

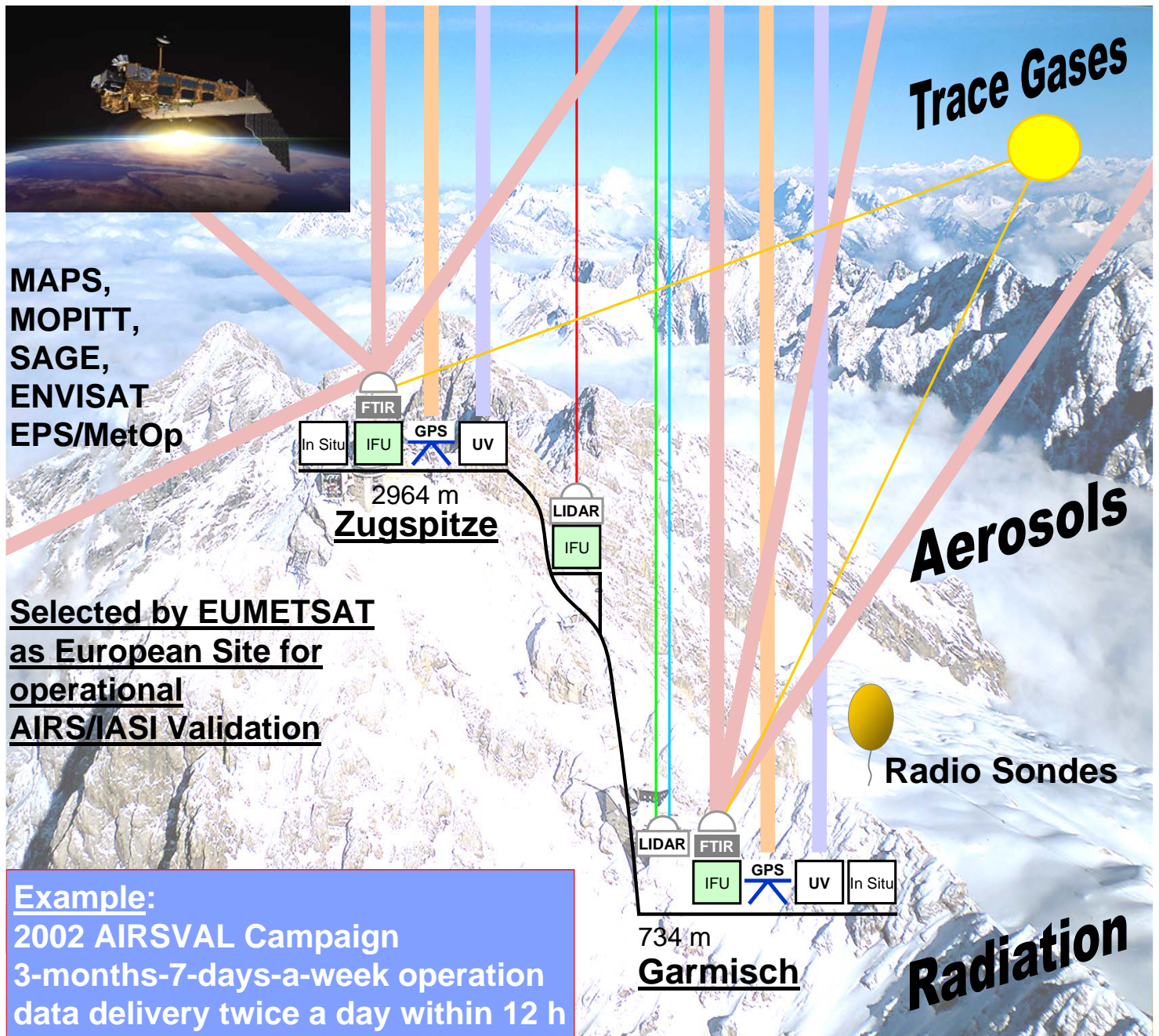


Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft
IMK-IFU
Garmisch-Partenkirchen



Permanent Ground-Truthing Facility Zugspitze/Garmisch according to the WMO requirements

Validation and Synergistic Use with Satellite Measurements



Die Permante Ground-Truthing-Station am Standort Zugspitze/Garmisch

Vor zehn Jahren ist das Ground-Truthing Center Zugspitze/Garmisch aufgebaut und in der Zwischenzeit durch zusätzliche Instrumentierungen mit bodengebundenen Fernerkundungsverfahren auf der Zugspitze (2964 m), dem Schneefernerhaus (2650 m) sowie im Institut in Garmisch-Partenkirchen (734 m) in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, der Europäischen Kommission, dem Freistaat Bayern, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), sowie den Weltraumorganisationen ESA und NASA zu einem permanenten Ground-Truthing Center ausgebaut worden.

