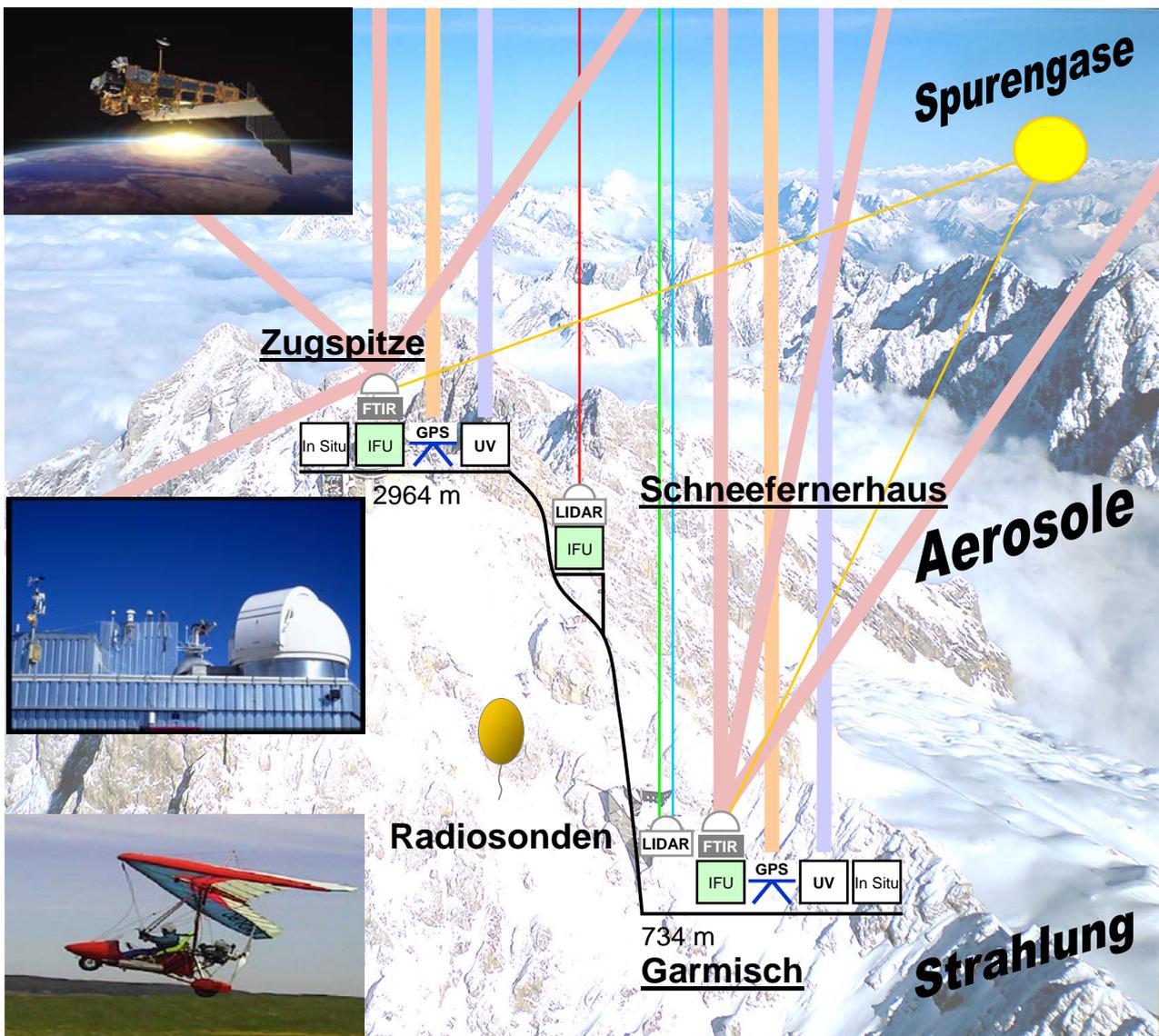


Permanente Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“

(Validierung und synergistische Nutzung von Satellitenmessungen)

Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU)
Forschungszentrum Karlsruhe
Garmisch - Partenkirchen



Die Permante Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“

Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU)
Forschungszentrum Karlsruhe
Kreuzeckbahnstrasse 19, 82467 Garmisch- Partenkirchen

Verantwortlicher: Dr. Ralf Sussmann

Tel. 08821 183 – 159, e-mail: ralf.sussmann@imk.fzk.de

Vor zehn Jahren ist das Ground-Truthing Center Zugspitze/Garmisch aufgebaut und in der Zwischenzeit durch zusätzliche Instrumentierungen mit bodengebundenen Fernerkundungsverfahren auf der Zugspitze (2964m), dem Schneefernerhaus (2650m) sowie im Institut in Garmisch-Partenkirchen (734m) 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.

