

---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

---

# **Untersuchungen ausgewählter Prozesse für die Luftqualität in Ballungsräumen und sensitiven Regionen**

**Klaus Schäfer**

*Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Meteorologie und Klimaforschung,  
Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen*

**Das IMK-IFU**

**Meteorologische Einflüsse auf die Schadstoffbelastung**

**Repräsentativität von Messstationen für die Überwachung der Luftqualität**

**Mischungsschichthöhen aus Fernerkundung und Schadstoffbelastungen**

**Bodennahe räumliche Verteilung von Schwebstaub-Konzentrationen aus Satellitenbildern**

**Bestimmung der Emissionsquellen auf Flughäfen mittels inverser Ausbreitungsmodellierung zur  
Untersuchung der Luftqualität**

**Emissionsmessung von N<sub>2</sub>O an der Bodenoberfläche auf einer Skala von 100 m**

---

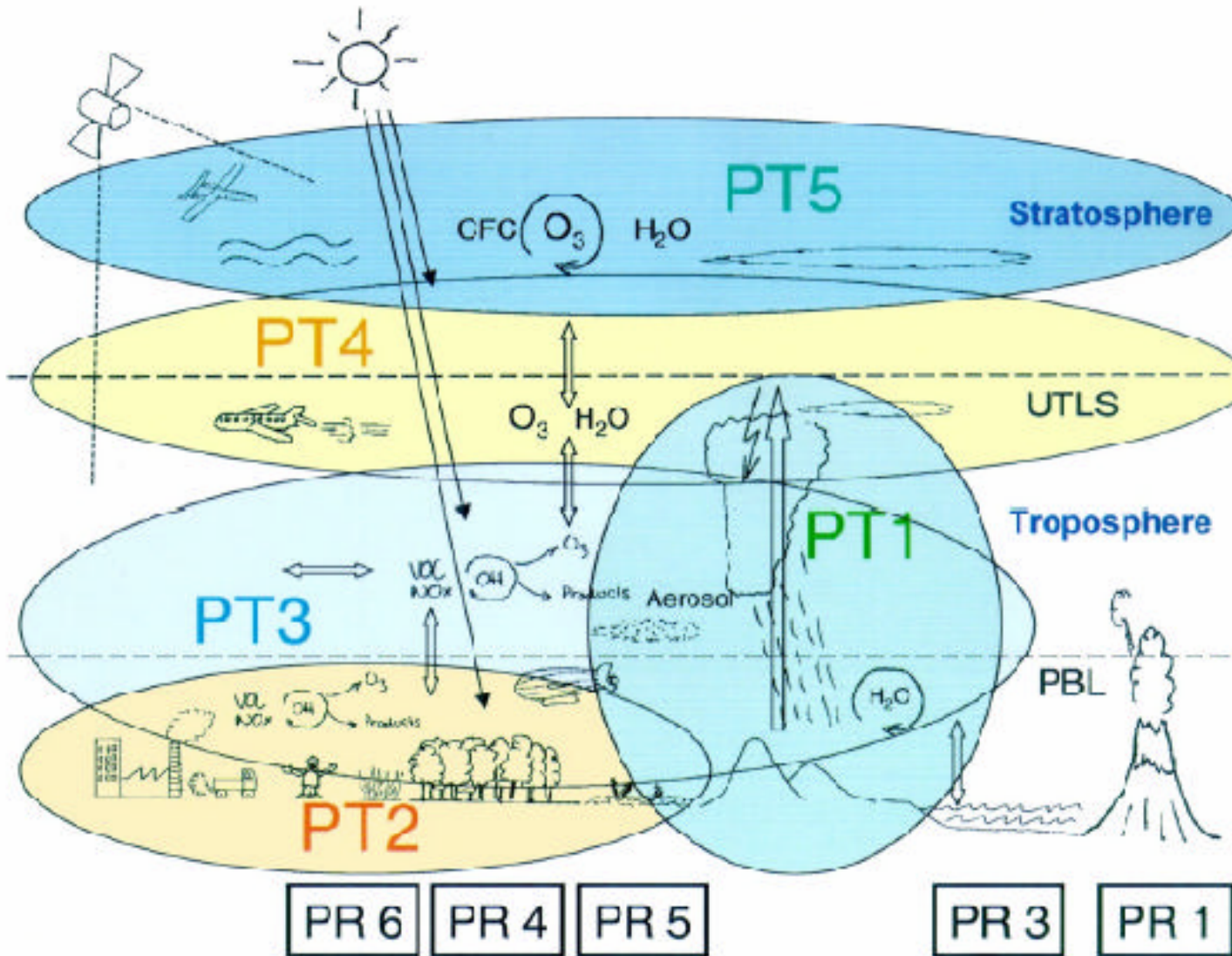
## Forschungszentrum Karlsruhe

- industrielle Vorlaufforschung
- Produkt- und Verfahrensentwicklung
- Vorsorgeforschung
- naturwissenschaftliche Grundlagenforschung

Betrieb von Großgeräten, die auch externen Nutzern zur Verfügung stehen

---





## Atmosphäre und Klima

PT1: Klima und  
Wasserkreislauf

PT2: Regionale  
Klimaänderungen und  
Auswirkungen

PT3: Spurensbstanzen  
in der Troposphäre

PT4 + 5: Stratosphäre  
und Tropopausenregion  
Im globalen Wandel

## **Die Entwicklung zum Karlsruher Institut für Technologie**

Universität Karlsruhe (TH) und das Forschungszentrum Karlsruhe – Exzellenzuniversität und nationales Helmholtz-Zentrum – verbinden ihre Zielsetzungen im Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Beide Einrichtungen führen ihre Kapazitäten in Forschung, Lehre und Innovation zusammen

Die Profilbildung des KIT erfolgt auf zwei Ebenen:

- Ebene der Kompetenzen und
- Ebene von KIT-Zentren und KIT-Schwerpunkten.

In KIT-Zentren und KIT-Schwerpunkten werden thematisch zusammengehörige Projekte unterschiedlicher Größe gebündelt und strategisch unterstützt

---

## **Institut für Meteorologie und Klimaforschung**

Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) besteht aus vier Teilinstituten

Davon werden zwei in Kooperation mit der Universität Karlsruhe betrieben

Atmosphärische Prozesse in der Troposphäre (IMK-TRO)

Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (IMK-ASF)

Atmosphärische Aerosolforschung (IMK-AAF)

Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU) in Garmisch-Partenkirchen,  
vor 2003 ein Institut der Fraunhofer Gesellschaft

---

## **IMK-IFU**

Untersuchungen der komplexen Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse und der sich ändernden Umweltparameter (u. a. Klima, UV-Strahlung, Stoffeinträge)

Bestimmung der Emission wichtiger umweltrelevanter Spurenstoffe durch anthropogene und biogene Prozesse, einschließlich der Berechnung von Emissionskatastern (wie u. a. im Kyoto-Protokoll gefordert)

Erfassung der räumlichen Verteilung, des Transports und der Langzeittrends wichtiger primär emittierter und sekundär in der Atmosphäre gebildeter Spurenstoffe sowie atmosphärischer Parameter mit Hilfe von bodengestützten Messungen und Satellitenüberwachung

---

## **IMK-IFU**

Entwicklung und Anwendung prozessorientierter, prognose- und szenarienfähiger Modelle zur gekoppelten Simulation der Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre für die Verbesserung der Kenntnisse über die Wechselwirkungen im System „Erde“ und ihre Beeinflussung durch den Menschen

Problem- und querschnittsorientierte Arbeitsweise, um herausragende wissenschaftliche Erkenntnisse und gesellschaftlich relevante Forschungsergebnisse zu erzielen

Beiträge zur Entwicklung von Konzepten für die Lösung von Umweltproblemen in Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft, Industrie und öffentlichen Einrichtungen

---



Zwei Abteilungen

„Wechselwirkung Atmosphäre / Biosphäre im globalen Wandel“

„Wechselwirkung Atmosphäre / Klima“

Arbeitsgruppe „Luftqualität in Ballungsräumen und sensiblen Regionen“

- Prozesse für die Luftqualität unter Berücksichtigung zunehmender Urbanisierung und Industrialisierung
- Emissionen aus urbanen Räumen und Beiträge zur Klimaänderung
- Dynamische und chemische Prozesse für die räumliche Verteilung der Spurenstoffe sowie Einflüsse von Wärmeinseleffekten in Städten und Landnutzungsänderungen
- Numerische Simulationen (MCCM, WRF/chem) für Mexico City, Santiago de Chile und Peking einschließlich der Klimaänderungseffekte

## Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



# Meteorologische Einflüsse auf die Schadstoffbelastung im Inntal bei Schwaz ALPNAP

Julia Wittig<sup>1</sup>, Stefan Emeis<sup>2</sup>, Klaus Schäfer<sup>2</sup>, Johannes Vergeiner<sup>1</sup>,  
Esther Grießer<sup>1</sup>, Peter Suppan<sup>2</sup>, Friedrich Obleitner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Meteorologie und Geophysik, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

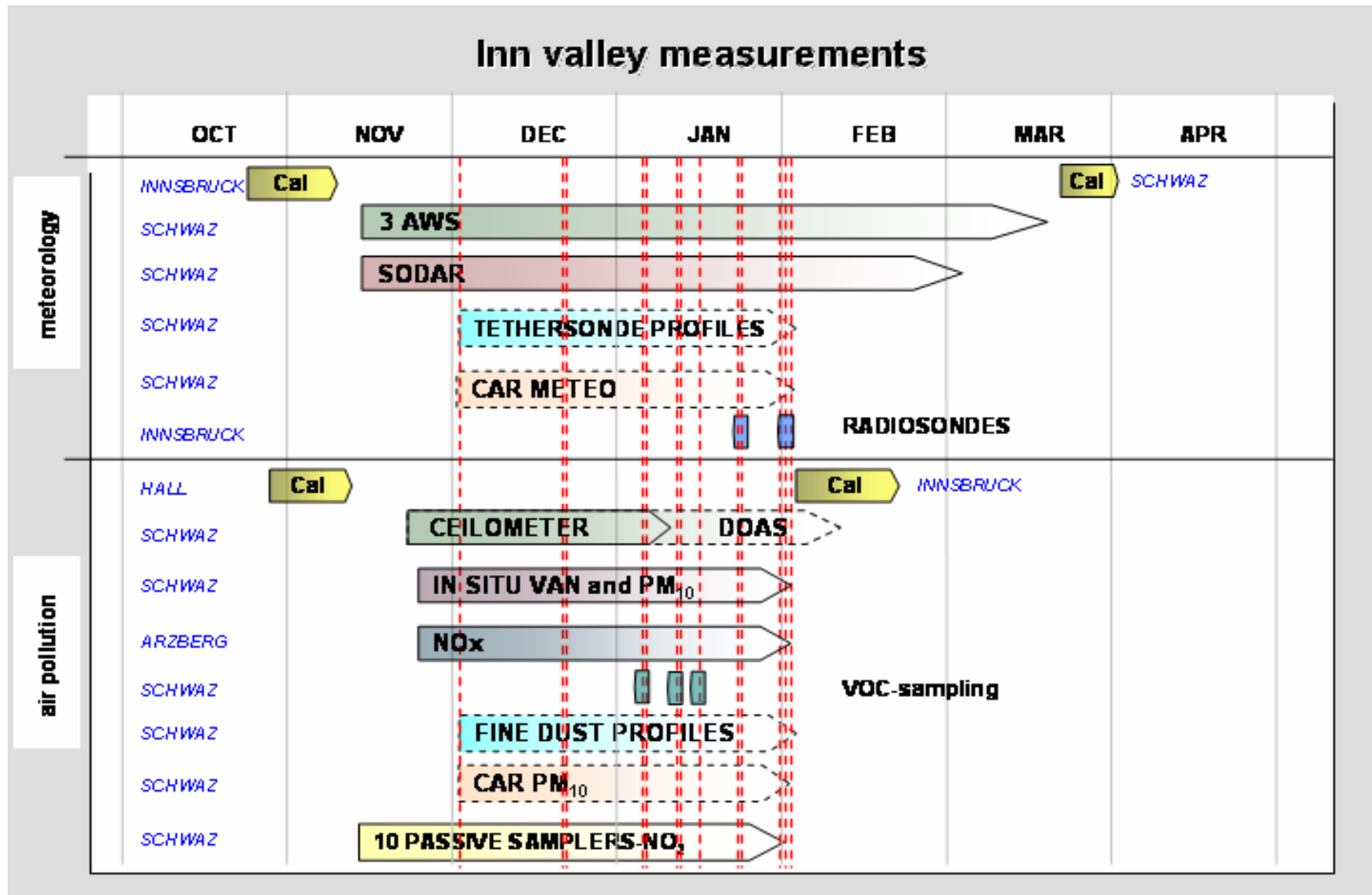
<sup>2</sup>Institut für Meteorologie und Klimaforschung - Atmosphärische Umweltforschung  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Garmisch-Partenkirchen

