

Abschlussbericht

zum F & E - Vorhaben:

***„Wissenschaftliche Begleitung und technologische Entwicklung von
Subkomponenten für die Mission STEP der NASA/ESA:
SQUID-basierte Positionsdetektoren und Pick-up-Spulendesign“***

Kurztitel:“SQUID-Komponenten für STEP“

FKZ: 50 OY 0103

(Förderzeitraum 01.03.2001 - 28.02.2003)

**Institut für Festkörperphysik der
Friedrich-Schiller-Universität Jena**

Projektleiter: Dr. sc. nat. W. Vodel

August 2003

Autoren: Dr. W. Vodel
Dr. S. Nietzsche
Dipl.-Ing.(FH) R. Neubert
R. Nawrodt
J. Langebach
T. Burkhardt

Inhaltsverzeichnis:

Präambel / Projektziele

Arbeitsergebnisse:

1. Fertigung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Messplatzes für Labortests von STEP-Komponenten im Temperaturbereich von 1,8 bis 4,2 K.
2. Messungen von STEP-Komponenten im Temperaturbereich von 1,8 bis 4,2 K und unter μg -Bedingungen am Fallturm Bremen
3. Adaption der SQUID-Positionssensoren der FSU Jena an das STEP-Probekörperdesign
4. Untersuchungen zur mechanischen Stabilität und elektrischen Störfestigkeit der aufgebauten elektronischen Baugruppen und Schlußfolgerungen für die Raumflugtauglichkeit
5. Durchführung von Falltests mit SQUID-Positionsdetektoren der FSU und abschließende Charakterisierung
6. Konzeption und Aufbau einer Kalibriervorrichtung im Nanometerbereich mittels LASER-Interferometrie für SQUID-Positionsdetektoren ([zusätzlich zum Arbeitsplan](#))
7. Vergleichende Rauschuntersuchungen an SQUIDs verschiedener Hersteller im niederfrequenten Signalbereich hinsichtlich des Einsatzes für STEP ([zusätzlich zum Arbeitsplan](#))

Abschließende Bemerkungen und Schlußfolgerungen

Referenzen

Publikationsliste

Anhang:

- Berichtsblatt
- Document Control Sheet
- Erfolgskontrollbericht
- Erklärung über Versendung der Vorhabensergebnisse an TIB
- Schlußnachweis

Präambel / Projektziele

Die Ziele des bearbeiteten Projektes bestanden in Voruntersuchungen zur Entwicklung und Erprobung mehrkanaliger SQUID-Positionsdetektoren zum Aufbau raumfahrttauglicher SQUID-Beschleunigungsmesser einschließlich der angepassten und optimierten Ankopplung der Detektoren (Magnetfeldantennen) an die supraleitenden bzw. supraleitend beschichteten Testkörper im geplanten NASA/ESA-Experiment STEP.

Das zu bearbeitende Forschungsthema baute damit auf den theoretischen und experimentellen Ergebnissen und Erfahrungen auf, die im Rahmen vorangegangener, von der DARA/DLR geförderten Aufgabenstellungen:

- *„Entwicklung eines Gradiometers auf Basis von DC-SQUIDs für ein Gravitationsexperiment am Fallturm Bremen“ (FKZ 05 WM 94 38) sowie*
- *„Untersuchungen zu hochempfindlichen SQUID-Positionsdetektoren für die Mission STEP und Durchführung experimenteller Tests am Fallturm Bremen“ (FKZ 50 OY98020)*

gewonnen wurden. Damit konnte erreicht werden, dass die während der letzten Jahre am Institut für Festkörperphysik der Friedrich-Schiller-Universität Jena gesammelten Erfahrungen mit SQUID-Positionsdetektoren und die magnetische Stabilisierungen von Testmassen in das Projekt STEP als einer der Beiträge Deutschlands einfließen. Die Notwendigkeit dafür wurde unter anderem auch vom STEP-Hardware-Team wiederholt betont. Die Einbeziehung in die Entwicklung einer für den Erfolg der STEP-Mission entscheidenden Hardwarekomponente ist eine außerordentliche Anerkennung für die erbrachten Leistungen der Projektgruppe und stellte zugleich eine große wissenschaftlich-technische Herausforderung dar.

Das von den Projektbearbeitern am Fallturm Bremen benutzte Messprinzip ist dem bei der STEP-Mission geplanten Messverfahren angelehnt. In beiden Fällen dienen klassische LTS-SQUIDS als höchstempfindliche Sensoren für die winzige Bewegung der Testkörper. Die bei diesen Experimenten gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen bieten daher eine gute Grundlage für eine zielstrebige Verbesserung und konsequente Weiterentwicklung der entscheidenden Komponenten des Systems für den Einsatz im Weltraum.

Die Entwicklung am Messsystem und seinen Komponenten waren neben der Erzielung einer hohen Ortsauflösung auch auf die Gewährleistung einer großen mechanischen und elektrischen Stabilität (z. B. Schwingungsfestigkeit) und die Reproduzierbarkeit der Systeme gerichtet. Aufgrund der aktuellen Erfordernisse wurde dabei besonderer Wert auf die Realisierung einer hochgenauen, interferenzoptischen Kalibrierung der Positionsdetektoren gelegt und dieser für die STEP-Mission wichtige Aufgabenkomplex zusätzlich zum Arbeitsplan bearbeitet.

Alle Messsysteme wurden so gestaltet, dass sie die erheblichen Belastungen in der Startphase des Experiments (Beschleunigung, Vibration usw.) möglichst ohne Empfindlichkeitsverlust bzw. Ausfall überstehen können, auch wenn die kostenintensiven Qualifizierungen nicht im Arbeitsplan vorgesehen waren.

Da im Experiment STEP eine Arbeitstemperatur von etwa 1,8 K sowie Ultrahochvakuumbedingungen geplant sind, mußten sowohl das SQUID-Positionsmesssystem (Sensor, Magnetfeldantennen) als auch die notwendige supraleitende Lagestabilisierung und die Testkörper selbst bei der angegebenen Betriebstemperatur gestestet werden. Das erforderte den Aufbau

geeigneter Kryotechnik und entsprechender Messmittel. Der aufgebaute Kryo-Teststand mußte die kontinuierliche Kühlung der supraleitenden SQUID-Positionsdetektoren und der entwickelten Komponenten sowie der beiden Testkörper unter Vakuumbedingungen mit einer Temperaturkonstanz von ± 10 mK sicherstellen.

Temperaturunterschiede in der Experimentierkammer sowie Temperaturdriften während der Messphase stellten Störgrößen dar, die sich nur sehr schwer von den eigentlichen Messsignalen des SQUID-Positionsdetektors trennen lassen und die Charakterisierung der Eigenschaften des Systems erschwerten oder unmöglich machten. In die Tests mußten daher schrittweise alle Systeme des STEP-Experiments, die für ihre Funktion magnetische Felder benutzen oder erzeugen bzw. magnetische Felder verändern können, als potentielle Störquellen einbezogen werden.

Da Heliumkryostaten zur Erzeugung von Temperaturen unter dem Siedepunkt des He-4 umfangreiche Pumpeinrichtungen benötigen, sind sie für Freifall-Experimente im Fallturm Bremen außerordentlich schwierig zu handhaben. Für den Test der zu entwickelnden Komponenten bei der Arbeitstemperatur (1,8 K) und unter Freifallbedingungen wurden daher andere experimentelle Möglichkeiten, wie z. B. Parabelflüge, Ballonabwürfe eruiert, aber letztlich aus Kostengründen nicht genutzt.

Neben den konstruktiven Arbeiten zur Auslegung und Optimierung der verschiedenen Positionsdetektoren spielte die Kalibrierung des Messaufbaues und die Bestimmung der erreichten Ortsauflösung des Systems eine entscheidende Rolle. Dazu wurden geeignete Verfahren erarbeitet und auf ihre Tauglichkeit hin getestet. Die besondere Schwierigkeit bestand hierbei in der Forderung, dass die Probekörper für den Kalibriervorgang berührungslos und ohne einwirkende Kräfte abgetastet werden mußten.

Die angestrebte Genauigkeit des Positionsdetektors setzte eine sehr geringe Rückstellkraft des Regelkreises voraus, um auch noch kleinste Kräfte nachweisen zu können. Als generell problematisch erwies sich in der Testphase der seismische Untergrund, der im Messlabor auf die Probekörper einwirkte, so dass die Testmessungen ständig z. B. durch Gebäudeschwingungen angeregt wurden. Da diese die aufzulösenden Messsignale z. T. erheblich überdecken, erfolgte der Einsatz einer kommerziellen schwingungsgedämpften Experimentierplattform, die den kompletten Versuchsaufbau aufnehmen kann und seismische Störungen wirkungsvoll aktiv bedämpfte.

Die impulsfreie Positionierung der Testkörper nach ihrer Freigabe in der Umlaufbahn ist ein zentrales Problem des STEP-Experiments. Ein geeigneter Caging-Mechanismus, der auch unter den Bedingungen des STEP-Experiments störungsfrei arbeitet, wurde parallel durch die Arbeitsgruppe Mikrogravitation der Universität Bremen in enger Zusammenarbeit mit der Jenaer Projektgruppe entwickelt und getestet.

Erfolgversprechende Versuche sowohl mittels magnetischer Freigabe als auch mittels Piezostellern wurden im Rahmen dieses Projektes durchgeführt und flossen in die Entwicklungsarbeiten am ZARM ein. Ziel der Weiterentwicklung war u. a. die Realisierung der momentfreien Freigabe der beiden Testkörper in Verbindung mit einem speziellen Algorithmus der Positionsregelung. Die erforderliche Verknüpfung der Subkomponenten Positionsmessung und Caging-System erforderte eine enge Zusammenarbeit der Jenaer und Bremer Arbeitsgruppen einerseits sowie der Hardware-Gruppe des STEP Teams andererseits.

Arbeitsergebnisse

Der folgende Abschlussbericht stellt eine Zusammenfassung der einzelnen Quartalsberichte dar. Im Berichtszeitraum wurden gemäß der im Arbeitsplan enthaltenen einzelnen Positionen folgende wesentliche Arbeiten durchgeführt:

1. Fertigung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Messplatzes für Labortests von STEP-Komponenten im Temperaturbereich von 1,8 bis 4,2 K.

Für den Test von STEP-Hardwarekomponenten unter Vakuum und unter kryogenen Bedingungen wurde ein spezieller Messplatz aufgebaut. Auf den entsprechenden STEP-Meetings wurden dazu die experimentellen Parameter abgestimmt. Der Vortest einzelner Komponenten mit Hilfe eines derartigen Messplatzes ist für das Hardware-Design unbedingt erforderlich.

Die Experimentierplanung für die Mission STEP sieht vor, die Messsysteme, die jeweils aus einem Testkörperpaar mit geeigneter Materialkombination, dem Positionsmesssystem sowie einer Reihe von magnetischen Hilfssystemen zur Justierung (Caging-Mechanismus) und Führung der Körper bestehen werden, bei der Arbeitstemperatur von 1,8 K zu betreiben. Diese Temperatur liegt unterhalb der kritischen Temperatur für den Eintritt der Superfluidität für He-4.

Im Temperaturbereich der Superfluidität wird im flüssigen Helium der störende Einfluß des



Abb. 1.1: Meßplatz zum Test von Komponenten bei kryogenen Temperaturen und unter Vakuumbedingungen (a - He-dichter Pumpstand, b - Kryostat, c - He-Weithalskanne, d - elektronische Meßtechnik).

Blasensiedens vermieden. Gleichzeitig kommt es beim Übergang zu Superfluidität zu einem Sprung im Wärmeleitvermögen des He-4 um ca. 3 Zehnerpotenzen (dieser Sprung ist auch für die Unterdrückung des Blasensiedens verantwortlich), wodurch eine hoch effektive Kühlung der Systemkomponenten gewährleistet werden kann. Voraussetzung dafür ist aber eine wirksame Ankopplung aller zu thermostatierenden Systemkomponenten über Wärmeleitvorrichtungen an das äußere Kältereservoir. Lose angekoppelte oder frei schwebende Komponenten, wie z. B. die Testmassen, können lediglich über Wärmestrahlung an das Reservoir angekoppelt werden.

Der aufgebaute Messplatz ist in Abb. 1.1 dargestellt. Die einzelnen Komponenten werden je nach Größe und Messaufgabe in den Kryostaten (b) bzw. in einen speziellen Vakuum-Meßstab für die He-Kanne (c) eingebaut. Mit dem He-dichten Vakuumpumpstand (a) kann die Temperatur des LHe-Bades durch Abpumpen des verdampfenden Gases über der Flüssigkeit auf Werte unterhalb des Normalsiedepunktes von 4,2 K gesenkt werden. Dies geschieht auf Kosten der Wärmemenge, die zur Dampfbildung des verdampfenden Flüssigkeitsanteils erforderlich ist. Zur Erzeugung einer Temperatur von 1,5 K muß bei guter thermischer Isolation des Gefäßes etwa 50% der zu Beginn vorhandenen Flüssigkeitsmenge verdampft (und abgepumpt) und ein Druck von ca. 0,5 kPa aufrechterhalten werden, wozu eine spezielle Helium-dichte Pumpe mit großer Saugleistung erforderlich ist.

2. Messungen von STEP-Komponenten im Temperaturbereich von 1,8 bis 4,2 K und unter μg -Bedingungen am Fallturm Bremen

Eine Bereitstellung von STEP-Komponenten durch das Hardware-Team der Stanford University erfolgte bis zum Abschluß des Projektes trotz mehrmaliger Ankündigungen nicht. Die entsprechenden Messungen werden ggf. zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt.

