
Signalverarbeitung im Weltraum

Beate Meffert, Frank Winkler

`meffert,fwinkler@informatik.hu-berlin.de`

Zusammenfassung. Die Raumfahrt hat vielen Wissenschaftsdisziplinen neue Forschungsfelder eröffnet. Nicht nur lebenswissenschaftliche, sondern auch materialwissenschaftliche Experimente versprechen unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit neue Erkenntnisse. Während bei medizinischen und biologischen Experimenten der Einfluss der Restbeschleunigung oft vernachlässigbar ist, fordern materialwissenschaftliche Experimente eine genaue Kenntnis der Einflussgrößen Beschleunigung und Temperatur. Die Erfassung, Aufbereitung und Verarbeitung dieser zeitabhängigen physikalischen Größen ist Gegenstand des Forschungsgebiets Signalverarbeitung, das seit Gründung der Sektion Elektronik im Jahre 1970 an der Humboldt-Universität vertreten ist. In diesem Beitrag werden Messeinrichtungen für die Signale Beschleunigung und Temperatur vorgestellt, die in den Jahren 1980 bis 1993 an der Sektion Elektronik und von 1993 bis 2002 am Institut für Informatik entwickelt wurden.

Bis zum Anfang der 90er Jahre waren die Forschungsarbeiten der beteiligten Institutionen der Humboldt-Universität gemeinsam mit dem Institut für Kosmosforschung der Akademie der Wissenschaften der DDR in das Programm INTERKOSMOS der UdSSR eingebunden. Ab 1992 hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt die verschiedenen Programme koordiniert, zu denen auch weiterhin materialwissenschaftliche Experimente gehörten.

An der Entwicklung und Realisierung der verschiedenen Messsysteme hat eine Reihe von Kollegen mitgearbeitet. Neben den Autoren gehören dazu u. a. Manfred Günther, Lothar Heese und Thomas Morgenstern (Institut für Informatik der Humboldt-Universität), Gerald Kell, Henry Langer und Holger Quaas (damals Mitarbeiter der Sektion Elektronik der Humboldt-Universität).

1 Elektronische Messtechnik für materialwissenschaftliche Experimente

Das Schmelzen ausgewählter Materialien unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit ist ein materialwissenschaftliches Experiment, für das die ortsbezogene, hochgenaue Kontrolle und Auswertung der Temperaturen im Schmelzofen ein zentrales Problem darstellt.

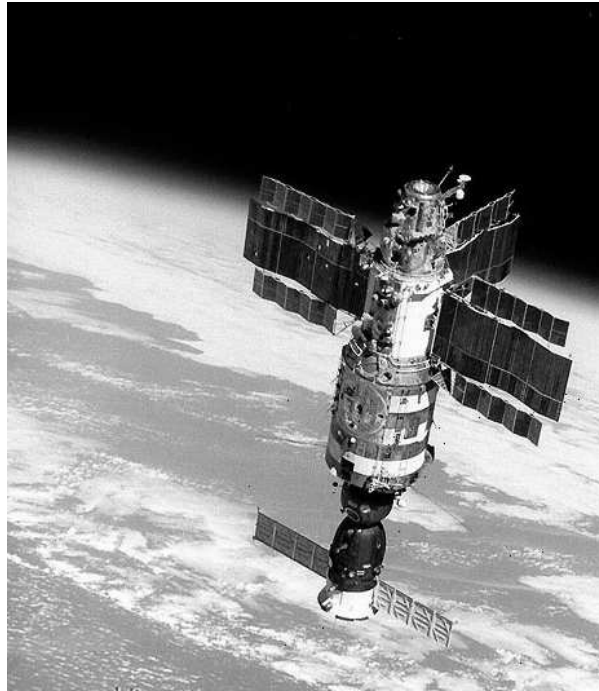


Abb. 1: Raumstation Saljut mit Raumschiff Sojus

Obwohl nahezu Schwerelosigkeit herrscht, können jedoch vor allem bei der bemannten Raumfahrt durch Erschütterungen störende Restbeschleunigungen auftreten, die während des Erstarrungsvorganges in den Materialproben zu lokalen Kristallbaufehlern führen. Deshalb ist auch die messtechnische Erfassung der sogenannten Mikrogravitation bei vielen Experimenten von besonderem Interesse.

Die für die Experimente entwickelten Messgeräte sind in der Tabelle 1 zusammengefasst; in Kapitel 3 (S. 121ff) werden sie ausführlich beschrieben.

Die Messgeräte wurden in den sowjetischen Raketen Sojus, in der ersten Raumstation Saljut (Abb. 1) und in der russischen Raumstation MIR (Abb. 2) eingesetzt.

Tabelle 1: Fünf Messgerätegenerationen, Bau- und Einsatzjahre sowie Anzahl der materialwissenschaftlichen Experimente im Weltraum

Messgerät	Baujahr	Temperatur	Gravitation	Einsatz	Experimente
IMITATOR	1980	×		1980	1
ARP	1982	×		1984–89	5
TES	1992	×		1992–94	6
TEGRA	1995	×	×	1995–99	20
Advanced TEGRA	2000	×	×		



Abb. 2: Raumstation MIR

2 Messprinzipien

Hochgenaue Messungen von Temperaturen und Mikrogravitation unter den besonderen Bedingungen in einer Raumstation erfordern Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowohl zu den Messprinzipien als auch zu ihren schaltungstechnischen Umsetzungen. Im Folgenden sollen die Arbeitsweise und die wesentlichen Eigenschaften der entwickelten Messsysteme vorgestellt werden.

2.1 Temperatur

Für die genaue Messung der Temperatur in geschlossenen Schmelzöfen werden vorzugsweise Thermoelemente genutzt. Die Wirkungsweise von Ther-

moelementen basiert auf dem Seebeck-Effekt. Johann Seebeck beobachtete 1821 erstmals, dass in einem Leiterkreis aus zwei verschiedenen Metallen bei Erwärmung einer Verbindungsstelle ein Strom fließt. Auf diese Weise kann eine Temperaturdifferenz in eine elektrische Spannung umgesetzt werden. Werden zwei leitende Materialien A und B verbunden und ist die Temperatur T_1 am Verbindungspunkt des Messortes verschieden von der Temperatur T_2 der Leitungsenden am Ausgleichspunkt, so ist die Spannung U_{AB} über die materialabhängigen Seebeck-Koeffizienten S von dieser Temperaturdifferenz abhängig:

$$U_{AB} = (S_A - S_B) \times (T_1 - T_2)$$

Für Temperaturbereiche zwischen 100 und 1250°C, die für materialwissenschaftliche Experimente relevant sind, kommen als Leitungsmaterial nur hochschmelzende Metalle oder Metalllegierungen wie Ni-NiCr oder Pt-PtRh in Frage. Die Seebeck-Koeffizienten dieser Materialien unterscheiden sich nur wenig (10 bis 40 $\mu\text{V}/\text{K}$), so dass hochempfindliche Verstärker benötigt werden, um diese Spannungen auszuwerten.

