

Kurzfassung der Dissertation für die Verleihung des Reinhard Furrer-Preises der Wernher von Braun-Stiftung

ENTWICKLUNG, WELTRAUMQUALIFIKATION UND ERSTE ERGEBNISSE EINES SENSORINSTRUMENTS ZUR MESSUNG VON ATOMAREM SAUERSTOFF IM NIEDRIGEN ERDORBIT

T. Schmiel, Technische Universität Dresden, Institut für Luft- und Raumfahrttechnik,
01062 Dresden, Deutschland

verteidigt am 17.02.2009 an der Technischen Universität Dresden

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (TU Dresden)

Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. e.h. Ernst W. Messerschmid (Universität Stuttgart)

Dr.-Ing. Frank Hammer (ESCUBE GmbH & Co. KG)

Zusammenfassung

Die Dissertation stellt die Problematik des atomaren Sauerstoffs für die Raumfahrt und für die Atmosphärenmodellierung sowie die Entwicklung und Charakterisierung elektrochemischer Sensoren zur erstmaligen Messung des zeitabhängigen Verhaltens dieser Spezies über eine längere Missionszeit bei einem Umgebungsdruck im Orbit von weniger als 10^7 mbar dar. Es wurde ein Instrument entwickelt, für die Orbitbedingungen und den bemannten Träger weltraumqualifiziert und auf einer Außenplattform der Internationalen Raumstation ISS platziert. Das Experiment wurde von der Technischen Universität Dresden aus gesteuert; erste Ergebnisse sind in dieser Arbeit dargestellt. Laut ESA war die besondere Herausforderung die europaweit erstmalige komplettete Entwicklung, Weltraumqualifikation und Steuerung eines Außenexperimentes auf der ISS an beziehungsweise von einer Universität. Die resultierenden Erfahrungen in der Weltraumqualifikation wurden zusammengestellt und weitere Weltraumexperimente vorgeschlagen. Das Ziel der Sensor- und Instrumententwicklung war die selektive und zeitaufgelöste *in-situ* Messung atomaren Sauerstoffs über einen längeren Zeitraum mit elektrochemischen Festkörperelektrolytsensoren.

Die vorliegende Schrift ist eine Kurzfassung der Dissertation [1].

1. EINLEITUNG

1.1. Problematik des atomaren Sauerstoffs

Atomarer Sauerstoff ist der dominierende Bestandteil der Restatmosphäre im niedrigen Erdorbit bis circa 1000 km Orbithöhe. Durch die hohe Reaktivität, verstärkt durch die Relativgeschwindigkeit zu Raumfahrzeugen im Bereich von 7,9 km/s, degradieren unter anderem die eingesetzten Strukturmaterialien, die thermooptischen Oberflächen sowie die photovoltaischen Energiesysteme in nicht zu vernachlässigbarem Maße. Davon sind insbesondere Erdebeobachtungssatelliten, Wettersatelliten, niedrig fliegende Kommunikationssatellitenkonstellationen als auch Raumstationen betroffen. Die variierte Sonnenaktivität, der Geomagnetismus und die atmosphärischen Bewegungen führen zu einem hochtransienten Verhalten des atomaren Sauerstoffs. Bisher existierten nur Integralmessungen über mehrere Orbitumläufe bzw. -höhen und zeitaufgelöste Kurzzeitmessungen in einzelnen Orbithöhen bei kurzen Missionszeiten. Die Kenntnis des zeitaufgelösten Verhaltens des atomaren Sauerstoffs ist jedoch grundlegend für dessen Vorhersage und damit der Degradationseffekte. Atomarer Sauerstoff ist eine äußere Randbedingung für die physikalisch-mathematischen Modelle der oberen Atmosphäre und insofern auch ein wichtiger Einflussfaktor in der globalen Klimamodellierung. Zudem kann die Physik der Gas-Oberflächen-Wechsel-

wirkungen bei extrem verdünnter Teilchendichte im Welt Raum nur erforscht werden, wenn die transienten Randbedingungen im Orbit hinreichend bekannt sind.

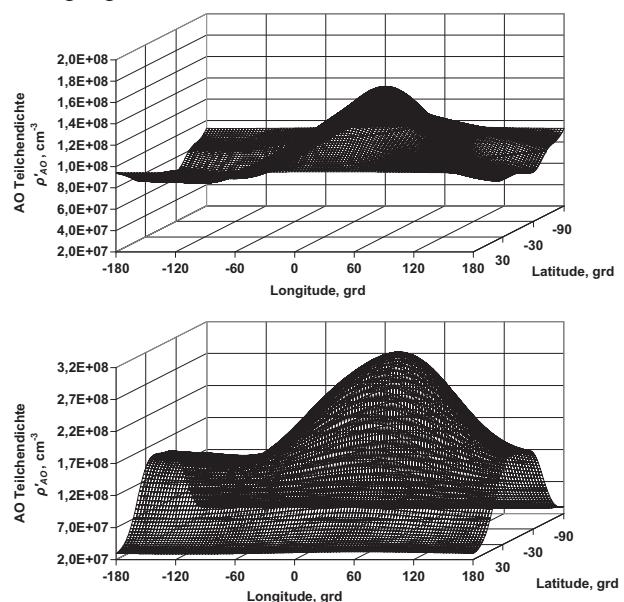


Abb. 1: Globales Profil für die Teilchenzahldichte atomaren Sauerstoffs: NRLMSISE (oben), DTM (unten), in 340 km Höhe, GMT/2008/10/12:00:00

Basierend auf den physikalisch-mathematischen Modellen der höheren Atmosphäre (NRLMSISE00, MET, DTM [1]) konnte unter anderem gezeigt werden, dass die Atmosphärenmodelle im Orbitbereich der Internationalen Raumstation (ISS) verschiedene globale Profile atomaren Sauerstoffs hinsichtlich der Längen- und Breitengradabhängigkeit liefern (Abb. 1). Diese Abweichungen führen zu unterschiedlichen Vorhersagen der Dichte des atomaren Sauerstoffs für eine Mission bis 1000km Orbithöhe. Die Validierung dieser physikalisch-mathematischen Modelle begründet sich auf sporadischen Messungen mittels Okkultationsspektroskopie, Experimenten zur Massen- und Oberflächenänderung von Materialien als auch auf der Satellitenabbremsung durch die Restatmosphäre [1-12]. Diese Messungen sind jedoch Integrale über der Zeit bzw. über den Messweg und stellen keine zeit- und ortsabhängigen Ergebnisse dar. Zudem sind die Materialerosionsraten nicht eindeutig von anderen Umgebungsbedingungen trennbar.

1.2. Einordnung in das Forschungsgebiet

Das Prinzip der Lambda-Sonde und verschiedene Veröffentlichungen aus der Elektrochemie dienten als Grundlage, miniaturisierte Sensoren für die Raumfahrt und Ultra-hochvakuumtechnik mittels Dickschichttechnik zu entwickeln. Maßgeblicher Motor ist neben den besonderen Anforderungen seitens der Raumfahrt die extrem niedrige Dichte des atomaren Sauerstoffs. Kommerziell erhältliche Lambdasonden auf Festkörperelektrolytbasis wurden 1994 an der Universität Stuttgart in Plasmawindkanälen eingesetzt [2]. Unter dem Namen FIPEX (Flux-Φ-Probe-EXperiment) flogen erstmalig modifizierte Lambdasonden auf ballistischen Forschungsraketen (TEXUS 34, VS30, IRDT mit Sojus) und führten Kurzzeitmessungen des Restsauerstoffs bis zu einer Höhe von circa 125 km durch [3-5]. Diese Experimente demonstrierten die Einsatzfähigkeit und setzten die Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung dieser Sensoren. In Förstner [3] wurden erste Festkörperelektrolytsensoren auf planarer Basis für die Messung im Hochvakuum entwickelt und erste experimentelle Untersuchungen zur Messung atomaren Sauerstoffs durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind die Grundlage für die vorliegende Arbeit. Die Sensorentwicklung wurde konsequent fortgesetzt, konzentrierte sich dabei auf Sensoren für molekularen und atomaren Sauerstoff für den Einsatz vom Ultrahoch- bis in den Feinvakumbereich, charakterisierte die Bedingungen im Ultrahochvakuum und erstellte somit Kalibrierkurven für den Einsatz im Weltraum. Die Entwicklungen in der vorliegenden Arbeit zeigen erste zeitaufgelöste Ergebnisse des Experiments auf einer Außenplattform der Internationalen Raumstation ISS und einen Vergleich mit den Modellen der höheren Atmosphäre. Zudem zeigten diese Sensoren frühzeitig ein großes Einsatzpotential in der Überwachung von vakuumtechnischen Prozessen, in der Verbrennungs- und Gasanalytik, in der sicherheitstechnischen Überwachung und auch in der medizinischen Lungenfunktions- und Leistungsdiagnostik [6-8]. So ergaben sich sehr gute synergetische Effekte durch den Austausch der Erfahrungen zwischen den Arbeitsgruppen des Instituts für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart, der ESCUBE GmbH & Co. KG und des Instituts für Luft- und Raumfahrttechnik der Technischen Universität Dresden.