Aus diesem Grund wurden - nach Absprache mit dem Projektträger - wegen ihrer Relevanz und Aktualität für STEP die folgenden Punkte in den Arbeitsplan aufgenommen und zusätzlich durchgeführt:

- Erarbeitung einer Kalibriervorrichtung für SQUID-Positionssensoren (s. Kap. 6)
- Rauschuntersuchungen an SQUID-Sensoren (s. Kap. 7).

3. Adaption der SQUID-Positionssensoren der FSU Jena an das STEP-Probekörperdesign

Das für die Mission STEP vorgesehene Design für die Testmassen und die SQUID-basierten Positionssensoren ist in Abb. 3.1 dargestellt. Beide Testkörper haben eine hohlzylindrische Gestalt und sind konzentrisch angeordnet. Auf diese Weise fallen in der Anfangsposition (Mittellage) die Massenschwerpunkte übereinander. Für die axiale Führung sind mäanderförmige Spulensysteme, jeweils für den inneren und äußeren Probekörper, vorgesehen. Die Sensorspulen der SQUID-Positionsdetektoren sind als Flachspulen ausgelegt. Zur Halterung der im Messbetrieb mechanisch freigegebenen Testmassen beim Start der Trägerrakete sowie zu Grobpositionierung ist ein sog. Caging-Mechanismus enthalten. Dieser ist Forschungsgegenstand am ZARM der Universität Bremen. Alle Komponenten sind in einer Tragestruktur fixiert.

Unter Berücksichtigung dieses Designs wurde das in Abb. 3.2 dargestellte Meßsystem aufgebaut. Es entspricht in den wesentlichen Punkten der STEP payload. Um den Besonderheiten der Fallturm-Experimente Rechnung zu tragen, sind jedoch einige Details geändert worden. An den Außenseiten der Testkörper befinden sich abgeschrägte Flächen. Diese dienen der automatischen Zentrierung unter Schwerkraft, da das System mit der Zylinderachse in Fallrichtung angeordnet ist.

Die Optimierung der Gesamtform der Testkörper bzgl. ihrer gravitativen Momente wurde durch z.T. geringfügige Änderung von Wandstärke bzw. Länge erreicht. Dazu wurden umfangreiche theoretische Simulationen durchgeführt. Weiterhin befinden sich jeweils ober- und unterhalb der Körper Spulen zur Positionierung. Diese waren nötig, um die Körper in der - verglichen mit STEP - kurzen Messzeit bei Fallturm-Experimenten von 4,7 s an ihre Anfangspositionen zu bewegen und dort abzubremesen. Für diesen Vorgang wurde ein spezielles digitales Positioniersystem entwickelt.

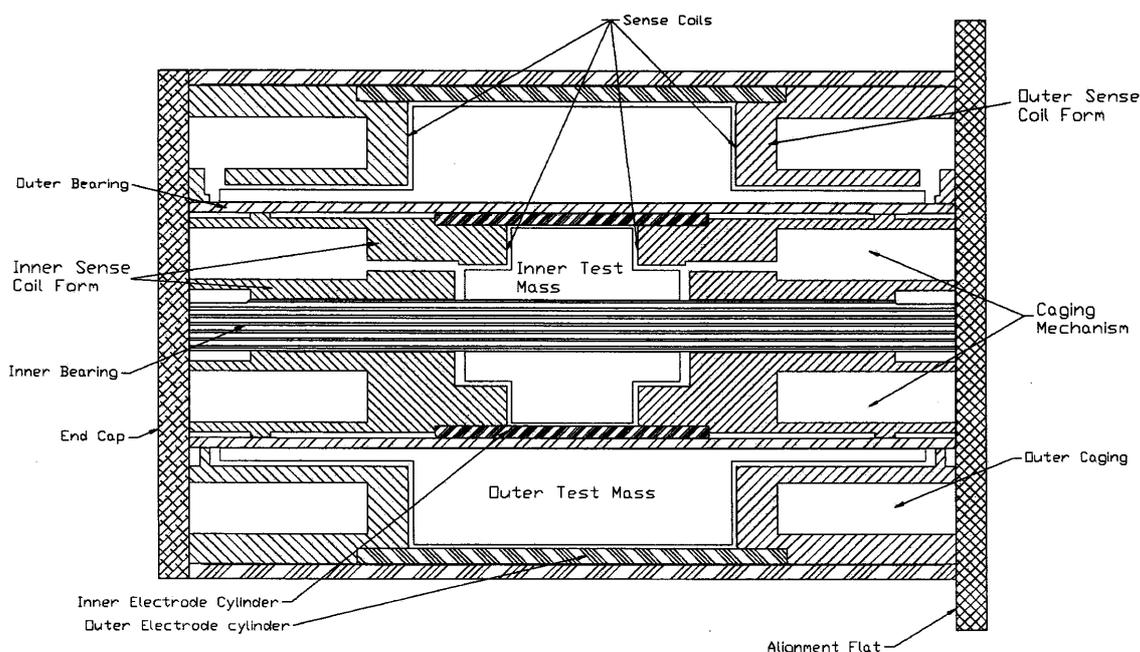


Abb. 3.1: Testmassen- und Sensordesign für STEP.

Zum Positionieren der Testkörper unter Schwerkraft wurde unter Einbeziehung entsprechender Untersuchungsergebnisse des ZARM ein Caging-Mechanismus aufgebaut. Dieser beruht auf dem Gasdruck von Helium in einem abgeschlossenen Volumen. Ein gasgefüllter flexibler Aktor dehnt sich bei Druckerhöhung und hebt so über Tragegestangen die Testkörper an. Die Drücke liegen im Bereich 10 ... 300 mbar Überdruck gegenüber dem Vakuumgefäß und werden durch die Gewichtskraft der Körper bestimmt. Bei diesen Drücken ist gesichert, daß das Heliumgas bei 4,2 K noch nicht kondensiert.

Auf Grund systematischer Untersuchungen verschiedener Geometrien der pick-up-Spulen für SQUID-Positionsdetektoren konnte gezeigt werden, daß die Tauchspulenkonfiguration bzgl. Linearität, Empfindlichkeit und Rückwirkungskraft klare Vorteile gegenüber den bislang in STEP geplanten Flachspulen besitzt. Dem gegenüber steht ein höherer technologischer Aufwand bei der Herstellung der Tauchspulen.

Für die Fallturm-Experimente wurden jedoch auf Grund ihrer Vorteile Tauchspulen aufgebaut (s. Abb. 3.2 g, h) und erfolgreich getestet. Alle Ergebnisse der Spulengeometrie-Optimierung sowie der Fallturmversuche wurden im STEP Hardwareteam vorgestellt und diskutiert, so daß diese Erkenntnisse bei den folgenden Design-Stufen entsprechend berücksichtigt werden können.

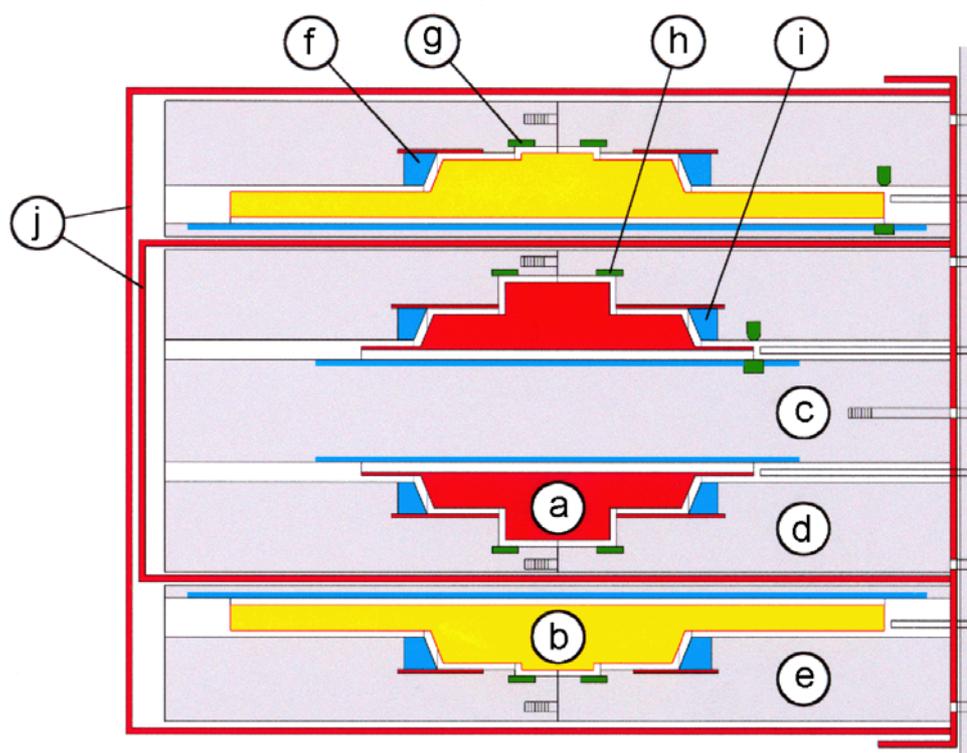


Abb. 3.2: Testmassen- und Sensordesign für die Durchführung der Fallturmexperimente (a - innere Testmasse, b - äußere Testmasse, c - innere Mäanderspule, d/e - Träger f. innere/äußere Positionier- und Sensorspulen, f/g - äußere Positionier-/Sensorspule, h/i - innere Positionier-/Sensorspule, j - supraleitende Schirmungen).

4. Untersuchungen zur mechanischen Stabilität und elektrischen Störfestigkeit der aufgebauten elektronischen Baugruppen und Schlußfolgerungen für die Raumflugtauglichkeit

Die an der Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelte SQUID-Geräte (*SQUID Control 3* und *SQUID Control 4*) waren ausschließlich für den erdgebundenen Einsatz konzipiert. Der Einsatz dieser SQUID-Meßtechnik im rauen Fallturmbetrieb bzw. in einem Satellitenexperiment erforderte daher gravierende Änderungen in der Schaltungstechnik. Um die SQUID-Meßtechnik unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit und den Einwirkungen starker Beschleunigungen und Vibrationen betreiben zu können, wurde ein autonom arbeitendes, fernsteuerbares Meßsystem realisiert, welches am Bremer Fallturm getestet werden konnte. Zum Aufzeichnen der Meßdaten und zur Ermittlung der Regelgrößen für das Positionierungssystem waren der Aufbau eines Datenerfassungssystems und eines Prozeßrechners nötig. Der Datenerfassungsrechner übernimmt auch die Steuerung diverser Betriebsparameter sowie die Synchronisation aller Datenerfassungs- und Meßsysteme.

Für den autonomen Betrieb ohne Möglichkeit eines Benutzereingriffs direkt am Messgerät wurden in das System eine Fernsteuerung integriert. Diese wurde über eine RS 232-Schnittstelle an den Steuerrechner im Labor bzw. im Kontrollraum des ZARM angeschlossen.

Die Stromversorgung erfolgte über Akkus, wobei Baugruppen mit kurzfristigem hohem Strombedarf eigene Akkus zugeordnet wurden.

Zur Wärmeabfuhr wurden großflächige und leistungsfähige Kühlkörper eingesetzt, auf bewegte mechanische Komponenten (Lüfter) wurde sowohl wegen der von den Lüftermotoren produzierten magnetischen Störfelder als auch wegen der mechanischen Anfälligkeit verzichtet.

Meßsystem *SQUID Control 5*

Das Meßsystem *SQUID Control 5* wurde im Hinblick auf den Einsatz in autonom arbeitenden, batteriegestützten und fernsteuerbaren Meßsystemen entwickelt, wie sie für das bearbeitete Projekt benötigt wurden. Notwendig waren dafür unter anderem die Integration einer Fernsteuereinheit für die verschiedenen Betriebsmodi, die automatische Nullpunkt-korrektur und die Änderung der Spannungsversorgung von Netzspannung auf 24 V Gleichspannung. Durch eine symmetrische Ansteuerung der SQUIDs wurde eine wesentliche Erhöhung der Störfestigkeit des Systems erreicht. Optimierungen in der Ausleselektronik des SQUID-Sensors führten zu einer deutlichen Erhöhung der Slewrates des Gesamtmeßsystems gegenüber den Vorgängermodellen. Eine erhöhte Packungsdichte der Bauelemente und eine verbesserte Topologie verringerten den Volumenbedarf. Die Schaltungstechnik hat sich für den vorgesehenen Einsatz bewährt, die mechanische Stabilität ist für Fallversuche am Bremer Fallturm ausreichend, für den Einsatz in einem Satellitenexperiment aber vermutlich nicht geeignet.

Die Raumqualifizierung von Bauelementen, Layoutgestaltung und Platinenanordnung konnten aus Budgetgründen bei dieser Entwicklung nicht berücksichtigt werden. Die derzeit verwendeten Gehäuse sind nicht raumfahrttauglich und somit für den angestrebten Satelliteneinsatz nicht geeignet.

Abb. 4.1 zeigt das 3-kanalige Meßsystem vom Typ *SQUID Control 5*, wie es im Rahmen des Projektes aufgebaut und getestet wurde. In Abb. 4.2 ist der innere Aufbau eines SQUID-Kanals und eines SQUID-Vorverstärkers dargestellt.