---

# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



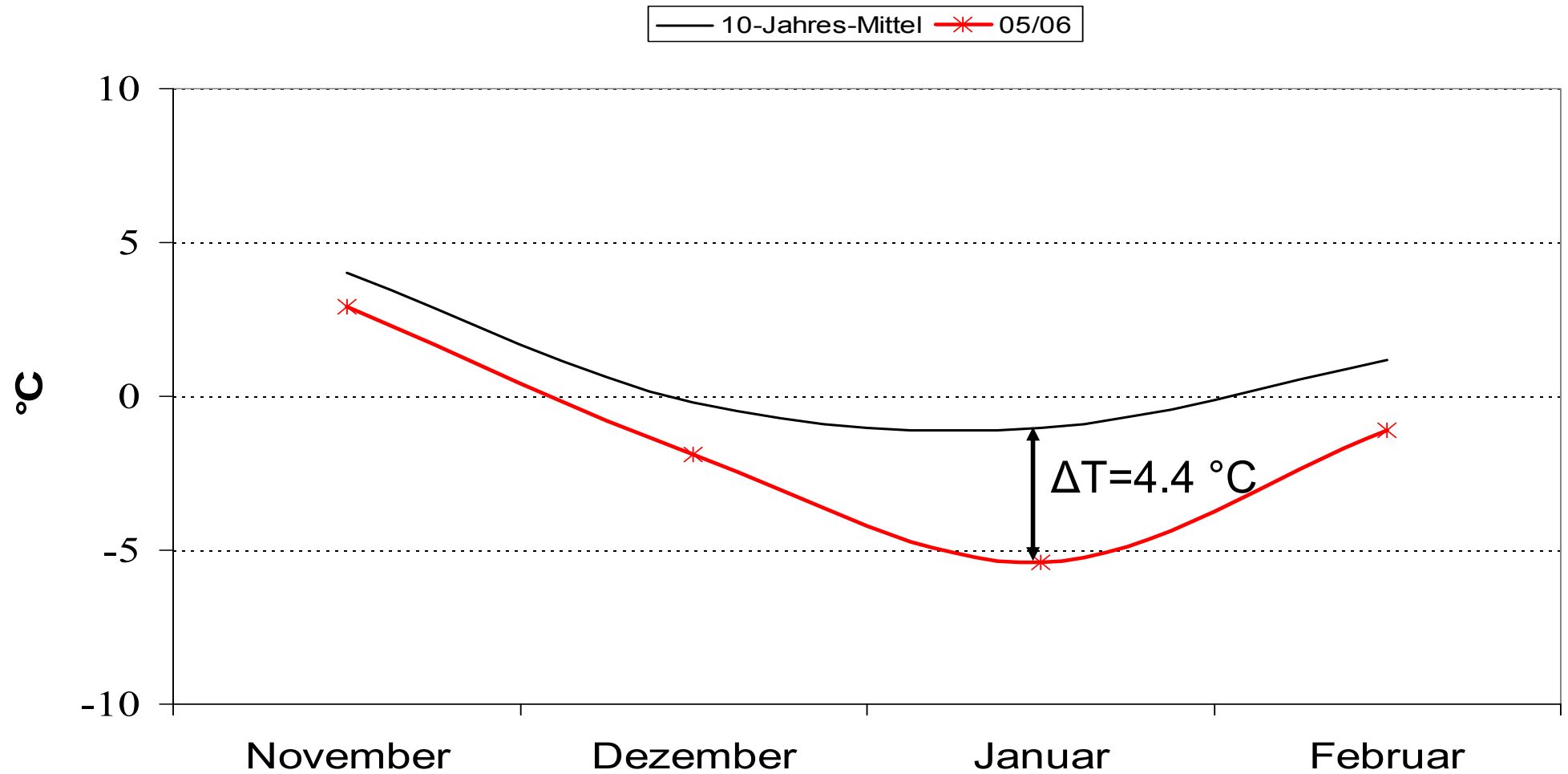
# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



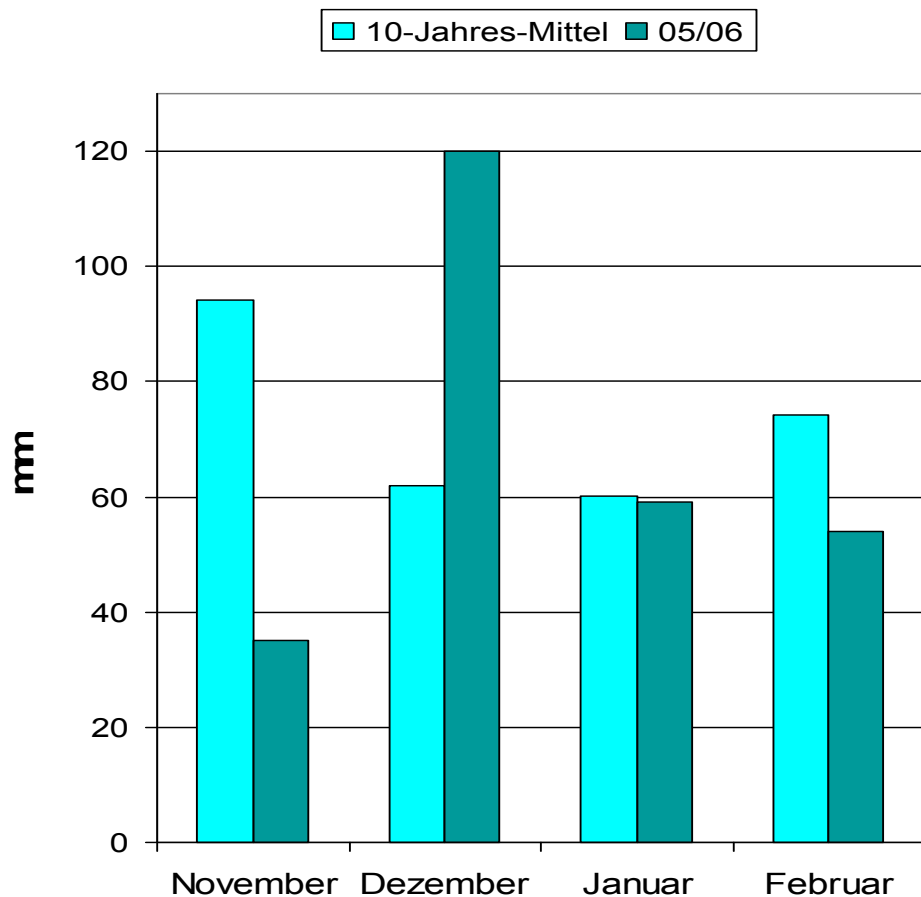
**Winter 2005/2006:  
Typischer Winter in den  
Alpen?**