Für eine exakte Temperaturmessung mit einer Auflösung von besser als 1 K im gesamten Temperaturbereich waren zahlreiche Probleme zu lösen, wie beispielsweise:

- Entwicklung kleiner, hochgenauer und alterungsbeständiger Thermoelemente mit genau definierten Temperaturkennlinien
- Herstellung einer temperaturbeständigen Isolation zwischen den Materialien A und B, um den Spannungsabfall am Leitungswiderstand infolge der Isolationsströme zu minimieren (50 mV/ 50 k Ω = 1 μA Isolationsstrom bei 1000°C)
- Reduzierung des Messstroms (1 μA Messstrom führt an 1 Ω Leitungswiderstand bereits zu einem Spannungsabfall von 1 μV)
- Einsatz extrem rauscharmer Verstärker mit minimalem niederfrequenten Rauschen der Halbleiterbauelemente (1/f-Rauschen)
- Reduzierung der Störungen im Messstromkreis durch Abschirmung und schaltungstechnische Maßnahmen (hochohmige Störspannungskreise)
- Vermeidung von Temperaturdifferenzen und damit von Verfälschungen der Temperaturmessung am Übergang vom Thermoelement zum Verstärker (Übergang auf Kupferleitungen, Lot und Silizium; Cu-Cu ca. 300 $\mu\text{V}/\text{K}$, Cu-PbSn ca. 2 $\mu\text{V}/\text{K}$, Cu-Si ca. 400 $\mu\text{V}/\text{K}$)
- Genaue Bestimmung der absoluten Temperatur T_2 des Ausgleichspunkts nach einem anderen Messprinzip
- Quantisierung der Messwerte für eine Zifferndarstellung oder digitale Verarbeitung
- Korrektur der nichtlinearen Sensorkennlinien der Thermoelemente.

Die genannten Probleme waren in erster Linie eine Herausforderung an die analoge Schaltungstechnik und die analoge Signalverarbeitung. Verstärker,

Thermoelemente und Kontaktierungstechniken waren entsprechend dem jeweiligen Stand der Technik aufeinander abzustimmen und gleichzeitig für die Raumfahrt- und Experimentbedingungen zu optimieren.

Aber auch die Digitalisierung der gemessenen Spannungen erforderte erhebliche Entwicklungsarbeit. Die notwendige hohe Auflösung, Linearität und Stetigkeit waren nur mit Verfahren der indirekten Analog-Digital-Umsetzung zu erreichen. Dazu mussten Spannungs-Frequenz-Umsetzer, Charge-Balance- und Sigma-Delta-Verfahren untersucht und verbessert werden. Ein weiteres Problem bestand darin, dass in der Raumfahrt eine nachträgliche Kalibrierung nicht möglich ist. Deshalb wurden für die Digitalisierung Referenzspannungen benötigt, die über eine lange Zeit stabil arbeiten und nach Möglichkeit ohne Thermostate auskommen.

IMITATOR Die Geräte der ersten Generation mit der Bezeichnung IMITATOR trugen den Namen der Experimentserie, bei der die thermischen Eigenschaften der Schmelzöfen „Kristall“ und „Magma“ bestimmt wurden [1, 2]. Die unterschiedlich beheizbaren Zonen der Öfen erlaubten die Einstellung verschiedener Temperaturprofile. Der tatsächliche Temperaturverlauf im Schmelzofen wurde anfangs experimentell mit Drahtproben verschieden schmelzender Metalle „imitiert“ (Abb. 3).

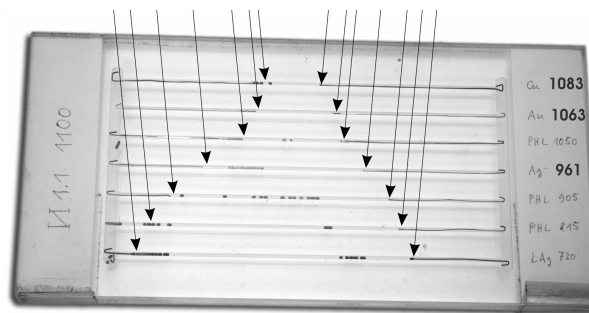


Abb. 3: Temperaturprofil (die Pfeile zeigen die Schmelzgrenze der nach Schmelzpunkten geordneten Metalle)

Zur „Imitation“ der Temperaturprofile verwendete das Messgerät IMITATOR erstmalig Thermoelemente. Die Spannungen wurden mit integrierten Operationsverstärkern gemessen, die für die Differenzmessung von sehr kleinen Spannungen besonders geeignet waren. Die Anforderungen an die Linearität erfüllten 10-bit-Spannungs-Frequenz-Umsetzer, die jedoch gegenüber vergleichbaren Produkten einen relativ großen schaltungstechnischen Aufwand erforderten. Da CMOS-Mikroprozessoren zu dieser Zeit noch nicht verfügbar waren und die p-MOS-Mikroprozessoren bezüglich des Energieverbrauchs inakzeptabel waren, wurde die gesamte Steuerung mit digitalen CMOS-Standardschaltkreisen aufgebaut. IMITATOR war für den mobilen

Batteriebetrieb vorgesehen, was gleichzeitig eine perfekte galvanische Trennung der Versorgung vom Messkreis und eine sehr gute Störunterdrückung bedeutete.

