric nitric acid and dinitrogen pentoxide concentrations, based on balloon borne active chemical ionization mass spectrometry. Method, instrument description and preliminary results", Poster op de 21^{ste} Algemene Vergadering van de International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Boulder, Colorado, VS, 2-14 juli 1995.
- [Amel 96a] C. Amelynck, E. Arijs, E. Neefs, D. Nevejans, W. Vanderpoorten, A. Barassin, C. Gimbaud, D. Labonnette, H.-P. Fink, E. Kopp and H. Reinhard, "MACSIMS, a new balloon borne active chemical ionization mass spectrometer to derive the concentrations of stratospheric trace gases", Oral Presentation on the 18th Quadrennial Ozone Symposium-96 L'Aquila, Italy, 12-21 september 1996.
- [Amel 96b] C. Amelynck, E. Arijs, J. Ingels, E. Neefs, D. Nevejans, W. Vanderpoorten, A. Barassin, C. Gimbaud, D. Labonnette, H.-P. Fink, E. Kopp, H. Reinhard, "Derivation of stratospheric trace gas concentrations by in-situ active chemical ionization mass spectrometry", Poster on the General Scientific Meeting of the Belgian Physical Society, Brussel, 6 en 7 juni 1996.
- [Arij 90] E. Arijs, E. Kopp, A. Barassin, R. Moor, D. Nevejans, U. Jenzer, U. Wälchli, C. Rytz, D. Fussen, C. Reynaud and E. Neefs, "Trace gas detection through passive and active ion mass spectrometry using a new type of balloon borne mass spectrometer", Proceedings of the first European Workshop on Polar Stratospheric Ozone Research, Air Pollution Research Report 34 of CEC pp. 111-114, Commission of the European Communities and Bundesministerium für Forschung und Technologie, FRG, Schliersee, Bavaria, October 1990.
- [Arij 94] E. Arijs, D. Nevejans, D. Fussen, E. Neefs, C. Amelynck, "MACSIMS : Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", IGBP and "Global Change" related research in Belgium II, 1994, pp. 92-93.
- [Arij 95] E. Arijs, D. Nevejans, J. Ingels, D. Fussen, P. Frederick, C. Amelynck, E. Neefs, W. Vanderpoorten, "Cosmic rays generated ions and trace gases in the stratosphere", N.S.T., vol.13, nr. 2/3/4, pp. 171-178, 1995.

- [Neef 96] E. Neefs, D. Nevejans, P. Frederick, F. Leclère, "Realisatie van Time of Flight-metingen met het MACSIMS-instrument. Hardware en software implementaties", Aeronomica Acta, Acta C nr. 59, februari 1996.

Tussentijdse en eindrapporten voor de Europese Gemeenschap.

"SIDAMS. Atmospheric trace gas mass spectrometry with simultaneous ion detection", Progress report on the contract STEP-0009-M(A), 28 February 1991.

"SIDAMS. Atmospheric trace gas mass spectrometry with simultaneous ion detection", Progress report on the contract STEP-0009-M(A), 1 March 1991 - 29 February 1992.

"SIDAMS. Atmospheric trace gas mass spectrometry with simultaneous ion detection", Final report on the contract STEP-0009-M(A), 1 March 1990 - 30 November 1992.

"MACSIMS. Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", Progress report on the contract EV5V-CT92-0062, 1 January 1993 - 30 June 1993.

"MACSIMS. Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", Progress report on the contract EV5V-CT92-0062, 1 July 1993 - 31 December 1993.

"MACSIMS. Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", Progress report on the contract EV5V-CT92-0062, 1 January 1994 - 30 June 1994.

"MACSIMS. Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", Progress report on the contract EV5V-CT92-0062, 1 July 1994 - 31 December 1994.

"MACSIMS. Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", Progress report on the contract EV5V-CT92-0062, 1 January 1995 - 30 June 1995.

"MACSIMS. Measurement of atmospheric constituents by selective ion mass spectrometry", Final report on the contract EV5V-CT92-0062, 1 January 1993 - 31 December 1995.

De volgende documenten zijn bestemd voor interne verspreiding in het BIRA, maar kunnen door geïnteresseerden worden opgevraagd.

E. Neefs, "MACSIMS. Organigrammen van de software aan boord van het massaspectrometergedeelte", Aeronomica Acta, Acta B nr. 57, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Code van de software aan boord van het massaspectrometergedeelte", Aeronomica Acta, Acta B nr. 58, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Organigrammen van de software aan boord van het actief chemi-ionisatiepakket", Aeronomica Acta, Acta B nr. 59, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Code van de software aan boord van het actief chemi-ionisatiepakket", Aeronomica Acta, Acta B nr. 60, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Organigrammen van de software in de bedieningsterminal aan de grond", Aeronomica Acta, Acta B nr. 61, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Code van de software in de bedieningsterminal aan de grond", Aeronomica Acta, Acta B nr. 62, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Organigrammen en code van het piekanalysealgoritme", Aeronomica Acta, Acta B nr. 63, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Elektrische schema's voor de elektronica in het massaspectrometergedeelte en in het actief chemi-ionisatiepakket", Aeronomica Acta, Acta B nr. 64, april 1996.

E. Neefs, "MACSIMS. Handleiding voor de bediening van het instrument. Commando's, telemetingpakketten, scripts, scenario en controlelijst uit de vlucht van 23 november 1995", Aeronomica Acta, Acta B nr. 65, april 1996.