Bedeutung der Satelliten-Erdbeobachtung

Die Fernsondierung von Satellitenplattformen aus wurde in der letzten Dekade erfolgreich und in stark zunehmendem Maße für die Erdbeobachtung eingesetzt. Nur von Satellitenplattformen aus können global flächendeckende Informationen von relevanten Kenngrößen erstellt werden, die für die Erforschung des globalen Systems „Erde“, aber auch der Überwachung von nationalen und internationalen Abkommen von grundlegender Bedeutung sind. Mit Hilfe von unterschiedlichen Instrumenten können Erdatmosphäre, Ozeane, Polarregionen sowie kontinentale Gebiete zeitgleich beobachtet und daraus die durch natürliche Prozesse sowie durch den Menschen verursachten Veränderungen quantifiziert und schließlich effiziente Strategien zur Verbesserung bestehender bzw. Vermeidung neuer Probleme abgeleitet werden. „Umweltsünden“, freute sich Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn daher anlässlich des Starts des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT in 2002, „werden wir nun global erkennen können. Mit den ENVISAT-Daten stellen wir sicher, dass internationale Umweltvereinbarungen eingehalten werden.“ So wird beispielsweise die Überwachung des Kyoto-Protokolls nur über Satellitensysteme möglich sein. Bis dahin sind jedoch noch weit reichende Entwicklungen notwendig, die derzeit von den Raumfahrtbehörden ESA und NASA sowie von der internationalen Forscher-Community angegangen werden.

Satelliten-Messdaten liefern und liefern zu einer Vielzahl relevanter Umweltfragen bzw. –probleme neue Erkenntnisse: zur globalen Erwärmung der Erde, zur Entdeckung und Erforschung des Ozonlochs, zur Versteppung oder Verwüstung von Landmassen sowie zum Abholzen von Regenwäldern, aber auch zum Bio-Inventar, zur Verschmutzung der Meere und zur Entwicklung polarer Eisregionen. Darüber hinaus liefern die Daten die Grundlagen zur Erforschung und Erfassung von Umweltkatastrophen wie Erdbeben, Fluten, Waldbränden und Vulkanausbrüchen.

Prüfung der Qualität von Satellitenmessungen erforderlich

Die Erdbeobachtung von Satellitenplattformen aus erfolgt mit Hilfe von spektralradiometrischen Sondierungen, die in den letzten beiden Dekaden erheblich verbessert und erfolgreich für die Forschung und für Zwecke der Überwachung 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 Vorhersagemodelle 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 raum-zeitlich aufgelöste Bilder der globalen Verteilung mehrerer und für die Atmosphärenwissenschaften wichtiger atmosphärischer Spurenstoffe, aus denen überraschende Veränderungen der Erdatmosphäre und deren Konsequenzen abgeleitet werden können. Ein besonders markantes Beispiel dafür ist die Entdeckung des „Antarktischen Ozonlochs“ und den daraus resultierenden Folgen.

Die Akzeptanz und Nutzung von Satellitendaten für umweltpolitische Entscheidungen setzt voraus, dass diese Daten einer umfassenden, kontinuierlichen und international harmonisierten Qualitätssicherung unter Nutzung international anerkannter Kalibrierstandards unterzogen werden. Diese Vorgehensweise ist von grundlegender Bedeutung, wenn (i) die aus den direkten Messgrößen (Level-1-Daten) abgeleiteten geophysikalischen Level-2-Daten während der „Commissioning Phase“ neuer Missionen (derzeit zumeist befristet auf wenige Monate) validiert, (ii) mögliche Langzeit-Drifts der Sensoren (etwa durch Degradation optischer Komponenten) möglichst früh erkannt sowie (iii) die verwendeten Auswerte-Algorithmen kontinuierlich re-evaluiert werden sollen. Satellitenvalidierung ist daher ein mehrstufiger iterativer Prozess, wie in Abbildung 1 dargestellt.