ARP Die Geräte der zweiten Generation konnten unter der Bezeichnung ARP (Automatisches Registriergerät für Prozessparameter) bereits mit integrierten 13-bit–Analog–Digital–Umsetzern ausgerüstet werden, die über Kalibrierungsfunktionen (*auto zero*) und digitale Schnittstellen verfügten [3]. Der Referenzstrom für diese Umsetzer wurde erstmals mit Hilfe von Doppel–Sperrschicht–Feldeffekttransistoren erzeugt. Sie wurden als Kaskodestufe geschaltet und so ausgesucht, dass sich ihre Temperaturabhängigkeit nahezu vollständig kompensierte. Diese Lösung brachte eine bessere Konstanz bei Temperatur- und Versorgungsspannungsschwankungen als die Verwendung industrieller Referenzelemente in Verbindung mit Operationsverstärkern. Sie war zudem kleiner und leistungsricher. Ein 8-bit–Mikroprozessor in Kombination mit Festwert- und Arbeitsspeicher, programmierbarem Zeitgeber und parallelen Schnittstellenbaugruppen war bei diesen Geräten in der Lage, die Messungen programmgesteuert zu übernehmen. Elektronische Messstellenumschalter gestatteten die Abfrage von 15 Temperaturmessstellen im Schmelzofen und der Temperatur T_2 des Ausgleichspunkts [4].

Eine innovative Lösung in dieser Gerätegeneration war der Einsatz von wechselbaren Halbleiterspeichern (EPROM) zur Datenspeicherung. Die Datenkassetten hatten ein ähnliches Wirkprinzip wie heutige Compact-Flash-Karten (Abb. 4). In der Größe einer Zigarettenschachtel brachten sie es auf eine Speicherkapazität von 24 KByte. Nach der Signalaufzeichnung wurden die Datenkassetten auf die Erde zurückgeführt. Sie konnten nach der Auswertung mit UV-Licht gelöscht und wiederverwendet werden.

TES In diesen Geräten, die nach der Experimentserie TES (Thermoelektrische Eigenschaften unterkühlter Schmelzen) bezeichnet wurden, ist erstmals eine Temperaturdifferenzmessung entwickelt worden, die kleinste Temperaturänderungen zwischen zwei Thermoelementen im Bereich von einem Hundertstel Kelvin detektieren konnte [5]. Damit war eine kurzzeitige Temperaturänderung, wie sie beim Kristallisationsbeginn in Schmelzen verursacht wird, zeitlich und örtlich genau festzuhalten. Die Steuerung übernahm ein 16-bit–Prozessor V25, der gegenüber einem 8-bit–Prozessor einen wesentlich größeren Adressraum besitzt und damit mehr Halbleiterdatenspeicher adressieren konnte. Die Datenkassette enthielt elektrisch programmierbare und elektrisch löschbare EEPROM-Speicher mit einer Kapazität von 512 KByte [6].

TEGRA Die Bezeichnung resultiert aus den neu entwickelten Modulen zur Temperatur- und Gravitationsmessung [8]. Für die Temperaturmessung wurde erstmals auch eine neuartige Lösung zur Unterdrückung elektrischer Störungen eingesetzt. Sie ist in Abb. 5 am Beispiel von 2 Messstellen dargestellt. Das Prinzip besteht darin, während der Messzeit sämtliche Thermoelemente nur mit jeweils einem Kondensator (C_2 in Abb. 5) zu verbinden, so dass

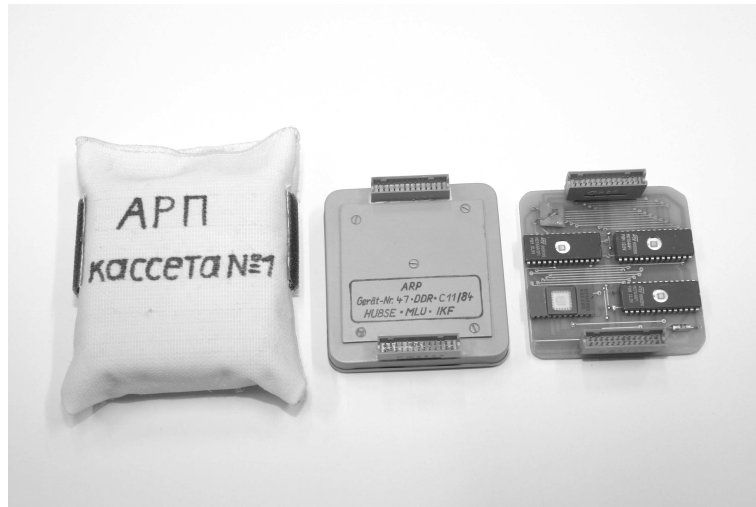


Abb. 4: Transportsack, Datenkassette und Datenkassette ohne Gehäuse

die Kondensatoren mit den zugehörigen Thermospannungen geladen werden. Dadurch wird eine hohe Impedanz zwischen allen Thermopaaren und dem Verstärkereingang erreicht.

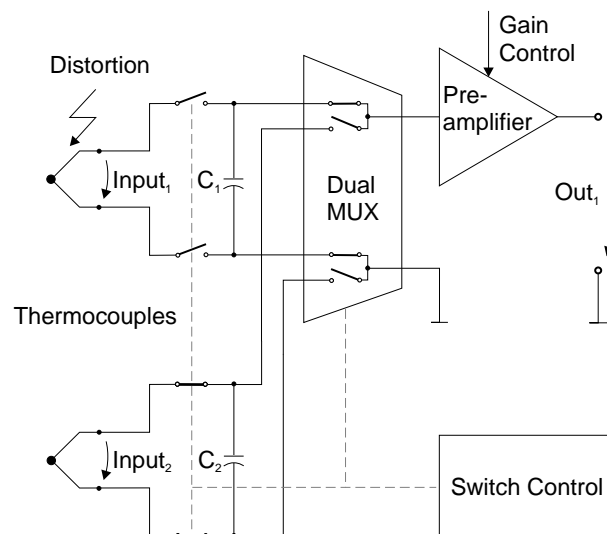


Abb. 5: Prinzip der Temperaturmessung im Messgerät TEGRA

Zum Auslesen der Messwerte werden nacheinander die Kondensatoren (C_1 in Abb. 5) vom jeweiligen Thermoelement abgetrennt und anschließend über einen Multiplexer (Dual MUX in Abb. 5) mit dem Eingang des Vorverstärkers verbunden. Dadurch werden die an den Thermoelementen wirksamen Gleichtaktstörungen vom Eingang des Vorverstärkers weitgehend ferngehalten. Die Güte dieser Stördämpfung wird im Wesentlichen von den Schaltereigenschaften bestimmt und erreicht in einem relativ großen Frequenzbereich 120 dB. Dabei müssen die Kenngrößen der verwendeten Kondensatoren sorgfältig bemessen sein. Die Dynamik bei den Umladevorgängen bestimmt einerseits die Messgenauigkeit, andererseits auch die erfassbare Temperaturänderung je Zeiteinheit.