2. SENSORENTWICKLUNG

Das Ziel der Sensorentwicklung war die selektive und zeitaufgelöste in-situ Messung atomaren Sauerstoffs über einen längeren Zeitraum mit elektrochemischen Festkörperelektrolytsensoren. Einen Schwerpunkt der Arbeit stellte die Untersuchung der Festkörperelektrolyte Yttrium- und Scandium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid mit katalytisch aktiven Elektroden dar, die eine Unterscheidung von atomarem und molekularem Sauerstoff ermöglichen. Es kamen Cermetelektroden auf Gold- und Platinbasis zum Einsatz. Dabei führte die Regelung der reduzierenden Spannung über eine Referenzelektrode zu konstanten Potentialen an den Elektroden bei Temperaturen von ungefähr 600 bis 800 °C, die für die Bildung eines von den adsorbierten Sauerstoffatomen abhängigen Ionenstroms notwendig sind. Es wurden verschiedene Elektrodenkonfigurationen untersucht, da auch in der freien molekularen Strömung die Diffusion, die Dreiphasengrenze für die Ionenbildung und der Ladungsdurchtritt maßgebliche Einflussfaktoren für die Anpassung des Messbereichs sind.

2.1. Messprinzip und Phänomenologie der Signalentstehung

Die entwickelten elektrochemischen Sensoren basieren auf dem Messprinzip der Amperometrie mit Referenzelektrode (Abb. 2). Im amperometrischen Prinzip wird durch eine an den Elektroden angelegte Spannung ein Stromfluss erzwungen, der bei einem reinen ionenleitenden Festkörperelektrolyten von der Zahl der gebildeten Ionen abhängt. Es gelten dann die Gesetze nach Faraday, d.h. die Stoffmenge des umgesetzten Gases ist proportional zum gemessenen Strom in Abhängigkeit der Anzahl der Elementarladungen eines transportierten Ions.

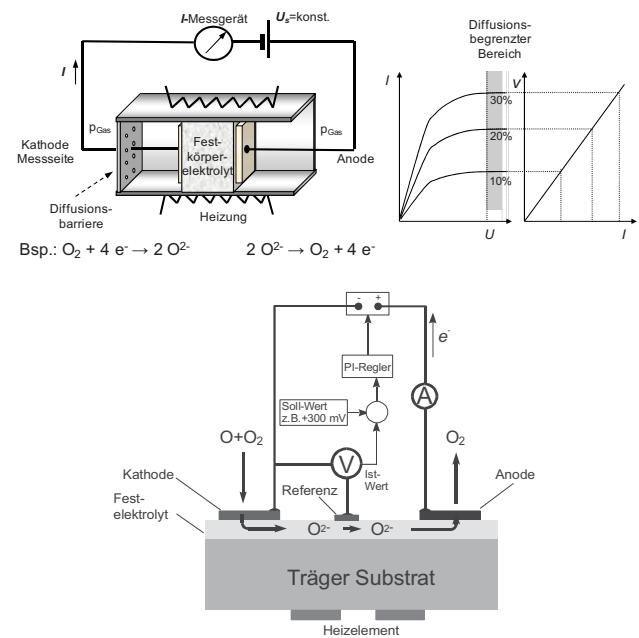
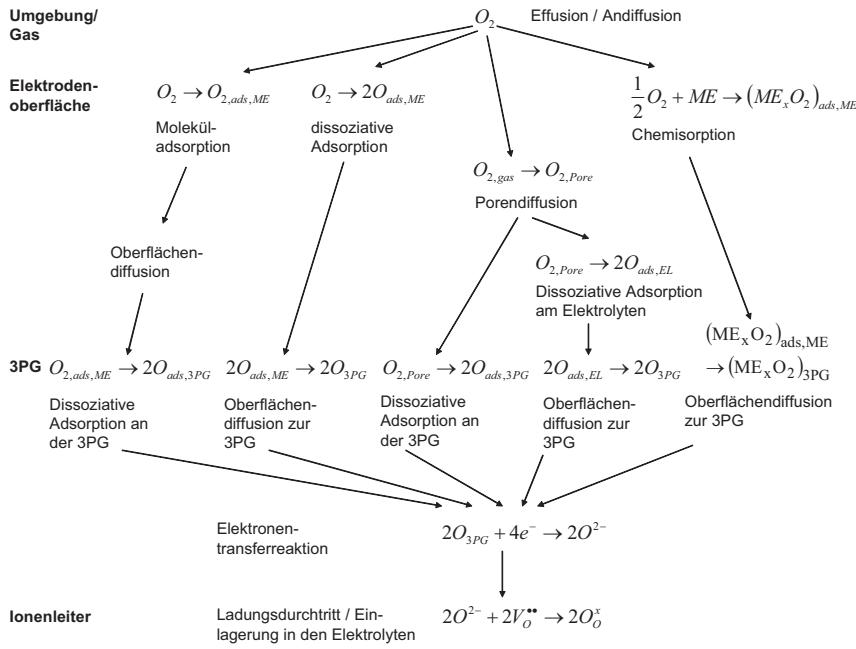


Abb. 2: Prinzipskizze zur Amperometrie ohne (oben) und mit Referenzelektrode (unten) [1, 3]

Abb. 3: Phänomenologie der Potentialbildung (O_2 , Elektrode // Ionenleiter)

Amperometrische Sensoren benötigen daher kein Referenzgas. Theoretisch wird bei weiterer Erhöhung der angelegten Spannung der Strom durch die Diffusion des Gases zur Messseite begrenzt, d.h. das zur Kathode diffundierende Gas wird durch den Elektrolyten abgeleitet. Der Elektrolyt „pumpt“ somit den Sauerstoff zur Referenzseite. Diese angelegte Spannung darf aber dabei die Zersetzungsspannung des Elektrolyten nicht erreichen, so dass die Anpassung des Sensors an den Messbereich durch eine Begrenzung der Diffusion erfolgt. Diese Diffusionsbarriere kann durch entsprechende konstruktive Maßnahmen oder durch eine Spezialbeschichtung der Messelektrode erfolgen. Eine Begrenzung der Diffusion führt folglich dazu, dass der Kopplung aus Adsorption und Oberflächendiffusion zur Dreiphasengrenze eine geringere Anzahl an Molekülen zur Verfügung steht, als vor der Diffusionsbarriere. Somit sind die Adsorptionsplätze nicht gesättigt und das Sensorsignal prinzipiell vom Sauerstoffpartialdruck abhängig. Das Einbringen der Diffusionsbarriere ermöglicht somit erst die Messung des Sauerstoffpartialdrucks über den Grenzstrom. Ein diffusionsbegrenzter Sensor liegt dann vor, wenn der O_2 -Partialdruck an der Kathode zu Null wird. Dies kann erreicht werden, indem nach der Diffusionsbarriere genügend Adsorptionsstellen und Dreiphasengrenzen zur Verfügung stehen, an denen sich geschlossene Diffusionspfade zur Anode anschließen. Voraussetzung ist auch hier die unbehinderte Abdifussion des Sauerstoffs von der Anode.