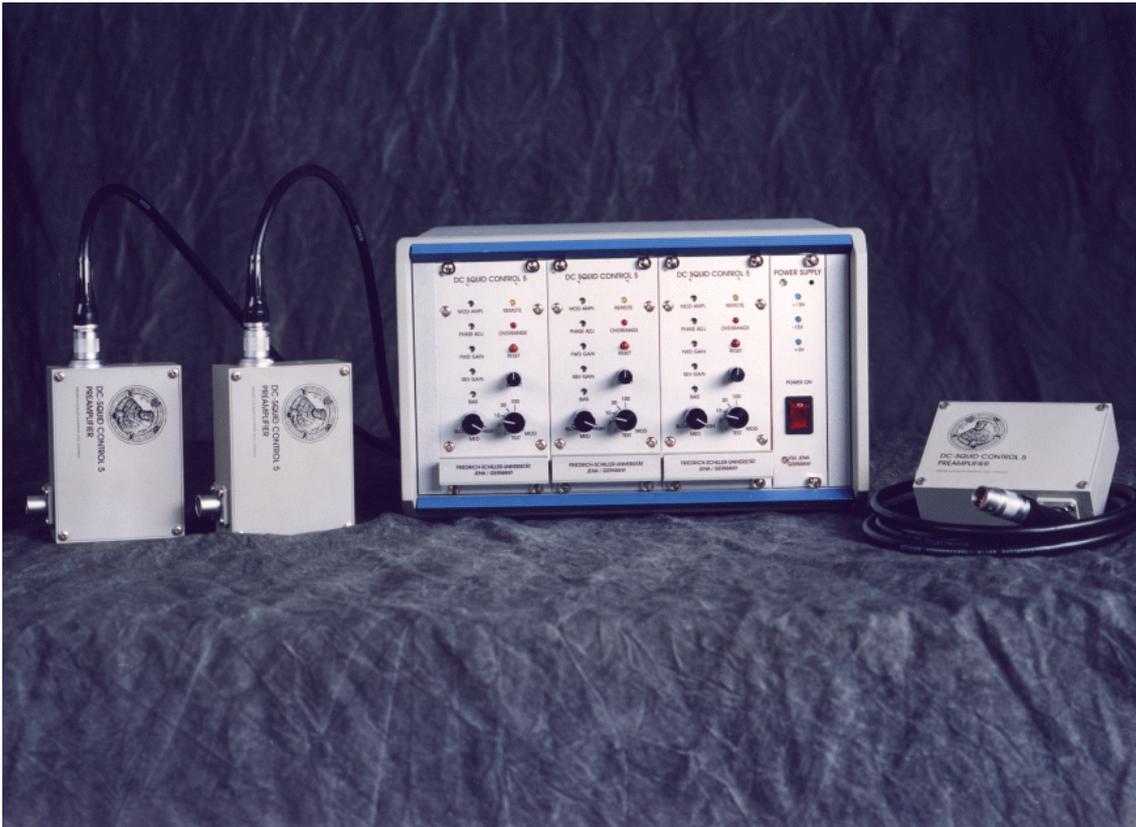


Abb. 4.1 DC SQUID Control 5

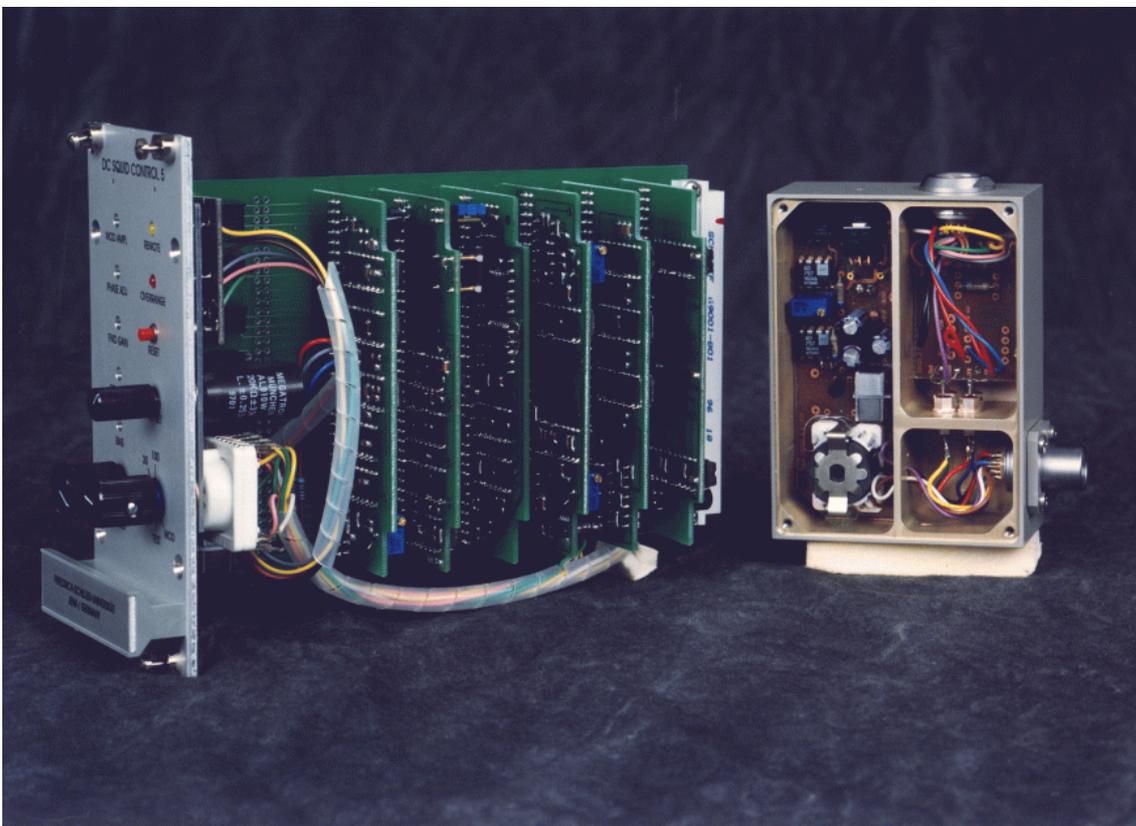


Abb. 4.2 Innerer Aufbau SQUID Control 5 und Vorverstärker

Potentialtrennung für Analogsignale

In der von uns realisierten komplexen Meßapparatur existieren mehrere, von einander unabhängige Spannungsversorgungen. Da die Meßsignale teilweise von mehreren, aus unterschiedlichen Spannungsquellen gespeisten Auswerteeinheiten aufgezeichnet werden, ist eine galvanische Trennung der Einheiten untereinander unverzichtbar. Nur so lassen sich unerwünschte Verkopplungen und die Entstehung von Fehlströmen, die das Meßsignal beeinflussen und verfälschen könnten, vermeiden.

Für unser hochauflösendes Meßsysteme ist es notwendig, auf strenge Linearität der Signalübertragung zu achten. Es wurden diverse Versuchsschaltungen aufgebaut und verschiedenen Übertragungsprinzipien auf ihre Eignung getestet. Dabei wurden sowohl Einzelbauelemente als auch industriell gefertigte Trennverstärker und Baugruppen auf ihre Eignung hin untersucht, wobei folgende Einsatzerfahrungen gesammelt wurden:

- C Mit konventionellen Optokopplern aufgebaute ergaben zu große Linearitätsfehler von bis zu $\pm 1\%$.
- C Trennverstärker auf Zerhacker-Transformator-Basis (z.B. Analog Devices, AD 202) besitzen eine sehr geringe Nichtlinearität von $\pm 0.025\%$, sind aber wegen ihrer geringen Signalbandbreite von ca. 5 kHz für SQUID-Applikationen nur bedingt geeignet.
- C Trennverstärker auf Basis kapazitiver Kopplung (z.B. Burr Brown, ISO 121) besitzen ebenfalls eine sehr geringe Nichtlinearität von $\pm 0.01\%$, verfügen aber nur über eine geringe Signalbandbreite von ca. 6 kHz.
- C Trennverstärker auf der Basis von Optokopplern (Burr Brown, ISO 100) besitzen unter optimalen Bedingungen eine Nichtlinearität von $\pm 0.1\%$ und eine Signalbandbreite von ca. 40 kHz.

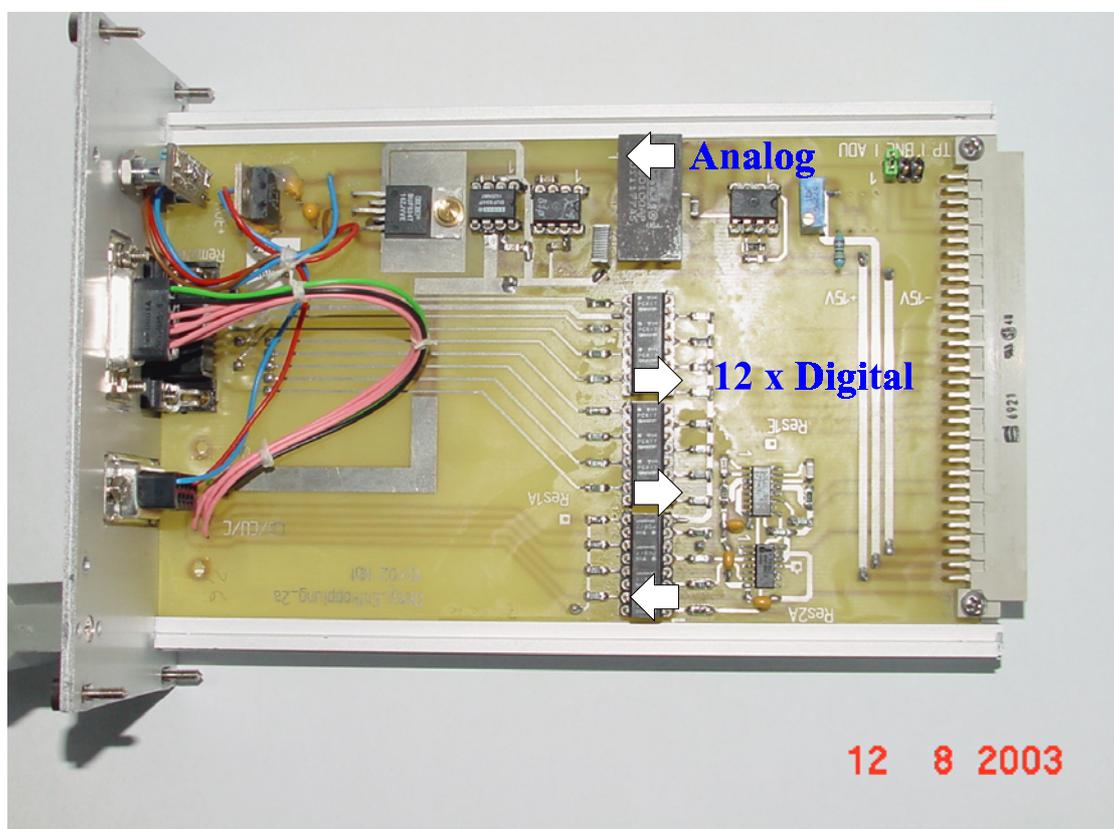


Abb. 4.3 Analogkoppler (mit ISO 100) und Digitalkoppler

Als Ergebnis unserer Untersuchungen ergab sich, dass für den Einsatz in einem SQUID-Meßsystem eine Kombination von optischer und kapazitiver Entkopplung sinnvoll erscheint, um schnelle Signale mit geringerer Auflösung und langsame Signale mit hoher Auflösung übertragen und in getrennten Meßkanälen erfassen zu können. Abb. 4.3 zeigt einen 12-kanaligen Digitalkoppler mit 1-kanaligem Analogkoppler (Eigenentwicklung).

Nach Projektende wurde ein neuer Trennverstärker von Analog Devices (AD 215, $\pm 0.005\%$, 120 kHz, lt. Datenblatt) verfügbar. Dieser Trennverstärker sollte im Rahmen eines folgenden Projektes für den Einsatz in unserem Meßsystem getestet werden.

Potentialtrennung für Digitalsignale

Für die Steuerung der Baugruppen unseres Meßsystems durch PC und zur Datenübertragung untereinander werden digitale Signale verwendet.

Um Störungen der Datenübertragung und Übersprechen digitaler Signale auf analoge Signale zu vermeiden, erfolgt eine galvanische Trennung der Module untereinander.

Ein bidirektionaler (10 Bit + 16 Bit) Digitalkoppler, eingesetzt in einem 8-kanaligen 16-Bit-AD-Wandler (Eigenentwicklung), ist in Abb. 4.4 zu sehen.

In unseren Schaltungen wurden für niederfrequente Schaltsignale Standardoptokoppler (K 847P, 4-fach-Koppler) und für hohe Übertragungsraten Optokoppler von HP (Typ 2631 und Typ 4562) eingesetzt.

Um auch sehr kurze Impulse (Spikes) sicher über die Optokoppler übertragen zu können, wurden den Kopplereingängen Impulsformer (Monoflops) vorgeschaltet.