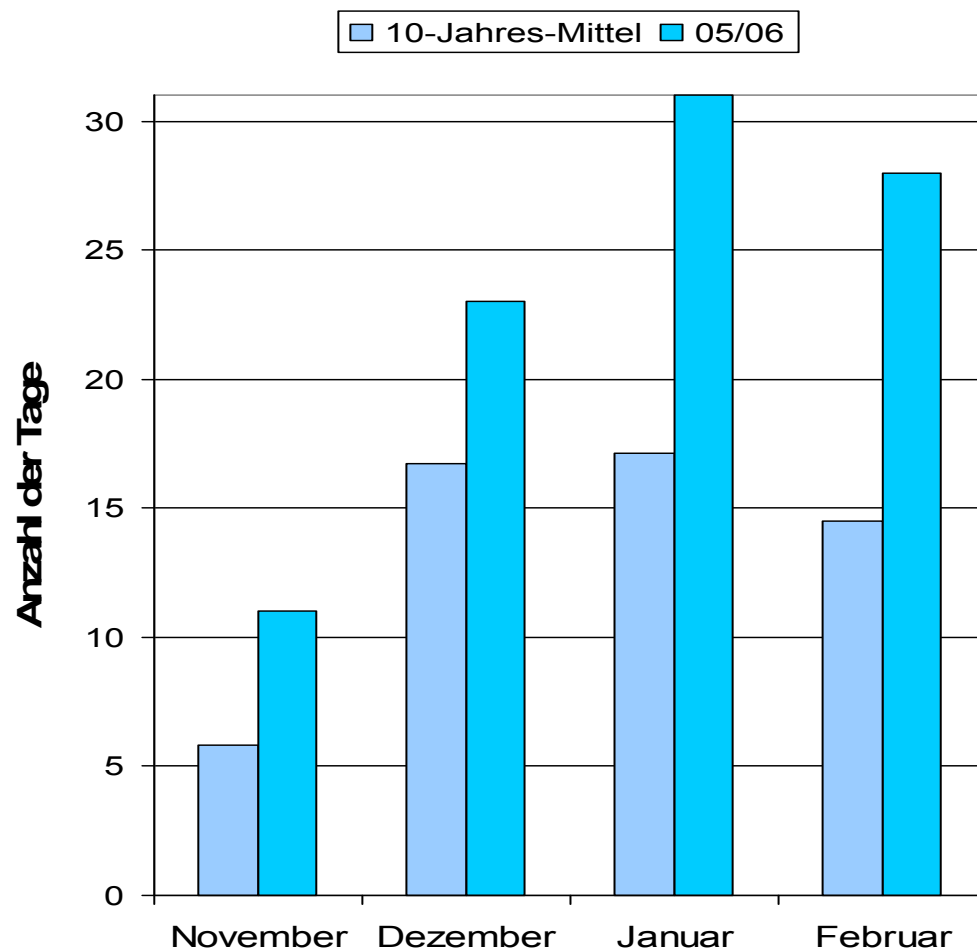
## Monatsmittel der Temperatur



### Monatliche Niederschlagssumme

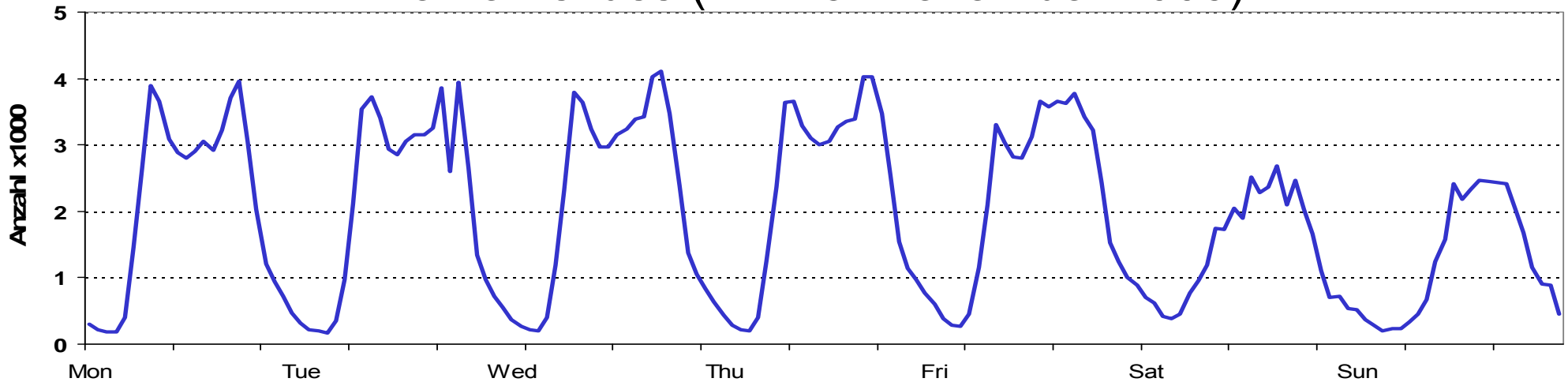


### Tage mit Schneedecke

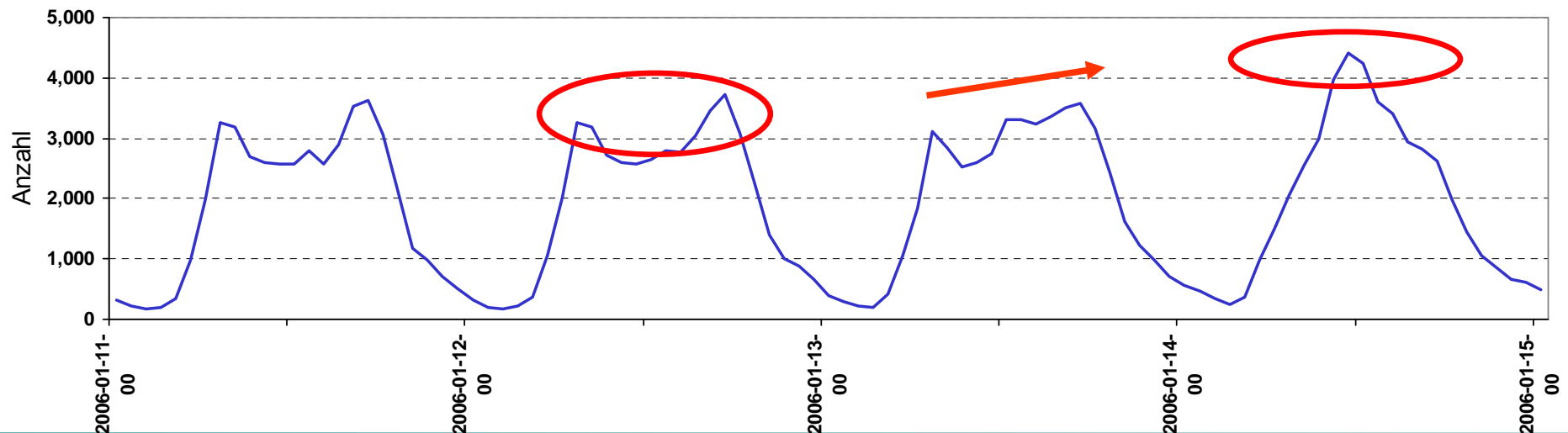




## Verkehrsfluss (12.-18. Dezember 2005)



## Verkehrsfluss bei Hochdruckwetterlage (11.-14. Januar 2006, Do-So)



Monatliches Mittel der Schadstoffkonzentrationen und prozentuale  
Änderung zum langjährigen Mittel

	<b>NO</b> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	<b>NO<sub>2</sub></b> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	<b>PM<sub>10</sub></b> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	<b>CO</b> [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	<b>O<sub>3</sub></b> [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]
<b>November 2005</b>	221.1 (-6.1)	70.8 (+18.2)	35 (+5.1)	0.5 (-21.9)	12 (-28.6)
<b>Dezember 2005</b>	224.6 (-12.4)	87.9 (+21.2)	43 (+8.3)	0.6 (-33.3)	16 (+21.2)
<b>Januar 2006</b>	321.8 (+35.7)	126.0 (+50.4)	66 (+53.8)	0.8 (-20.0)	14 (-14.1)

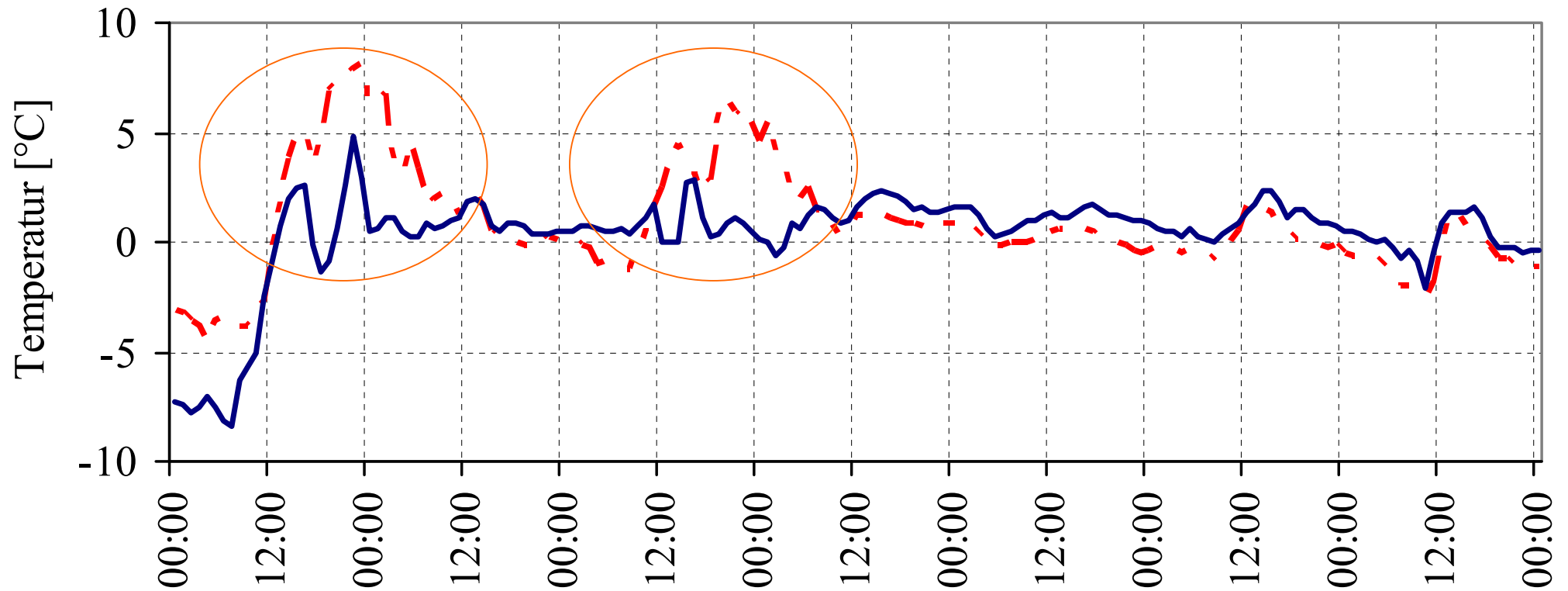
Emissionen

Stabile Schichtung:  
Anreicherung

Verschmutzte Luft;  
austauscharm

Einflüsse:  
Föhn,  
Stratosphäre

## Fallstudie 1: Kaltfrontdurchgänge am 3. und 5. Dezember 2005



2.– 9. Dezember 2005: Stundenmittelwerte der Temperatur in Schwaz (blau) und Arzberg (rot)

## **Wind:**

Anstieg der Windgeschwindigkeit bei Kaltfront-Durchgang

Talauswind wird von Kaltfront-Durchgang unterbrochen →  
Wind variabel

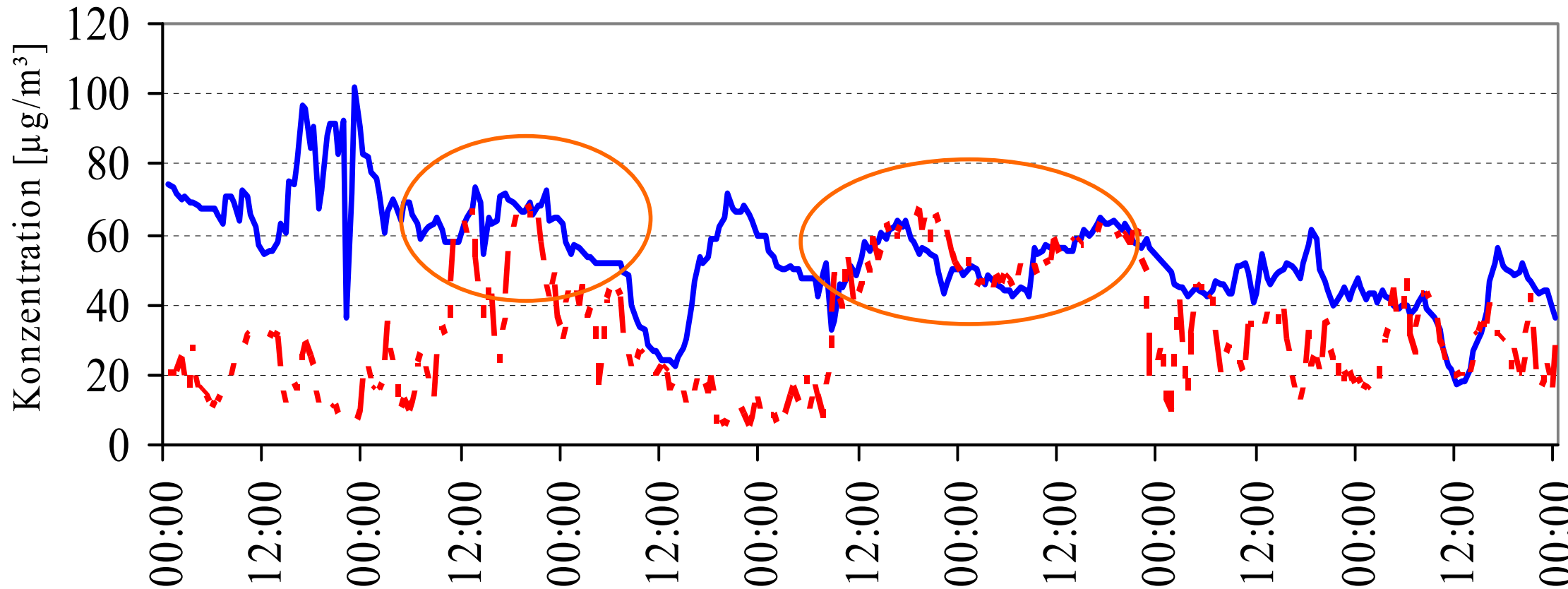
## **Mischungsschicht (aus Sodar-Daten):**