Überpotentiale führen jedoch dazu, dass sich das tatsächlich zur Ionenbildung und Leitung vorhandene Potential von der beaufschlagten Spannung in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration unterscheidet. Gleichbleibende Verhältnisse kann unter bestimmten Bedingungen die Regelung über eine Referenzelektrode gewährleisten. Die Überpotentiale können in Ohmsche Überspannungen, Aktivierungsüberspannungen und Stofftransportüberspannungen unterteilt werden. Den Überpotentialen ist zusätzlich die aufgrund der Halbzellen-

potentiale konzentrationsabhängige Elektromotorische Kraft (EMK) überlagert. Damit der Sauerstoff an der Kathode eine konstant reduzierende Kraft erfährt, können die Überpotentiale durch Änderung der angelegten Sensorspannung entsprechend ihrer von der Sauerstoffkonzentration abhängigen Größe konstant gehalten werden. Die Summe der Überpotentiale an der Kathode ist in der Regel durch eine sehr kleine, nah an der Kathode platzierte Elektrode, die Referenzelektrode, messbar [13, 14]. Man versucht, die gemessene Spannung zwischen Kathode und Referenzelektrode durch Veränderung der zwischen Kathode und Anode angelegten Spannung konstant zu halten (Abb. 2 unten). Da dadurch die elektrochemischen Vorgänge beeinflusst werden, sind die Geschwindigkeiten der Teilschritte (Abb. 3) zu beachten.

Bei elektrochemischen Sensoren im Grobvakuum und im Bereich des Umgebungsdrucks wird eine Andiffusion des Sauerstoffs begrenzt, um eine Sättigung der Adsorptionsstellen der Elektrode zu verhindern. Hingegen darf die Andiffusion aus der freien molekularen Strömung bei Messungen im Ultrahochvakuum nicht unterbunden werden und es sollte eine Erhöhung der Dreiphasengrenze für die Ionenentwicklung und den Ladungsdurchtritt erfolgen.

2.2. Sensoraufbau

Die Ausbildung der Halbzellenpotentiale wird maßgeblich von der Herstellung der eingesetzten Materialien und den Herstellungsparametern bestimmt. Das hier genutzte Konzept beruht auf Sieb- und Schablonendruckverfahren, wie es in zahlreichen Veröffentlichungen in Fachzeitschriften zu elektrochemischen Sensoren zu finden ist. Bei genauer Betrachtung unterscheiden sich diese jedoch in den Einstellparametern des Siebdruckverfahrens, in der Pastenzusammensetzung und -herstellung, in den Pasteigenschaften als auch in den nachfolgenden Sinter- und Einbrennprozessen.

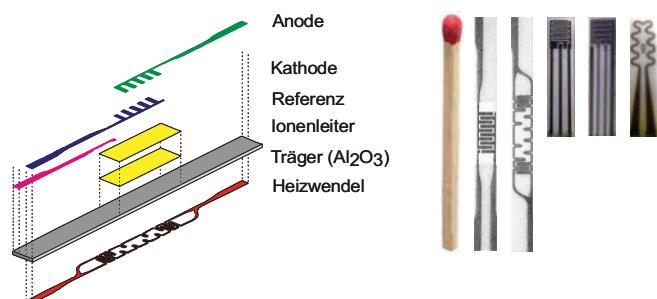


Abb. 4: Prinzipieller Sensoraufbau (links) und Beispiele für hier untersuchte Sensoren für Ultrahochvakuum (mitte) und Feinvakuum (rechts)

Davon wird die Funktionsfähigkeit der galvanischen Kette und somit das Sensorsignal wesentlich beeinflusst. Der entscheidende Vorteil des Sensoraufbaus in Mehrschichtentechnik mittels Sieb- und Schablonendruckverfahren besteht in der Möglichkeit der Miniaturisierung bei gleichzeitiger Fertigung mehrerer Sensoren bei einer sehr guten Reproduzierbarkeit. Als Trägersubstrat dienen dabei Al_2O_3 – Platten auf denen der Ionenleiter, die Elektroden, die metallische Ableitung einschließlich der Kontaktspulen, die Heizwendel und gegebenenfalls zusätzliche Funktionsschichten gedruckt werden (Abb. 4). Je nach Aufbau schließen sich nach den einzelnen Druckvorgängen Sinter- oder Einbrennvorgänge an. Die in dieser Arbeit untersuchten Sensoren unterscheiden sich hinsichtlich der Elektrodengeometrie und -anordnung, der verwendeten Ionenleiter und Kathodenmaterialien, der Bauform, der Kontaktierung und zusätzlicher Funktionsschichten.

2.3. Unterscheidung von atomarem und molekularem Sauerstoff

Wie die experimentellen Ergebnisse zeigen, wird atomarer Sauerstoff bevorzugt an den Goldelektroden, hingegen molekularer und auch atomarer Sauerstoff an den Platinelektroden einer Elektronentransferreaktion unterzogen. Dieser ist die Adsorption und Diffusion zur Dreiphasengrenze vorgelagert. Cermetelektroden auf Gold- und Platinbasis können somit die Unterscheidung von atomarem und molekularem Sauerstoff ermöglichen. In [15, 16] wurde dieses Verhalten näher untersucht und in [3] an dem hier entwickelten Sensortyp angewandt. Generell kann die katalytische Wirkung von Materialien bestimmte Reaktionen unterstützen und andere hemmen. So zeigen die Untersuchungen [15, 16], dass die Ionenbildung an der Dreiphasengrenze von Platinelektroden nach vorheriger Oberflächendiffusion geschieht. Bei Gold hingegen scheinen Ladungstransferprozesse innerhalb der Elektrode eine Rolle zu spielen, so dass sich nicht nur die Elektrodenpolarisation sehr stark in Abhängigkeit der Adsorbate ändert, sondern auch eine Volumendiffusion von Sauerstoff einsetzt, die eine Elektronentransferreaktion auch an den Dreiphasengrenzen ermöglicht, zu denen kein Pfad der Oberflächendiffusion führt [16]. Es sei erwähnt, dass dieser selektive Prozess an Goldelektroden mit YSZ-Elektrolyten noch nicht abschließend geklärt ist.

3. SENSORCHARAKTERISIERUNG

3.1. Atomarer Sauerstoff im Ultrahochvakuum

Zur Kalibrierung der Sensoren wurde ein mikrowelleninduzierter Plasmakanal mit angeschlossener Ultrahochvakuumkammer entwickelt und aufgebaut. Im Gegensatz zu herkömmlichen Testeinrichtungen aus diesem Forschungsbereich, wurde der atomare Sauerstoff zunächst im Plasmakanal erzeugt und anschließend ins Ultrahochvakuum expandiert. Dadurch waren die Untersuchungen außerhalb der Plasmaentladung möglich. Entlang der Wegstrecke der Sauerstoffatome im Ultrahochvakuum konnten Partialdrücke des atomaren Sauerstoffs von $8 \cdot 10^{-8}$ bis $2 \cdot 10^{-6}$ mbar simuliert werden. Insofern wurde

das Ziel, den Partialdruckbereich an die Orbitbedingungen anzupassen, erreicht, und die Sensoren sind somit für den Einsatz im Weltraum kalibrierbar. Die Anwesenheit des atomaren Sauerstoffs wurde anhand massenspektrometrischer Untersuchungen mit Sekundärelektronenvervielfacher und durch Erosionstests mit Materialproben charakterisiert und bewiesen. Der minimale Partialdruck des molekularen Sauerstoffs ist dabei bis $4,8 \cdot 10^{-10}$ mbar einstellbar und wurde durch ein Quadrupolmassenspektrometer und durch Kaltkathodenionisation bestimmt.

3.2. Sensoren für molekularen Sauerstoff im Fein- und Hochvakuum

Durch ein gezieltes Beeinflussen der Elektrodenkonfiguration, der Dreiphasengrenze und das Applizieren einer Diffusionsbarriere mit unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten konnte der Nachweis erbracht werden, dass die neu entwickelten Sensoren für einen Sauerstoffpartialdruckbereich von $8 \cdot 10^{-10}$ bis circa 10 mbar sehr gute Signale liefern (Abb. 5). Ebenfalls kann die Sensitivität trotz eines hohen Diffusionswiderstandes durch eine hohe Dreiphasengrenze erhalten werden. Dadurch sind diese Sensoren in einem weiten Partialdruckbereich im Ultrahoch- bis Feinvakuum einsetzbar. Damit eröffnet sich neben der Anwendung im Weltraum auch die Nutzung in terrestrischen Vakumsystemen, wie z. B. Glasbeschichtungsanlagen, aber auch in Bereichen höherer Drücke bei gleichzeitig geringsten Sauerstoffpartialdrücken.