Dieses Zentrum erfüllt die von CEOS-WGCV gestellten Forderungen für eine integrierte Umweltbeobachtung („Integrated Global Observing System-IGOS“) und ist Bestandteil des von NASA koordinierten globalen Umweltüberwachungsnetzwerks NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change).

Das Ground Truthing Center ist in den vergangenen Jahren erfolgreich an verschiedenen Aktivitäten und Kampagnen zur Satellitenvalidierung (u.a. von MAPS, SAGE, GOME, MOPITT, AIRS, ENVISAT, ACE) beteiligt gewesen und wird Bestandteil des im nächsten Jahr anlaufenden Validierungsvorhabens zu ESA/EUMETSAT EPS/MetOp.

Mit dem Ground-Truthing Center Zugspitze/Garmisch ist ein international führender Standort für die Satellitenvalidierung entstanden, der eine ausgezeichnete Position in dem in der Entstehung befindlichen globalen Validierungsmessnetz einnimmt. Darüber hinaus werden die an diesem Ground-Truthing Center erzielten Ergebnisse in Verbindung mit Modellierungsaktivitäten zur Erstellung höherwertiger Datenprodukte genutzt.

Prüfung der Qualität von Satellitenmessungen erforderlich

Die spektralradiometrische Sondierung der Erdatmosphäre von Satellitenplattformen aus ist in den letzten beiden Dekaden erheblich verbessert und erfolgreich in Forschung und Technik eingesetzt worden. Populäres Beispiel sind die Wettersatelliten, mit denen heute global flächendeckende und dabei raum-zeitlich hoch aufgelöste Bilder des aktuellen Wettergeschehens wie z.B. globale Wolkenverteilungen sowie Höhenprofile von Wasserdampf und Temperatur kontinuierlich geliefert werden können. Gegenüber traditionellen Punktmessungen an Bodenstationen erlaubt es die neue Dimension der Satellitendaten zudem, über ihre Assimilierung in numerische Vorhersagemo-

delle nahe der Echtzeit, die Zuverlässigkeit der Wetterprognose signifikant zu verbessern.

Ein ähnliches Bild zeigt sich in jüngerer Zeit auch bei der möglich gewordenen globalen Erfassung der komplexen chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre. Ein renommiertes Beispiel hierfür ist u.a. das MIPAS-Experiment auf dem in 2002 in Umlauf gebrachten Umweltsatelliten ENVISAT. Derartige Missionen liefern raumzeitlich aufgelöste Bilder der globalen Verteilung mehrerer für die Atmosphärenwissenschaften wichtiger atmosphärischer Spurenstoffe. Ein besonders markantes Beispiel dafür ist die Entdeckung und zeitliche Verfolgung des „Antarktischen Ozonlochs“.

Die Akzeptanz und Nutzung der Daten aus Satellitenmessungen für umweltpolitische Entscheidungen ist jedoch nur dann gewährleistet, wenn diese Daten einer umfassenden, kontinuierlichen und international harmonisierten Qualitätssicherung bei Rückführung auf international anerkannte Kalibrierstandards unterzogen werden. Diese Vorgehensweise ist von grundlegender Bedeutung für (i) die Validierung von aus den direkten Messgrößen (Level-1-Daten) abgeleiteten geophysikalischen Level-2-Daten während der „Commissioning Phase“ neuer Missionen (derzeit zumeist befristet auf wenige Monate), (ii) für die frühzeitige Erkennung möglicher Langzeit-Drifts der Sensoren (etwa durch Degradation optischer Komponenten) sowie (iii) die regelmäßige Re-Evaluierung der Algorithmen. Satellitenvalidierung ist daher ein mehrstufiger iterativer Prozess, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Unabhängig davon ist es erforderlich, eine „Interkalibrierung“ zwischen den einzelnen jeweils auf nur wenige Jahre beschränkten Satellitenmissionen zur jeweiligen Nachfolgemission sicherzustellen. Diese „Interkalibrierung“ ist eine unabdingbare Voraussetzung, wenn aus Satellitenmissionen konsistente Messserien mit einer Mindestlaufzeit von mindestens einer Dekade abgeleitet und damit die potentielle Fähigkeit der Satellitenmessungen für die Berechnung der in den Atmosphärenwissenschaften wichtigen Trendanalysen sichergestellt werden soll.

Für derartige Validierungsaufgaben eignen sich neben den klassischen Insitu-Techniken bevorzugt die bodengebundenen Fernerkundungsverfahren (u.a. FTIR-Spektrometrie, LIDAR, GPS, UV/vis-Spektrometrie), mit deren Hilfe die Vertikalprofile der atmosphärischen Spurenstoffverteilungen mit der erforderlichen Präzision und Langzeitstabilität über dem Messstandort bis in hohe Schichten der Atmosphäre bestimmt werden können. Durch diese Messungen wird die notwendige vertikale Überlappung mit der Messgeometrie des Satelliten hergestellt.