Tagesmittelwerte zwischen 100 und 200 m

hohe Rückstreu-Intensitäten in der Nacht → stabile nächtliche  
Schichtung

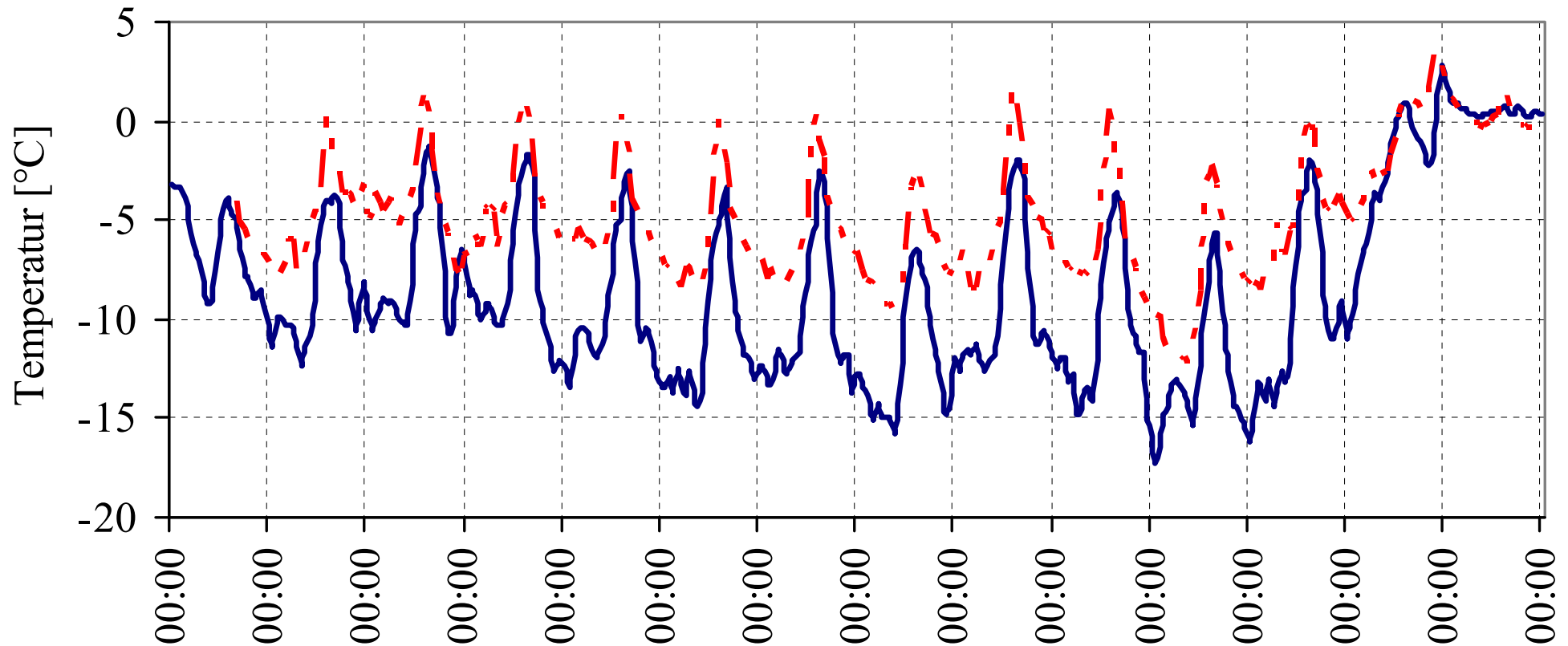
geringere Rückstreu-Intensitäten zum Zeitpunkt der Kaltfront-  
Durchgänge → Ausräumen der stabilen Schichtung

## Trend des NO<sub>2</sub>



2.- 9. Dezember 2005, Halbstundenwerte NO<sub>2</sub> bei Schwaz (blau) und in Arzberg (rot)

Fallstudie 2: Hochdruck-Periode 6.–17. Januar 2006



5.–19. Januar 2006: Stundenmittelwerte der Temperatur in Schwaz (blau) und Arzberg (rot)

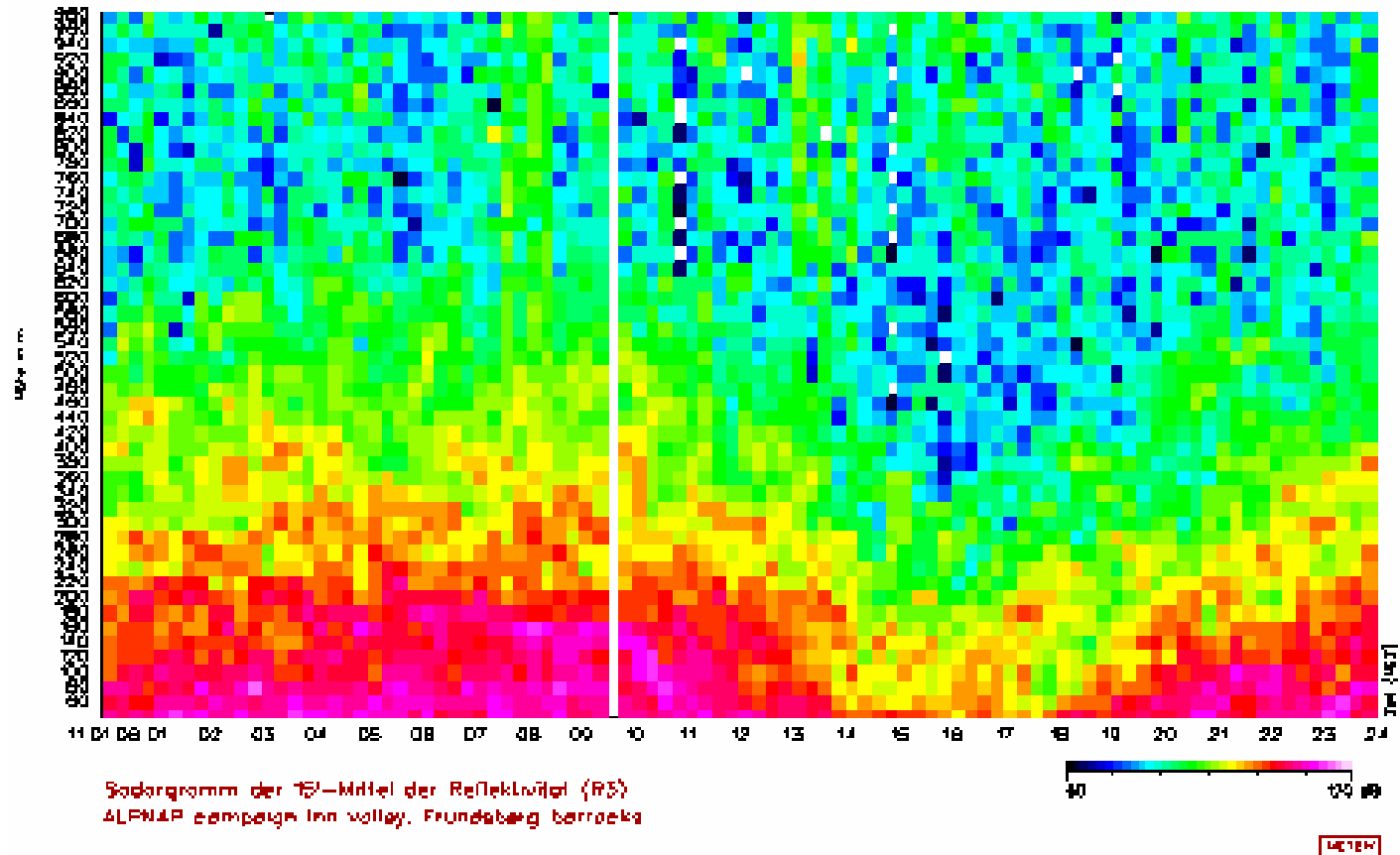
**Wind:**

mit Hochdruckeinfluss schwächt sich Windgeschwindigkeit ab

Ausfließen mit höheren Windgeschwindigkeiten verbunden (mittags)

östliche Windrichtung bei Aufbrechen der stabilen Schichtung (nachmittags)

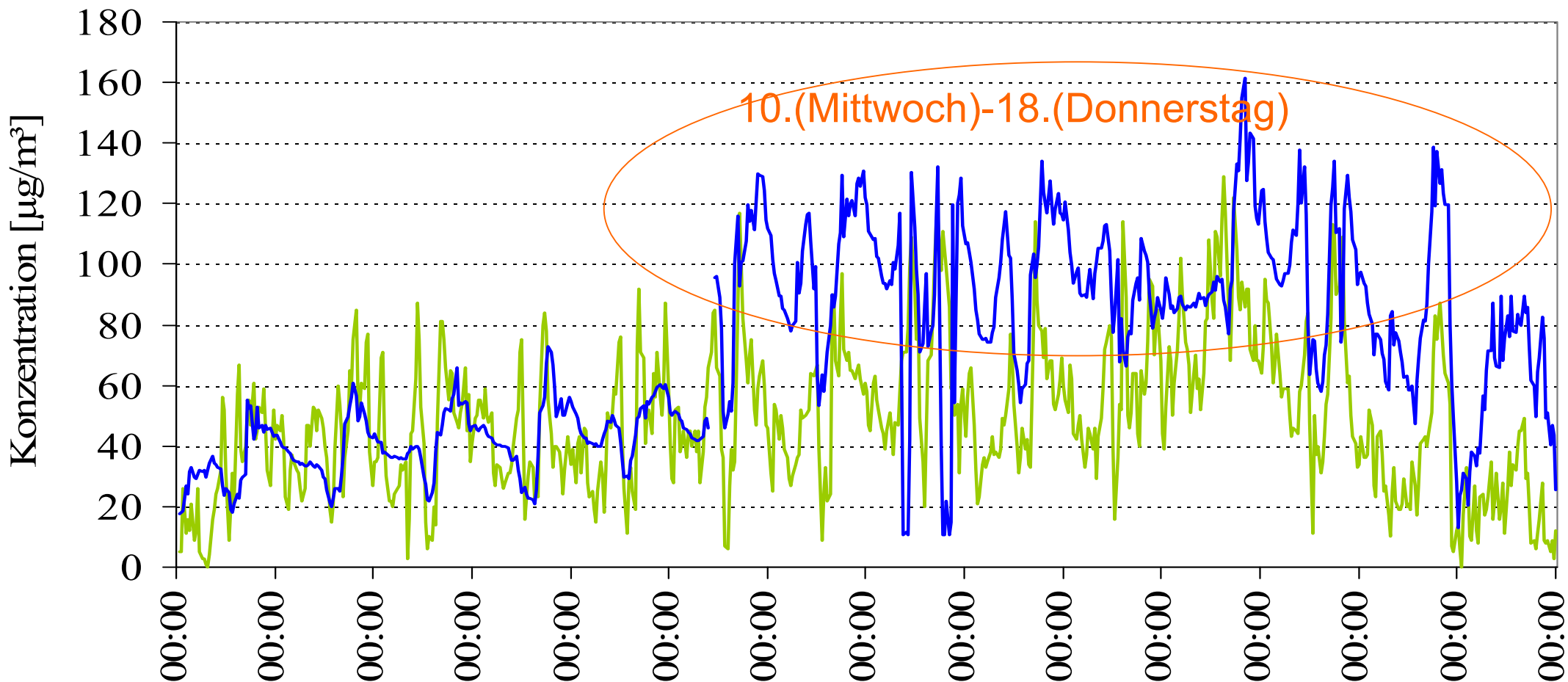
## Mischungsschicht: Tagesmittelwerte 130 m



Sodargramm 15-Minuten-Mittel der Rückstreuintensitäten am 11. Januar 2006



### Trend des NO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub> in Schwaz



5.- 19. Januar 2006, Halbstundenwerte NO<sub>2</sub> (blau) und PM10 (grün) in Schwaz