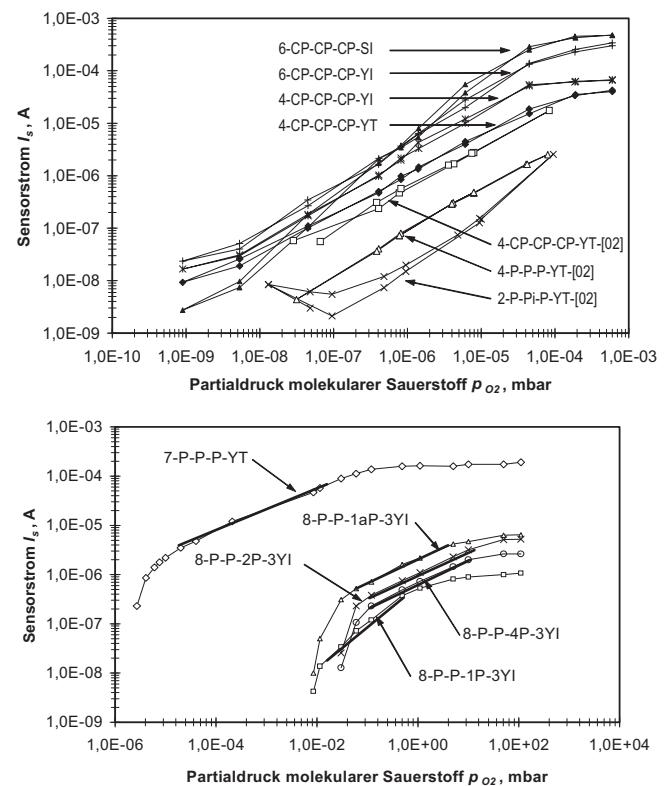


Abb. 5: Strom-Druckkennlinien für molekularen Sauerstoff im Hochvakuum (oben) und im Feinvakuum bis Umgebungsdruck (unten) für Sensoren mit unterschiedlichen Elektrodenmaterialien und Elektrodengeometrien

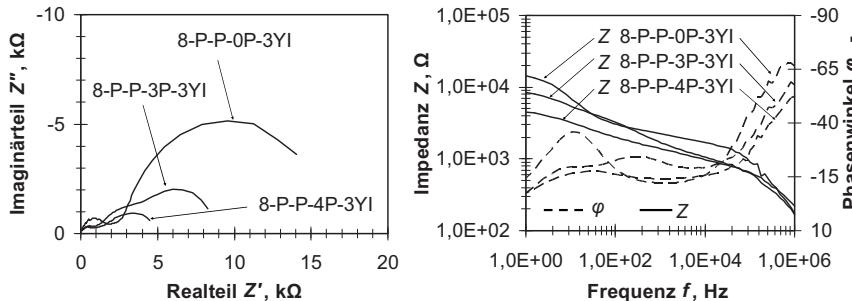


Abb. 6: Impedanzspektren von Sensoren mit verschiedenen Diffusionsbarrieren

Dies kann z. B. die Anwendung in der Halbleiterherstellung, in der Verbrennungstechnik oder in der Untersuchung der Vorgänge der Sprühverbrennung während Parabelflüge sein.

Die Impedanzspektroskopie der Sensoren zeigte, dass die Vorgänge am Sensor zur Signalentstehung, wie diese im Theorieteil der Dissertation beschrieben sind [1], prinzipiell richtig verstanden werden. Daraus ist ableitbar, dass weitere Untersuchungen die Einflüsse der Fertigungsparameter der Sieb- und Schablonendrucktechnik beschreiben können. Dies ist durch eine mögliche Identifizierung einzelner elektrochemischer Teilschritte in der Signalentstehung, deren Beschreibung durch äquivalente Stromkreise und der anschließenden Charakterisierung durch impedanzspektroskopische Messungen möglich. Die Interpretation der Impedanzspektren zeigte eine enge Kopplung der Adsorption, der Oberflächendiffusion und des Ladungsdurchtritts. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass eine Aussage über die Güte der Diffusionsbarriere aus den Impedanzspektren ableitbar ist. Einerseits wird damit der Modellbildung zur physikalisch-mathematischen Beschreibung der Vorgänge an der Dreiphasengrenze ein wichtiges Werkzeug zur Verfügung gestellt. Andererseits kann eine derartige Messung in einem kleineren, begrenzten Frequenzbereich zu einer Begutachtung der Fertigungsprozesse und auch zur Qualitätssicherung in der Massenproduktion eingesetzt werden.

3.3. Sensoren für atomaren Sauerstoff

Wird gleichzeitig mit Sensoren gemessen, die sowohl Cermetelektroden auf Platin- und auf Goldbasis besitzen, ist nicht nur eine quantitative Unterscheidung von

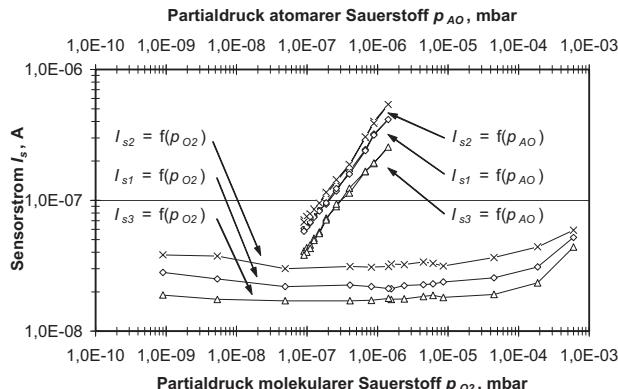


Abb. 7: Typische Charakteristiken der entwickelten Sensoren für atomaren Sauerstoff

atomarem und molekularem Sauerstoff möglich. Im doppelt logarithmischen Koordinatensystem ergab sich ebenfalls ein lineares Verhalten des Sensorsignals in Abhängigkeit vom Partialdruckbereich des atomaren Sauerstoffs im in dieser Arbeit erweiterten Testbereich ab $8 \cdot 10^{-8}$ mbar (Abb. 7). Zusätzlich wurde der Beweis erbracht, dass der Goldsensor im Bereich von $8 \cdot 10^{-8}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$ mbar nicht vom molekularen Sauerstoff, jedoch bei höheren Partialdrücken auch vom Gesamtdruck abhängig ist.

Die Interpretation der impedanzspektroskopischen Ergebnisse gab Hinweise zur Erklärung dieses Verhaltens. Aufgrund der hohen Sensitivität bei sehr geringen Partialdrücken sind die Sensoren im niedrigen Erdorbit einsetzbar. Bedingt durch die niedrige Sonnenaktivität während des geplanten Einsatzes auf der Raumstation ISS war diese Bedingung zu prüfen. Die für diese Zeit prognostizierte sehr geringe Sonnenaktivität hatte auch einen sehr geringen Partialdruck atomaren Sauerstoffs zur Folge.

4. FIPEX AUF DER INTERNATIONALEN RAUMSTATION

4.1. Systembeschreibung

Basierend auf der in Kapitel 1 vorgestellten Problematik, dass der zeitliche Verlauf von atomarem Sauerstoff praktisch unbekannt ist, sind die wissenschaftlichen Ziele des Experiments FIPEX (Flux-Φ-Probe-Experiment) auf der Internationalen Raumstation (FIPEX on ISS) die erstmalige zeitaufgelöste in-situ Messung von atomarem Sauerstoff entlang des Orbitals und die Unterscheidung von induziertem molekularem Sauerstoff. Die Ergebnisse sollen in der Modellierung der höheren Atmosphäre, in der Klimamodellierung, in der Vorhersage der Materialdegradation als auch für Modelle der Gas-Oberflächenwechselwirkungen Verwendung finden. Die Funktionsfähigkeit der Festkörperelektrolytsensoren ist bereits durch ballistische Flüge bewiesen: „FIPEX on Texus“ (1996), „FIPEX on VS30“ (1997), „FIPEX on Ariane 502/Teamsat“ (1997) und „FIPEX on IRDT-I“ (2000) [4, 5]. Während des letztgenannten Experiments wurden die neuen planaren Sensorelemente eingesetzt und somit deren prinzipielle Funktionsfähigkeit im Weltraum demonstriert. Langzeitmessungen als auch die Unterscheidung von molekularem und atomarem Sauerstoff wurden erst durch die Sensorweiterentwicklung, Teststandsanpassung und der Mission „FIPEX on ISS“ möglich.