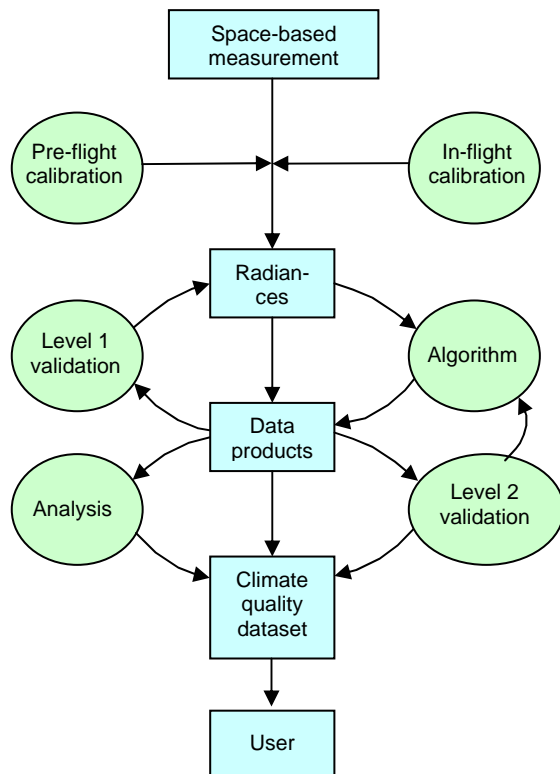


Abbildung 1 Satellitenvalidierung ist ein iterativer Prozeß, der gleichermaßen Kalibrierung, Vergleichsstudien, Algorithmen-Verbesserungen und Datenreprozessierungen beinhaltet.

Solche Instrumente sind zwar prinzipiell an verschiedenen Standorten weltweit im Einsatz, werden aber in der Regel für wissenschaftliche Zielsetzungen eingesetzt, bei denen lediglich Messungen in größeren Zeitabständen (einmal pro Woche) oder in ausgewählten Messkampagnen durchgeführt werden. Da jedoch die Satellitenüberflüge typischerweise nur einmal pro Tag erfolgen und zudem die bodengebundenen Fernerkundungsverfahren in der Mehrzahl auf Schönwetterbedingungen angewiesen sind, ist der rein wissenschaftlich orientierte und nicht auf Operationalität ausgelegte Betrieb der Bodenstationen im Allgemeinen nicht ausreichend, um etwa im Rahmen einer dreimonatigen „Commissioning Phase“ einer Satellitenmission eine ausreichende Vergleichsstatistik aus koinzidenten Messungen (Boden versus Satellit) zu erzielen.

Ferner sind zur Validierung der verschiedenen geophysikalischen Datenprodukte eines Satellitensensors in der Regel mehrere Parameter aus verschiedenen bodengebundenen Fernerkundungssystemen an einem Standort erforderlich. Diese sind zumeist entweder nicht vollständig vorhanden oder werden von verschiedenen Institutionen und damit oft sogar von verschiedenen Ländern aus betrieben. Ein koordinierter Messbetrieb und eine harmonisierte Auswertung der verfügbaren Bodenmessungen zur Validierung eines Satellitensensors ist unter diesen Umständen kaum möglich.

Das Ground-Truthing-Center Zugspitze/Garmisch

Aufgrund dieser Problematik fordert die CEOS-WGCV („Committee of Earth Observing Satellites - Working Group Calibration/Validation“) der WMO von den Satellitenbetreibern eine fortlaufende und international koordinierte Validierung aller Sensoren über deren gesamte Lebensdauer. Daraus leitet sich die Notwendigkeit von ausgewählten, permanenten Ground-Truthing-Stationen ab, an denen mit höchster Genauigkeit und erhöhter Operationalität kontinuierlich die Säulendichten und Profile der relevanten Spurenstoffe und Strahlungsparameter gemessen werden, was z.B. im WMO-Report Nr. 140 explizit gefordert wird. Die Dringlichkeit, diese Stationen unverzüglich aufzubauen, folgt aus der Tatsache, dass bis zum Jahr 2008 über 34 Satellitenplattformen mit multiplen Sensoren im Umlauf sein werden, die fortlaufend durch bodengebundene „Referenz-Systeme“ qualitätsgesichert und betreut werden müssen wie z.B. im WMO Bulletin Nr. 50 (Jan 2001) dargelegt. Nur durch den Aufbau von permanenten Ground-Truthing-Stationen kann diese wichtige Aufgabe kosteneffizient und global harmonisiert erfüllt werden.



Abbildung 2 Neu implementiertes Infrarot-Radiometer am Standort Garmisch zur Erfassung troposphärischer Spurengas-Höhenverteilungen.