## Signifikante Korrelationen am Talboden

niedrige Temperaturen (v.a.  $< -5\text{ °C}$ ) → höhere  
Schadstoffkonzentrationen

→ Schichtung

hohe Windgeschwindigkeit → geringere  
Schadstoffkonzentrationen

→ Durchmischung

---

## Zusammenfassung

- Meteorologie: Situation im Winter 2005/2006 begünstigten Anreicherungen von Schadstoffen im Inntal
  - Emissionen:
    - Verkehr: keine außergewöhnlichen Abweichungen  
Ausnahme im Januar: Zunahme des Schwerverkehrs (~+ 3-5 %) auch steigendes Verkehrsauskommen an Wochenenden
    - Hausbrand: direkt abhängig von Temperaturverhältnissen, allgemein erhöht (i.Vgl. zum langjährigen Mittel, Januar!!)
- Die meteorologischen Bedingungen beeinflussen Immission und Emission!
-

# Repräsentativität von Messstationen für die Überwachung der Luftqualität in einem verkehrsbelasteten Alpental

Klaus Schäfer, Stefan Emeis, Herbert Hoffmann, Peter Suppan

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

Johannes Vergeiner, Julia Wittig

Institut für Meteorologie und Geophysik, Leopold-Franzens-Universität  
Innsbruck (IMGI), Innsbruck, Austria

---

## Hintergrund

Es wird ein Anstieg der Konzentrationen des primär emittierten  $\text{NO}_2$  beobachtet – die Ursachen sind

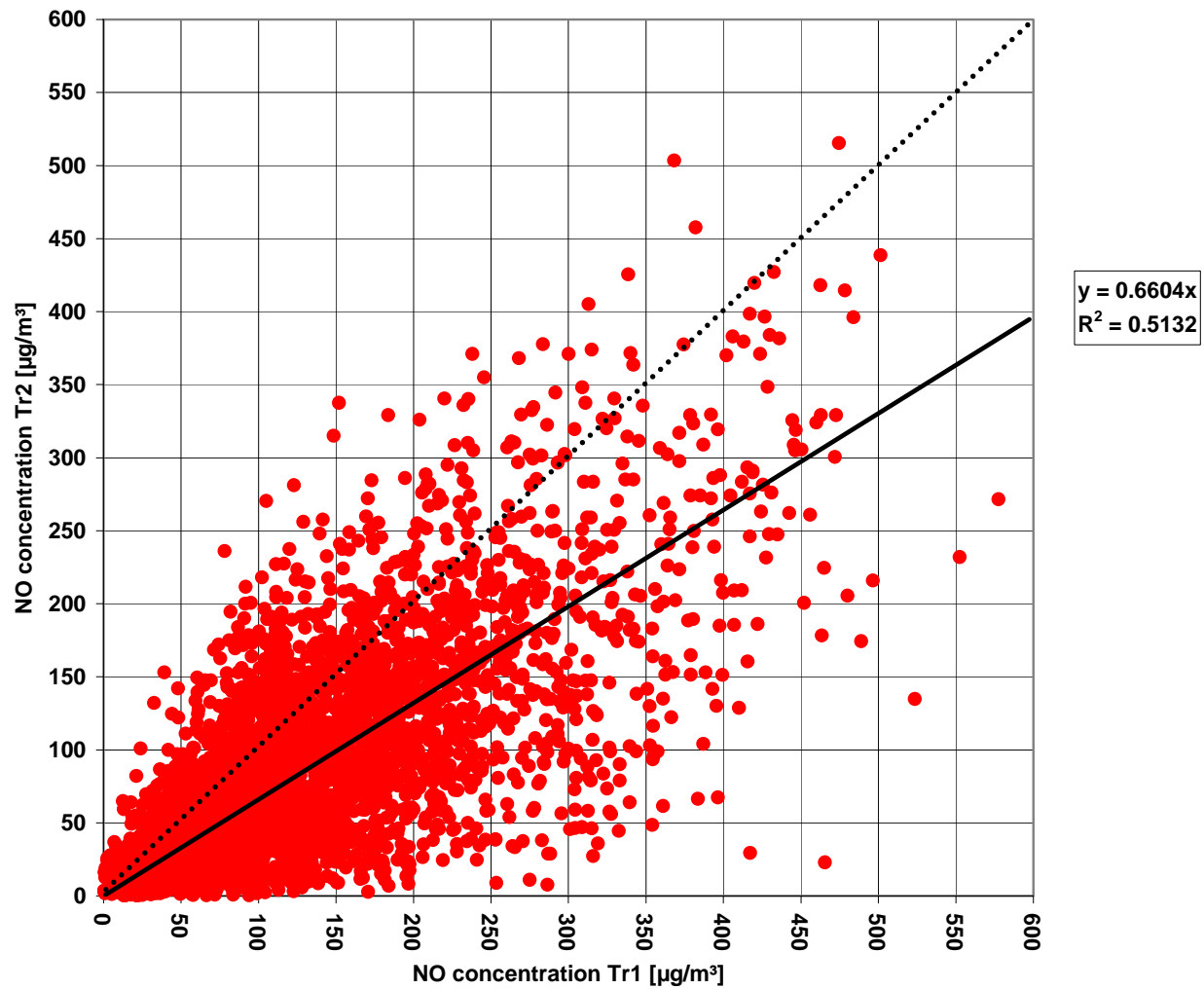
- steigende Verbrennungseffektivitäten der Dieselmotoren,
- der vermehrte Einsatz von modernen Katalysatoren und Partikelfiltern sowie
- die gestiegene Zahl von Dieselfahrzeugen

## Methodik

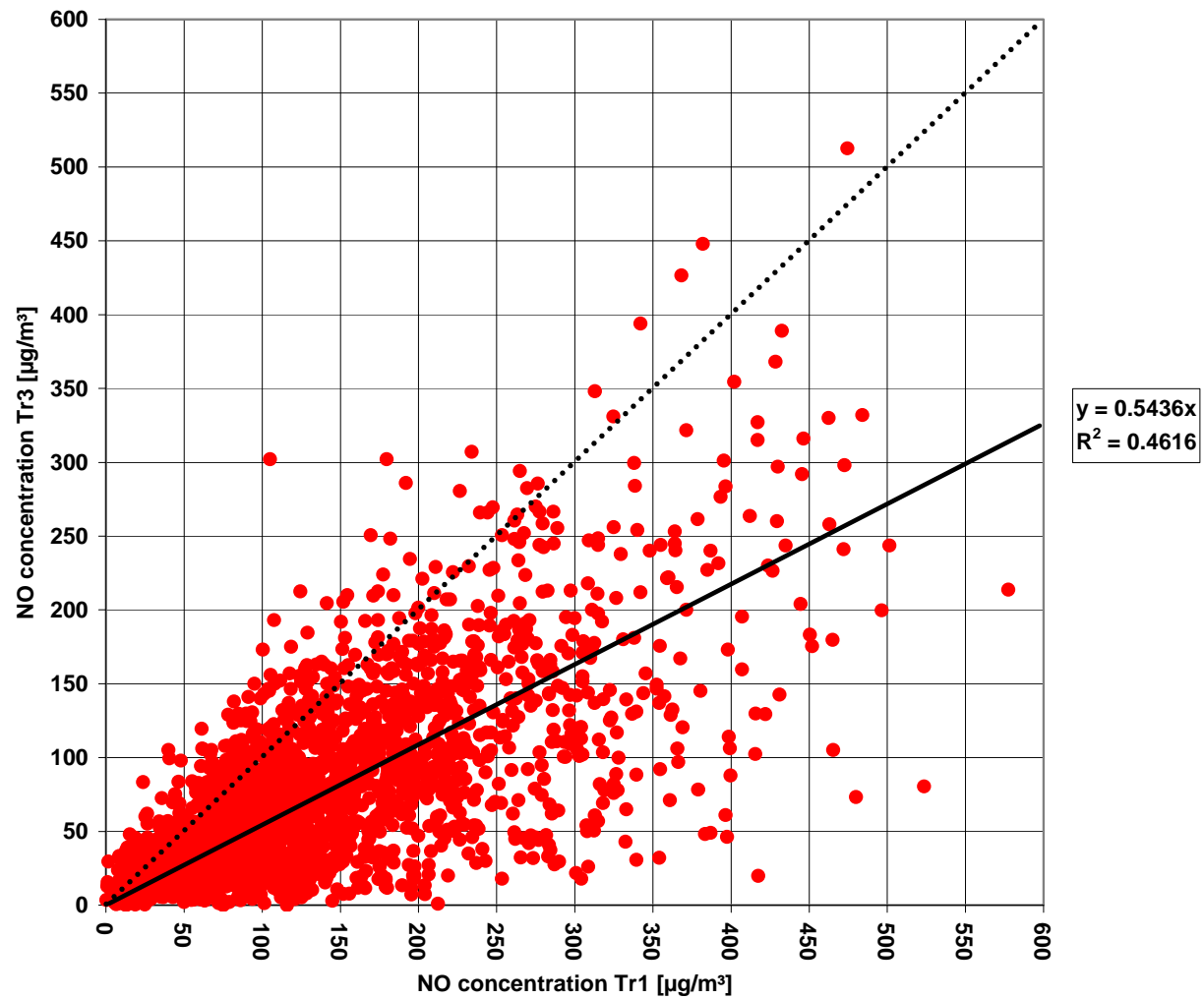
DOAS (Differentielle Optische Absorptionsspektroskopie) an der Autobahn A12, Sende-Empfangseinheit auf einer Seite, Retroreflektoren, Pfadlängen ca. 120 m:

- a) auf der anderen Seite – Messpfad quer über die Autobahn in 10 m Höhe,
- b) an der Autobahn – Messpfad entlang der Autobahn sowie
- c) abseits der Autobahn – Messpfad von der Autobahn weg gerichtet