„FIPEX on ISS“ befand sich für 572 Tage auf der Außenplattform EuTEF (European Technology Exposure Facility) des Columbusmoduls und führte die ersten Langzeitmessungen durch. Die Entwicklung dieses Experiments begann 1998 an der Universität Stuttgart und wurde seit 2001 an der Technischen Universität Dresden fortgeführt, im Rahmen dieser Dissertation für die Bedingungen der Raumstation und des Raumtransporters Space Shuttle „Atlantis“ adaptiert und für den Weltraum

hinsichtlich des Material- und Komponenteneinsatzes qualifiziert. Dies betraf strukturelle und thermalsystembedingte Veränderungen, den Austausch elektronischer Komponenten und die Adaption des Leiterplattenlayouts als auch eine Vielzahl an Veränderungen hinsichtlich sicherheitstechnischer Aspekte.

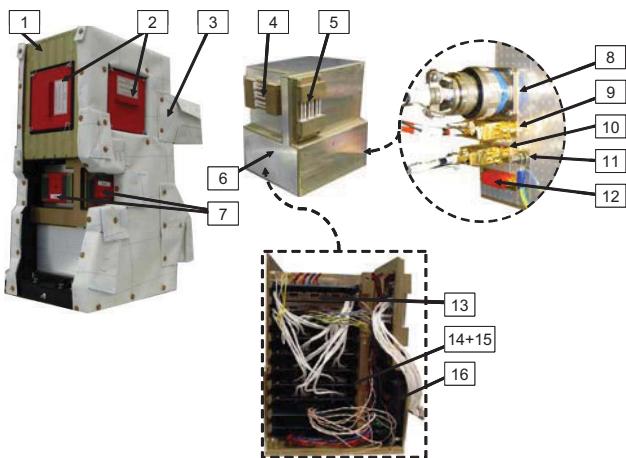


Abb. 8: Das FIPEX-System: integriert in EuFIDE (links), FIPEX Flugmodell (Mitte), Schnittstellen (rechts) und Blick in das Ingenieurmodell (unten)

Der Aufbau eines Nutzerkontrollzentrums („FIPEX User Home Base“) erlaubte die direkte Kommunikation mit dem FIPEX Experiment auf der Raumstation. So konnten Messprogramme und Sensorparameter in Abhängigkeit der ersten wissenschaftlichen Daten eingestellt und Telemetriedaten abgerufen werden. Die nachfolgende Beschreibung gibt einen knappen Überblick über das System „FIPEX on ISS“ und seine wesentlichen Komponenten. Detaillierte Angaben zur Weltraumqualifikation sind in [1] zu finden.

Das System „FIPEX on ISS“ besitzt zwei Sensoreinheiten (Abb. 8) (4+5) mit je drei Sensoren für atomaren und je drei Sensoren für molekularen Sauerstoff. Entsprechend des Thermalhaushalts und der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung können maximal vier der zwölf Sensoren gleichzeitig betrieben werden. Eine Sensoreinheit ist dabei in Flugrichtung (Ram, 4) und die zweite in Zenit-Richtung (5) platziert. Dies erlaubt die Unterscheidung von dynamischen und quasi-statischen Partialdrücken der beiden Sauerstoffspezies. FIPEX ist zusammen mit Debbie (Mikrometeoroidendetektor, 2) in EuFIDE (1) integriert und auf EuTEF platziert. Die roten Schutzkappen (7) wurden unmittelbar vor dem Start entfernt.

Die äußere Struktur besteht aus einer vorbehandelten hochfesten Aluminiumlegierung (7075 T7351) mit einer Oberflächenbehandlung nach dem Alodine-Verfahren® (MIL-C-5541 Class 3, 1200 Gold). Diese Oberflächenbehandlung ist weitgehend resistent gegenüber Sauerstoff und behält diese Eigenschaften mindestens über den äußeren FIPEX-Temperaturbereich von -40°C bis +85°C bei sehr hoher elektrischer Leitfähigkeit. Letzteres ist zur Verhinderung einer elektrostatischen Aufladung in der Plasmaumgebung notwendig. In die Struktur sind Bohrungen eingearbeitet, die eine kontrollierte Entlüftung des Experiments während des Starts in den Orbit ohne zu große Druckgradienten gewährleisten.

Die Sensoren für molekularen und atomaren Sauerstoff sind aufgrund der hohen Betriebstemperaturen (600 – 800°C) mittels keramischer Stecker eingefasst und die elektrische Kontaktierung wird über Platinleiterbahnen sichergestellt. Die Schutzdeckel dienen dabei gleichzeitig als Radiatoren, so dass die Temperatur an den Kontaktstellen zur FIPEX Struktur maximal 120°C beträgt.

4.2. Thermalhaushalt

FIPEX emittiert die überschüssige Wärme über Radiatoren in Ram- (6) und entgegengesetzt in Wake-Richtung (entsprechend der Ausrichtung der Raumstation). Die Radiatoroberflächen sind mit einer silberbeschichteten Polyamidfolie (silver coated FEP, Sheldahl G404000) über einen ausgasungsfesten Wärmeleitkleber beschichtet. Diese Beschichtung erlaubt für die Thermalanalyse ein definiertes, nahezu konstantes thermisches Adsorptions- und auch Emissionsvermögen ($\alpha/\varepsilon = 0,10/0,85$) über eine Missionszeit von drei Jahren. Erst das hohe Emissions- bei geringem Adsorptionsvermögen gestattet den Betrieb von vier Sensoren bei mindestens 600 °C bei gleich bleibender Temperatur der kritischen elektronischen Baulemente.

Da nur passive Elemente zur Thermalkontrolle gestattet sind, erfordert das hohe Emissionsvermögen bei ausgeschalteten Sensoren die Zuschaltung zusätzlicher Heizungen, um so ein Unterschreiten der Temperaturgrenzen zu vermeiden. Es sind drei Heizsysteme mit sehr gutem thermischen Kontakt zu den Leiterplatten und zu den DC/DC-Wandlern installiert, welche unabhängig voneinander die Einhaltung der Temperaturgrenzen im nominalen Fall, im nicht-nominalen Fall (survival mode) als auch während des Transports mit dem Space Shuttle (stay alive) gewährleisten.

Durch die hohe Anzahl an Leiterplatten, die mit einer ausgasungsfesten Schicht (Solithane 113/C, ECSS-Q-70-71A-C.14.10) versehen sind, besitzt FIPEX eine hohe Wärmekapazität von 6123,5 J·K-1. Dies führt zu einer sehr stabilen Temperatur trotz der Sonne-Eklipsen-Zyklen. Diese Schicht besitzt jedoch ein geringes thermisches Emissionsvermögen, so dass die von den elektronischen

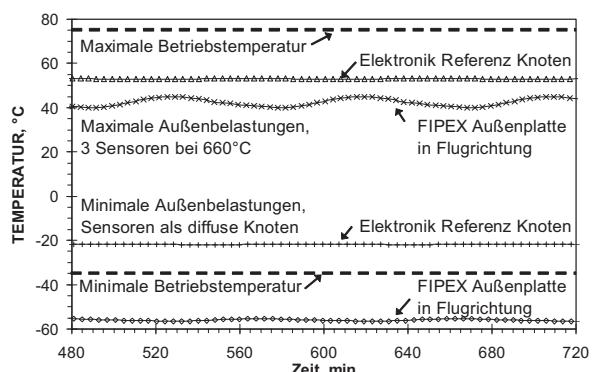


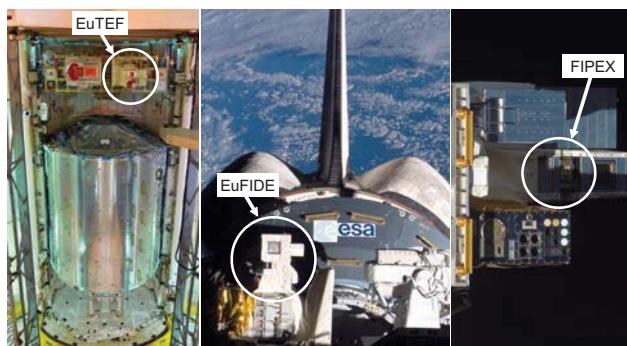
Abb. 9: Ergebnisauszug der FIPEX Thermalanalyse: Temperatur-Referenz-Knoten für den heißesten und den kältesten Fall

Komponenten abzuführende Wärme auch über die extra in die Leiterplatten eingearbeitete Kupferschicht abgeleitet wird. Zusätzliche interne Radiatoren und Wärmebarrieren verhindern ein Überhitzen der CPU bei plötzlich ansteigender CPU-Leistung.