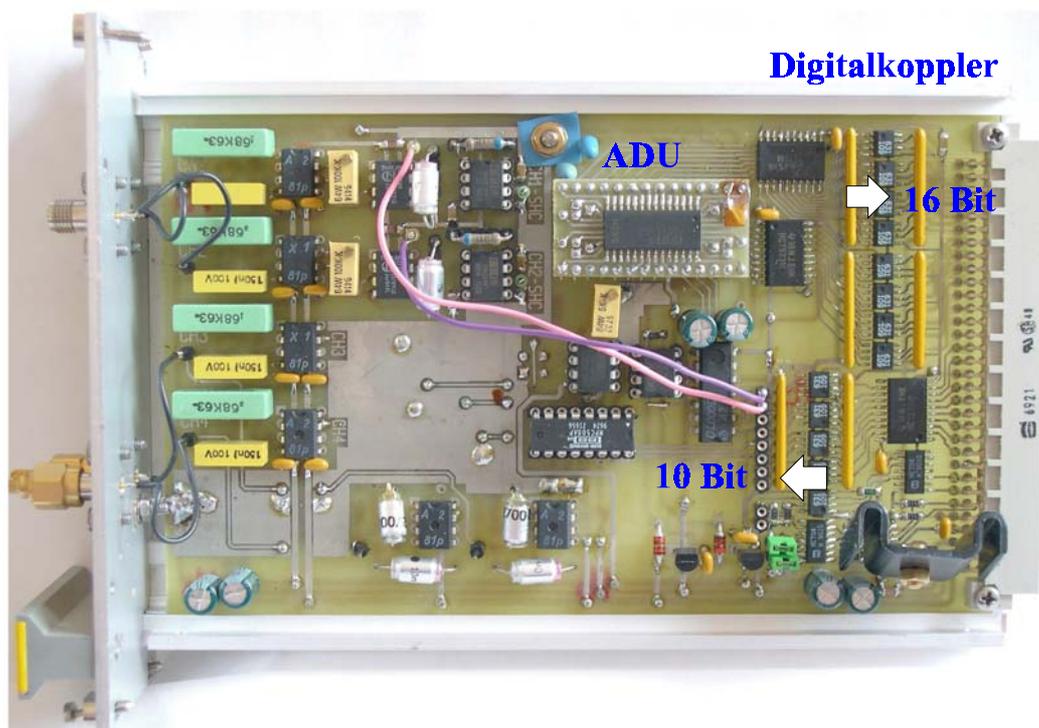


Abb. 4.4 Bidirektionales Digitalkopplemodul mit 8-kanaligen 16-Bit-AD-Wandler

Fernsteuerung

Der Betrieb unseres Meßsystems an akkugespeisten Stromversorgungen erforderte die Möglichkeit der gezielten Zu- und Abschaltung einzelner Komponenten zur Erhöhung der Akkulaufzeit und zur Vermeidung unnötiger Abwärme. Die Systemstabilität muß dabei jederzeit gewährleistet sein.

Ebenso ist es notwendig, Betriebszustände und elektrische Betriebsgrößen ferngesteuert zu verändern. Dafür wurden - für jedes Modul angepaßte - Schnittstellen entwickelt. Durch den Verzicht auf standardisierte Schnittstellen (wie RS 232, LPT, GPIB etc.) ließ sich die Zahl der benötigten Bauelemente minimieren.

Es hat sich jedoch im Verlaufe der Bearbeitungszeit gezeigt, daß es auf Grund fehlender Skalierbarkeit bei Änderungen oder Erweiterungen zweckmäßig wäre, bei kommenden Projekten auf standardisierte Schnittstellen mit optischer oder anderweitiger galvanischer Entkopplung überzugehen.

Stromversorgung

Die vom ZARM Bremen zum Einsatz in Freifallexperimenten empfohlenen Akkumulatoren erwiesen sich für den Einsatz in unserem Meßaufbau (Freeflyer) als zu groß und zu schwer. Deshalb erfolgten Tests mit Bleigelakkus der Serie 500 (Fa. Sonnenschein). Diese Serie zeichnet sich durch eine hohe mechanische Stabilität, hohe Kapazitätskonstanz und geringe Empfindlichkeit gegenüber Tiefentladung aus. Erfolgreich getestet wurden 5 Akkus verschiedener Kapazitäten, wobei es zu keinerlei Ausfällen kam. Zwischenzeitlich stellte auch das ZARM Bremen die Stromversorgung weitgehend auf die von uns als optimal angesehene Akkuserie um.

Die in unserem Experiment realisierten elektronischen Baugruppen benötigen meist zwei Betriebsspannungen für analoge und eine Betriebsspannung für digitale Baugruppen. Eine Spannungsversorgung direkt vom Akku ist aus Platzgründen, Potentialproblemen, nicht verfügbaren Spannungen sowie unzureichender Spannungskonstanz nicht möglich.

DC-DC-Wandler mit großem Eingangsspannungsbereich stellen alle benötigten Versorgungsspannungen bereit, garantieren die geforderte galvanische Trennung zwischen den einzelnen Baugruppen, verfügen über eine hohe Konstanz der Ausgangsspannung und lassen sich über einen Remoteeingang ferngesteuert ein- und ausschalten. Da alle handelsüblichen DC-DC-Wandler als getaktete Wandler aufgebaut sind, ist der Ausgangsgleichspannung eine höherfrequente Wechselspannung (ca. 70 .. 150 kHz, Nadelimpulse), überlagert. Dieser Ripple kann die Funktion besonders bei empfindlichen Analogbaugruppen stören.

Vergleiche zwischen verschiedenen Modellen ergaben, das Wandler der Fa. Schroff für unsere hochempfindlichen Meßaufbauten völlig ungeeignet sind, wogegen Wandler der Fa. Vero und der Fa. Autronic - jeweils mit einer zusätzlichen RC-Kombination am Ausgang versehen - sehr gut auch in Verbindung mit SQUIDS verwendbar sind. Die vollständig mit Epoxydharz vergossenen Autronic-Wandler sind besonders für den Einsatz bei starken Beschleunigungen und Vibrationen geeignet, wie sie im Fallturmbetrieb unvermeidbar sind.

Alle eingesetzten Wandler blieben bei den Fallversuchen am Bremer Fallturm sowohl mechanisch als auch elektrisch ohne Beschädigungen und Ausfälle.

5. Durchführung von Falltests mit SQUID-Positionsdetektoren der FSU und abschließende Charakterisierung

Am Fallturm Bremen können einzelne STEP Hardware-Komponenten, wie z.B. die SQUID-Positionsdetektoren, unter weltraumähnlichen Bedingungen getestet werden. Innerhalb der Freifallzeit von 4,74 s herrscht in der Fallkapsel nahezu Schwerelosigkeit ($a < 20 \mu g$). Am Ende des Fluges tritt jedoch durch das Abbremsen eine sehr hohe Beschleunigung auf, was erhöhte Anforderungen an die Stabilität des Aufbaus stellt. In Abb. 5.1 ist ein typischer Beschleunigungsverlauf dargestellt.

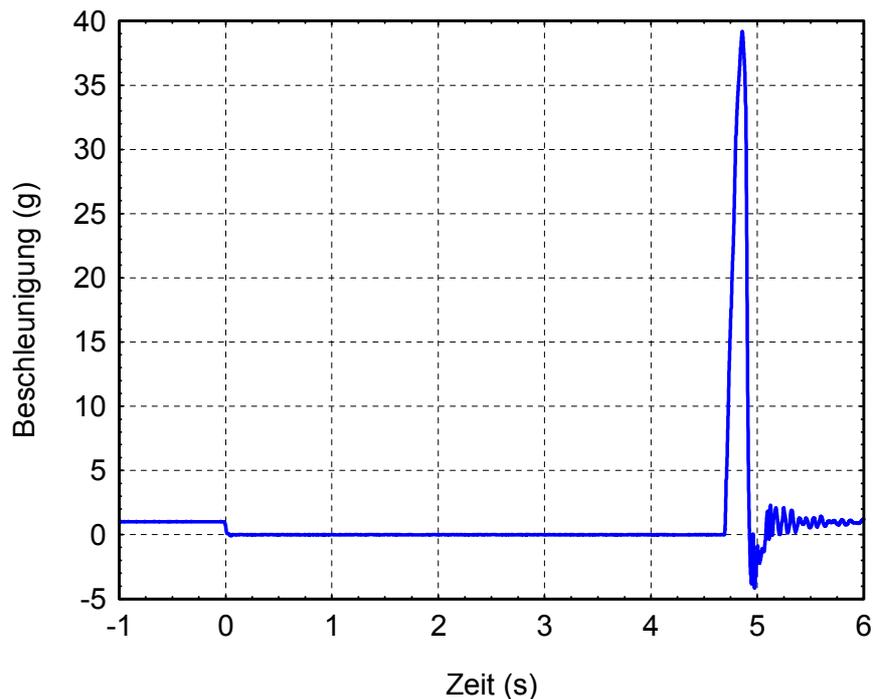


Abb. 5.1: Beschleunigung in Fallrichtung in der Fallkapsel während eines Freifallexperimentes am Fallturm Bremen. Am Ende des Fluges (4,74 s) tritt ein Beschleunigungsspeak von ca. 40 g auf.

Die für die Tests verwendete Fallkapsel mit Kryostat, Vakuum-Handling-System, elektronischen Messeinrichtungen, Experimentrechner/Datenspeicher und Energieversorgung ist in Abb. 5.2 dargestellt. Mit Hilfe des enthaltenen He-Badkryostaten konnten kryogene Temperaturen (4,2 K) erzeugt werden. Aufgrund seiner speziellen Bauform ist eine hohe mechanische Stabilität gewährleistet. Eine Besonderheit dieser Fallkapsel besteht darin, daß sie im Inneren einer größeren Kapsel ohne mechanische Verbindung zu dieser frei fällt. Durch dieses Konzept (Freeflyer) wird die Restbeschleunigung weiter reduziert und die Weltraumbedingungen können damit noch besser simuliert werden.

Die eingesetzte hochempfindliche DC-SQUID Apparatur und die Kryotechnik arbeiten während des freien Falls zuverlässig und ohne Beanstandungen und besitzen ausreichende mechanische Stabilität, um auch während der Abbremsphase Verzögerungen von bis zu 40 g auszuhalten. Aus den aufgezeichneten Daten für den Gasdruck im Inneren des Kryostaten und des LHe-Füllstandes konnte ferner geschlossen werden, daß während der Phase der Schwerelosigkeit stabile Druck- und Temperaturverhältnisse im Kryostaten herrschen - eine wichtige Vor-

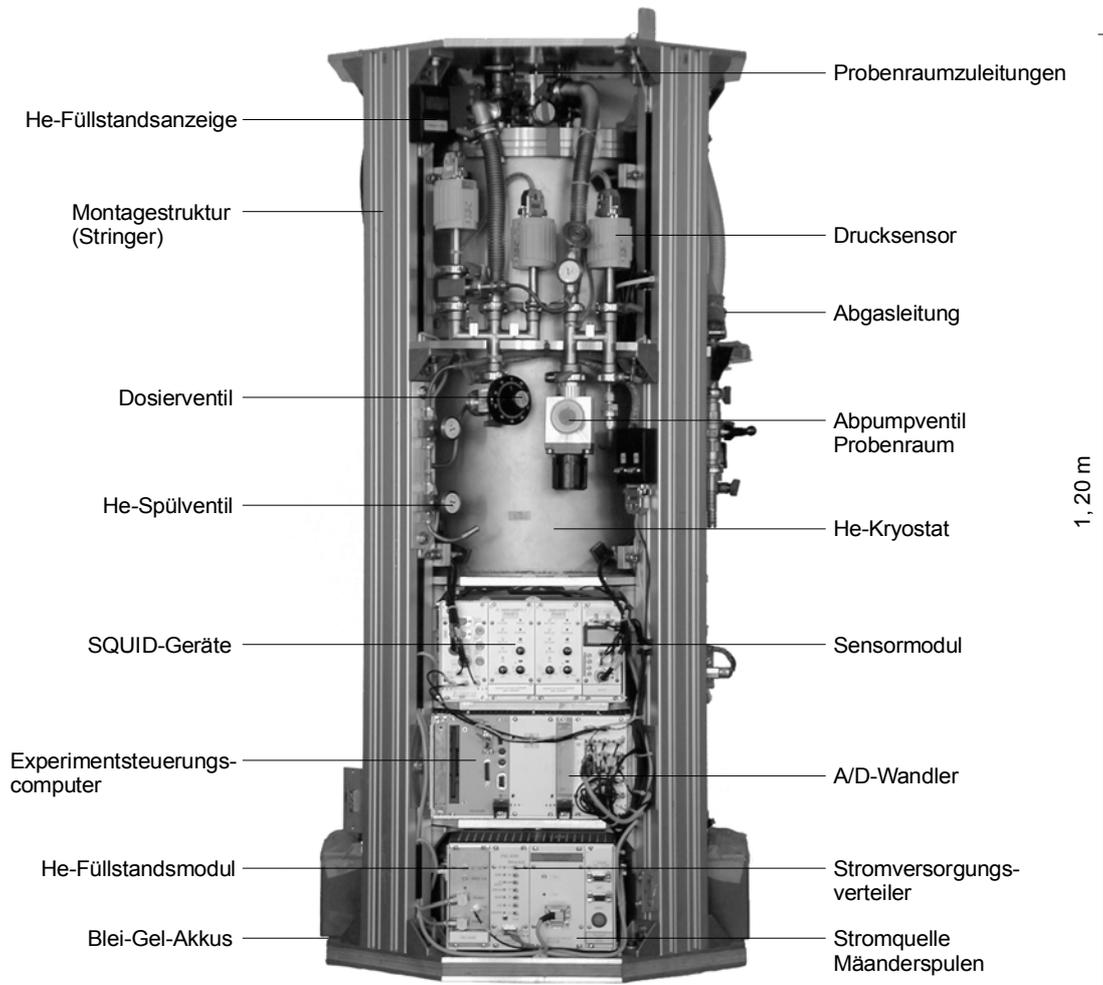


Abb. 5.2: Spezielle Fallkapsel (Freeflyer) zum Test der SQUID-Positionsdetektoren unter Mikrogravitationsbedingungen am Fallturm Bremen.

bedingung für die angestrebte extreme Empfindlichkeit des SQUID-Meßsystems. Der durchaus denkbare und zunächst befürchtete Druckanstieg durch Flüssigkeitsturbulenzen während der kritischen Phase der Schwerelosigkeit, aber auch zum Zeitpunkt des Eintretens der Fallkapsel in den Auffangbehälter, konnte bisher in keinem Fall beobachtet werden. Dennoch wurden entsprechende Sicherheitsvorkehrungen in der Fallkapsel installiert und erfolgreich getestet.