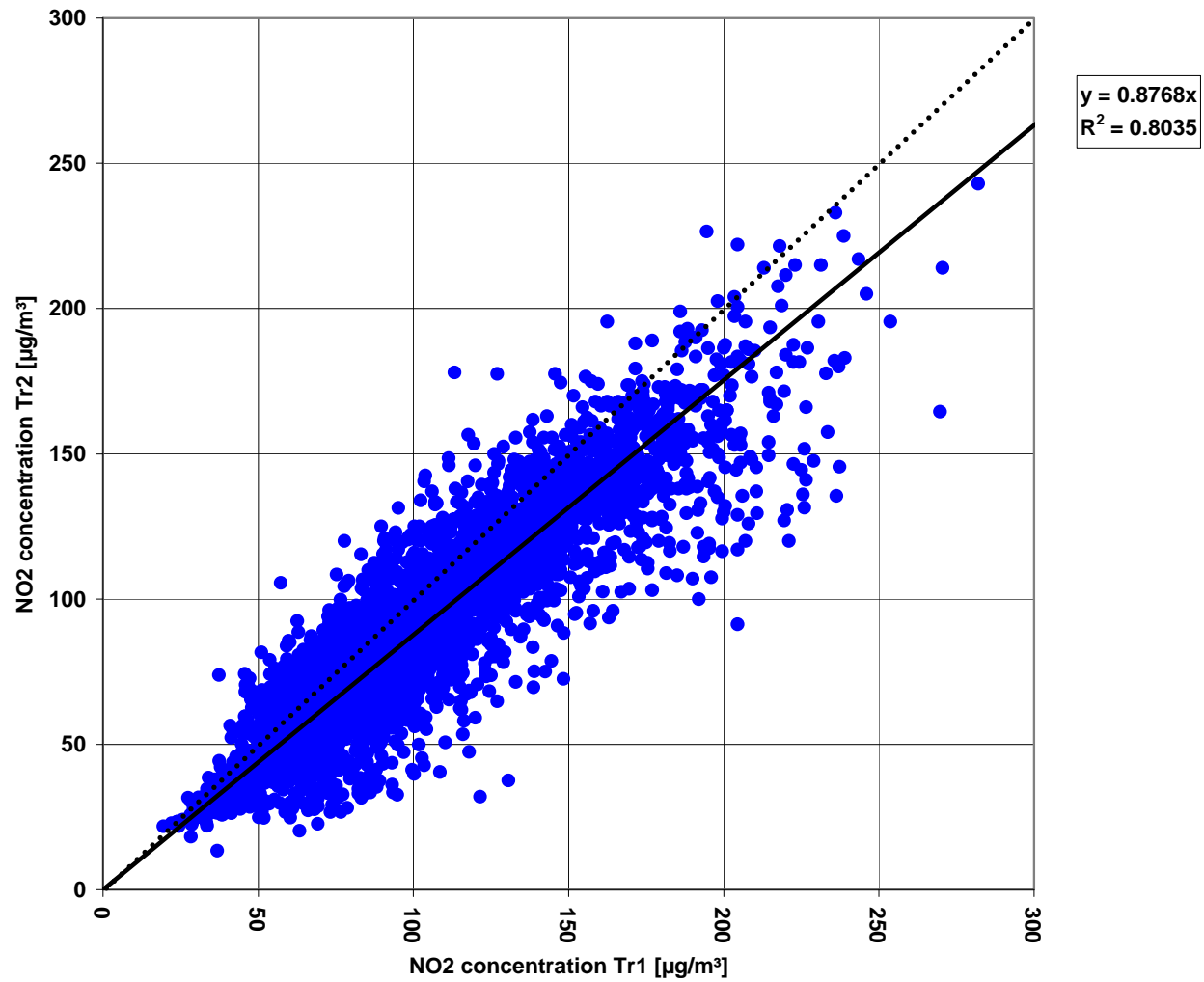


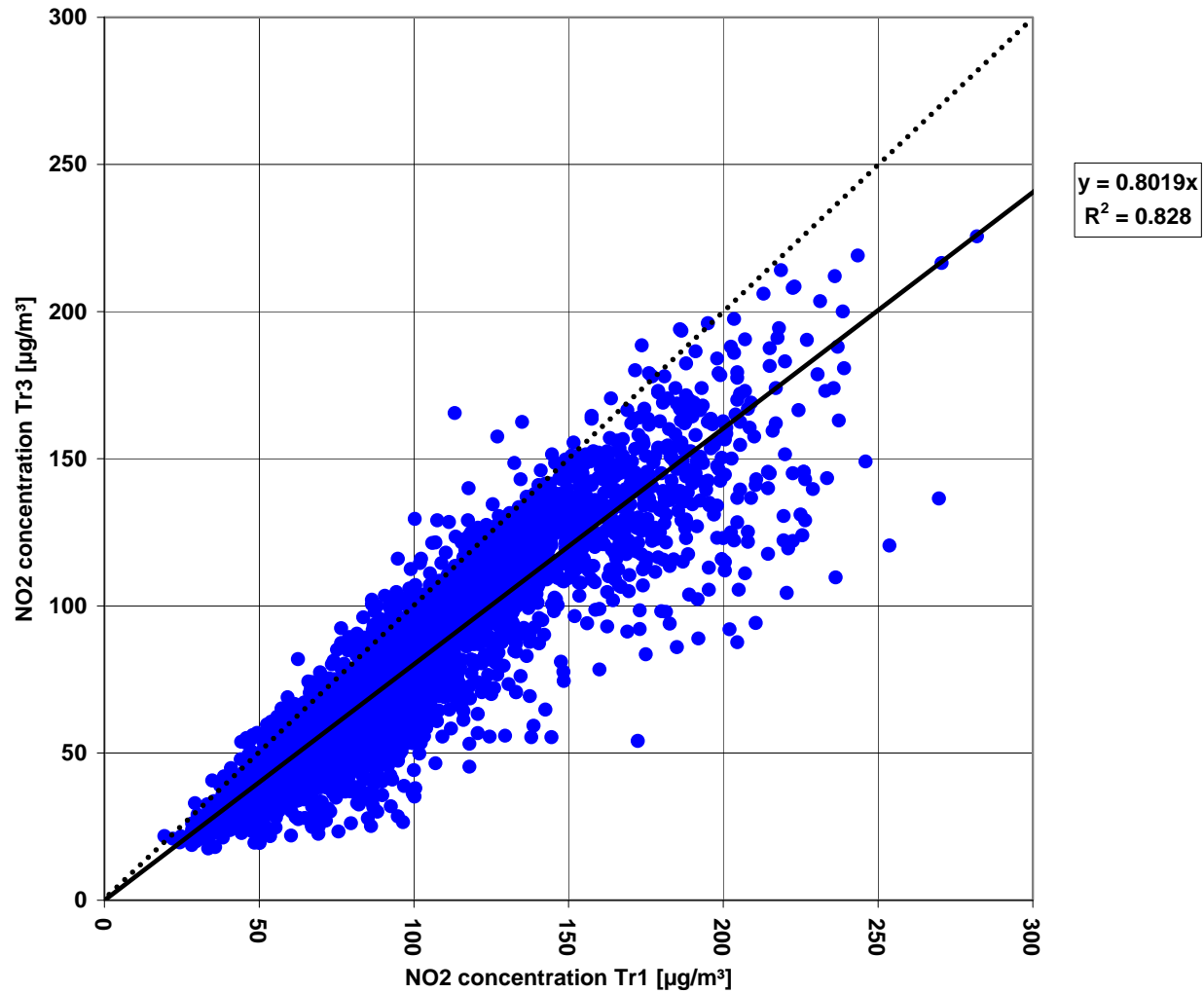


# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft









## Ergebnisse

Leichte Abnahme der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit zunehmender Entfernung von der Autobahn: Korrelationskoeffizient R<sup>2</sup> ca. 80 %

Deutliche Abnahme der NO-Konzentration mit zunehmender Entfernung von der Autobahn: Korrelationskoeffizient R<sup>2</sup> ca. 50 %

In der Umgebung einer einzelnen Quelle wächst mit der Entfernung bzw. zunehmendem „Luftalter“ das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Konzentrationsverhältnis

## Ergebnisse

Unterschiedliche Entfernungsabhängigkeit der NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen von der Emissionsquelle auch bei Messungen am Standort Schwaz gegenüber den DOAS-Messungen quer über die Autobahn:  
NO<sub>2</sub>-Konzentrationen nehmen deutlich stärker ab als die NO-Konzentrationen bei ähnlichen Korrelationskoeffizienten  $R^2$   
NO-Emissionsquellen sind in der Nähe (Schwaz)

Gleiche Ergebnisse bei Verwendung der Messnetz-Station an der Autobahn A12

## Zusammenfassung

Typische winterliche NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Tal-  
Atmosphäre sind

- NO<sub>2</sub> an der Autobahn: 50 – 200 µg/m<sup>3</sup>,
- NO<sub>2</sub> bei Schwaz: 10 – 100 µg/m<sup>3</sup>,
- NO<sub>2</sub> bei Arzberg: 10 – 50 µg/m<sup>3</sup>,

NO<sub>2</sub>-Grenzwert-Überschreitungen für den Stunden-Mittelwert  
von 200 µg/ m<sup>3</sup> wurden an der Autobahn während einiger  
Stunden an jedem Tag bei winterlichen stabilen Wetterlagen  
beobachtet

## Zusammenfassung

Die Messstelle bei Schwaz ist repräsentativ für die Luftbelastung am Tal-Boden

Die Messstation an der Autobahn ist dominiert von den Emissionen des Verkehrs

Die Messstelle Arzberg ist bei stabilen Wetterlagen oberhalb der bodennahen Mischungsschicht und damit während dieser Situationen nicht von den Emissionen im Tal belastet

---

# Bestimmung der Mischungsschichthöhe mit Fernerkundungsverfahren und Schadstoffbelastungen

Stefan Emeis<sup>1</sup>, Klaus Schäfer<sup>1</sup>, Christoph Münkel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Meteorologie und Klimaforschung - Atmosphärische Umweltforschung  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Garmisch-Partenkirchen

<sup>2</sup>Vaisala GmbH, Hamburg

---

## Messung der Vertikalstruktur der Grenzschicht und der Mischungsschichthöhe mit Fernerkundungsverfahren:

mobile bodengestützte Fernerkundung mit akustischen und optischen Verfahren gibt Information über:

→ thermische Struktur der Grenzschicht und deren Turbulenzgrad

(SODAR)