Dieses thermische Design ist iterativ durch Thermalanalysen und Thermalvakuumtests entstanden. Aufgrund der hohen Unsicherheit der Randbedingungen (Wärmeleitung, -widerstände, thermische Lasten) und des stets verzögerten Missionsstarts wurde FIPEX mit elektronischen Komponenten mit erweitertem Temperaturbereich ausgestattet und bei Temperaturzyklen zwischen -40 und +80 °C bei einem Gradienten von 2 K/min hinreichend getestet. Abgesehen von Ram- und Wake-Richtungen sind Wärmestrahlung und Leitung in andere Raumrichtungen nicht gestattet. Daher ist EuFIDE mit mehrschichtigen Folien (MLI, Multi-Layer-Insulation) (3) versehen. Da die orbitalen Randbedingungen für die Thermalanalyse als auch die verschiedenen Thermaltests mit Unsicherheiten versehen sind, befinden sich an definierten Stellen innerhalb des Systems Temperatursensoren, die einen Vergleich der Analyseergebnisse mit den Missionsdaten erlauben und somit bei Erreichen der Grenztemperaturen einen sicheren Betrieb gestatten.

4.3. Sicherheitsaspekte (Safety/FMECA)

Ein interner Sicherheitsschalter erlaubt die zusätzliche Abschaltung der Leiterplattenbereiche, die für den Betrieb der mindestens 600 °C heißen Sensoren zuständig sind. Dieser Schalter kann nicht von FIPEX automatisch und auch nicht durch das FIPEX Nutzerkontrollzentrum am Boden bedient werden. Es erlaubt die redundante und eindeutige Abschaltung der Sensoren durch EuTEF im Fall von EVAs (Extra Vehicular Activities – Außenbordarbeiten von Astronauten). Der so genannte TRP (Temperature Reference Point, Betatherm G1K7D357 nach ECSS 4006/014) gestattet die Temperaturüberwachung seitens EuTEF. Im Fall einer Überschreitung der Operationsgrenzen wird FIPEX automatisch deaktiviert. FIPEX besitzt weder rotierende noch schutzgasbeaufschlagte elektronische Komponenten. Eine so genannte Containment Analyse zeigte, dass das FIPEX-System bei Ausfall wichtiger struktureller Komponenten sicher in



© ESA/NASA

Abb. 10: FIPEX und EuTEF integriert in den Nutzlastcontainer des Space Shuttle Atlantis oberhalb des Columbus-Moduls (links), EuFIDE im Orbit bei geöffneter Nutzlastbucht (mitte) und FIPEX in Operation auf der Plattform EuTEF montiert an das Columbusmodul der ISS (rechts)

EuFIDE verbleibt. Ebenfalls ist berechnet, dass bei lose gewordenen und während des Starts beschleunigten elektronischen Komponenten und internen Strukturbau teilen die äußere FIPEX Struktur nicht durchdringbar ist.

4.4. Kommando- und Datenverarbeitung

Das Nutzerkontrollzentrum kann Telekommandos über eine zwischengeschaltete S/W-Kontrollstelle der ESA (ERASmus-USOC) mittels Bodenstationen der USA und Russlands zu FIPEX senden und Telemetriedaten erhalten. Kommandos können in Echtzeit (DCW, Direct Commanding Window) umgesetzt oder über ein wöchentliches Programm (IOP, Instrument Operation Procedure) übertragen werden. Der Empfang der Telemetriedaten erfolgt in der Regel 16-mal pro Stunde einschließlich der wissenschaftlichen Daten. Zusätzlich sendet FIPEX jede Stunde ein Datenpaket mit den wichtigsten Zustandsdaten (housekeeping) des Systems (interne Energieverteilung, Temperaturen, Programmstatus, Sensordaten) und aller zehn Sekunden einen Gesundheitsstatus (health status). Mittels der Telekommandos können unter anderem verschiedene Operationsmodi geschaltet, Messprogramme gestartet und Sensorparameter gesetzt werden. Das C&DH (Command & Data Handling Subsystem) von Columbus sorgt für eine Zwischenspeicherung der FIPEX Telemetrie zwischen den Kommunikationsfenstern im Orbitumlauf.

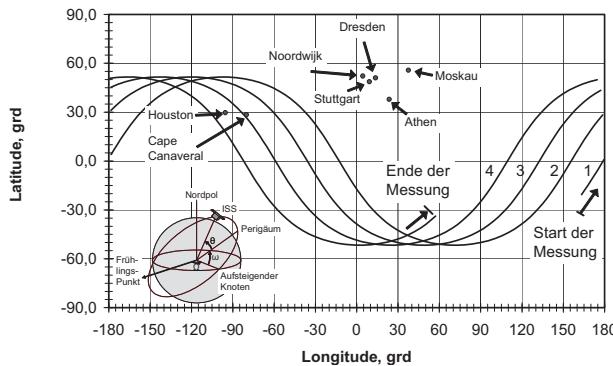
Eingesetzte Sicherheitsabfragen erlaubten erstmals eine direkte Steuerung eines Experiments auf der Raumstation von einer europäischen Universität.

4.5. Missionsverlauf

Im Juni 2007 erfolgte der Einbau neuer Sensoren im bereits auf EuTEF integrierten FIPEX. Am 07. Februar 2008 startete FIPEX erfolgreich mit der Mission STS122 (Space Shuttle Atlantis) (Abb. 10). Fünfzehn Minuten nach dem Start aktivierte sich die FIPEX Thermalkontrolle und erhöhte die Temperatur für den anschließenden Transfer zum europäischen Modul Columbus. Dieser Transfer war besonders kritisch, da die dabei fehlende Energieversorgung ein Abkühlen der Experimente auf EuTEF bewirkte. Die minimale Betriebstemperatur wurde wie analysiert nicht unterschritten und die Inbetriebnahmephase von FIPEX konnte am 27. Februar 2008 gestartet werden. Dabei erfolgte ein umfangreicher Test aller Telekommandos und die Überprüfung der Telemetriedaten. Aufgrund eines Fehlers in der Kommunikation mit EUTEF können allerdings Messprogramme und das Senden von wissenschaftlichen Daten nicht gleichzeitig erfolgen. Die Datenpakete wurden daher nach Beendigung der Messprogramme gesendet. Eine Rückführung des Experiments erfolgte nach 572 Tagen erfolgreicher Operation.

5. ERSTE ERGEBNISSE VON FIPEX ON ISS

Die folgenden Diagramme zeigen eine Auswahl erster zusammenhängender Daten von „FIPEX on ISS“ im Vergleich zu den Ergebnissen der Modelle der höheren Atmosphäre während des „ISS-Inkrement“ der Nr. 16, gemessen zur Referenzzeit GMT/2008/107/20:27:28 bis GMT/2008/108/02:26:23 (GMT: „Greenwich Mean Time“ / Jahr / Tag des Kalenderjahres / Uhrzeit bei 0° Longitude)



FIPEX Datenblöcke: Nr. 30, 31, 32
Bezug der Orbitelemente: Standard-Ellipsoid
Startpunkt: GMT/2008/107/20:27:28
Apogäum: 342,0 km
Perigäum: 330,5 km
Inklination i : 51,5°
Aufsteigender Knoten Ω : 333,6°
Argument des Perigäums ω : 45,8°
Wahre Anomalie θ : 321,7°
Endpunkt nach vier Orbitumläufen: GMT/2008/108/02:26:23

Abb. 11: Bodenspur des Nadirpunkts während der Messung und die Orbitparameter der Raumstation ISS zum Startzeitpunkt der Messung

entsprechend zwischen dem 16. April 2008, 21:27:28 Uhr und dem 17. April 2008, 03:26:23 Uhr westeuropäischer Sommerzeit (CEST). Die Messung startete bei Longitude 163,24719° Ost / Latitude -20,59339° und endete nach vier Orbitumläufen bei Longitude 57,26138° Ost. Zur besseren Übersicht zeigt Abb. 11 die entsprechende Bodenspur des Nadirs und listet die Orbitparameter zum Startzeitpunkt der Messung.