Die Analog-Digital-Umsetzung konnte in dieser Gerätegeneration mit einer Auflösung von 19 bit innerhalb von 10 ms realisiert werden. Dazu wurde ein 16-bit-Analog-Digital-Umsetzer nach dem Verfahren der sukzessiven Approximation in Verbindung mit einem speziellen Verfahren der Mehrfachmessung eingesetzt, wobei das Eingangssignal zusätzlich mit einer determinierten Rampenfunktion überlagert wurde. Der differenzielle Linearitätsfehler bei der Analog-Digital-Umsetzung lag dadurch unter der Auflösungsgrenze.

Eine weitere Neuerung in der TEGRA-Generation war die Anbindung an einen Crew-Interface-Computer, ein spezielles raumflugtaugliches Laptop [9, 10]. Über eine serielle Schnittstelle konnte dieser Rechner den Schmelzofen und das Messgerät fernsteuern, Messdaten von beiden Geräten übernehmen und diese speichern. Über einen Telemetrikkanal wurden die Daten zur Erde gesendet. Die Messwertaufnahme erfolgte in TEGRA jedoch nach wie vor autonom und völlig getrennt vom Computer, um eine hohe Genauigkeit und Störsicherheit zu erreichen.

Advanced TEGRA Die Geräte der fünften Generation sind für den Einsatz in der internationalen Raumstation ISS vorgesehen [14]. Die neue Qualität besteht darin, dass sie Systembestandteil einer modularen Schmelzofenanlage sind und in deren Versorgungs- und Kommunikationsstruktur eingebunden werden. Die Bedienoberfläche erlaubt direkte Einsicht in den Experimentablauf. Je nach Experiment sind unterschiedliche Module einsetzbar. Das Modul zur Temperaturerfassung befindet sich hier erstmals unmittelbar am beweglichen Träger für die Materialproben. Die konstruktiven Gegebenheiten machen deshalb eine besonders kompakte Bauweise und einen leistungsarmen Betrieb erforderlich (s. Abb. 15), wobei natürlich die guten technischen Parameter der TEGRA-Generation beibehalten oder verbessert werden sollten. Aus diesem Grunde wird zur zeitlichen Steuerung ein programmierbarer Schaltkreis des Typs FPGA (*field programmable gate array*) eingesetzt, der eine große Anzahl von Signalen für die zeitkritische Steuerung der analogen Baugruppen und für den Datentransport zur Verfügung stellt und gleichzeitig nur einen geringen Platz- und Leistungsbedarf hat.

Die Signalübertragung erfolgt über optoelektronische Koppler zu den Verarbeitungsmodulen. Die Analog-Digital-Umsetzung übernimmt ein spezieller 23-bit-Umsetzer, der ein besonders ausgewogenes Rauschspektrum über den

gesamten Umsetzungsbereich besitzt. Damit wird gewährleistet, dass die statistische Verteilung der Messwerte von der Aussteuerung des Umsetzerschaltkreises nahezu unabhängig ist – eine wichtige Voraussetzung für die spätere statistische Auswertung sehr kleiner, kaum noch erfassbarer Temperaturänderungen. Ebenfalls unter dem Leistungsaspekt wurden 32-bit-Signalprozessoren eingesetzt, die effizienter mit den Ergebnissen des 23-bit-Umsetzers arbeiten können als die 16-bit-Prozessoren der TEGRA-Serie.

2.2 Gravitation

Nach dem Gravitationsgesetz wirken zwischen zwei Massen Gravitationskräfte. In Raumstationen, die auf einer Erdumlaufbahn in ca. 400 km Höhe kreisen, herrscht Schwerelosigkeit, wenn sich Zentrifugalkräfte und Gravitationskräfte aufheben. Es treten jedoch weitere Kräfte auf, die zu kleinen Beschleunigungen in der Größenordnung von $1 \mu\text{g}$ führen (1 g ist die mittlere Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$). Diese so genannte Restbeschleunigung oder Mikrogravitation kann verschiedene Ursachen haben. Dazu zählen die Ortsabhängigkeit des Erdgravitationsfeldes, der Luftwiderstand in der Hochatmosphäre, der Gravitationseinfluss von Mond und Sonne, die Abweichung des Standorts des Schmelzofens vom Massenmittelpunkt der Raumstation, Bahnkorrekturmanöver und mechanische Bewegungen in der Raumstation durch die Kosmonauten oder Apparaturen (z. B. Pumpen und Ventilatoren des Lebenserhaltungssystems). Im Extremfall führen im Stationsbetrieb Schwingungen und Stöße sogar zu Beschleunigungen bis 10 mg . Besonders die Beschleunigungen im Bereich tiefer Frequenzen unter 50 Hz können Erstarrungsvorgänge in Schmelzöfen beeinflussen. Aus diesem Grund ist die Messung der Restbeschleunigung auf Raumstationen für materialwissenschaftliche Experimente von großem Interesse.

Sensoren zur absoluten Beschleunigungsmessung sind auf der Erde nur bedingt genau justierbar: einer Änderung von $1 \mu\text{g}$ entspricht eine Neigungsänderung von $0,1 \text{ mm}$ auf 100 m Länge. Der Justagefehler beträgt typischerweise 300 bis $1000 \mu\text{g}$. In einem *Orbital Acceleration Research Experiment* verwendeten NASA-Forscher daher ein Messgerät, in dem durch Umklappen eines empfindlichen Sensors um 180° eine Kompensation der Justagefehler vorgenommen werden kann. Diese Geräte wurden bei der Kopplung zwischen einem Space Shuttle und der MIR-Station erfolgreich eingesetzt. Sie arbeiten allerdings nur in einer Raumdimension. Das von der DASA im Auftrag der ESA entwickelte *Microgravity Measurement Assembly* benutzt dagegen drei kapazitive Sensoren, die einen Messbereich von 10 bis $10.000 \mu\text{g}$ im Frequenzbereich von $0,1$ bis 100 Hz in allen drei Raumrichtungen abdecken. Das Messgerät wurde später mit dem französischen System *Accellerometre Spatial Triaxial Electrostatique* erweitert, das im Bereich tiefer Frequenzen ($0,0001$ bis $2,5 \text{ Hz}$) für kleine Beschleunigungen (1 bis $1000 \mu\text{g}$) ausgelegt ist. Für die Integration in einem Schmelzofen ist das Gerät aber zu aufwändig [11].