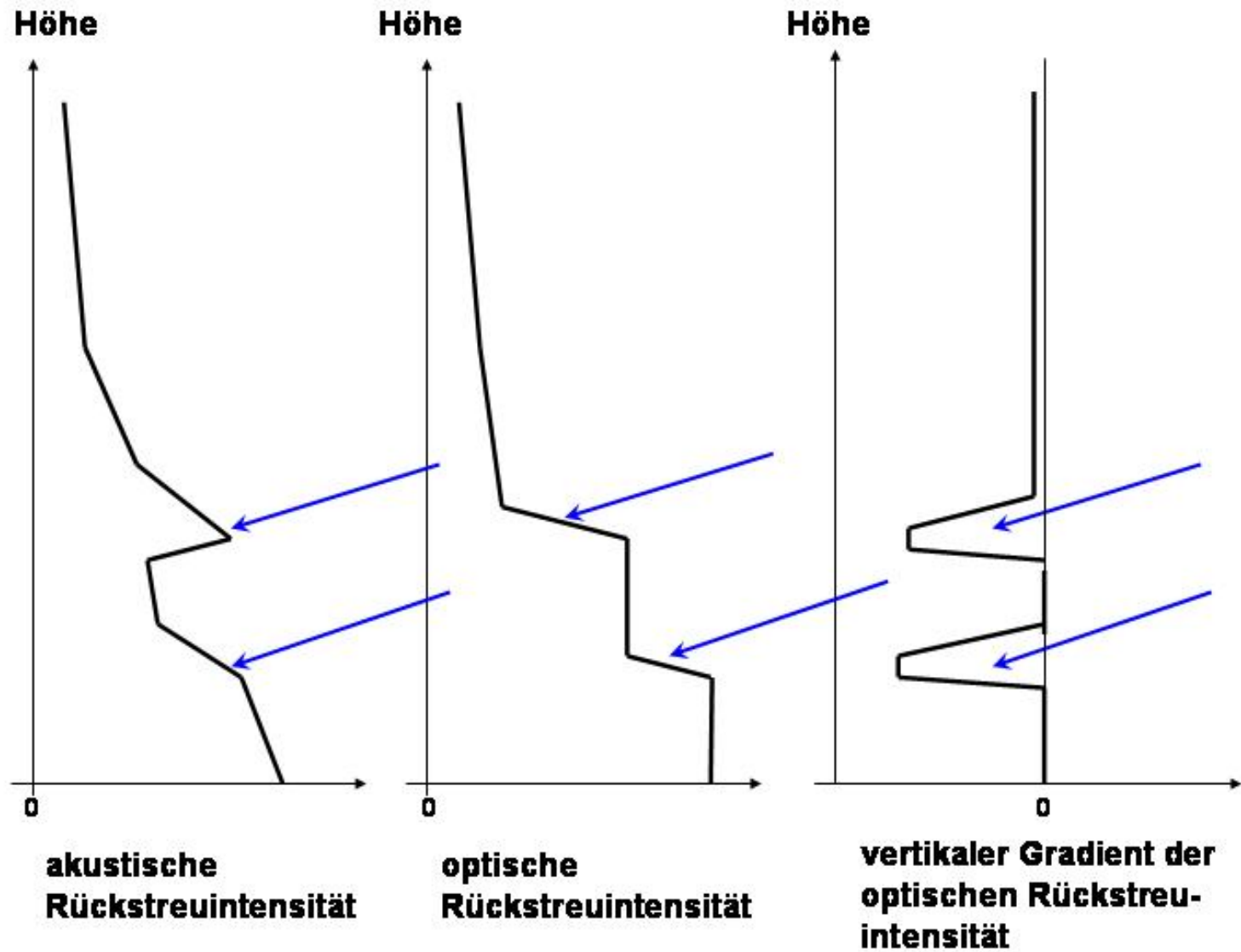
→ Aerosolgehalt der Grenzschicht

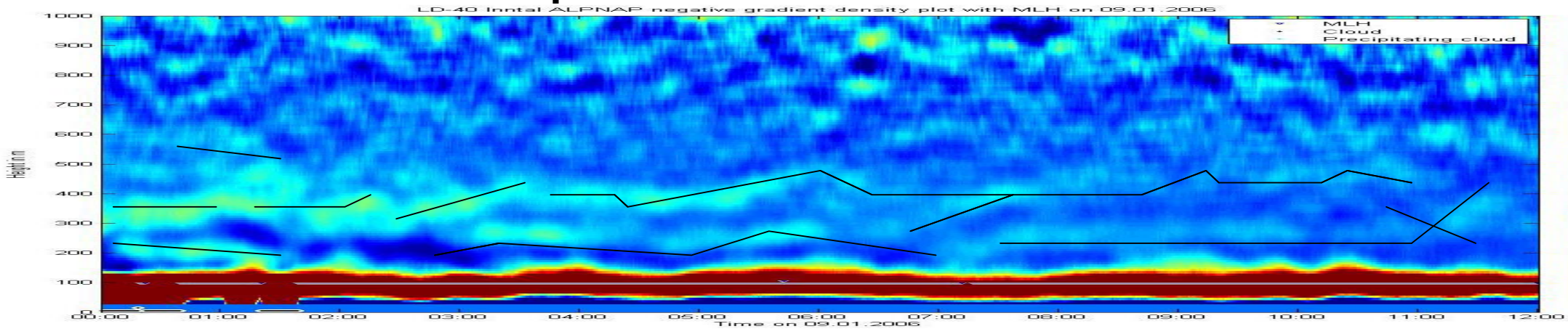
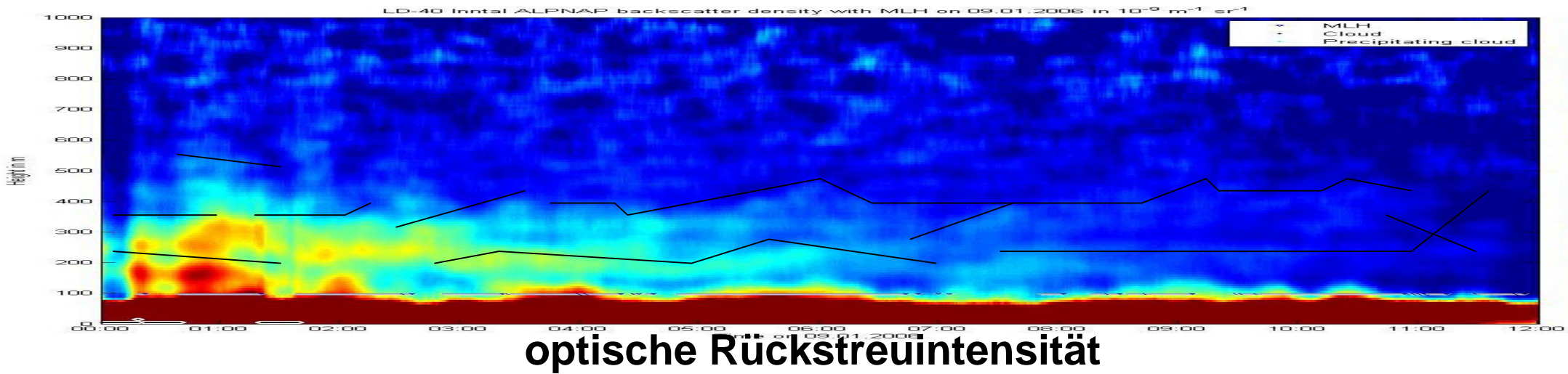
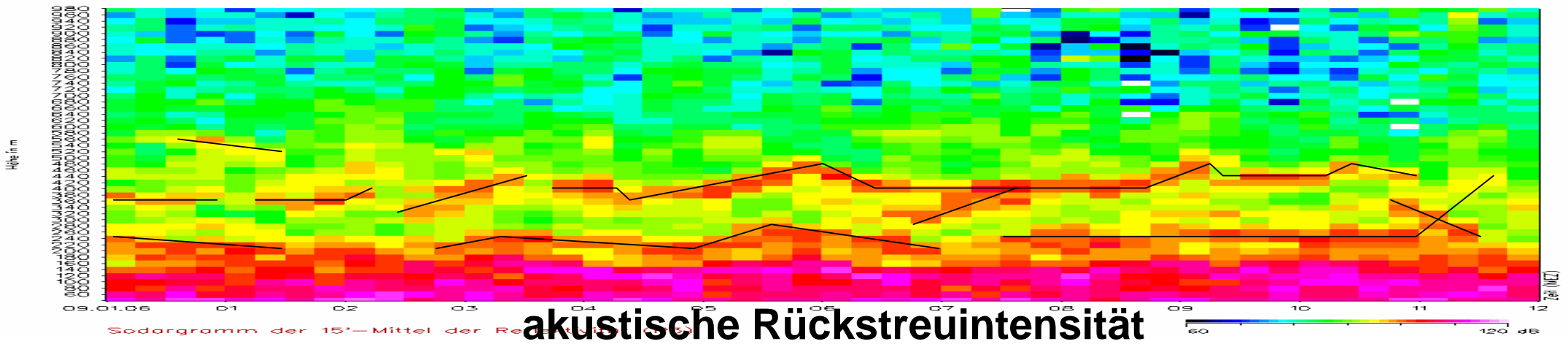
(Ceilometer)



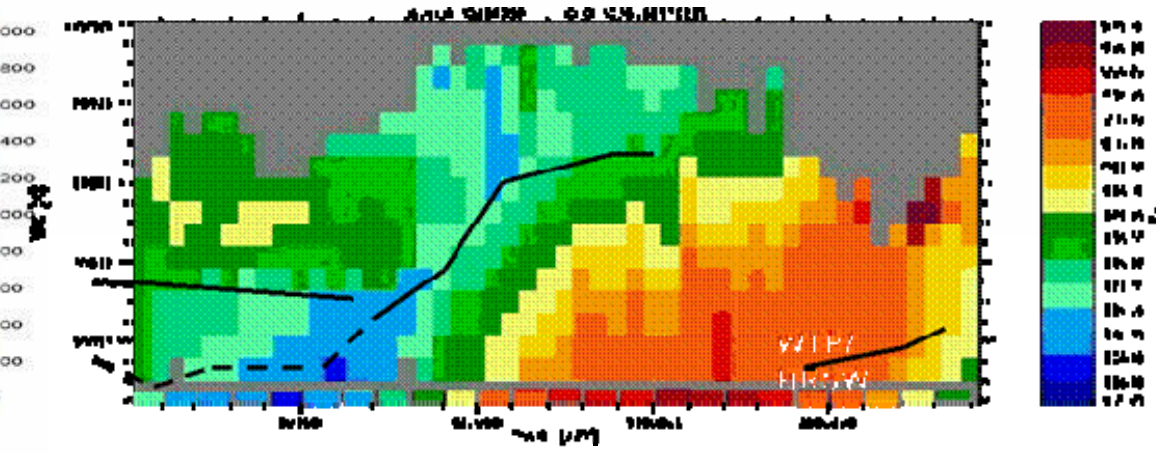
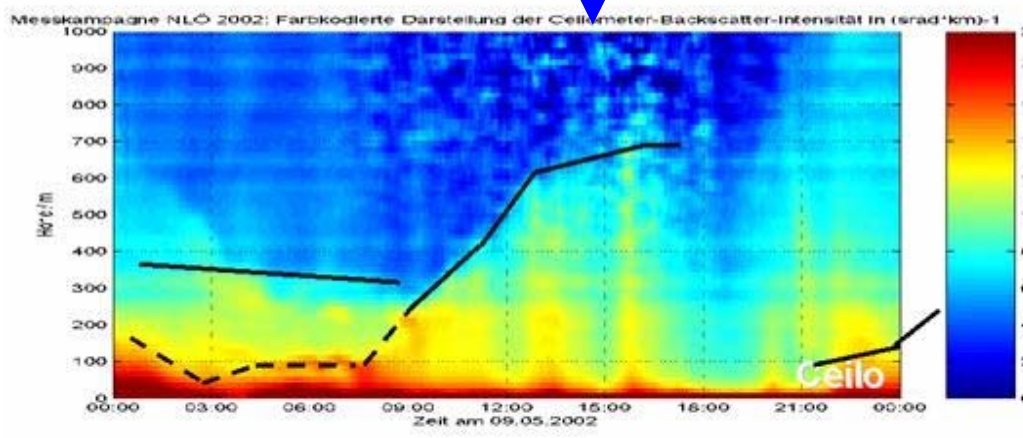
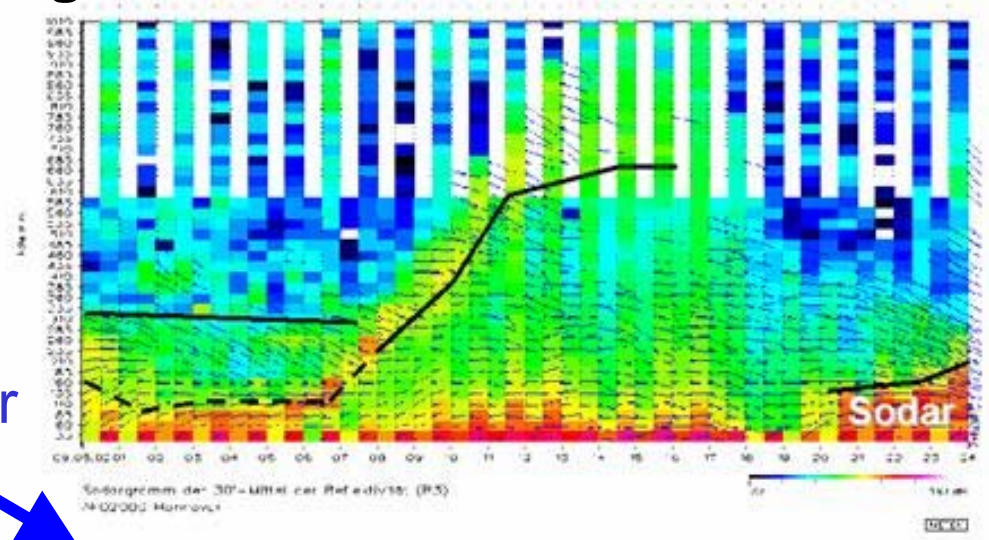
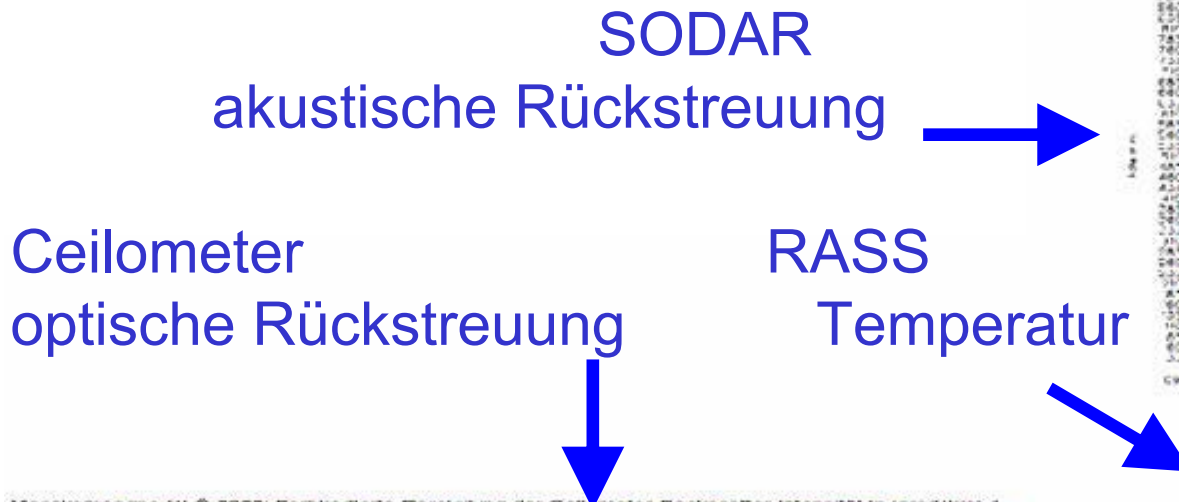