Wie im Kap. 3 erwähnt, wurden die Testkörper im Meßsystem nach der Freigabe des Freeflyers positioniert und abgebremst. Dazu kam das ebenfalls erwähnte digitale Reglermodul (Positionierungscomputer) zum Einsatz. Dabei wurden auf der Basis der jeweils aktuell gemessenen Positionen bzw. Geschwindigkeiten der Testkörper Stromimpulse mit vorausberechneten Amplituden und Dauern in den entsprechenden Tragespulen erzeugt, um die Körper definiert zu beschleunigen bzw. abzubremesen.

Ein Beispiel einer Positioniersequenz für den inneren Testkörper während eines Freifallexperimentes, bestehend aus 3 Impulsen, ist in Abb. 5.3 dargestellt. Zu Beginn bewegte sich der Körper von der Zielposition (Mitte des Bewegungsbereiches, entspricht Position Null in Abb. 5.3) weg und hatte davon einen Abstand von ca. 200 μm . Der erste Impuls (obere Tragespule) kehrte die Bewegungsrichtung um und beschleunigte den Körper in Richtung des Zieles. Nachdem der Körper ca. die Hälfte des Weges zurückgelegt hatte, wurde er durch den zweiten

Impuls (untere Tragespule) abgebremst. Durch den dritten Impuls (untere Tragespule) mit halber Amplitude wurde die Endgeschwindigkeit im Rahmen der Messgenauigkeit auf Null reduziert.

Der Körper bewegte sich zu Beginn mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/s. Der erste Impuls verursachte für die Dauer von 30 ms eine Beschleunigung von -98 mm/s^2 bei einem Strom von 840 mA in der oberen Tragespule, wodurch die Geschwindigkeit einen Wert von $-4,8 \text{ mm/s}$ erreichte. Durch den zweiten Impuls wurde die Geschwindigkeit wieder stark reduziert. Die Restgeschwindigkeit von $-0,2 \text{ mm/s}$ wurde durch den dritten Impuls unterdrückt. Dieser erzeugte für die Dauer von 7,1 ms eine Beschleunigung von ca. 24 mm/s^2 bei einem Strom von 420 mA in der unteren Tragespule. Der Betrag dieser Beschleunigung bei der Hälfte des o.g. Stromes entspricht im Rahmen der Messgenauigkeit $1/4$ des Wertes für einem Strom von 840 mA, da die Kraft, die auf den Testkörper ausgeübt wird, näherungsweise proportional zum Quadrat des Stromes ist. Die Endgeschwindigkeit dieser Sequenz mit einer Gesamtdauer von 119 ms betrug ca. $5 \text{ } \mu\text{m/s}$, d.h. die Geschwindigkeit wurde um den Faktor $1/60$ reduziert. Bemerkenswert ist, daß die vom Positionsregler berechneten und automatisch erzeugten Impulse sowohl in der Amplitude als auch in der Dauer variieren. Außerdem vergrößert sich die Messzeit zur Bestimmung der Geschwindigkeit (Abstand zwischen Impulsen) bei betragsmäßig kleineren Geschwindigkeiten, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

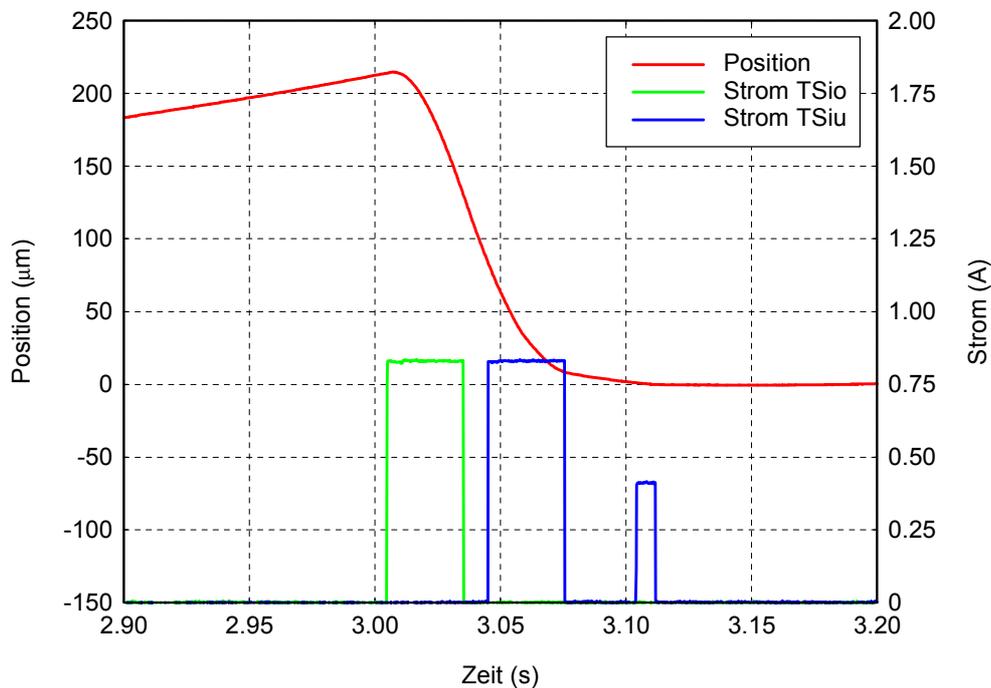


Abb. 5.3: Gemessener Verlauf eines Positioniervorganges des inneren Testkörpers während eines Freifallexperimentes. Durch die ersten beiden Impulse in oberer bzw. unterer Positionerspule (TSio bzw. TSiu) wird der Körper um ca. $200 \text{ } \mu\text{m}$ bewegt. Der dritte Impuls mit verminderter Amplitude korrigiert die Endgeschwindigkeit im Rahmen der Messgenauigkeit auf Null.

6. Konzeption und Aufbau einer Kalibriervorrichtung im Nanometerbereich mittels LASER-Interferometrie für SQUID-Positionsdetektoren (zusätzlich zum Arbeitsplan)

Das Ziel dieser Teilaufgabe war, eine Messvorrichtung aufzubauen, die in der Lage ist, hochempfindliche SQUID-Positionsdetektoren nahe der Auflösungsgrenze zu kalibrieren. Aufgrund der sehr hohen Auflösung bieten sich hier nur sehr wenige Verfahren an. Zusätzlich muss die gewählte Variante Kältetauglichkeit besitzen, d.h. bei Temperaturen von ca. 4 K arbeitsfähig sein.

Als Vorbild für den von uns konzipierten Aufbau dienten Untersuchungen der Fakultät Physik der Universität Konstanz. Hier wurde zur hochgenauen Stabilisierung von Lasern ein Saphir-Resonator bei 1,2 K aufgebaut. Saphir besitzt einen extrem kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der in Verbindung mit der niedrigen Arbeitstemperatur eine Frequenzstabilität von $<10^{-14}$ ermöglichte. Rückwirkend konnte dann die thermische Ausdehnung einer Saphirkammer bei 1,9 K bestimmt werden.

Der hier verwendete Aufbau diente als Grundkonzept für unsere Überlegungen.

Da die Anordnung für die Kalibrierung des SQUID-Messsystems dimensioniert wird, muss für die Längenbestimmung ein Messfehler ($\Delta L/L$) von kleiner 10^{-9} angestrebt werden. Damit ergibt sich für die Frequenzstabilität des Lasers:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \nu}{\nu}$$

mit: ν = Frequenz des Lasers,
 $\Delta \nu$ = Langzeit-Frequenzabweichung

und im speziellen für den minimalen Fehler des Weges:

$$\Delta \nu = \nu \cdot \frac{\Delta L}{L} = \frac{10^{-9} m}{0,02 m} \cdot 5 \cdot 10^{14} Hz = 2,5 \cdot 10^7 Hz$$

Zum Erfüllen dieser Kriterien mußte der eingesetzte Laser frequenzstabilisiert sein. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Optik der Fakultät Physik und unter Nutzung der dort vorhandenen umfangreichen Erfahrungen wurde die in Abb. 6.1 gezeigte prinzipielle Anordnung erarbeitet.

Als Referenzsensor für die Positions- oder Wegkalibrierung dient ein Michelson-Interferometer. Der frequenzstabilisierte Laser wird über einen Monomode-Lichtwellenleiter in den Messaufbau eingekoppelt. Das Interferometer selbst besteht aus einem festen Spiegel und einem mit dem Positionssensor verbundenen, beweglichen (Spiegel 1 und 2). Das am Strahlteiler entstehende Interferometerbild wird über ein Objektiv auf die CCD-Kamera abgebildet, siehe Abb. 6.2.

Ein spezielles Programm berechnet danach aus dem Kamerabild die Verschiebung des Spiegels 2. Zuerst wird eine Mittelung über alle 576 Zeilen des Bildes durchgeführt. So können Abbildungsfehler der Optik minimiert werden. Abbildung 6.3 verdeutlicht dies anhand der Darstellung einer einzelnen Zeile sowie des errechneten Mittelwertes.

Das hier angewandte Verfahren stellt bereits eine wirksame Unterdrückung auftretender Stör-

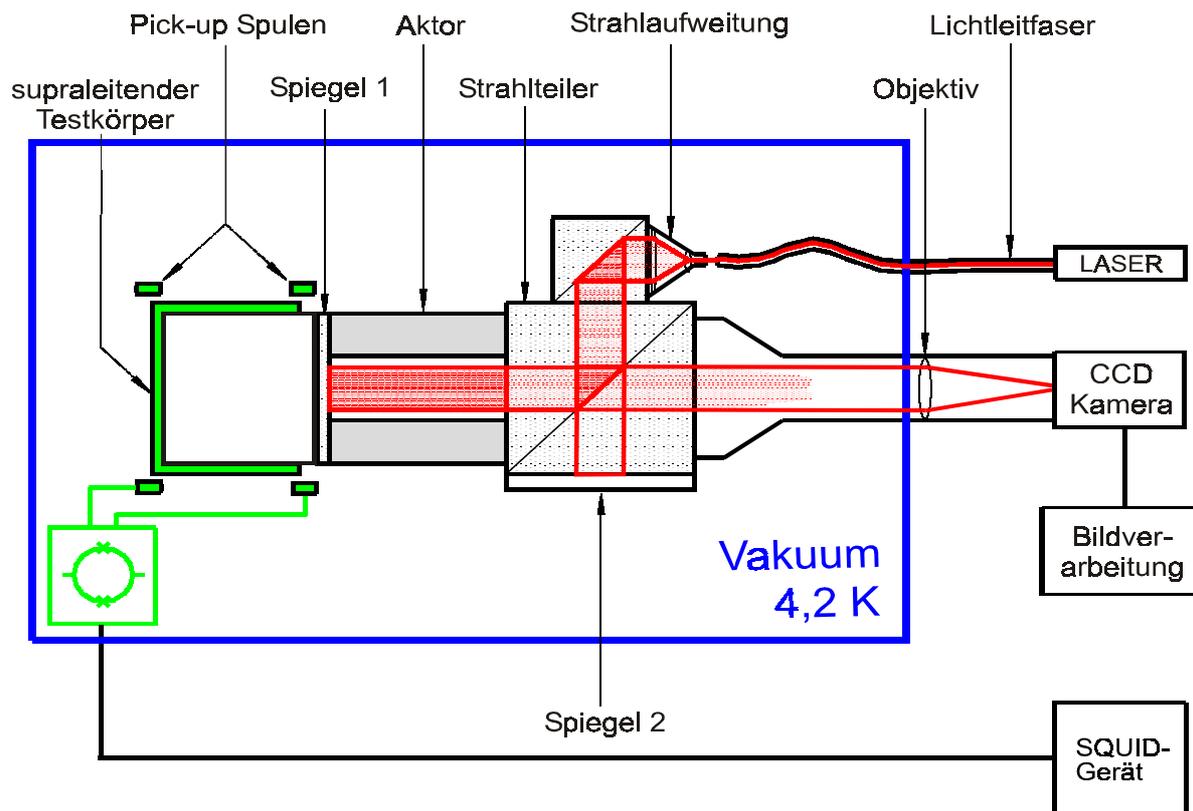


Abb. 6.1: Schematischer Aufbau der Kalibriervorrichtung

gen dar. Über eine Fouriertransformation wird die Ortsfrequenz der Streifen bestimmt. Wurde die Frequenz ermittelt, so kann über die Phaseninformation (Verschiebung der Streifen) eine Umrechnung auf den zurückgelegten Weg erfolgen. Mit einer höheren Anzahl von Streifen nimmt dabei die Genauigkeit der Auswertung zu, da die Periodizität des Signals genutzt werden kann.

