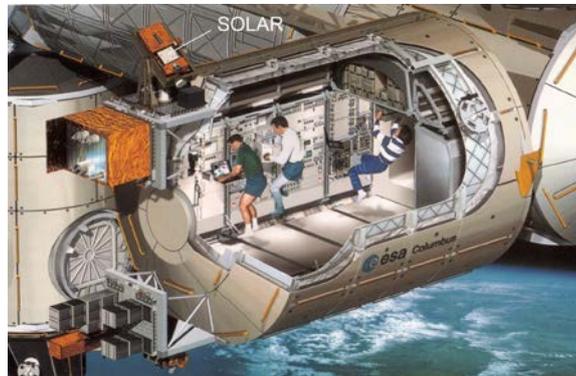




## Zusammenfassung

SolACES (SOLAR Auto-Calibrating EUV / UV Spectrophotometers) hat während seiner nahezu 9-jährigen Meßkampagne an Bord der **International Raumstation (ISS)** die Sonne im Extremen UV (EUV) und UV bei Wellenlängen zwischen 17 und 220 nm beobachtet. Der Start des Instruments ist zusammen mit dem Columbus-Modul der ESA am 7. Februar 2008 erfolgt. Als ein **Bestandteil des wissenschaftlichen Instrumentenpakets SOLAR** ist SolACES im Coarse Pointing Device (CPD) auf der **Columbus External Payload Facility (CEPF)** untergebracht. Das CPD kompensiert die unterschiedlichen Orientierungen der ISS aus und richtet dabei SolACES zusammen mit den beiden anderen Nutzlasten von SOLAR, dem "Solar Variability and Irradiance Monitor" (**SOVIM**, Schweiz) und dem "Solar Spectrum Measurement" Instrument (**SOLSPEC**, Frankreich), auf die Sonne aus. Dies hat synchrone und einander ergänzende Messungen aller drei Instrumente ermöglicht. Während SOVIM den Strahlungsstrom der Sonne integriert über das gesamte Spektrum bestimmte, führte SOLSPEC Messungen des spektralen Strahlungsstromes in dem sich langwellig an den Spektralbereich von SolACES anschließenden Teil des Sonnenspektrums bei Wellenlängen zwischen 180 nm und 3 µm durch.

Das vorrangige wissenschaftliche Ziel von SolACES war die Messung des spektralen Strahlungsstromes der Sonne (die Solar-"konstante" in physikalischen Einheiten) im EUV / UV-Bereich und deren zeitliche Variation. Die spektrale Auflösung der Spektren betrug dabei, abhängig von der Wellenlänge, zwischen 0.5 und 2 nm. Eine neuartige Eigenschaft von SolACES, die die Meßergebnisse aller bisherigen Weltraumexperimente dieser Art übertrifft, war die Möglichkeit der Auto-Kalibration, die während der gesamten Dauer der Mission regelmäßig durchgeführt wurde. Das Auto-Kalibrationsverfahren diente dazu, die nicht zu vermeidenden zeitlichen Änderungen des Wirkungsgrades (Degradation) des Instruments zu berücksichtigen und den EUV-Fluß mit einer bisher nicht erreichten radiometrischen Genauigkeit von besser als 10% zu bestimmen. Bisher lagen die typischen Unsicherheiten bei ähnlichen Messungen in der Größenordnung von 20 bis 400% und mehr.



Neben der Überwachung der EUV / UV-Strahlung der Sonne, verfolgte SolACES eine Anzahl von weiteren wissenschaftlichen Zielen sowie Anwendungen auf dem Gebiet des Satellitenbetriebs und deren Technologie. Diese Ziele umfassten Fragestellungen aus den Bereichen der solar-terrestrischen Beziehungen, der Sonnenphysik, der stellaren Astrophysik (Vergleich zwischen der Sonne und Sternen) und der Beobachtung der atmosphärischen Umgebung der ISS. Insbesondere sollten grundlegende Meßergebnisse gewonnen werden, die eine deutliche Verbesserung der Modelle der irdischen Thermosphäre und Ionosphäre erwarten lassen. Anwendungen der Ergebnisse von SolACES werden die Verbesserung der Vorhersagen von Satelliten- und Weltraummüllorbits sein sowie neue Modelle zur Telekommunikation per Satellit und Satellitenavigation (Weltraumwetter).

Die Entwicklungskosten von SolACES wurden gemeinsam durch das **DLR** (55%), die **ESA** (25%), und die **Fraunhofer-Gesellschaft** (20%) getragen. Der Transfer zur ISS lag in der Verantwortung der ESA. Über die Entwicklungsphase hinaus hat das DLR auch die Missionsvorbereitungen, die Betriebsphase und die Datenauswertung finanziell unterstützt.