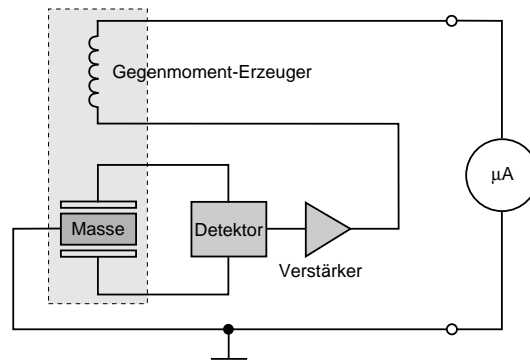


Abb. 6: Wirkprinzip des Sensors QA 1400

Für den interessierenden Beschleunigungsbereich von 25 bis 50.000 μg und einen Frequenzbereich von 0,1 bis 50 Hz war daher ein spezielles Messgerät erforderlich. Der eingesetzte Beschleunigungssensor QA 1400 (Abb. 6) enthält eine dünne Metallplatte mit definierter Masse, die zusammen mit zwei weiteren Platten einen Differenzkondensator bildet. Mit regelungstechnischen Maßnahmen wird die magnetische Platte durch das Magnetfeld einer Spule genau in Mittellage gehalten. Der Korrekturstrom durch die Spule ist ein Maß für die Kraft, die senkrecht auf die Masse wirkt. Aus dieser Kraft ergibt sich bei bekannter Masse die Beschleunigung in derselben Richtung. Die Sensoren gestatten eine Auflösung bis in den μg -Bereich, sind bis 100 Hz nahezu frequenzunabhängig, weisen jedoch Offset- und Temperaturfehler auf, die nur bedingt und mit großem schaltungstechnischen Aufwand kompensierbar sind.

Die Mikrogravitationsmessungen während der materialwissenschaftlichen Experimente kamen erstmals in dem Messgerät TEGRA zum Einsatz [12]. Für jede der drei Raumkoordinaten wurde ein Sensor genutzt. Im Gravitationsteil des Gerätes wurde eine analoge Schaltung zur Kompensation des statischen Anteils entwickelt, die es gestattet, mit einer Bandbreite von 0,1 bis 50 Hz sowohl Untersuchungen auf der Erde bei 1 g als auch in der Schwerelosigkeit im Bereich von maximal 50 mg durchzuführen. Durch die untere Begrenzung des Frequenzbereiches auf 0,1 Hz kann der Einfluss der Temperatur auf die Offsetgrößen des Sensors unterdrückt werden, da übliche Temperaturgradienten der Umgebungstemperatur deutlich unter 0,1 K/s liegen. Nach Verstärkung, Filterung, Abtastung und Analog-Digital-Umsetzung des Signals stehen digitalisierte Messwerte zur Verfügung. Sie werden einem Steuerrechner übergeben, der sie mit anderen prozessbegleitenden Daten verknüpft und entsprechend der Experimentdefinition speichert. Auf Grund der großen Datenmenge und der begrenzten Telemetrikkanäle der MIR-Raumstation sind die gespeicherten Gravitationsdaten mittels wechselbarer Festplatten auf die Erde zurückgebracht worden [9].

In dem Nachfolgesystem Advanced TEGRA wurden die gleichen Sensoren verwendet, für die Signalfilterung wurden aber digitale Signalprozessoren eingesetzt, die wesentlich effizienter arbeiten [14]. So können die Ströme aus den Gravitationssensoren mit einer Abtastfrequenz von 16 kHz abgetastet, digitalisiert und anschließend mit digitalen Tiefpassfiltern in mehreren Stufen auf den gewünschten Frequenzbereich von 0 bis 64 Hz dezimiert werden. Ein spezieller niederfrequenter Kanal (0 bis 1 Hz) wird für Langzeitmessungen genutzt, mit dessen Hilfe eine nachträgliche, digitale Nullpunktkorrektur vorgenommen werden kann.

3 Messgeräte

Im Folgenden sollen die in mehr als 20 Jahren für die Weltraumforschung entwickelten und eingesetzten Geräte vorgestellt werden, und zwar in der Reihenfolge ihrer Entwicklung, die im Jahre 1978 begonnen hat.

3.1 IMITATOR

Das erste mobile Messgerät für den Raumfahrteinsatz, das in einem Schmelzofen Temperaturprofile ermitteln konnte, hieß IMITATOR (Abb. 7). Für die Messung wurden 10 Ni-NiCr-Thermoelemente eingesetzt. Die Messung erfolgte manuell, die Messwerte wurden über ein kleines Display ausgegeben und die Ergebnisse von Hand protokolliert. Das Messgerät IMITATOR ist im Jahre 1980 im Raumschiff Sojus 37 und in der Raumstation Saljut 6 eingesetzt worden. Zu den wichtigsten technische Daten dieser Gerätegeneration gehörten:

- 10 direkt angeschlossene Thermoelemente
- 3 Digit Auflösung mit einer Quantisierungsstufe von 40 μV bzw. 1,0 K
- Auslösung einer Messung und Messstellenumschaltung manuell
- Batteriebetrieb 7,2 V
- CMOS-Schaltkreise, kein Prozessor
- 3-stellige LED-Messwertanzeige, kein Speicher.

Wie in der Weltraumforschung üblich, waren von allen Anlagen mehrere identische Exemplare zu bauen und zu testen, so auch von den Temperaturmessgeräten IMITATOR. Abbildung 8 zeigt die fünffach gefertigten Flugmuster des Messgeräts IMITATOR 2.

Abbildung 9 zeigt ein Zeugnis, das die Humboldt-Universität für die erfolgreiche Beteiligung am Interkosmosprogramm erhalten hat.