Das IMK-IFU hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, die bereits an der Stationskette Zugspitze/Garmisch laufenden Validierungsaktivitäten

(u.a. von MAPS, SAGE, GOME, MOPITT, AIRS, ENVISAT, ACE) zu einer permanent betriebenen Ground-Truthing-Station auszubauen. Dabei wird auf die vom IMK-IFU und anderen, auf den höhengestaffelten Stationen Garmisch (734 m ü. NN), Wank (1780 m ü. NN), Schneefernerhaus (2650 m ü. NN) und Zugspitze (2964 m ü. NN) betriebenen Messeinrichtungen zurückgegriffen (siehe Schemadarstellung auf der Titelseite).

Die Messverfahren werden ständig auf den modernsten Stand der Technologie gebracht und durch neue Messsysteme zur Erfassung möglichst vieler relevanter Parameter vervollständigt und als "Referenz-Systeme" für Satellitensensoren eingesetzt. Diese Stationskette ist bereits Bestandteil des internationalen wissenschaftlichen Messnetzes NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) und hat darin den Status einer „Primary Station“ für die Aerosolmessungen, die Bestimmung von Spurenstoffen mit FTIR und für die Messung von Strahlungsparametern.

Von CEOS-WGCV wurde eine Liste an atmosphärischen Parametern erarbeitet, die für eine integrierte Umweltbeobachtung („Integrated Global Observing System-IGOS“) erforderlich sind. Enthalten sind dabei auch die von den Messungen geforderte Präzision sowie die zeitliche, vertikale und flächenhafte Auflösung (Tabelle 1).

Die hinsichtlich der Datenverfügbarkeit und -qualität gestellten Forderungen werden an der Stationskette Zugspitze/Garmisch - abgesehen von wenigen Ausnahmen - in vollem Umfang erreicht und nach Abschluss eines derzeit vom Bayerischen Wirtschaftsministerium geförderten Entwicklungsvorhabens zur Erweiterung des Messprogramms an dieser Station weiter verbessert.

Derzeitige Entwicklungsarbeiten am Standort Zugspitze/Garmisch



Abbildung 3 Standort „Schneefernerhaus“ mit Kuppel zur Wasserdampfmessung mittels Lidar

Im Rahmen der derzeitigen Entwicklungsaktivitäten am IMK-IFU wurde im Jahr 2004 am Stand-

ort Garmisch ein hoch auflösendes Infrarot-Spektralradiometer installiert (Abbildung 2). Das Gerät wird synchron zu dem FTIR-Spektrometer auf der Zugspitze betrieben und erlaubt damit zusätzlich die Charakterisierung von Ozon und klimarelevanten Spurengasen in der planetarischen Grenzschicht und der freien Troposphäre. Es kann auch bei bedecktem Himmel Spurengas-Teilsäulen und Höhenverteilungen etwa von Ozon, Wasserdampf und der Temperatur unterhalb der Wolkengrenzen liefern. Zusätzlich wird mit diesem Infrarot-Radiometer die vom Satellitensensor gemessene Bodenemissivität validiert.

Abbildung 3 zeigt den Standort „Schneefernerhaus“, in dem das neu entwickelte Wasserdampf-Lidarsystem (Abbildung 4) aufgebaut ist. Nur durch den hoch gelegenen Standort oberhalb der stark feuchtehaltigen planetarischen Grenzschicht ist es möglich, Wasserdampfhöhenverteilungen bis in den kritischen Höhenbereich von über 12 km („UT-LS“) zu erhalten, der auf andere Weise nicht vom Boden aus erreicht werden kann. Derartige Wasserdampfprofile sind für die Validierung von meteorologisch orientierten Satellitenmissionen von hoher Bedeutung (Abbildung 4).

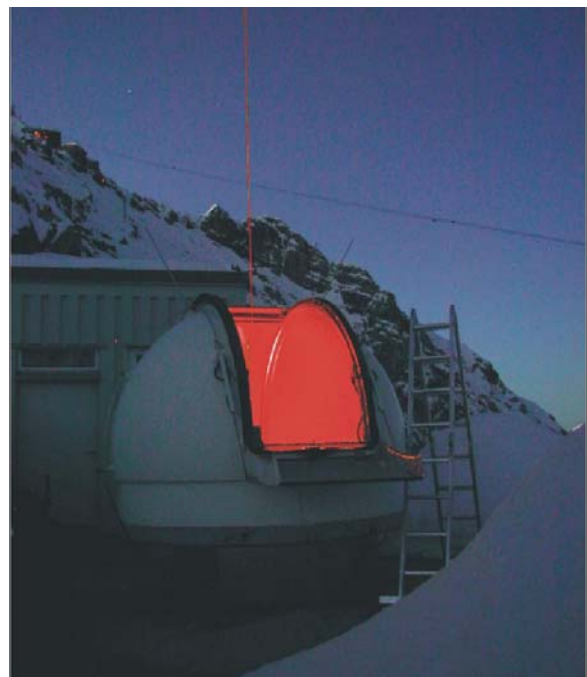


Abbildung 4 Wasserdampf-Lidarsystem am Standort „Schneefernerhaus“.