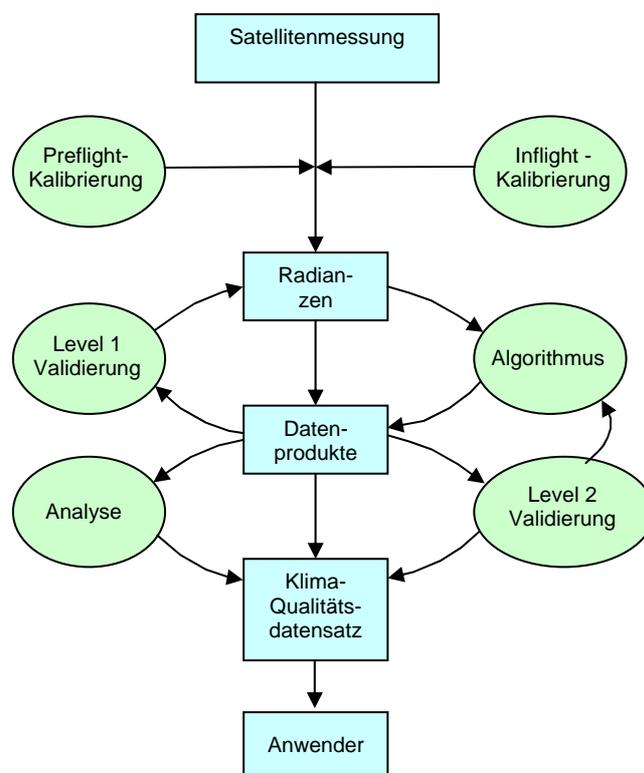


Abbildung 1: Satellitenvalidierung ist ein iterativer Prozess, der gleichermaßen Kalibrierung, Vergleichsstudien, Algorithmen-Verbesserungen und Datenreprozessierungen beinhaltet.

Die allgemeine Tendenz geht zum Einsatz mehrerer, dafür aber kleinerer Satelliten. Deren Missionen sind in der Regel auf nur wenige Jahre beschränkt und machen damit eine „Interkalibrierung“ zur

jeweiligen Nachfolgemission unbedingt erforderlich, wenn konsistente Messserien mit einer Mindestlaufzeit von mindestens einer Dekade aus Satellitenmissionen sichergestellt werden sollen.

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.

Solche Instrumente sind zwar prinzipiell an verschiedenen Standorten weltweit im Einsatz, werden aber in der Regel nur 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 sind 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 Validierung aller Sensoren, die fortlaufend erfolgt, international koordiniert ist und sich über deren gesamte Lebensdauer erstreckt. Daraus leitet sich die Notwendigkeit von ausgewählten, permanenten Ground-Truthing-