Das **wissenschaftliche Team von SolACES** wird durch einen „Principal Investigator“ aus dem Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) in Freiburg geleitet, das für die Entwicklungsarbeiten und den Betrieb des Experiments verantwortlich zeichnet. Mitglieder des Teams kommen aus dem Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik, Freiburg, dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, dem Astrophysikalischen Institut Potsdam (AIP), DLR / DFD, Neustrelitz, der Firma Space Environment Technologies, Los Angeles (USA), dem Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP), Boulder (USA), dem Space Science Center (SSC) der University of Southern California, Los Angeles (USA), dem Service d'aéronomie, Verrières-le-Buisson (Frankreich, SOLSPEC), und dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos / World Radiation Center (PMOD / WRC), Davos (Schweiz, SOVIM).

## Wissenschaftliche Ziele

Das vorrangige Ziel von **SolACES** und **SOLAR** war zunächst eine (quasi-) kontinuierliche **Messung der Solar"konstante"** mit dem Hintergrund, natürliche Effekte der Variation der Sonnenstrahlung von einem Einfluß des Menschen auf das Klima der Erde trennen zu können. Ein zusätzliches Ziel der Sonnenphysik war auch die Modellierung der variablen VIS-UV-EUV Emissionen in den dunklen Gebieten der Sonne und deren aktiver Umgebung.

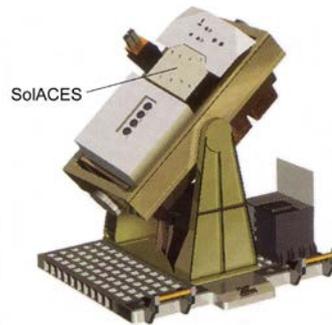
Über die primären Ziele von SOLAR hinaus war zu erwarten, dass SolACES auch zu anderen Gebieten von großem wissenschaftlichem Interesse beiträgt, da die EUV-Strahlung der Sonne DIE Hauptenergiequelle für das **System der Thermosphäre und der Ionosphäre (T/I)** der Erde darstellt. Die meisten T/I-Prozesse werden durch die solare EUV-Strahlung gesteuert, die sich auf kurzfristigen (solare Flares), mittelfristigen (Sonnenrotation) und langfristigen Zeitskalen (Sonnenzyklus) stark ändern kann. Auf

Grund der technischen Herausforderungen bei der Messung war diese wichtige Energiequelle jedoch bisher nicht mit einer Genauigkeit bekannt, die dem heutigen Stand der Wissenschaft (z.B. der Aeronomie der Thermosphäre und der Ionosphäre, der Sonnenphysik und der Physik der Planeten und der interplanetaren Materie) angemessen wäre. Dies gilt in einem noch größeren Maße auch für die Anforderungen in Anwendungsfeldern wie der Navigation (insbesondere der GPS-Technologie), der Analyse der Orbits von ISS und Satelliten („drag analysis“), Radarmessungen und Telekommunikation.

In der Vergangenheit betrug die radiometrische Genauigkeit von EUV-Fluß-Messungen der Sonne im wichtigen Wellenlängenbereich unterhalb von 100 nm zwischen 20% und mehr als 400%. Ein wichtiges Ziel von SolACES war daher eine Verringerung dieser Unsicherheiten auf unter 10%. Eine Unsicherheit von z.T.

weniger als 5% wurde, abhängig vom jeweiligen Wellenlängenband, erreicht. Dieser Fortschritt wurde durch den erstmaligen Einsatz des Auto-Kalibrationssystems mit einer sehr hohen absoluten und statistischen Genauigkeit erzielt. Angesichts der noch in Betrieb befindlichen US-Missionen TIMED und SORCE, die weder diese In-Flight Auto-Kalibrationsmöglichkeit haben, noch die hohe statistische Genauigkeit, hat SolACES mit neuen Resultaten zu verschiedenen Gebieten der Weltraumwissenschaften und ihrer Anwendungen beigetragen. Insbesondere sind dies:

- (Quasi-) kontinuierliche **Überwachung der solaren EUV / UV-Strahlung**
- Radiometrisch exakte Bestimmung des **solaren EUV / UV-Strahlungsstromes** zwischen 17 und 220 nm
- Modellierung des spektralen / integralen EUV / UV-Strahlungsstromes der Sonne
- Modellierung der irdischen **Thermosphäre und Ionosphäre**
- Bestimmung von solaren **EUV / UV Indizes**
- Semi-empirische Modellierung der **aktiven Regionen der Sonne**
- Spektroskopie der Wasserstoffemissionen aktiver Regionen