Wie in der Problemdarstellung eingangs dargelegt, bringt die Notwendigkeit einer ausreichenden hohen Zahl koinzidenter Messdatensätze (Vergleichsstatistik Satellit versus Boden) eine besondere Anforderung an die Operationalität der Instrumentierungen mit sich. An der Ground-Truthing-Station Zugspitze/Garmisch wurden daher konsequent alle Messsysteme und Auswerteroutinen weitestgehend automatisiert und fernbedienbar implementiert.

Ergebnisse - Validierung des Umweltsatelliten ENVISAT

Der betriebene Aufwand hat sich bereits gelohnt und sichtbare Erfolge gebracht. Eine wichtige Kampagne war die ENVISAT-Validierung (Commissioning Phase), die im Jahr 2002/2003 durchgeführt wurde und u.a. die atmosphärischen Komponenten O_3 , N_2O , CO , CH_4 und NO_2 beinhaltet. Der in Abbildung 5 gezeigte Vergleich der mit dem FTIR-Messsystem auf der Zugspitze erzielten Messtage und -daten mit Ergebnissen an anderen, an dieser Validierung beteiligten internationalen Stationen dokumentiert die führende Operationalität der durch das IMK-IFU betriebenen Grund-Truthing-Station.

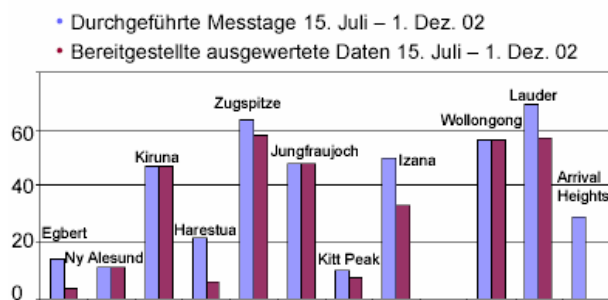


Abbildung 5 Erzielte Messtage an der Zugspitze und verschiedenen FTIR-Stationen weltweit im Rahmen der ENVISAT-Validierung.

Die Ergebnisse der ENVISAT-Validierungsstudie, die u.a. die Messungen der atmosphärischen Spurengase O_3 , N_2O , CO , CH_4 und NO_2 überprüfen sollte, zeigen beispielhaft den Stand der Technik: Das „Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography“ (SCIAMACHY) auf ENVISAT ist ein für den UV- und sichtbaren Spektralbereich ausgelegtes High-Tech-Spektrometer, das die an der Erdatmosphäre gestreute und reflektierte Strahlung analysiert. Die von der ESA bereitgestellten Standard-Datenprodukte, also beispielsweise Satellitendaten zu den Ozon-Gesamtsäulengehalten sind zwar von hervorragender Qualität. Dies trifft auch für die Gesamtsäulenmessungen von NO_2 zu, obgleich sich hier Probleme zeigten, wenn Wolken im Gesichtsfeld des Satelliten auftauchten. Die Verfügbarkeit der „operationellen“ geophysikalischen (near real time) ESA-Datenprodukte von SCIAMACHY ist jedoch zurzeit noch stark eingeschränkt.

Um diese Lücken zu schließen wurden so genannte „wissenschaftliche“ Datenprodukte von einigen Forscher-Teams (off line) aus den verfügbaren Rohdaten abgeleitet. So wurde an der Universität Bremen etwa für die Bestimmung von CO -, CH_4 -, oder NO_2 -Säulendichten ein Standard-Auswerteverfahren angepasst und erfolgreich eingesetzt. Beispielsweise bei den CH_4 -Säulendichten zeigte sich dabei eine zeitabhängige

ge Abweichung durch Detektorvereisung am Satelliteninstrument, dass durch periodisches Heizen minimiert wird (Abbildung 6). Aufgrund dieser Studie wird nun in Zukunft einer der anderen verfügbaren Detektoren (ohne Vereisungsproblem) verwendet.

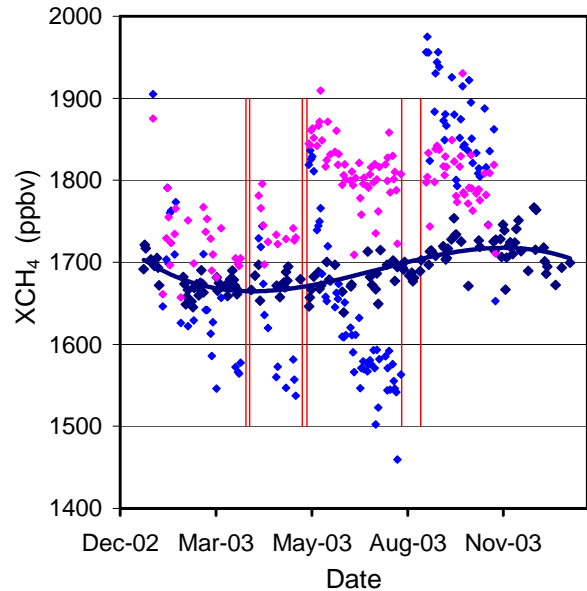


Abbildung 6 FTIR-Messungen der CH_4 -Säulendichten über der Zugspitze (dunkelblau) im Vergleich zu SCIAMACHY-Säulen von denen sind zwei verschiedene Prozessorversionen gezeigt sind: pink (Uni Bremen v04) und hellblau (Uni Bremen v0.41). Deutlich sieht man den zeitabhängigen Bias durch die Detektorvereisung der in v041 reduziert werden konnte. Die roten Linien zeigten die Detektor-Dekontaminationsintervalle an.