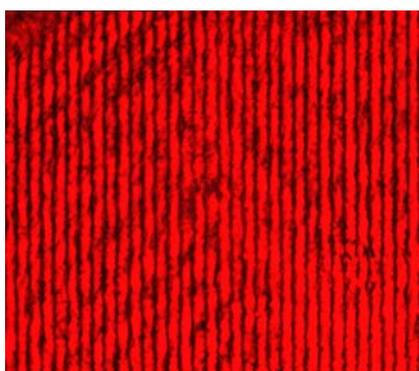


Abb. 6.2: CCD-Kamerabild der Interferenzstreifen

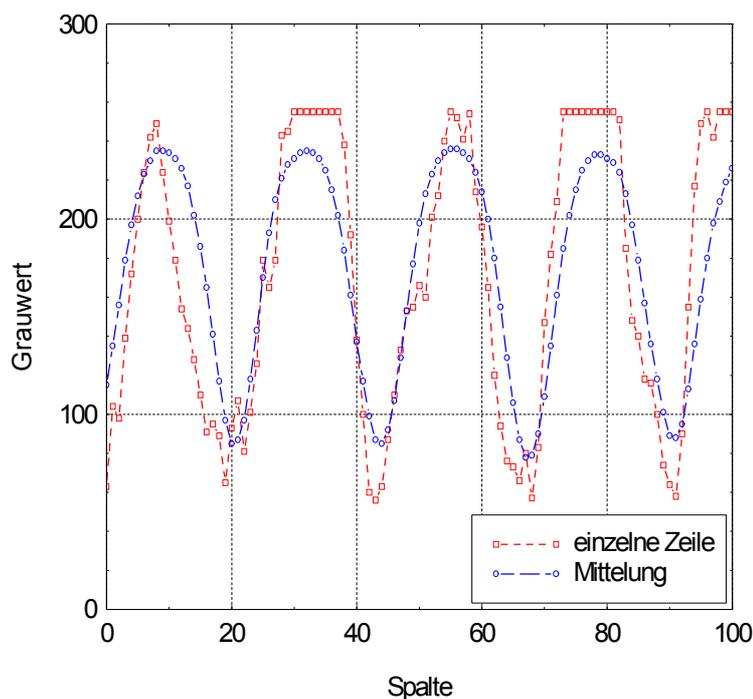


Abb. 6.3: Intensitätsverlauf des Interferenzstreifenmusters (Bildausschnitt)

Allerdings wird die maximale Anzahl der Streifen durch die Auflösung der Kamera begrenzt, d.h. der Streifenabstand muss groß gegen die laterale Ausdehnung eines Kamerapixels sein. Im gesamten Meßablauf steuert das Programm über einen Algorithmus den Aktor, mißt anschließend die Verschiebung des Interferometerspiegels und nimmt das Positionssignal des Sensors auf. Alle Werte werden in einer Datei abgelegt und stehen dann zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Als Aktor für die aktive Verstellung diente vorerst ein Piezosteller. Dieser ist gegenüber dem Saphir-Resonator leichter zu handhaben und besitzt einen größeren Verstellbereich.

Der gesamte Interferometeraufbau, der Aktor und die Positionssensoren befinden sich bei einer Temperatur von ca. 4 K. Zusätzlich ist der Messraum evakuiert und zum thermischen Ausgleich mit einer geringen Menge an Helium-Austauschgas gefüllt. Nur so kann eine ausreichende Kühlung aller Komponenten und damit die Funktion des Interferometers gewährleistet werden.

Die Vorgaben der Optik und der Kryotechnik bzw. Vakuumtechnik waren jedoch nur schwer miteinander zu vereinbaren. Für den Betrieb mit den erwarteten Auflösungen war es unumgänglich, dass die Verschiebung der optischen Komponenten gegeneinander kleiner als die erzielte Auflösungsgrenze ist. Allein die stark unterschiedlichen Längenausdehnungen der optischen Elemente (Glas) und der kryotechnischen Bauteile (Metall) erforderte aufwendige konstruktive Maßnahmen. Diese konnten zusätzlich durch nachträgliche Verbesserungen in Verbindung mit wiederholten Tests verbessert werden.

Trotz des optimal an die Gegebenheiten angepassten Aufbaus ist es erforderlich, den Einkühlprozeß äußerst langsam zu gestalten.

In Abb. 6.4 ist der zeitliche Verlauf eines optimalen Zeitregimes dargestellt. Der Prozess erstreckt sich über mehrere Stunden, da speziell beim Abkühlen neben der unterschiedlichen thermischen Längenausdehnung der Bauteile auch die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit Probleme bereitet und zu Beschädigungen der Apparatur führen kann.

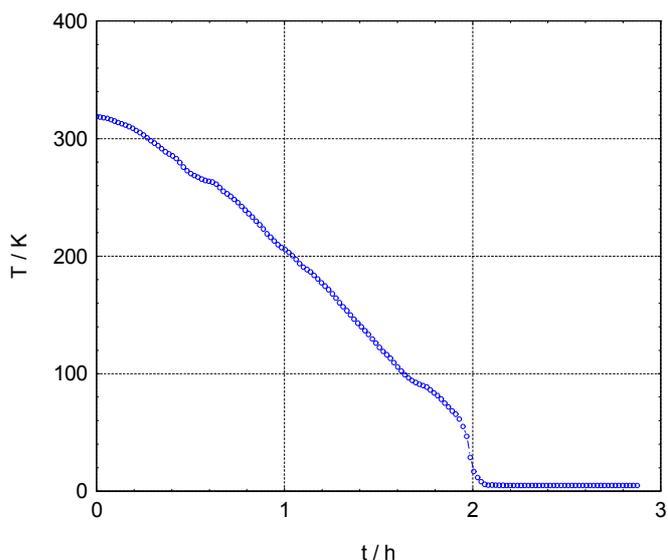


Abb. 6.4: optimaler Temperaturverlauf beim Einkühlen des Kryointerferometers

Der in Abb. 6.5 dargestellte fertige Aufbau wurde zunächst bei Zimmertemperatur in Betrieb genommen, justiert und die Funktion des Interferometers getestet. Es ergab sich eine Auflösung, die mit einem Wert von $\Delta x = 0,3$ nm dem abgeschätzten Wert entspricht.

Am oberen Ende befinden sich die CCD-Kamera, vakuumdichte elektrische Durchführungen und der Pumpanschluss.

Die Interferometerpatrone beinhaltet das Interferometer sowie die SQUID-Positionsdetektoren. Als rauschunterdrückende Ergänzung kann über die Patrone zusätzlich eine Hülse aus supraleitendem Hartblei geschoben werden.

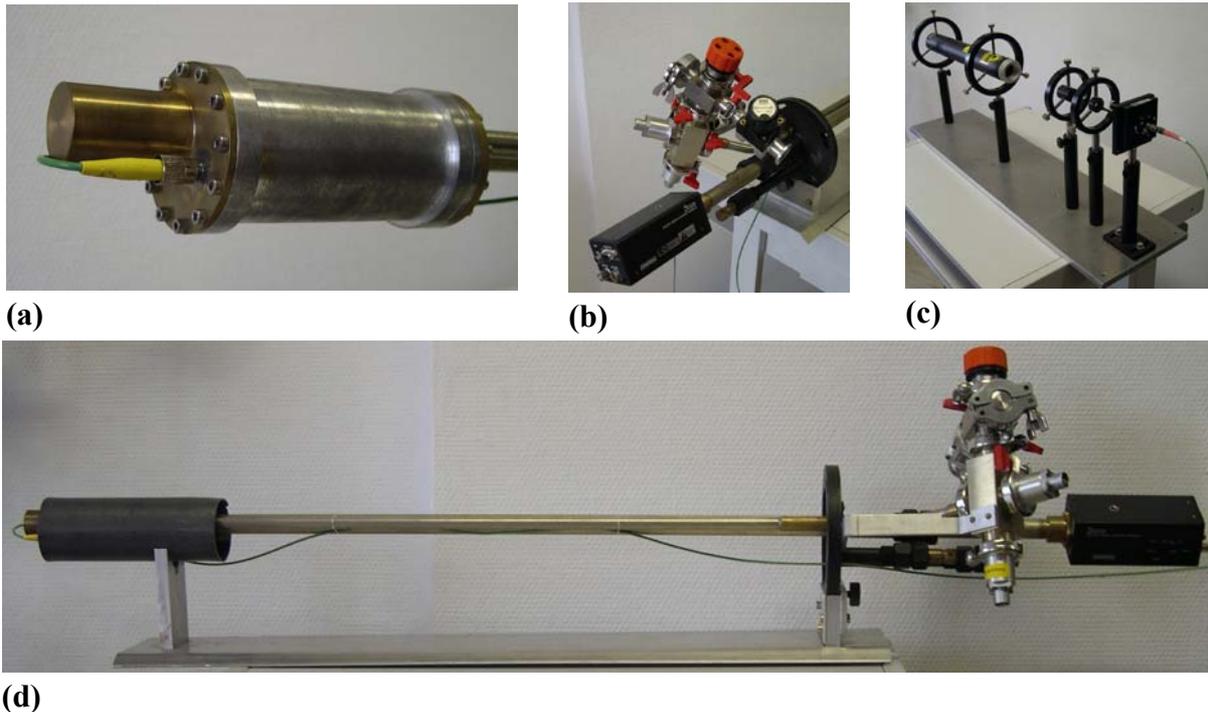


Abb. 6.5: Kryointerferometer (d) und seine Komponenten:

- (a): Interferometerpatrone mit Lichtwellenleiter
- (b): Oberteil mit CCD-Kamera, elektrischen Verbindern, Kryostatenansatz
- (c): frequenzstabilisierter Laser mit Einkoppeloptik

Nach dem Einkühlen mit dem bereits erwähnten Zeitregime konnte die Abhängigkeit $\Delta L/\Delta U$ des Piezostellers aufgenommen und mit der bei Zimmertemperatur gemessenen verglichen werden. Dabei ergaben sich die in Abb. 6.6 dargestellte Verläufe. Der Stellbereich des Piezoaktors sinkt bei 160 V von ca. 16 : m bei 300 K auf ca. 1,1 : m bei 4,2 K ab. Der verbleibende Stellbereich ist dennoch ausreichend für die Kalibrierung der Sensoren.

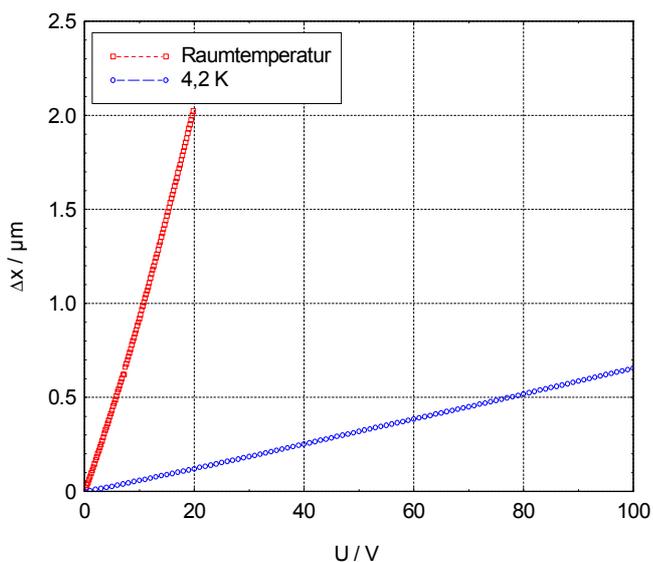


Abb. 6.6: Stellbereich des Piezoaktors bei Raumtemperatur und bei 4,2 K

Dank der gewählten Konstruktion sind wir außerdem in der Lage, alternative Aktorkonzepte im Kryointerferometer zu nutzen bzw. zu kalibrieren.

Neben der an der Universität in Konstanz genutzten thermischen Längenänderung von Saphir kommen die thermische Längenänderung anderer Materialien, wie Teflon oder Makrolon sowie weitere physikalische Effekte in Betracht.

Als Beispiel hierfür kann die Volumenänderung eines Gases in einem flexiblen Metallzylinder (Balg) angeführt werden. Für das Verfahren der thermischen Expansion wurden trotz ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit Teflon und Makrolon gewählt, da diese Materialien bei der Arbeitstemperatur von 4,2 K die größten linearen Ausdehnungskoeffizienten besitzen.

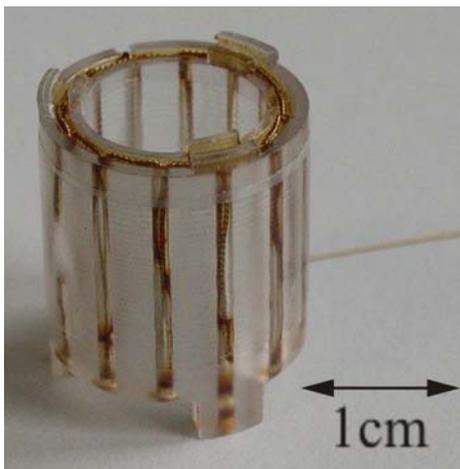


Abb. 6.7: Makrolonaktor

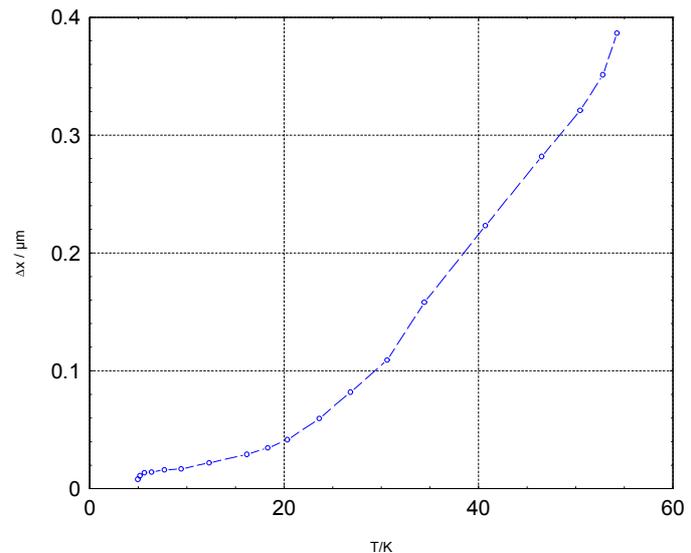


Abb. 6.8: Längenänderung des Teflonaktors in Abhängigkeit von der Temperatur

Abb. 6.7 zeigt den Aktor aus Makrolon, der neben einem Teflonaktor im Interferometeraufbau kalibriert wurde. Die Verstellkurve in Abhängigkeit von der Temperatur im Aktor ist in Abb. 6.8 dargestellt. Man erkennt den kleineren Verstellbereich gegenüber dem Piezosteller, jedoch benötigt dieses Stellelement keine Spannungen im dreistelligen Volt-Bereich, die bei SQUID-Messungen störenden Einfluss zeigen können.