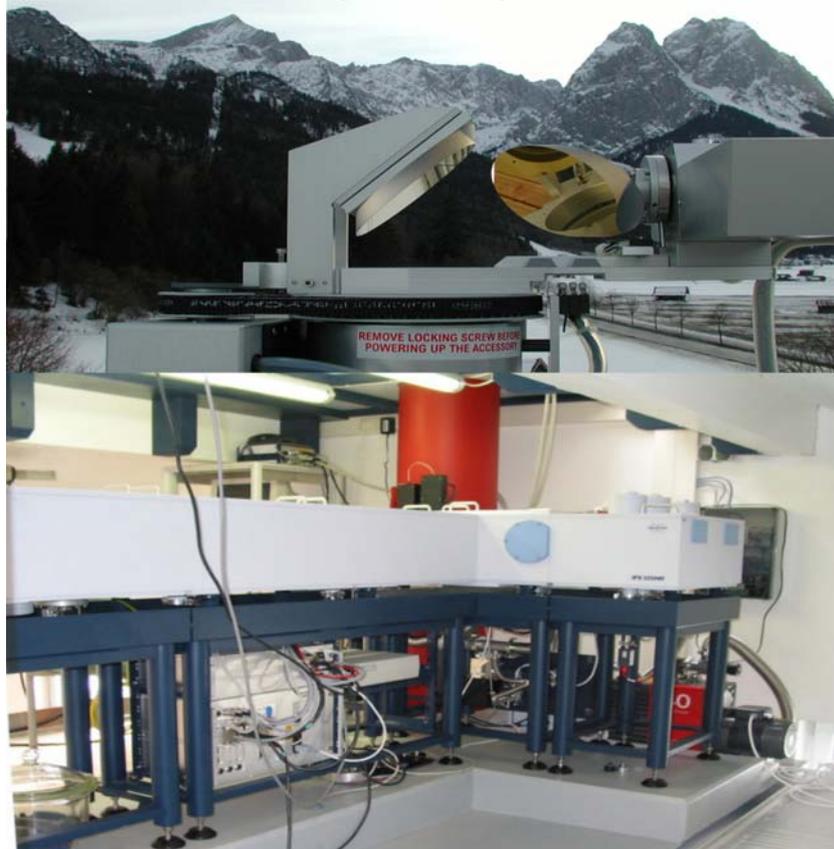


Abbildung 2: Infrarot-Radiometer am Standort Garmisch zur Erfassung troposphärischer Spurengas-Höhenverteilungen.

Stationen ab, an denen mit höchster Genauigkeit und erhöhter Operationalität kontinuierlich die Säulendichten und Profile der relevanten Spurenstoffe und Strahlungsparameter gemessen werden (siehe hierzu z.B. den WMO-Report Nr. 140). Die Dringlichkeit für den Aufbau und Betrieb derartiger Stationen 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, die den gesamten Globus abdecken, kann diese wichtige Aufgabe kosteneffizient und global harmonisiert erfüllt werden.

Bestandteil dieses weltweiten Stationsnetzwerks ist die durch das IMK-IFU auf der Zugspitze und in Garmisch-Partenkirchen betriebene permanente Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“, die auf die vom IMK-IFU und anderen Forschungseinrichtungen 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 zurückgreift. Darüber hinaus ist die permanente Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ zentraler Bestandteil des internationalen wissenschaftlichen Messnetzes NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) und hat darin den Status einer „Primary Station“ für die Bestimmung von Aerosolen, Spurengasen und Strahlungsparametern, inklusive der UV-Strahlung. Die hinsichtlich der Datenverfügbarkeit und -qualität gestellten Forderungen werden an der permanenten Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ - abgesehen von wenigen Ausnahmen - in vollem Umfang erreicht.

Für die Validierungsmessungen werden *in-situ* Messinstrumente sowie bodengebundene Fernerkundungsverfahren eingesetzt, die ständig auf den modernsten Stand der Technologie gebracht und durch neue Messsysteme zur Erfassung möglichst vieler relevanter Parameter vervollständigt werden. Die von der CEOS-WGCV zusammengestellten und für eine integrierte Umweltbeobachtung („Integrated Global Observing System-IGOS“) erforderlichen atmosphärischen Parameter (Tabelle 1) werden bereits nahezu vollständig an der Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ mit der notwendigen zeitlichen, vertikalen und flächenhaften Auflösung erfasst. Neuerdings wurde im Rahmen der derzeitigen Entwicklungsaktivitäten am IMK-IFU am Standort Garmisch ein hoch auflösendes Infrarot-Spektralradiometer installiert (Abbildung 2), das synchron zu dem FTIR-Spektrometer auf der Zugspitze betrieben wird und damit die Charakterisierung von Ozon und klimarelevanten Spurengasen in der gesamten Atmosphäre, einschließlich der planetarischen Grenzschicht erlaubt. Zusätzlich wird mit diesem Infrarot-Radiometer die vom Satellitensensor gemessene Bodenemissivität validiert.



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

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, Wasserdampf-Höhenverteilungen 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.