3.2 ARP

Die nächste Generation der Temperaturmessgeräte (ARP, Abb. 10) besaß als wesentliche Neuerung einen austauschbaren Speicher. Außerdem waren die



Abb. 7: Messgerät IMITATOR

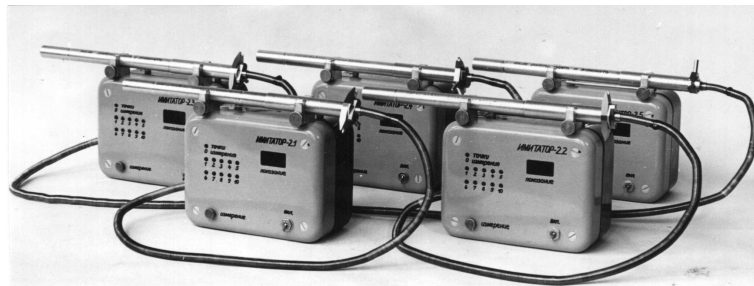


Abb. 8: Fünf Messgeräte IMITATOR 2 (1980)

Anzahl der Ni-NiCr-Thermoelemente erhöht und die Auflösung des Analog-Digital-Umsetzers verbessert worden. Zur Ausstattung gehörte erstmals auch ein Mikroprozessor. Das Messgerät ARP arbeitete im Jahre 1984 auf Saljut 7 und 1987-89 auf der MIR. Die wichtigsten Charakteristika waren:

- Messsonde mit 15 austauschbaren Thermoelementen
- 13 bit Auflösung mit einer Quantisierungsstufe von $5 \mu\text{V}$ bzw. 125 mK
- linearisierte Anzeige in $^{\circ}\text{C}$
- Abtastfrequenz und Messstellen programmierbar
- 8-bit-Prozessor Z80
- austauschbarer Speicher (EPROM 24 KByte)
- Versorgungsspannung $27 \text{ V} \pm 5 \text{ V}$ vom MIR-Bordnetz
- 8-stellige 7-Segment-LED-Anzeige.



СВИДЕТЕЛЬСТВО

СОВЕТ „ИНТЕРКОСМОС“
ПРИ АКАДЕМИИ НАУК СССР ВРУЧАЕТ

Университету им. Гумбольдта

ПАМЯТНУЮ МЕДАЛЬ ЗА ВКЛАД
В ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ
ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ ПО ПРОГРАММЕ
„ИНТЕРКОСМОС“

Президент Совета „Интеркосмос“
при Академии наук СССР
Александр Б. ПЕТРОВ

Abb. 9: Свидетельство (Zeugnis) der Akademie der Wissenschaften der UdSSR (1980)

Abbildung 11 zeigt das Deckblatt eines in dieser Zeit veröffentlichten Sonderdrucks der sowjetischen Akademie der Wissenschaften.

3.3 TES

Der Erfolg der internationalen Raumfahrtprojekte und die dabei gewonnenen Erkenntnisse waren die Grundlage dafür, dass auch nach den Strukturveränderungen in Europa und den daraus resultierenden neuen Kooperationen in der Weltraumforschung die Humboldt-Universität wieder in materialwissenschaftliche Projekte einbezogen wurde. Es ist eine dritte Gerätegeneration TES



Abb. 10: Messgerät ARP

entwickelt worden (Abb. 12). Bei dieser neuen Gerätegeneration handelte es sich um ein modular aufgebautes Messgerät zur hochgenauen Temperaturdifferenzmessung, das in den Missionen MIR'92 und EUROMIR'94 in der russischen Raumstation MIR eingesetzt wurde. Die wichtigsten technischen Eigenschaften waren:

- 2 Differenzeingänge, 4 unsymmetrische Eingänge für Thermoelemente
- 12 bit Auflösung mit einer Quantisierungsstufe von $0,1 \mu\text{V}$ bzw. $2,5 \text{ mK}$
- feste Abtastfrequenz, 2-s-Messzyklus für 6 Messstellen
- 512 KByte EEPROM als Speicher
- 16-bit-Mikroprozessor V25
- austauschbares Speichermodul
- Versorgungsspannung $27 \text{ V} \pm 5 \text{ V}$ vom MIR-Bordnetz
- Fernbedienung über RS232-Schnittstelle
- Betriebszustandsanzeige über 4 LED.

3.4 TEGRA

Im Jahre 1995 beteiligte sich die europäische Weltraumbehörde ESA an der Mission EUROMIR. Bei dieser Mission war der Schmelzofen TITUS (*Tubular Furnace with Integrated Thermal Analysis under Space Conditions*) im Einsatz [7]. Für diese neue Ofenanlage war wieder die Erfassung des Temperaturprofils erforderlich. Außerdem sollte erstmals auch eine Gravitationsmessung vorgenommen werden. Das Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten war das programmierbare, vollautomatisch arbeitende elektronische

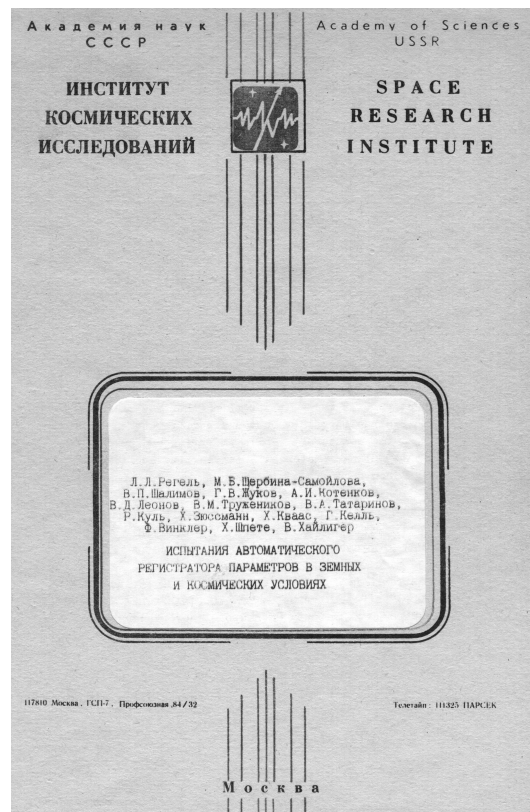


Abb. 11: Sonderdruck zum Messgerät ARP [3]