Mit dem Messaufbau konnte eine Kalibrierengenauigkeit von

$$\Delta x = 0,4 \text{ nm}$$

erreicht werden.

Diese extrem hohe Genauigkeit kann durch Mittelung über mehrere Messwerte noch um bis zu einer Zehnerpotenz gesteigert werden.

Mit Hilfe dieser Messanordnung sind wir nun in der Lage, hochempfindliche Positionssensoren wie z.B. SQUID-Positionssensoren für STEP-Missionen zu kalibrieren. Die Kalibrierung erfolgt für eine Arbeitstemperatur von 4,2 K. Darüber hinaus können auch Stellelemente hinsichtlich ihrer Eingangssignal-Verschiebungs-Kennlinie bei niedrigen Arbeitstemperaturen charakterisiert und kalibriert werden.

7. Vergleichende Rauschuntersuchungen an SQUIDs verschiedener Hersteller im niederfrequenten Signalfrequenzbereich hinsichtlich des Einsatzes für STEP (zusätzlich zum Arbeitsplan)

Aufgrund der aktuellen Erfordernisse bei STEP wurden zusätzlich zum Arbeitsplan systematische vergleichende Rauschuntersuchungen insbesondere an Jenaern und Quantum Design-SQUIDs (USA) vor allem im unteren Frequenzbereich (10 μ Hz bis 1 Hz) durchgeführt. Diese sehr aufwendigen und zeitintensiven Untersuchungen dienten der Charakterisierung des $1/f$ -Rauschens der SQUIDs und haben für das STEP-Experiment (Signalfrequenz: 10 ...100 μ Hz) größte Bedeutung. Die Fehleranalyse des Stanford-Teams hat gezeigt, dass das Eigenrauschen der für die Akzelerometer eingesetzten SQUIDs die erzielbare Genauigkeit des Experiments bestimmt.

Wichtigste gerätetechnische Voraussetzung für diese Messungen bestand in der Nutzung eines für diesen Signalfrequenzbereich geeigneten Spektrum-Analysators, der im vorangegangenen Projekt angeschafft worden war. Das eingesetzte Gerät HP 35670A der Firma Hewlett Packard gestattete sowohl die Analyse der geforderten niedrigen Signalfrequenzen als auch die gleichzeitige Messung von zwei Signalquellen und bot damit exzellente messtechnische Voraussetzungen für vergleichende Untersuchungen.

Wissenschaftliches Ziel war die Aufklärung der Rauschursachen im Frequenzbereich des weißen und des $1/f$ -Rauschens. Daraus abgeleitet wurde nach experimentell-technischen Möglichkeiten für eine weitere Verbesserung der „read-out“-Kreise und Verstärker-Elektronik der SQUIDs gesucht, um das Eigenrauschen der SQUIDs möglichst nahe an das physikalisch bedingte Limit zu bringen.

Um die Vergleichbarkeit von SQUIDs unterschiedlicher Hersteller zu erreichen, wurde aufbauend auf diesen Untersuchungen ein spezieller 2-Kanal-Rauschmessstab (Abb. 7.3) entwickelt und hergestellt, der die gleichzeitige Untersuchung von zwei SQUID-Sensoren unter identischen Bedingungen ermöglichte. Dies ist vor allem im niederfrequenten Bereich außerordentlich wichtig, um Aussagen über Driften, Flusssprünge und Störfestigkeit gegenüber äußeren Einflüssen zu erlauben.

Der mechanische und elektrische Aufbau des SQUID-Messkopfes wurde so ausgelegt, dass auch SQUIDs mit stark vom FSU-Design abweichenden Abmessungen und elektrischen Anschlüssen untersucht werden konnten. Wichtige Voraussetzung für diese Untersuchungen war die erreichte Universalität unserer aufwendigen Mess- und Verstärkertechnik für das Ansteuern und Auslesen der SQUIDs, die im Rahmen des Projektes weiter vervollkommen und optimiert wurde.

Der unsererseits für den Einsatz in der STEP-Mission favorisierte DC-SQUID-Sensor *UJ 111* (Institut für Festkörperphysik, FSU Jena) basiert auf Nb-NbO_x-Pb/In/Au Josephson-Tunnelkontakten und wurde für eine Arbeitstemperatur von 4,2 K entwickelt und optimiert. Die Josephson Tunnelkontakte sind, wie allgemein üblich, mit einem Widerstand von ca. 2 Ω geshuntet, um in der I-U-Kennlinie des Sensors hysteretische Bereiche - und damit ein erhöhtes Eigenrauschen - zu vermeiden.

Während die den eigentlichen SQUID-Ring bildenden Schichtmaterialien ihre supraleitenden Eigenschaften bei der Absenkung der Temperatur nicht wesentlich verändern, waren die Eigenschaften der Materiallegierung, die zu Herstellung der Shunt-Widerstände eingesetzt wur-

de, in diesem Temperaturbereich nicht ausreichend bekannt. Erste Untersuchungen bestanden daher in der Bestimmung der Eigenschaften der SQUIDs im Temperaturbereich bis herab zu ca. 1,5 K in einem He-Kryostaten. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt (vergl. Abb. 7.1):

1. SQUIDs vom Typ *UJ 111* arbeiten auch im erweiterten Temperaturbereich bis herab zu 1,5 K stabil,
2. Das intrinsische Rauschen der SQUIDs ist bei 1,5 K um etwa 10% geringer, was zumindest teilweise auf die Reduzierung des Rauschbeitrages der Shunt-Widerstände (Nyquist-Rauschen) durch die Absenkung der Temperatur zurückgeführt werden kann.
3. Der kritische Strom der Sensoren bei 1,5 K erhöht sich um ca. 10% im Vergleich zu 4,2 K, was sich aus dem vergrößerten Temperaturabstand zum kritischen Wert T_C des Schichtmaterials erklärt. Eine derartige Erhöhung des Strombedarfes um Arbeitspunkt stellt für die von uns entwickelte SQUID-Steuerlektronik kein Problem dar. Bei weiterem Absenken der Temperatur bleibt der kritische Strom nahezu konstant.

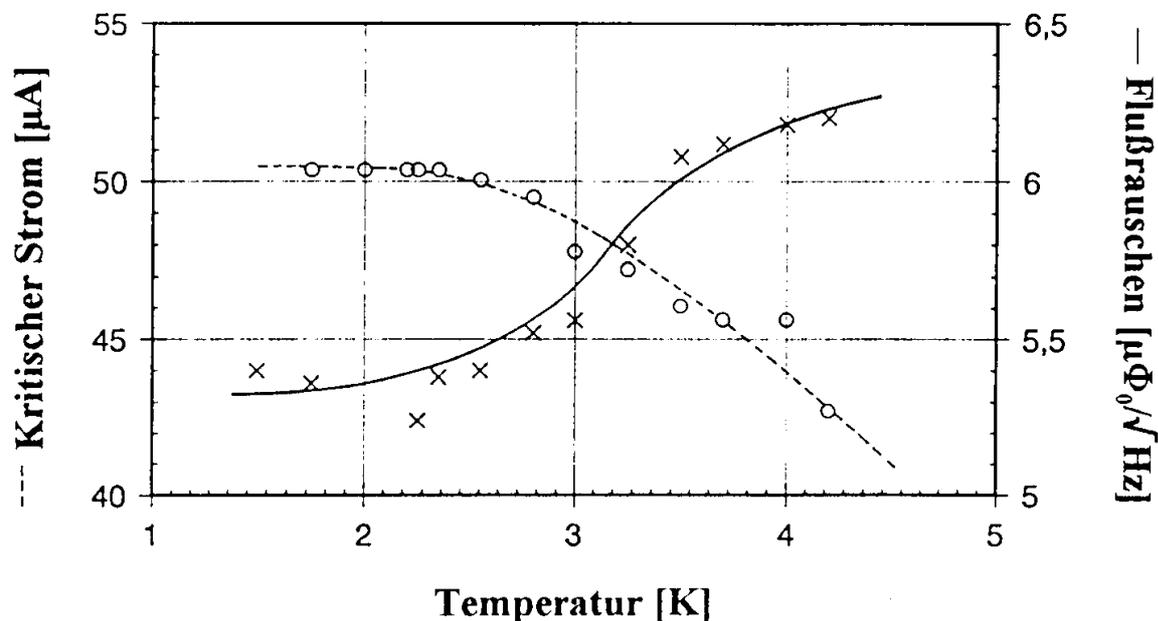


Abb. 7.1: Experimentell ermittelte Abhängigkeiten des Flußrauschens sowie des kritischen Stromes von der Temperatur für das DC SQUID *UJ111* der FSU Jena.

Im Rahmen unserer Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Institut für Tiertemperaturphysik, konnten unsere SQUIDs bei sehr tiefen Temperaturen (1 K) und im Vakuumraum einer He-3/He-4 Lösungskältemaschinen untersucht werden. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde die prinzipielle Eignung der SQUID-Sensoren unter diesen Bedingungen, d.h. bei 1 K Arbeitstemperatur und im Hochvakuum ($p \approx 10^{-7}$ kPa) nachgewiesen. Es zeigt sich dabei, dass der Wärmekontakt über das Si-Chip und den Chip-Träger (GFK, Dicke: 1,5 mm) für eine stabile Arbeitsweise nicht ausreichend war. Zur Verbesserung des Wärmekontaktes der SQUIDs mit dem 1-K-Niveau wurden mehrere zusätzliche Drähte (Mehrfach-Bondung) zu den am 1 K-Niveau thermisch kontaktierten SQUID-Zuleitungen geschaffen. Zudem konnte über mehrfache Bonddrähte die Wärmeleitung gegenüber der schwachen thermischen Kopplung Si-Chip-Träger (GFK) entscheidend verbessert werden.

In Fortführung dieser Arbeiten wurde am IFK, Institut für Tieftemperaturphysik Jena die Tauglichkeit der SQUIDs für den Betrieb bis hinab zu 100 mK untersucht. Dazu wurde der für die optimale Funktion eines SQUIDs wichtige Parameter *kritische Strom* eines SQUIDs für Temperaturen im Bereich von ca. 5 K bis 100 mK bestimmt. Das Ergebnis ist in Abb. 7.2 dargestellt und zeigt das erwartete typische BCS-artige Verhalten. Damit konnte erstmals gezeigt werden, dass SQUIDs vom Typ UJ111 ohne Einschränkungen bis hinab zu 100 mK einsetzbar sind und sich somit für STEP hervorragend eignen.

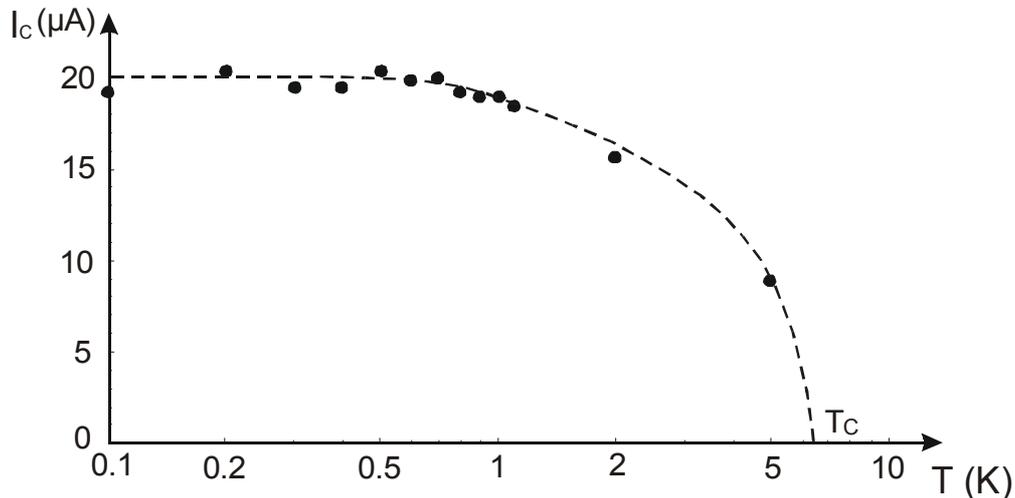


Abb. 7.2: Abhängigkeit des kritischen Stroms von der Temperatur bei sehr tiefen Temperaturen.



Abb. 7.3: Zweikanal-Rauschmessplatz, bestehend aus 2-Kanal-SQUID-Elektronik mit rauscharmen Vorverstärkern, Spektrumanalysator und Messkopf.

Typische Rauschspektren von Jenaer SQUIDs (*UJ 111*) sind im Vergleich mit denen von den Firmen *Quantum Design* und *Supracon* vertriebenen SQUIDs in Abb. 7.4 dargestellt. Es zeigte sich, dass die **Jenaer SQUIDs des Typs *UJ 111*** vor allem **in unabgeschirmter Umgebung** im Gebiet des weißen Rauschens ein **um etwa den Faktor 400 niedrigeres Eigenrauschen** aufweisen. Dieses Ergebnis ist von enormer Bedeutung für den Einsatz dieser Bauelemente in der gestörten Umgebung eines Satelliten und stellt überzeugend die wesentlich bessere Eignung der Jenaer SQUIDs einschließlich der hochentwickelten SQUID-Elektronik für das STEP-Experiment unter Beweis.