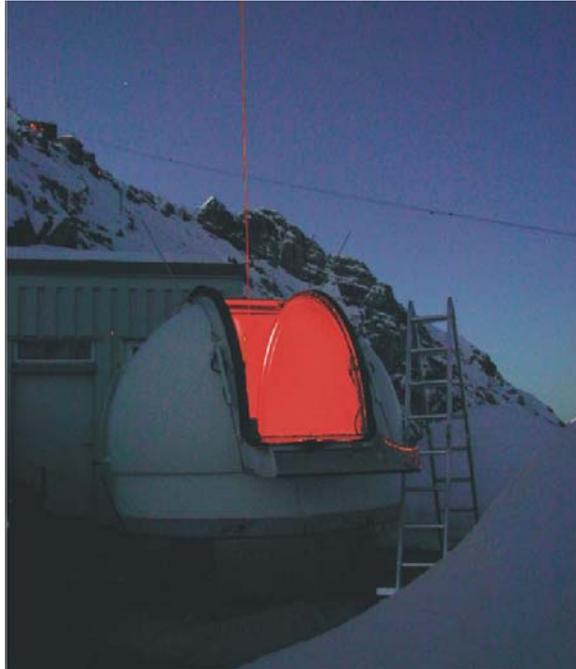


Abbildung 4 Wasserdampf-Lidarsystem am Standort „Schneefernerhaus“.

Die Notwendigkeit einer ausreichenden hohen Zahl koinzidenter Messdatensätze (Vergleichsstatistik Satellit versus Boden) stellt eine besondere Anforderung an die Operationalität der Instrumentierungen. An der Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ wurden daher konsequent alle Messsysteme und Auswerteroutinen weitestgehend automatisiert und fernbedienbar implementiert.

Ergebnisse - Validierung von Satellitenmissionen

Die permanente Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ hat bereits zu mehreren Satelliten-Validierungen (u.a. von MAPS, SAGE, GOME, MOPITT, AIRS, ENVISAT, ACE) beigetragen. Nachfolgend sind beispielhaft die Ergebnisse der **ENVISAT-Validierung (Commissioning Phase)** dargestellt, die im Jahr 2002/2003 durchgeführt wurde und u.a. die atmosphärischen Komponenten O₃, N₂O, CO, CH₄ und NO₂ beinhaltete. Der in Abbildung 5 gezeigte Vergleich der mit dem FTIR-Messsystem

- Durchgeführte Messtage 15. Juli – 1. Dez. 02
- Bereitgestellte ausgewertete Daten 15. Juli – 1. Dez. 02

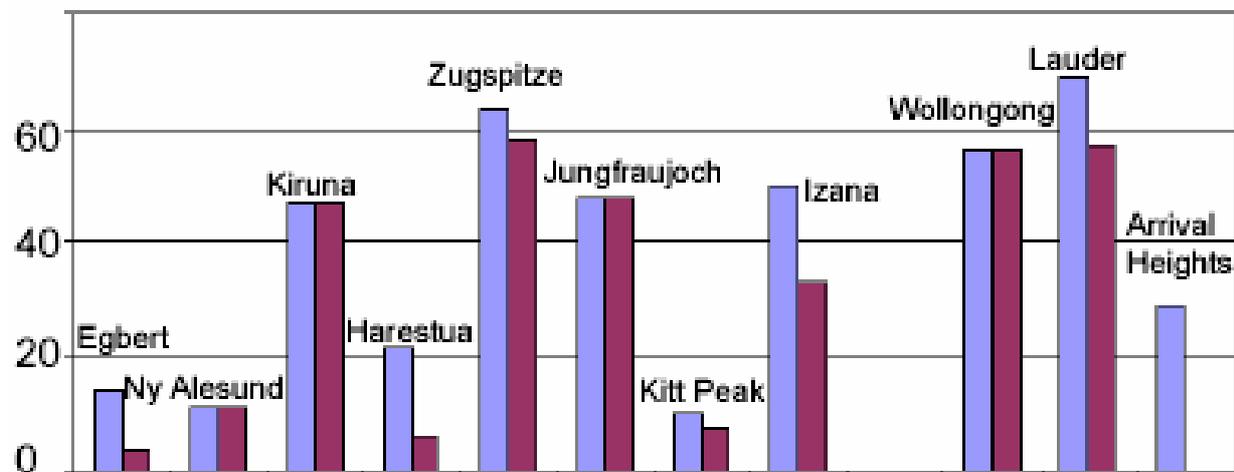


Abbildung 5: Erzielte Messtage an der Zugspitze und verschiedenen FTIR-Stationen weltweit im Rahmen der ENVISAT-Validierung.