Validierung des Wettersatelliten EOS-Aqua/AIRS

Ein anderes Beispiel ist die im Herbst 2002 an der Ground-Truthing-Station durchgeführte dreimonatige Validierungskampagne für das amerikanische Wetter-Satelliteninstrument AIRS auf der Satellitenplattform EOS-Aqua. Die Validierung solcher Wetter-Satelliteninstrumente ist von besonderer Bedeutung, weil diese eingesetzt werden um die numerische Wettervorhersage zu verbessern. Durch die Kombination von GPS- und FTIR-Instrumenten sowohl auf einer Bergstation (Zugspitze) als auch auf einer Tal-Station (Garmisch) konnten Wasserdampfsäulengehalte in der planetarischen Grenzschicht und zusätzlich auch mit einer Reichweite bis in eine Höhe von über 12 km (von der Bergstation aus) validiert werden – dieser Höhenbereich ist anderweitig nicht vom Boden aus zugänglich. Abbildung 7 zeigt das neu aufgebaute GPS-Empfangssystem, das es ermöglicht über die Laufzeitverzögerung zu den GPS-Satelliten den Wasserdampf-Säulengehalt der

Atmosphäre vollautomatisch und kontinuierlich zu quantifizieren.



Abbildung 7 GPS-Empfänger auf der Zugspitze zur Bestimmung des Atmosphärischen Wasserdampf-Säulengehalts.

Gleichzeitig wurden auch Ballon-Sondenaufstiege zur Erfassung von Wasserdampf- und Temperaturprofilen durchgeführt. Ein Paar an Ballonsonden – im Abstand von einer Stunde gestartet - erlaubt es über die Differenz der beiden erhaltenen Messwerte aus einer bestimmten Höhe auf den Messwert zum Zeitpunkt des Satellitenüberflugs in dieser Höhe zu schließen (Abbildung 8).



Abbildung 8 Duales Radiosondensystem zur Messung von Wasserdampf- und Temperaturprofilen bis >20 km Höhe.

Gleichzeitig boten die Radiosondenaufstiege eine Möglichkeit, die FTIR-Messungen von Wasserdampfsäulen zu validieren. Es zeigte sich eine hervorragende Übereinstimmung mit Abweichungen im Sub-Prozentbereich (Abbildung 9).

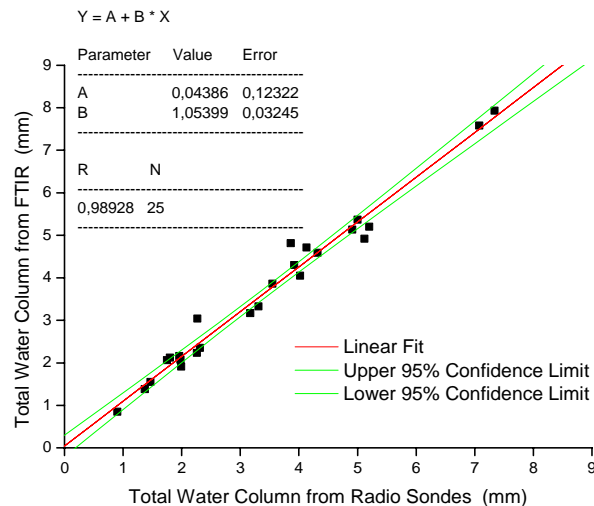


Abbildung 9 Das Bild zeigt die Korrelation und damit die hervorragende Übereinstimmung von Wasserdampfsäulendichten aus solaren FTIR-Messungen am Standort Zugspitze und zeitgleichen Radiosondenaufstiegen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der Ground-Truthing-Station Zugspitze/Garmisch ist ein international führender Standort für die Satellitenvalidierung entstanden, der eine ausgezeichnete Position in dem in der Entstehung befindlichen globalen Validierungsmessnetz einnimmt. Darüber hinaus ist vorgesehen, das Messprogramm an dieser Stationskette auszubauen und durch synergistische Verbindung der mit Satelliten und bodengebundenen Verfahren erzielten Ergebnissen zu höherwertigen Produkten zu nutzen. Ein erstes Beispiel hierfür wurde kürzlich vom IMK-IFU in Zusammenarbeit mit der Universität Bremen im Online-Journal „Atmospheric Chemistry and Physics“ publiziert: Die Ausnutzung der prinzipiell unterschiedlich hohen Sensitivität der Satelliten- bzw. Bodenmessverfahren erlaubt es über die Kombination der beiden unabhängigen Verfahren Stickoxide nun in der untersten Schicht der Atmosphäre (Troposphäre) zu quantifizieren und damit „Pollution Hot-Spots“ etwa ausgehend von Fabriken oder Straßenzügen zu verfolgen.