Messgerät TEGRA mit einem Temperatur- und einem Gravitationsmessmodul (Abb. 13). Es hat erstmals die Hardware für die Messung von Temperaturen und Gravitation in einem Gerät vereinigt [8]. Unter Einhaltung des hohen technischen Standards der Weltraumtechnik konnten Temperaturen bis 1250°C mit einer Auflösung von $0,0025\text{ K}$ in elektrisch stark gestörter Umgebung gemessen werden. Die gleichzeitige Gravitationsmessung erfolgte mit einer Auflösung von $25\text{ }\mu\text{g}$ [13]. Das Messgerät TEGRA wurde in den Missionen EUROMIR'95, MIR'97 und im Jahre 1999 in der Mission MIR PERSEUS eingesetzt. Die wichtigsten technischen Daten waren:

- 10 Mantelthermoelemente Ni-NiCr oder Pt-PtRh
- Temperaturmessbereich von 0 bis 1250°C (Pt-PtRh)
- 3 Beschleunigungssensoren QA 1400, Messbereich $\pm 0,050\text{ g}$ und $25\text{ }\mu\text{g}$ Auflösung
- 10 Universaleingänge für Thermoelemente (Differenz- oder unsymmetrische Eingänge)

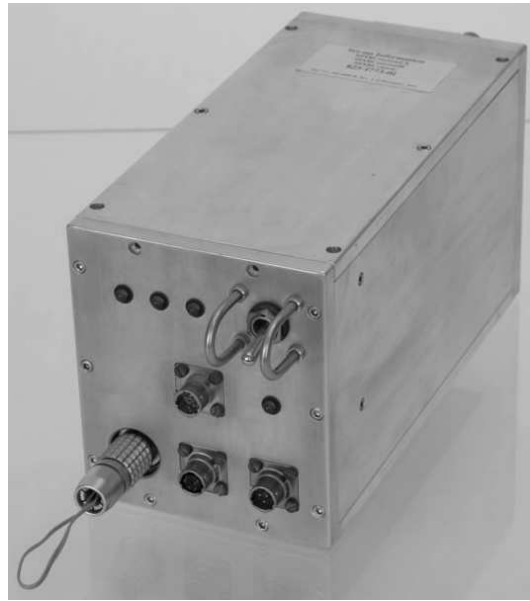


Abb. 12: Messgerät TES

- 19 bit Auflösung mit einer Quantisierungsstufe von $0,1 \mu\text{V}$ bzw. $2,5 \text{ mK}$
- feste Abtastfrequenz von einer Messung pro Sekunde
- 128 KByte Speicher
- 16-bit-Prozessor V25
- serielle Kommunikationsschnittstellen RS232
- Versorgungsspannung $27 \text{ V} \pm 5 \text{ V}$ vom MIR-Bordnetz
- Stromaufnahme $0,36 \text{ A}$
- Fernbedienung über RS232-Schnittstelle
- Betriebszustandsanzeige über 3 LED.

Durch die konstruktive Gestaltung des Messgerätes TEGRA als Modul wurde die Integration in die Schmelzanlage TITUS ermöglicht. Die Abbildung 14 zeigt den Schmelzofen TITUS mit einem in den Ofen integrierten Messgerät TEGRA (rechts).

3.5 Advanced TEGRA

Das Messmodul TEGRA hat noch eine Weiterentwicklung erfahren. Es ist für den Einsatz in der Internationalen Raumstation ISS vorgesehen. Gemeinsam mit einem Schmelzofen ist es integraler Bestandteil einer modularen Experimentalplattform [14]. In dem verbesserten Messgerät Advanced TEGRA (Abb. 15) arbeiten ein digitaler Signalprozessor und ein FPGA, die im Wesentlichen für die Abtastung und die Signalfilterung verantwortlich sind. Au-



Abb. 13: Messgerät TEGRA

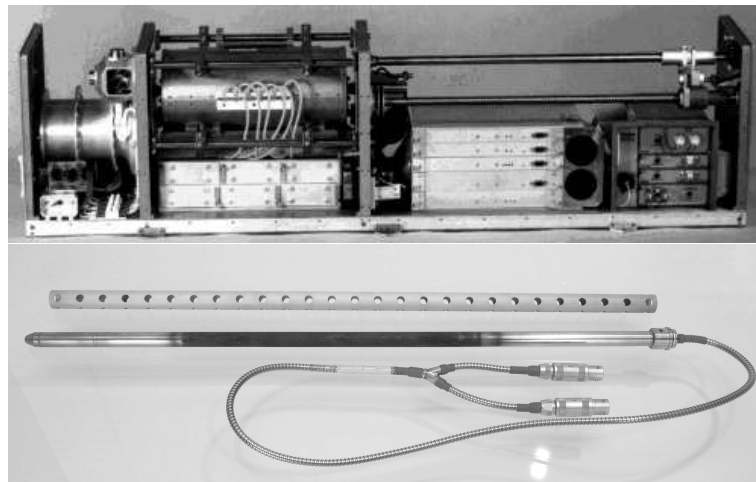


Abb. 14: Schmelzofen TITUS [7] mit TEGRA (rechts) und Sonde (unten)

ßerdem sind der Schmelzofen und die Messgeräte von einem Laptop aus steuerbar. Mit dem Messgerät Advanced TEGRA sind in den Jahren 2000 und 2001 zusammen mit dem DLR Köln Experimente durchgeführt worden. Die verbesserte Leistungsfähigkeit ist aus den technischen Daten ersichtlich:

- bis zu 40 Universaleingänge für Thermoelemente (Differenz- oder unsymmetrische Eingänge)
- 19 bit Auflösung mit einer Quantisierungsstufe von $0,1 \mu\text{V}$ bzw. $2,5 \text{ mK}$
- Messmodul für Mikrogravitation mit 3 Kanälen
- 3 Beschleunigungssensoren QA 1400, Messbereiche $\pm 0,030 \text{ g}$, $\pm 0,3 \text{ g}$ und $\pm 3 \text{ g}$ mit jeweils $25 \mu\text{g}$ Auflösung
- programmierbare Abtastfrequenzen, bis zu 8 Messungen pro Sekunde
- serielle Kommunikationsschnittstelle
- 32-bit-Signalprozessor TMS320C32
- FPGA XC4044 für zeitkritische Vorgänge
- Bussystem zum Ofen und zum Steuer- und Bedienteil (Laptop)
- Versorgungsspannungen 5 V und $\pm 15 \text{ V}$ vom TITUS-Netz
- Fernbedienung über RS485-Schnittstelle
- Betriebszustandsanzeige über 6 LED.