auf der Zugspitze erzielten Messtage und -daten mit Ergebnissen an anderen, an dieser Validierung beteiligten internationalen Stationen dokumentiert die führende Operationalität der Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“, die trotz ihrer Lage am Nordrand der Alpen und der damit verbundenen ungünstigen meteorologischen Ausgangslage mehr Daten geliefert hat als andere wesentlich günstiger gelegene Stationen.

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-, CH₄-, oder NO₂-Säulendichten ein Standard-Auswerteverfahren angepasst und erfolgreich eingesetzt. Beispielsweise bei den CH₄-Säulendichten zeigte sich dabei eine zeitabhängige 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.

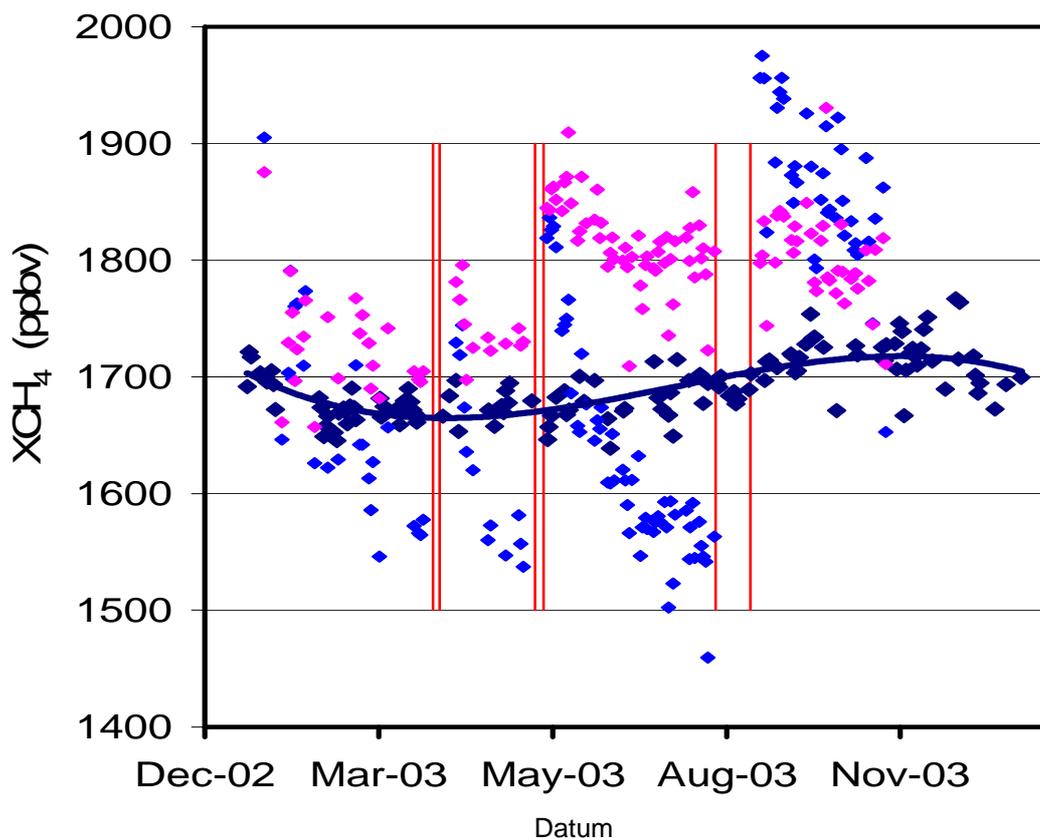


Abbildung 6: FTIR-Messungen der CH₄-Säulendichten über der Zugspitze (dunkelblau) im Vergleich zu SCIAMACHY-Säulen von denen sind zwei verschiedene Prozessorversionen gezeigt sind: pink (Uni Bremen v04) und hellblau (Uni Bremen v0.41). Deutlich sieht man den zeitabhängigen Bias durch die Detektorvereisung der in v041 reduziert werden konnte. Die roten Linien zeigten die Detektor-Dekontaminationsintervalle an.