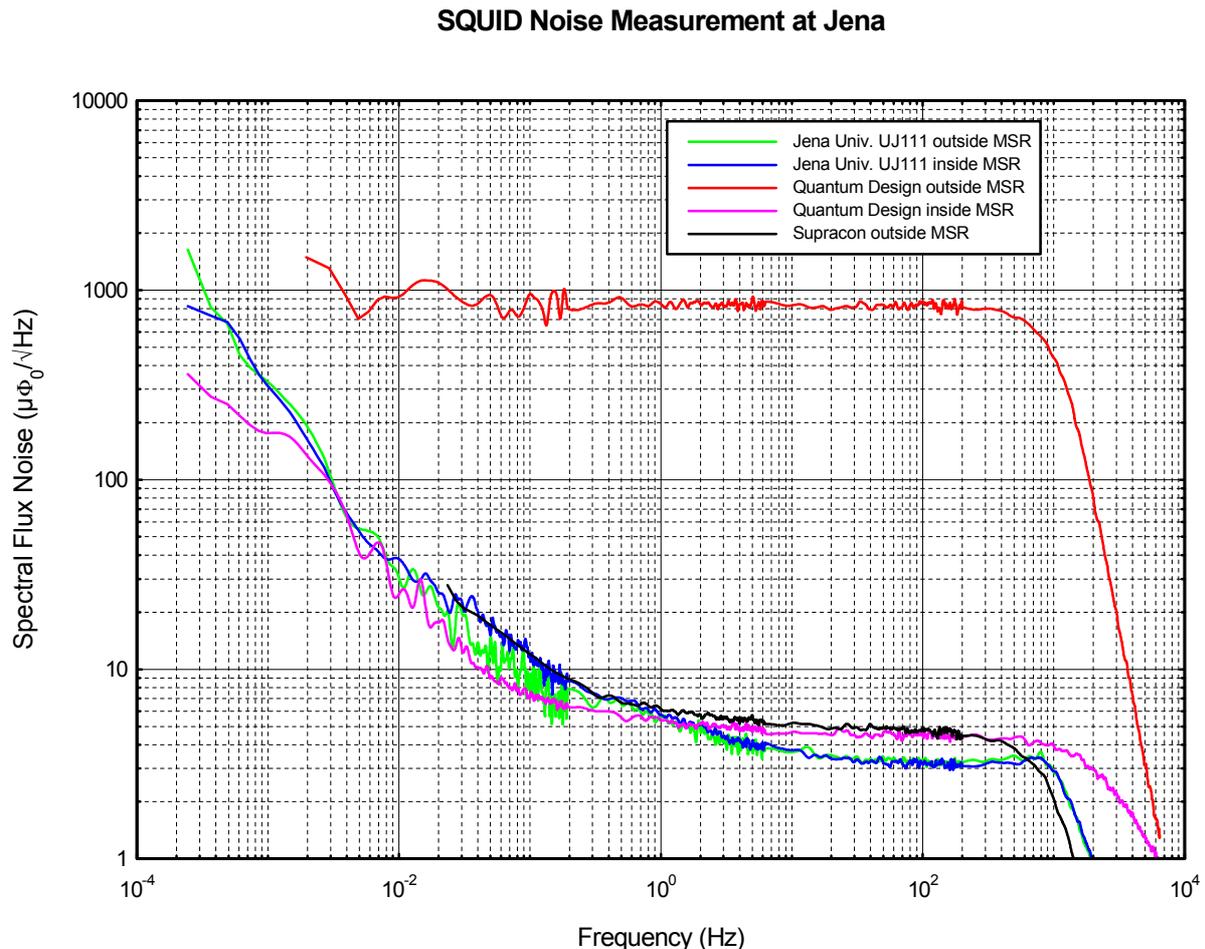


Abb. 7.4: Typische Rauschspektren von SQUIDs unterschiedlicher Hersteller unter verschiedenen Umgebungsbedingungen

Die Ergebnisse dieser zeitaufwendigen Messungen bzw. anspruchsvollen elektronischen Arbeiten wurden laufend auf STEP-Meetings vorgestellt und mit dem Ziel diskutiert, die signifikanten Vorteile der FSU-SQUIDs gegenüber anderen Lösungen (GP-B: Quantum Design, CA.) deutlich zu machen. Als direkte Konsequenz erfolgte die Einbindung der für Weltraumwendungen der FSU SQUID-Messtechnik noch erforderliche Space-Qualifizierung in den „STEP European Technology Development Plan“, der als europäischer Anteil zur Payload der STEP-Mission zu werten ist. Dieser Plan konnte trotz aller Bemühungen unsererseits während der Projektlaufzeit nicht realisiert werden.

Darüber hinaus wurden in der Projektlaufzeit zahlreiche Untersuchungen zur rauschbegrenzten Auflösung des Messsystems durchgeführt. Unter anderem wurde die Abhängigkeit des SQUID-Rauschens von dessen Arbeitspunkt (Biasstrom) untersucht. Abb. 7.5 zeigt eine solche typische Abhängigkeit. Man erkennt deutlich eine starke Abhängigkeit des Systemrauschens vom Biasstrom. Dieses fällt jedoch erstaunlicherweise nicht mit dem Arbeitspunkt zusammen, der das größte SQUID-Signal liefert.

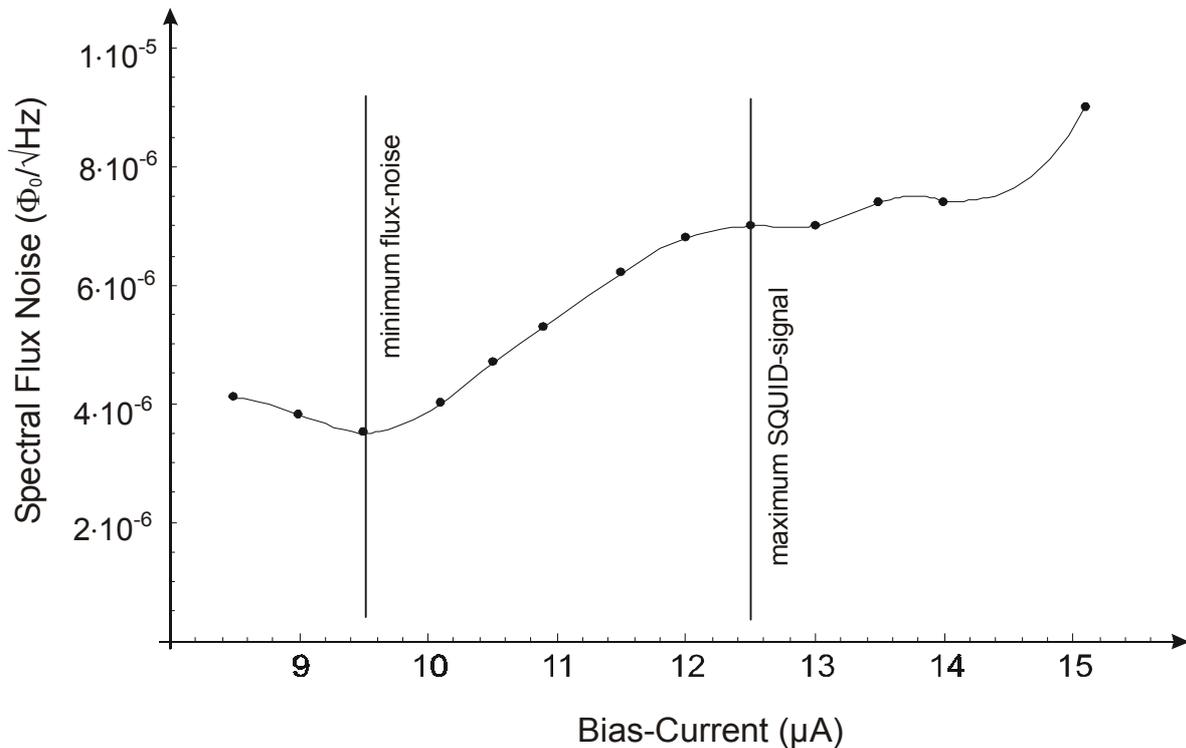


Abb. 7.5: Abhängigkeit des SQUID-Rauschens vom eingestellten Arbeitspunkt (Biasstrom)

Berücksichtigt man das Signal-Rausch-Verhältnis, so liegt der optimale Arbeitspunkt zwischen dem Punkt mit minimalem Rauschen und maximalem Signal. Mit dieser Optimierung war es möglich, ein Flußrauschen von weniger als $3,5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ für das SQUID UJ111 im Gebiet des weißen Rauschens zu erreichen.

Abschließende Bemerkungen und Schlußfolgerungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle im Arbeitsplan vorgesehenen Aufgaben- und Problemstellungen, soweit sie in unserem Kompetenzbereich lagen, termingemäß und erfolgreich bearbeitet wurden.

Der Messplatz für Tests von STEP-Komponenten bei Temperaturen von 1,8 ... 4,2 K wurde fertiggestellt und optimiert. Aufgrund dessen, daß von der Stanford University keine Komponenten zur Verfügung gestellt wurden, konnten die entsprechenden Messungen noch nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grunde wurden - nach Absprache mit dem Projektträger - wegen ihrer Relevanz und Aktualität für STEP zusätzliche Punkte in den Arbeitsplan aufgenommen und erfolgreich bearbeitet (vgl. Kap. 6 und 7). Dabei handelte es sich zum einen um die wichtige Frage der Kalibrierung der SQUID-Positionsdetektoren im nm-Bereich. Dazu wurde ein Tieftemperatur-taugliches Laserinterferometer aufgebaut. Zur Erzeugung der notwendigen, sehr kleinen Positionsverschiebungen wurden verschiedene Aktoren getestet. Eine derartige Apparatur ist nach Kenntnis der Autoren weltweit einmalig.

Weiterhin wurden in Form eines speziellen Rauschmessplatzes die Voraussetzungen geschaffen, unterschiedliche SQUID-Sensoren bzgl. ihrer Rauscheigenschaften im niederfrequenten Bereich (< 1 Hz) zu vergleichen. Zentrales Problem bei der Fehleranalyse des STEP-Experimentes und bei der Abschätzung der zu erreichenden Parameter und Grenzempfindlichkeit stellt nach wie vor die einzusetzende SQUID-Messtechnik für die Akzelerometer dar. Von den amerikanischen Kollegen in Stanford werden aufgrund der bereits im Rahmen des Grundlagen-Experimentes *Gravity Probe B* erreichte Weltraumtauglichkeit die von der US Firma Quantum Design kommerziell erhältlichen SQUIDs favorisiert, ungeachtet der Tatsache, dass diese in den Rauscheigenschaften deutlich schlechter als die an der FSU Jena entwickelten und hergestellten SQUIDs sind.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur mechanischen Stabilität und elektrischen Störfestigkeit der aufgebauten elektronischen Baugruppen durchgeführt und Schlußfolgerungen für die Raumflugtauglichkeit gezogen. Der Einsatz der SQUID-Messtechnik im rauen Fallturmbetrieb bzw. in einem Satellitenexperiment erforderte daher gravierende Änderungen in der Schaltungstechnik.

Die gewonnenen Erfahrungen und experimentellen Ergebnisse wurden laufend auf den Treffen des STEP-Hardware-Teams vorgestellt und diskutiert, sie flossen bzw. fließen in die Konzeption des STEP-Experimentes und dessen konstruktiver Umsetzung ein.

Aufgrund der gezeigten Vorteile der SQUIDs der Jenaer Universität wird ein Ziel künftiger Arbeiten sein, die Weltraumqualifizierung der Jenaer SQUID-Messtechnik in naher Zukunft zu erreichen und damit den Weg frei zu machen für einen Einsatz sowohl im STEP-Experiment als auch in anderen Präzisionsexperimenten im Orbit.

Referenzen:

- **Zwischenberichte 2001**
- **Zwischenberichte 2002**
- **Abschlußbericht “Caging für STEP”, ZARM, Universität Bremen**

Publikationsliste

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten F & E -Ergebnisse wurden in den folgenden Publikationen veröffentlicht:

2001

1. Testing Einstein's Equivalence Principle at Bremen Drop Tower using LTS SQUID Technique
W. Vodel, H. Koch, S. Nietzsche, J. v. Zameck Glyscinski, R. Neubert, and H. Dittus
Proc. of **2000 Applied Superconductivity Conference**, September 18-22, 2000, Virginia Beach, USA, published in **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Vol. 11, No. 1, 1379-1382, March 2001
2. Recent Progress in testing the Weak Equivalence Principle at an Improved Level of Accuracy Using High Performance LTS SQUIDS at the Drop Tower Bremen
W. Vodel, S. Nietzsche, R. Neubert, and H. Dittus
Proc. of 8th Inten. Superconductivity Electronics Conf. (ISEC 2001), Osaka, Japan, June 19-22, 2001

2002

3. Application of LTS-SQUIDS for testing the weak equivalence principle at the Drop Tower Bremen
W. Vodel, S. Nietzsche, R. Neubert, and H. Dittus
Proc. of 5th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2001), Copenhagen, August 26-30, 2001, **PHYSICA C: Superconductivity and its Applications**, vol. 372-376 (2002), Part I, 1. August 2002, pp. 154-157
4. Experimental Test of Einstein's Equivalence Principle at the Drop Tower Bremen using SQUID measurement technique
W. Vodel, S. Nietzsche, R. Neubert, and H. Dittus
Proc. of **Drop Tower Days 2002**, November 26-27 (Tokyo) and November 29, 2002 (Sapporo), p.p. 187-192

2003

5. Überprüfung des Schwachen Äquivalenzprinzips von träger und schwerer Masse mittels SQUIDS
(eingeladener Vortrag)
W. Vodel, S. Nietzsche, R. Neubert, H. Dittus
Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2002, Magdeburg, 20.-22. November 2002
DKV-Tagungsbericht, 29. Jahrgang Bd. I, 89-104, 2003