- Erforschung der **solar-terrestrischen Beziehungen**
- **Astrophysik der Sonne** (Vergleich Sonne – Sterne)
- **Aspekte des Weltraumwetters** (Einfluß auf die Satelliten-Telekommunikation and Navigation)
- Wechselwirkung der solaren EUV-Strahlung mit der ISS
- Änderung der **ISS-Umgebung** mit der Sonnenaktivität
- **Instrumentierung für die Messung des EUV / UV im Weltraum** und ihre Kalibration
- Kreuzkalibration mit anderen EUV-Experimenten

Um eine Kooperation mit den wichtigsten Gruppen aufzubauen, die auf den genannten Gebieten arbeiten, hat der „Principal Investigator“ von SolACES in Koordination mit den internationalen Organisationen SCOSTEP (Scientific Committee On Solar-Terrestrial Physics) und COSPAR (Committee on Space Research) das internationale **TIGER** Programm (Thermospheric-Ionospheric GEospheric Research) ins Leben gerufen.

## Kenndaten der Entwicklung und des Betriebs von SolACES

- |                            |                      |                       |                              |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| • Beginn der Entwicklung:  | November 1998        | • Missionsdauer:      | bis Februar 2017             |
| • Beginn der Mission:      | 7. Februar 2008      | • Bahncharakteristik: | ISS-Orbit (Bahnhöhe ~400 km) |
| • Trägerfahrzeug:          | Space Shuttle (NASA) | • Kontrollzentrum:    | B.USOC (Belgien)             |
| • Startort:                | Cape Canaveral       | • Meßfenster:         | max. 20 Minuten pro Orbit    |
| • Nominelle Missionsdauer: | 18 Monate            |                       |                              |

## Kenndaten des Instruments

- |                              |                              |                        |                        |
|------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|
| • Masse des Instruments:     | 23.0 kg                      | • Datenrate:           | ~1.0 kbit/s            |
| • Abmessungen:               | 25 x 29 x 60 cm <sup>3</sup> | • Wellenlängenbereich: | 17...220 nm (EUV / UV) |
| • Elektr. Leistungsaufnahme: | < 25 W (typ.), 60 W (max.)   | • Spektrale Auflösung: | 0.5...2 nm             |

## Beschreibung von SolACES und seines Messprinzips

SolACES besteht aus zwei Doppel-Spektrophotometern mit insgesamt vier Beugungsgittern und Channel-Elektronenvervielfachern als Detektoren sowie zwei Ionisationskammern mit Photodioden, um die einfallende EUV / UV-Strahlung nachzuweisen und die In-Flight Kalibration durchzuführen. Ein gemeinsames Filterrad für die Spektrometer und die Ionisationskammern (Befüllung mit Ne-, Xe-, oder NO-Gas), das 43 verschiedene Dünnschicht-Metall- sowie Kristallfilter enthält, diente dazu, die spektralen Bänder während der Auto-Kalibrationsprozedur auszuwählen.

Spektrophotometrische Standardmessungen der Sonne wurden mit Hilfe der Spektrometer ohne ein vorgeschaltetes Filter durchgeführt. Pro Orbit ließen sich auf diese Weise ein oder zwei EUV / UV-Spektren (d.h. mehr als 15 Spektren pro Tag), integriert über die volle Sonnenscheibe, aufnehmen.

Während der Missionsphase wurde die Auto-Kalibration regelmäßig durchgeführt. Bei dieser Prozedur wurde die Transmission der Filter durch Spektrometermessungen mit und ohne Filter bestimmt. Die absoluten EUV / UV-Flüsse, integriert über jeden der Filterbandpässe, konnten dann aus Ionisationskammermessungen abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung der aktuellen Filtertransmissionen wurden diese Messungen schließlich dazu benutzt, Kalibrationsfaktoren für die Standardmessungen zu bestimmen.

Während der Durchführung aller Standard- und Kalibrationsmessungen war die genaue Ausrichtung des Experiments auf die Sonne durch das CPD gewährleistet.



## Ansprechpartner

Fraunhofer IPM  
Heidenhofstraße 8  
79110 Freiburg

[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)

DLR  
Königswinterer Str. 522 - 524  
53227 Bonn

[www.dlr.de](http://www.dlr.de)

ESA / ESTEC  
Postbus 299  
NL-2200 Noordwijk  
Niederlande

[www.sci.esa.int](http://www.sci.esa.int)

Stand: Mai 2017