Ein weiteres Beispiel ist die im Herbst 2002 an der Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ durchgeführte dreimonatige Validierungskampagne für das amerikanische **Wetter-Satelliteninstrument AIRS auf der Satellitenplattform EOS-Aqua**. Die Validierung derartiger Wetter-Satelliteninstrumente ist von besonderer Bedeutung, weil diese für die Verbesserung der numerischen Wettervorhersage eingesetzt werden und deshalb eine hohe operationelle Bedeutung haben. 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 zur Bestimmung der Wasserdampfsäulen zu überprüfen. Dabei zeigte sich eine hervorragende Übereinstimmung mit Abweichungen im Sub-Prozentbereich (Abbildung 9).

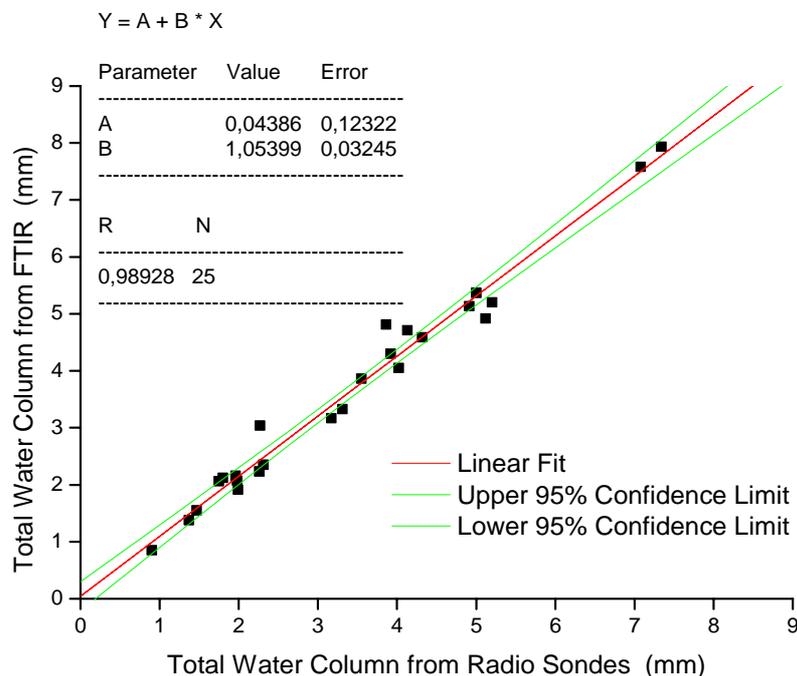


Abbildung 9: Das Bild zeigt die Korrelation und damit die hervorragende Übereinstimmung von Wasserdampfsäulendichten aus solaren FTIR-Messungen am Standort Zugspitze und zeitgleichen Radiosondenaufstiegen.

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. Es ist vorgesehen, diese Station weiter auszubauen und die erzielten Ergebnisse durch synergistische Verbindung der mit Satelliten und bodengebundenen Verfahren zur Schaffung höherwertiger Produkte 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, durch die Kombination der beiden unabhängigen Verfahren Stickoxide in den unteren Schicht der Troposphäre zu quantifizieren und damit „Pollution Hot-Spots“ etwa ausgehend von Fabriken oder Straßenzügen zu verfolgen.

Die an der Ground-Truthing-Station „Zugspitze/Garmisch“ vorhandenen vielfältigen Messsysteme bieten aber auch die Möglichkeit Sensor-Synergieeffekte der Bodensensoren untereinander künftig systematisch auszunutzen. So liefert beispielsweise das Lidarverfahren 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 Ground-Truthing-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.

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			
			Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres	Objc	Thres		
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	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)	(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	50	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	12	168	6	24	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	5	10				
	Δt	h	6	168	6	168	3	168	12	168	12	360	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	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		
	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	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)	(2)	(3)	(2)	(3)		
IMK-IFU-Validation Capability				P,C	P,C	P,C	P,C	P,C	P,C	C	P,C									(C)	C	P,C	P,C	P,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.