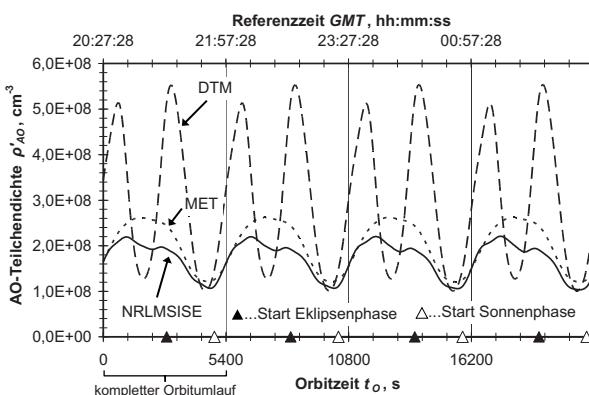
In Abb. 12 sind zunächst die Ergebnisse der Atmosphärenmodelle NRLMSISE-00, MET und DTM (vgl. Kapitel 1) entlang des Orbits dargestellt. Die Berechnung der Teilchendichte des atomaren Sauerstoffs mittels des ESA Spennvis Systems erfolgte zu jedem Zeitpunkt ent-

sprechend der Längen- und Breitengrade entlang des Orbits zwischen 330,5 km Perigäums- und 342,0 km Apogäumshöhe. Die Randbedingungen für den Solaren Fluss $F_{10.7}$ lieferten Messungen des NASA Experiments „Penticon (2800 MHz, Series C)“ [17] zum Zeitpunkt GMT/2008/107/20:00 UTC. Der geomagnetische Index A_p berechnete sich aus 13 weltweiten Messungen des „International Service of Geomagnetic Indices“ [18]. Die Vorhersage der Teilchendichte des atomaren Sauerstoffs ist sehr stark von der Prognose des geomagnetischen Index als auch des solaren Flusses abhängig. Die in Abb. 12 gezeigten Modellergebnisse stellen die bestmögliche Vorhersage dar, da diese auf realen Messungen für A_p und $F_{10.7}$ zum Startzeitpunkt der Berechnung beruhen.

Die Atmosphärenmodelle MET und NRLMSISE-00 weisen einen Anstieg der Teilchendichte des atomaren Sauerstoffs während der Sonnen- und einen signifikanten Abfall während der Eklipsenphasen auf. Nach Sinken der Teilchendichte zeigt NRLMSISE-00 einen weiteren kurzen Anstieg, bevor die Eklipsenphase beginnt. Nach dem DTM Modell liegt das Minimum während der Eklipse ungefähr auf dem gleichen Niveau wie bei NRLMSISE-00 und MET. Der Kurvenverlauf zeigt jedoch zwei Maxima und zwei Minima je Orbitumlauf. Wie später erörtert wird, ist dies auf den Einfluss des Breitengrades als auch der Orbithöhe gegenüber dem Standardellipsoid der Erde zurückführbar. Der maximale Unterschied zwischen den NRLMSISE-00- und den DTM - Ergebnissen für den betrachteten Zeitbereich beträgt 185 Prozent (Faktor 2,85 zwischen $2 \cdot 10^8$ (NRLMSISE-00) und $5,7 \cdot 10^8$ (DTM) Sauerstoffatome je cm^{-3}).

Entsprechend der Inbetriebnahmeprozedur des FIPEX-Experiments wurden zunächst drei Sensoren aktiviert, um das thermische Verhalten auch bei schlechten Betawinkeln der Raumstation zu untersuchen. Die Abb. 13 zeigt den Verlauf der Sensorströme eines Platin- und eines Goldsensors in Flugrichtung (Ram) und eines Platin-sensors in Zenitrichtung. Der Vergleich zu den Atmosphärenmodellen für den jeweils zweiten Orbitumlauf ist in Abb. 14 abgebildet. Die dargestellten Werte sind auf das jeweilige Maximum während der gesamten Messzeit normiert. Zunächst ist zu erkennen, dass die normierten Sensorströme des Platin- und des Goldsensors ungefähr die gleichen Zahlenwerte aufweisen. Somit kann geschlussfolgert werden, dass sich das Verhältnis von atomarem zu molekularem Sauerstoff während dieser vier Orbitumläufe nahezu nicht änderte. Die Sensorströme als auch die Ergebnisse des NRLMSISE-00 Modells erreichen ungefähr zu den gleichen Zeitpunkten die beiden leicht unterschiedlich hohen Maximalwerte pro Orbitumlauf. Die Minima der Sensorströme in Ram- und Zenitrichtung kurz vor Ende der Eklipsenphasen werden von allen drei Atmosphärenmodellen zu den gleichen Zeitpunkten erreicht. Das MET bildet im Gegensatz zu den Messergebnissen als auch den Ergebnissen von NRLMSISE-00 und DTM kein Minimum während der Sonnenphasen. Zwar treten die Extrema der Sensorströme und der Atmosphärenmodelle zu ungefähr den gleichen Zeitpunkten auf, jedoch sind die Teilchenzahldichten des atomaren Sauerstoffs für alle drei Modelle insgesamt auf unterschiedlichem Niveau.

Für die Interpretation der Ergebnisse erweist sich die Abhängigkeit der Sensorströme vom Breitengrad bei Be-



Geomagn. Index $A_p = 19$ (Intern. Service of Geomagnetic Indices), 13 Messungen @ GMT107, Solarer Fluss $F_{10.7} = 70$ (NASA Penticon, 2800 Mhz Series C @ GMT107, 20:00 UTC)

Abb. 12: Ergebnisse der Atmosphärenmodelle NRLMSISE-00, MET und DTM für die Teilchendichte des atomaren Sauerstoffs (AO) entlang der vier Orbitumläufe

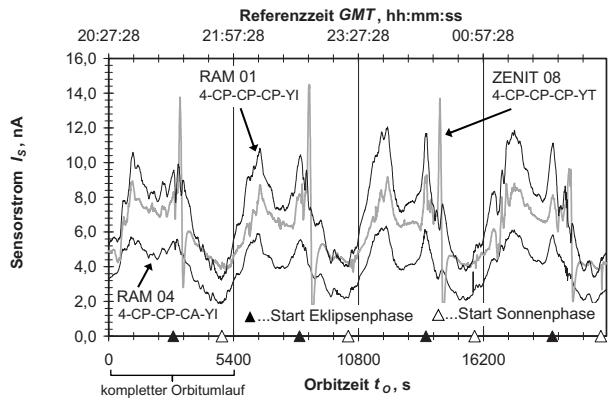


Abb. 13: FIPEX Messergebnisse: Sensorströme entlang der vier Orbitumläufe von GMT/2008/107/20:27:28 bis GMT/2008/108/02:26:23

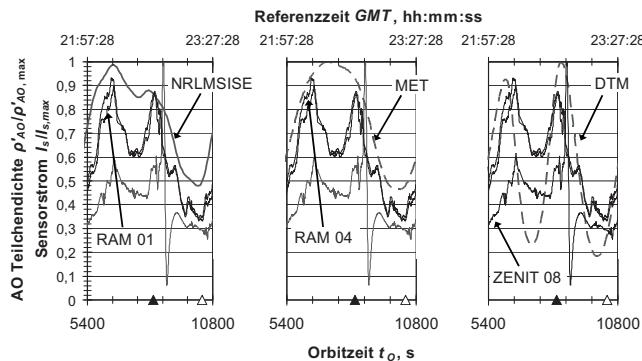


Abb. 14: FIPEX Messergebnisse: Sensorströme entlang des zweiten Orbitumlaufs im Vergleich zu den Ergebnissen der Atmosphärenmodelle NRLMSISE-00 (links), MET (Mitte) und DTM (rechts), Ergebnisse sind auf das jeweilige Maximum normiert.