Die an der Ground-Truthing-Station vorhandenen vielfältigen Messsysteme bieten aber auch die Möglichkeit Sensor-Synergieeffekte der Bodensensoren untereinander künftig systematisch auszunutzen. So liefert beispielsweise das Lidar-

verfahren hochgenaue Vertikalverteilungen von Ozon oder Wasserdampf während das FTIR-System bzgl. der integralen Größe (Säulendichte) die genauere Information liefert. Künftig soll daher das Ergebnis aus der Lidarmessung als Startwert für die Auswertung der FTIR-Messungen verwendet werden. Das Resultat wird dann ein „Super-Datenprodukt“, das sowohl hinsichtlich der Vertikalverteilung als auch der Säule bestmögliche Genauigkeit aufweist.

Nicht zuletzt ermöglicht die nun verfügbare hohe Operationalität der Station Zugspitze/Garmisch wesentlich aussagekräftigere wissenschaftliche Studien an atmosphärischen Spezies mit stark variablen Säulengehalten, wie etwa CO, dessen Gesamtsäulendichte in den letzten Jahren bisher unverstandene dramatische Erhöhungen auf Zeitskalen von Tagen bis Monaten zeigt.

[Ansprechpartner:](#)

Dr. Ralf Sussmann
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
IMK-IFU
Forschungszentrum Karlsruhe
Kreuzleckbanstrasse 19
82467 Garmisch-Partenkirchen
Tel. 08821 183 – 159
e-mail: ralf.sussmann@imk.fzk.de

Aktuelle Publikationen

- Sussmann, R., W. Stremme, M. Rettinger, and A. Rockmann, Validation of SCIAMACHY Operational Near-Real-Time Level-2 Products by FTIR at the Ground Truthing Station Zugspitze, in “Proc. ACVE-2 workshop“, 3-7 May 2004, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, SP-562, 2004.
- Sussmann, R., M. Buchwitz, and A. Richter, Validation of SCIAMACHY Scientific Retrievals of CO, CH₄, N₂O, and NO₂ by FTIR at the Ground Truthing Station Zugspitze, in “Proc. ACVE-2 workshop“, 3-7 May 2004, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, SP-562, 2004.
- Sussmann, R., W. Stremme, and M. Rettinger, Two years of satellite validation at the ground-truthing facility Zugspitze/Garmisch: Long-term validation of ENVISAT atmospheric chemistry data, in “Proc. of the XX Quadrennial Ozone Symposium“, C.S. Zerefos (ed.), 1-8 June 2004, KOS, Greece, Vol. 1, 618-619, 2004.
- Sussmann, R., and C. Camy-Peyret, Two years of satellite validation at the permanent ground-truthing facility Zugspitze/Garmisch: Implementations for AIRS/IASI validation, in “Proc. of the XX Quadrennial Ozone Symposium“, C.S. Zerefos (ed.), 1-8 June 2004, KOS, Greece, Vol. 1, 616-617, 2004.

- Sussmann, R., SCIAMACHY Validation with Solar FTIR Spectrometry at the NDSC Primary Station Zugspitze, Final oral presentation, Joint 5th Meeting of the German SCIAMACHY Validation Team (GSVT) and SCIAMACHY Validation Workshop (SCIAVALIG), Bremen, 6.-8. Dec 2004.
- Sussmann, R., and Buchwitz, M.: Initial validation of ENVISAT/SCIAMACHY columnar CO by FTIR profile retrievals at the Ground-Truthing Station Zugspitze, Atmos. Chem. Phys., 5, 1497–1503, 2005.
- Sussmann, R., Stremme, W. Buchwitz, M., and de Beek, R.: Validation of ENVISAT/SCIAMACHY columnar methane by solar FTIR spectrometry at the Ground-Truthing Station Zugspitze, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 2269–2295, 2005.
- Sussmann, R., Stremme, W., Burrows, J.P., Richter, A., Seiler, W., and Rettinger, M.: Stratospheric and tropospheric NO₂ variability on the diurnal and annual scale: a combined retrieval from ENVISAT/SCIAMACHY and solar FTIR at the Permanent Ground-Truthing Facility Zugspitze/Garmisch, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 2377-2426, 2005.