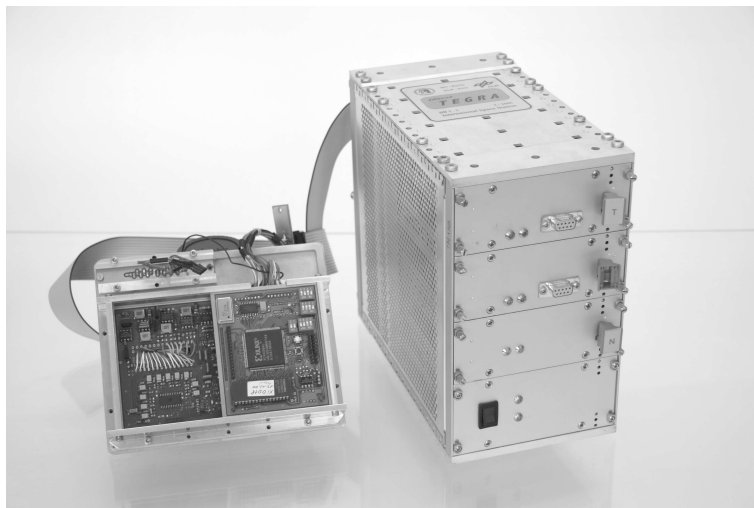


Abb. 15: Messgerät Advanced TEGRA mit offenem Temperaturmessmodul

4 Rückblick und Ausblick

Über die Erfassung, Aufbereitung und Verarbeitung von Signalen können Informationen über Zufallsprozesse gewonnen werden. Die hier vorgestellte Anwendung signalverarbeitender Verfahren hatte das Ziel, den komplexen physikalischen Vorgang der Materialschmelze zu beobachten, um unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit Informationen über die Einflüsse auf den Schmelzvorgang zu gewinnen. In verschiedenen Raumschiffen sind Schmelzexperimente durchgeführt worden. In jeder Schmelzanlage ist dabei sehr genau die zeitliche Veränderung des Temperaturprofils und der Mikrogravitation ermittelt und gespeichert worden. Materialwissenschaftler haben eine Fülle von Daten für ihre weiteren wissenschaftlichen Arbeiten gewonnen. Aber auch die Signalverarbeitung hat von den langjährigen Arbeiten sehr profitiert. Unter den extremen Bedingungen der Raumfahrt waren die signalverarbeitenden Systeme besonderen Härtetests ausgesetzt, die zu Erkenntnissen geführt haben, die unter irdischen Bedingungen nicht ohne Weiteres möglich gewesen wären. Eigenschaften wie hohe Auflösung, Linearität, Genauigkeit, Robustheit, Langzeitzuverlässigkeit oder Bedienerfreundlichkeit sind auch auf der Erde wichtige Kennzeichen guter signalverarbeitender Systeme.

Literaturverzeichnis

1. Barta C, Triska A, Trnka J, Regel LL (1984) Experimental device for Materials research in Space – CSK-1. *Adv. Space Res.* vol. 4, no. 5, p. 95–98
2. Kuhl R, Röstel R (1985) Labors im Orbit – Materialwissenschaftliche und technologische Experimente in Salut-Raumstationen. *Urania* 5, 12–17
3. Кузь Р, Зюссманн Х, Кваас Х, Кель Г, Винклер Ф и др. (1986) Испытания автоматического регистратора параметров в земных и космических условиях. Конгресс ИКИ АН СССР. Москва (Soviet Union)
4. Kuhl R, Quaas H, Süßmann H (1986) ARP – a multipurpose instrumentation for experiments in materials sciences in space. Preprint 37th International Astronautical Federation Congress. Innsbruck (Austria)
5. Bewersdorff A, Görler GP, Willnecker R, Wittmann K, Kuhl R, Röstel R, Günther M, Kell G (1992) Measurements of heat capacity in undercooled metals. ESA SP-333, 817. Proceedings of the 8th European Symposium on Materials and Fluid Sciences in Microgravity. University Libre de Bruxelles (Belgium)
6. Kell G, Winkler F, Wittmann K (1994) High Resolution Temperature Measurement Technique for Materials Sciences Experiments in Space. 234. Proceedings 45th International Astronautical Federation Congress. Jerusalem (Israel)
7. Nähle R, Röstel R, Schmidt HP, Wittmann K (1995) TITUS: A New Facility for Materials Sciences Experiments in Space. Preprint 46th International Astronautical Federation Congress. Oslo (Norway)
8. Meffert B, Winkler F (1996) Hochgenaue Messungen unter Weltraumbedingungen. *HU-Spektrum* 2: 26–31
9. Nähle R, Röstel R (1996) Technische und operationelle Nutzerunterstützung für die TITUS-Experimente der Mission MIR 1997/E. 453–458. In: Sahn, P

- R (eds) Research program of the German Russian Space Mission MIR 1997. WPF, Aachen (Germany)
10. Merbold U, Hamacher H (1996) Messung der Mikrogravitation auf MIR. 372–375. In: Sahm, P R (eds) Research program of the German Russian Space Mission MIR 1997. WPF, Aachen (Germany)
 11. Nähle R, Röstel R, Schmitz G (2000) TITUS: Anlagekonzepte und Nutzerunterstützung für MIR-Missionen und ISS. 223–228. In: Keller M H, Sahm, P R (eds) Bilanzsymposium Forschung unter Weltraumbedingungen. WPF, Aachen (Germany)
 12. Winkler F, Kell G, Röstel R (2000) Gravitationsmessungen während der Mission MIR-97. 777–787. In: Keller M H, Sahm, P R (eds) Bilanzsymposium Forschung unter Weltraumbedingungen. WPF, Aachen (Germany)
 13. Winkler F, Röstel R (2001) The TEGRA vibration measurement environment on the MIR space station. 457–464. Proceedings International Symposium on International Scientific Cooperation onboard MIR. Lyon (France)
 14. Seibert G (2001) The growth of microgravity research - From Skylab to the International Space Station. 367–398. In: Seibert G (eds) A World without gravity. ESA, Noordwijk (Netherlands)