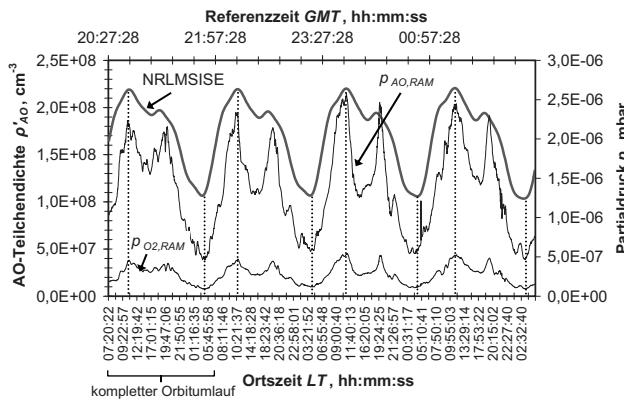


Abb. 15: Ergebnisse der Atmosphärenmodelle NRLMSISE-00, MET und DTM für die Teilchendichte des atomaren Sauerstoffs (AO) entlang der vier Orbitumläufe

achtung der Ortszeit am Messpunkt als interessant. Zunächst steigen die Sensorströme bis etwa zum 30. Breitengrad. Bei weiterer Erhöhung des Breitengrads entlang des Orbits sinkt der Sensorstrom bis zum 51. Breitengrad, um anschließend wieder anzusteigen. Das vorher erreichte Maximum wird jedoch nicht erreicht. Dies ist wahrscheinlich auf den abnehmenden solaren Einfluss

zurückzuführen, da sich die Ortszeit den späten Abendstunden annähert. Der Betawinkel der Raumstation betrug während der Messung ungefähr -30° . Dieser Winkel ist der Winkel zwischen der Orbitebene und dem solaren Vektor und demnach abhängig von der Inklination der Raumstation und der Deklination der Sonne. Daher nimmt der Sensorstrom bereits ab dem 30. Breitengrad nicht mehr zu. Die Maxima in der Sonnenphase treten jeweils circa 10:30 Uhr wahrer Ortszeit und die Minima in der Eklipsenphase gegen 4:30 Uhr morgens auf. Zu beachten ist jedoch, dass die Maxima zur Ortzeit nicht die Tagesmaxima an diesen Orten darstellen, sondern die je Orbit erreichten Maximalwerte.

Ebenfalls zeigt Abb. 15 die Ergebnisse der Umrechnung der Sensorströme über die Kalibrierfunktionen in die Partialdrücke von atomarem und molekularem Sauerstoff im Vergleich zum Atmosphärenmodell NRLMSISE-00. Es ist erkennbar, dass der Partialdruck des atomaren Sauerstoffs im Gegensatz zum molekularen Sauerstoff wesentlich höheren Schwankungen unterliegt und den Hauptbestandteil darstellt. Das Maximum liegt bei $4,8 \cdot 10^{-7}$ mbar für molekularen und $2,6 \cdot 10^{-6}$ mbar für atomaren Sauerstoff. Das Minimum während der vier betrachteten Orbits erreicht $9,3 \cdot 10^{-8}$ mbar im Fall von molekularem Sauerstoff und $5,0 \cdot 10^{-7}$ mbar bei atomarem Sauerstoff. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Aufgrund der Erdrotation die Atmosphärendichte in der Äquator-ebene größer als in der polaren Region ist. Somit muss in Äquatornähe auch der Partialdruck des atomaren Sauerstoffs höher sein, wie ein Vergleich der Abbildungen 11 und 15 beweist.

Diese ersten Messdaten und der Vergleich mit den Vorhersagen der Atmosphärenmodelle zeigen an einigen Punkten qualitative Übereinstimmungen. Jedoch gibt es signifikante Unterschiede im qualitativen, zeitabhängigen Verlauf. Diese Ergebnisse demonstrieren nicht nur, dass die Sensoren und das Gesamtsystem im Weltraum einsetzbar sind und zeitabhängige Messergebnisse liefern. Vielmehr unterstreichen die ersten Ergebnisse auch die Notwendigkeit dieser und weiterer Messungen. Nach Missionsende werden bei Verfügbarkeit einer großen Datenbasis und erfolgter Postkalibrierung der Sensoren alle Ergebnisse zur Korrelierung der Atmosphärenmodelle veröffentlicht.

6. DANKSAGUNG

Diese Dissertation und die dazugehörigen Projekte wurden durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Förderkennzeichen 50JR0231, die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) und die Technische Universität Dresden gefördert. An dieser Stelle möchte sich der Autor herzlich bei allen Personen bedanken, durch deren Unterstützung die Dissertation und das Weltraumexperiment überhaupt erst ermöglicht wurden. Dies gilt insbesondere für meine akademischen Lehrer und Gutachter Herr Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas, Herr Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. e.h. Ernst W. Messerschmid und Herr Dr.-Ing. Frank Hammer.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Schmiel, T.: Entwicklung, Weltraumqualifikation und erste Ergebnisse eines Sensorinstruments zur Messung von atomarem Sauerstoff im niedrigen Erdorbit, Dissertation, Sierke-Verlag, 2009
- [2] Fasoulas, S.: Measurement of Oxygen Partial Pressure in Low Pressure and High Enthalpy Flows, AIAA.96-2213, 19th Advanced Measurement and Ground Testing Technology, New Orleans, LA, 1996
- [3] Förstner, R.: Entwicklung keramischer Festkörperelektrolyt-sensoren zur Messung des Restsauerstoffgehalts im Welt-raum, Dissertation, Universität Stuttgart, 2003
- [4] Fasoulas, S.; Förstner, S.; Stöckle, T.: Flight Test of Solid Oxid Micro-Sensors on a Russian Reentry Probe, AIAA 2001-4724, Space 2001 Conference & Exhibition, Albuquerque, NM, 2001
- [5] Schremp, C.; Fasoulas, S., Messerschmid, E.: Direct Measurement of Oxygen during a Ballistic Flight on a Sounding Rocket, AIAA-96-2231, 19th Advanced Measurement and Ground Testing Technology, New Orelans, LA, 1996
- [6] Hammer, F.: Entwicklung eines miniaturisierten Festkörper-elektrolytsensors aus der Raumfahrt zur Optimierung von Verbrennungsprozessen, Dissertation, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, 2001
- [7] Sauer, M.: Entwicklung von Festkörperelektrolytsensoren zur Charakterisierung von Gaspartialdrücken und Massenströmen, Dissertation, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, 2000
- [8] Fasoulas, S. (Editor); Baumann, R.; Gläser, M.; Gritzner, C.; Hammer, F.; Heisig, J.; Kahle, R.; Kirschke, T.; Schmiel, T.; Völkel, M.: Solid State Electrolyte Sensors for the Determination of Oxygen, Carbon Dioxide, and Total Flow Rates Associated to Respiration in Human Subjects, Executive Summary to ESA-ESTEC Contract No. 15450/01/NL/JS CNN 1+2, PRO2-FR-EXEC-SUM-05-02-10, TU Dresden, 2005
- [9] Engelhardt, R., EuTEF / FIPEX Experiment, European Space Agency, Head of Technology Flight Opportunities Section, Schreiben vom 06.05.2002
- [10] NASA TP—1999–209260, Material Selection Guidelines to Limit Atomic Oxygen Effects on Spacecraft Surfaces, 1999
- [11] Hedin, A. E.: Atomic Oxygen Modelling in the Upper Thermosphere, Goddard Space Flight Center, 1988
- [12] Dieminger, W.; Hartmann, G.K.; Leitinger, R.: The Upper Atmosphere, Data Analysis and Interpretation, Springer Verlag, 1996
- [13] Oldham, K.B., Myland, J.C.: Fundamentals of Electrochemical Science, Academic Press, Inc., San Diego, 1994
- [14] Günther, C.: Untersuchungen zur Chromvergiftung keramischer Kathoden einer Hochtemperaturbrennstoffzelle, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- [15] Schwandt, C., Weppner, W., Elektrode Reactions at Oxygen, noble Metal / Stabilized Zirconia Interfaces, Ionics, Springer Verlag, 1996
- [16] Schwandt, C., Weppner, W., Kinetics of Oxygen, Platinum/Stabilized Zirconia and Oxygen, Gold/Stabilized Zirconia Electrodes under Equilibrium Conditions, J. Electro-chem. Soc., Vol. 144, No. 11, pp. 3728 – 3738, 1997
- [17] Space Weather Prediction Center, U.S. Dept. of Commerce, NOAA, <http://www.swpc.noaa.gov>, täglich aktualisierte elektronische Datenbank für Kennzahlen der solaren Aktivität
- [18] International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Geomagnetic Planetary Indices, GeoForschungsZentrum Potsdam, Adolf-Schmidt-Observatorium for Geomagnetism, <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/index.html>, Elektronische Datenbank für Kennzahlen des Geomagnetismus