Tabelle 1: CEOS-WMO requirements and IMK-IFU capabilities for Atmospheric Chemistry

Atmospheric volume	Req.mt	Unit	004 H ₂ O		008 Aerosol		009 O ₃		010 CH ₄		011 CO ₂		012 CO		013 CFC 11		014 CFC 12		015 OH		016 NO		017 NO ₂		018 N ₂ O		019 HNO ₃		020 HCl		021 BrO		022 ClO		023 ClONO ₂		024 SO ₂					
			Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres	Obje	Thres				
			Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay	Δx	Δz	r.m.s.	Δt	delay
1 Lower troposphere	Δx	km	10	500	10	250	10	250	10	250	10	5000	10	250					10	250	10	250	10	250	100	250	10	250	50	250	50	250					10	250				
	Δz	km	0.1	2	0.5	1	0.5	5	2	4	0.5	2	0.5	2					1	1.5	0.5	3	0.5	3	1	4	0.5	3	1	5	1	3					0.5	5				
	r.m.s.	%	0.1	2	1	10	3	20	1	10	0.1	0.3	1	20					5	30	10	40	10	40	0.5	5	10	40	10	20	10	20					3	20				
	Δt	h	0.5	12	6	72	3	168	12	168	12	360	6	24					6	24	6	24	6	24	12	168	6	24	6	24	6	24	6	72			3	168				
	delay	h	(1)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(1)	(3)					(2)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)					(1)	(3)						
2 Higher troposphere	Δx	km	50	250	50	250	50	250	50	250	50	5000	50	250	100	500	100	500	50	500	50	250	50	250	100	250	50	250	50	250					100	500	50	250				
	Δz	km	0.5	3	1	2	0.5	5	2	4	1	5	1	4	1	3	1	3	1	1.5	0.5	3	0.5	3	1	4	0.5	3	1	5					1	3	0.5	5				
	r.m.s.	%	0.2	4	2	20	3	20	1	10	0.2	1	1	20	5	10	5	10	5	30	10	40	10	40	0.5	5	10	40	10	40					5	10	3	20				
	Δt	h	6	168	6	72	3	168	12	168	12	360	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	12	168	6	24	6	24					6	24	3	168				
	delay	h	(1)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(1)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)					(2)	(3)	(1)	(3)				
3 Lower stratosphere	Δx	km	50	250	20	250	50	250	50	250	250	5000	50	250	100	500	100	500	50	250	50	250	50	250	100	250	50	250	50	250	100	250	100	250	100	250	100	500				
	Δz	km	0.5	3	0.5	2	0.5	3	1	3	1	5	2	5	1	3	1	3	1	3	0.5	4	0.5	4	1	3	0.5	4	1	4	1	3	1	3	1	3	1	3				
	r.m.s.	%	0.1	3	1	10	3	15	2	10	0.2	1	5	15	5	10	5	10	5	30	10	30	10	30	2	10	10	30	3	20	10	50	10	50	10	50	5	10				
	Δt	h	6	168	6	168	3	168	12	168	12	360	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	12	168	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24		
	delay	h	(2)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)				
4 Higher stratosphere, mesosphere	Δx	km	50	250	50	250	50	250							100	500	100	500	50	250	50	250	50	250	100	250	50	250	50	250	100	250	100	250	100	250	100	500				
	Δz	km	0.5	3	1	3	0.5	6	1	3					1	3	1	3	1	3	0.5	4	0.5	4	1	3	0.5	4	1	4	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3		
	r.m.s.	%	0.3	5	5	20	3	15	2	10					5	10	5	10	5	30	10	30	10	30	5	20	10	30	5	20	10	20	10	20	10	20	5	10				
	Δt	h	6	168	6	168	3	48	12	168					6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	12	168	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24	6	24		
	delay	h	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)					(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)				
5 Total column	Δx	km	10	500	10	250	10	100	50	250	10	5000	10	250							10	250	10	250	100	250	50	250	50	250	100	250					10	250				
	r.m.s.	%	0.1	3	1	10	1	5	1	5	0.2	1	1	10							1	10	1	10	1	5	1	10	3	15	1	20					1	10				
	Δt	h	0.5	12	6	72	6	24	12	168	12	360	6	24							6	24	6	24	12	168	6	24	6	24	12	24					6	24				
	delay	h	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)							(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)					(2)	(3)				
IMK-IFU-Validation Capability			P,C		P,C		P,C		P,C		C		P,C				C				(C)		C		P,C		P,C		P,C						C							

P = Profile

C = Column

r.m.s.: root mean square error; delta t: orbital cycle of satellite sensor

	H ₂ O, aerosol and CO ₂ - RMS in percentage based on WMO No. 140 and preliminary IGACO review.
	Delay time between observation and availability of the product for distribution to the users: (1) HOURS for operational use in met. forecast or air quality monitoring; (2) DAYS to WEEKS for global distributions and trend analysis and verification of MEA's; (3).MONTHS for climate research and modelling
	CFC 11, CFC 12, OH and ClONO ₂ -based on WMO No. 140 and preliminary IGACO review.