Vergleich  
der beiden  
Algorithmen





# Vergleich von MLH-Bestimmungen mit drei verschiedenen Fernerkundungsverfahren



Emeis, S., Chr. Münkel, S. Vogt, W.J. Müller, K. Schäfer, 2004: Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS, and ceilometer measurements. Atmos. Environ., 38, 273-286.

## **Beispiel für den gemeinsamen Einsatz von SODAR und Ceilometer**

**Sommer 2003 Budapest und Herbst/Winter 2003 Fürstenfeldbruck / Erding**

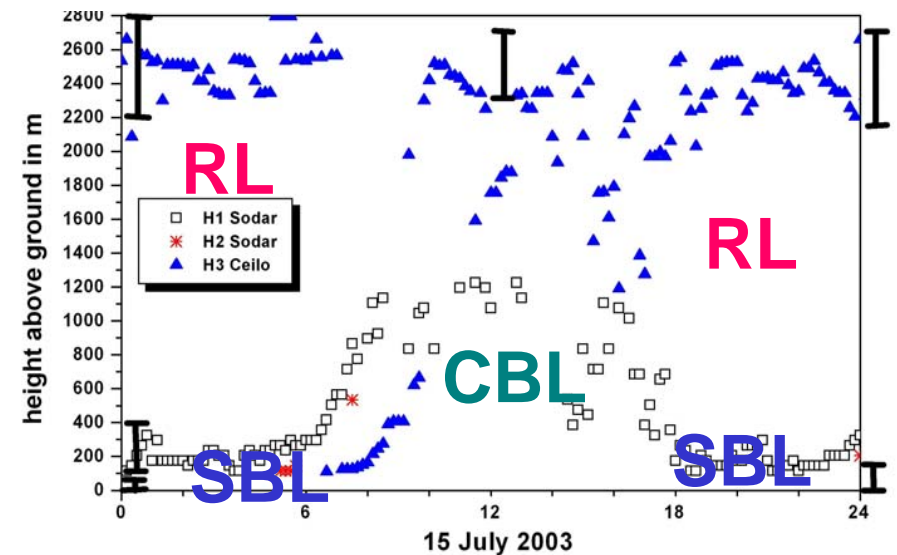
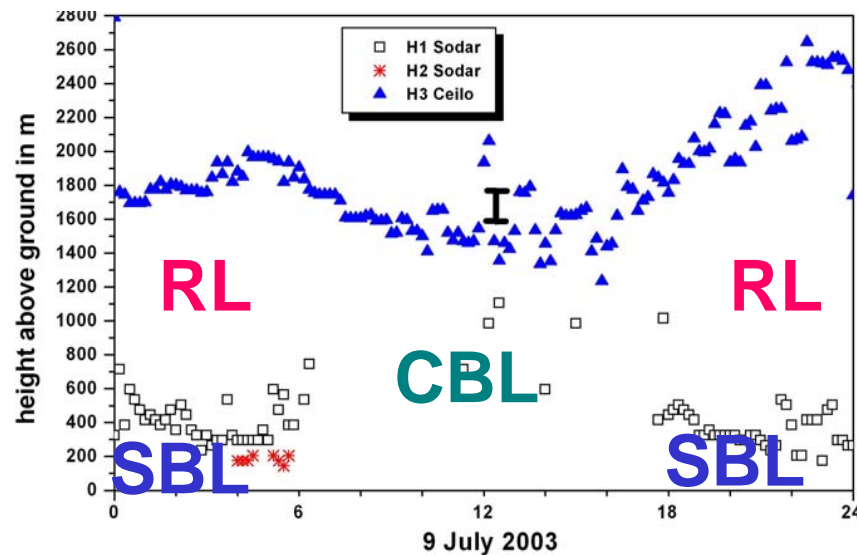
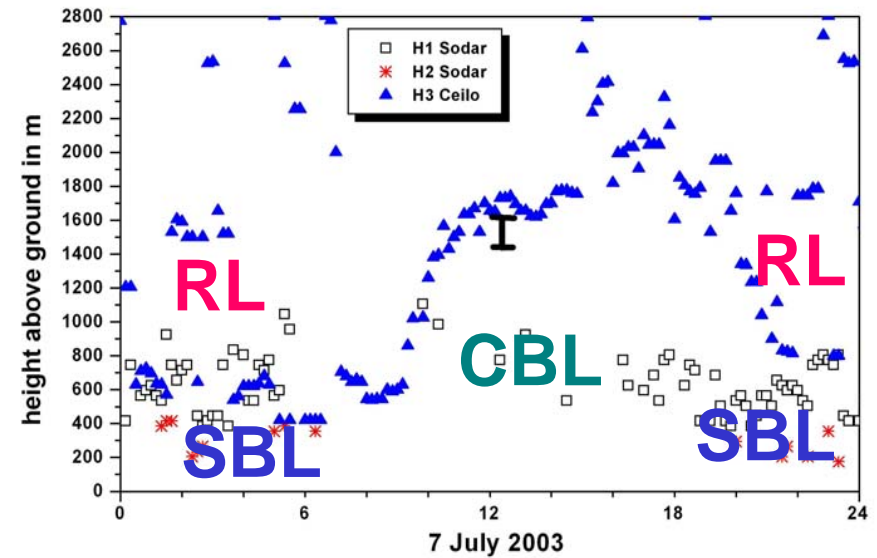
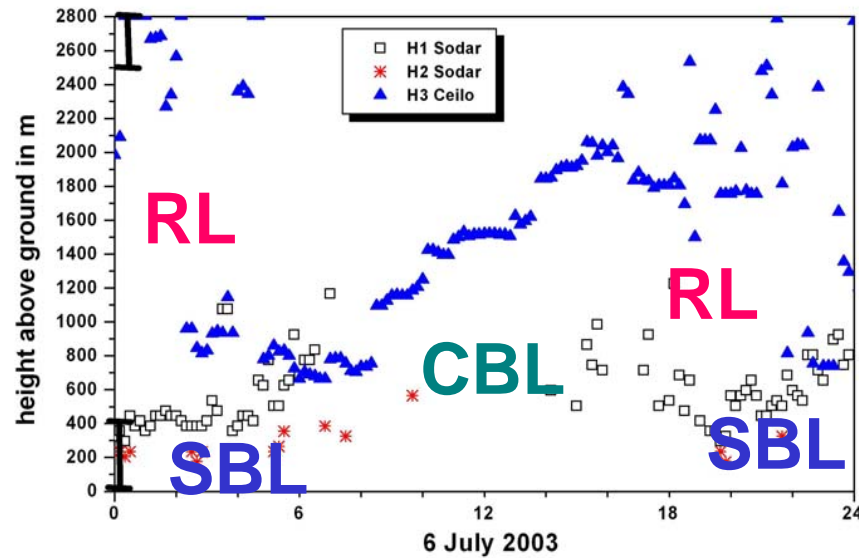
**(ICAROS NET-Kampagnen)**



**(ICAROS NET war ein Projekt im Europäischen Forschungsrahmenprogramm FP5: IST-2000-29264)**

---

# Gemeinsamer Einsatz SODAR und Ceilometer: Beispiele für Sommertage



**Beispiel für den gemeinsamen Einsatz  
von einem SODAR und einem Ceilometer**

**Winter in einem Alpental (Inntal zwischen Schwaz und Innsbruck)**

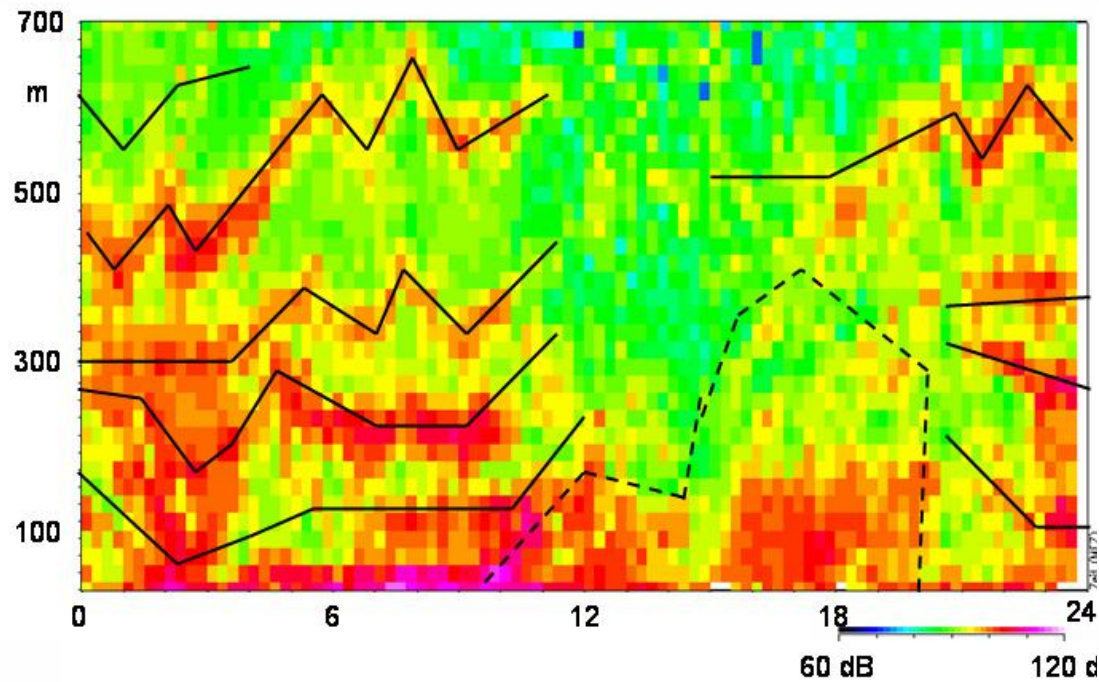
**(ALPNAP-Kampagne im Inntal im Winter 2005/06)**

**(ALPNAP ist ein Projekt im Europäischen Programm  
INTERREG III B Alpine Space, ref. no. D/III/2.1/7)**

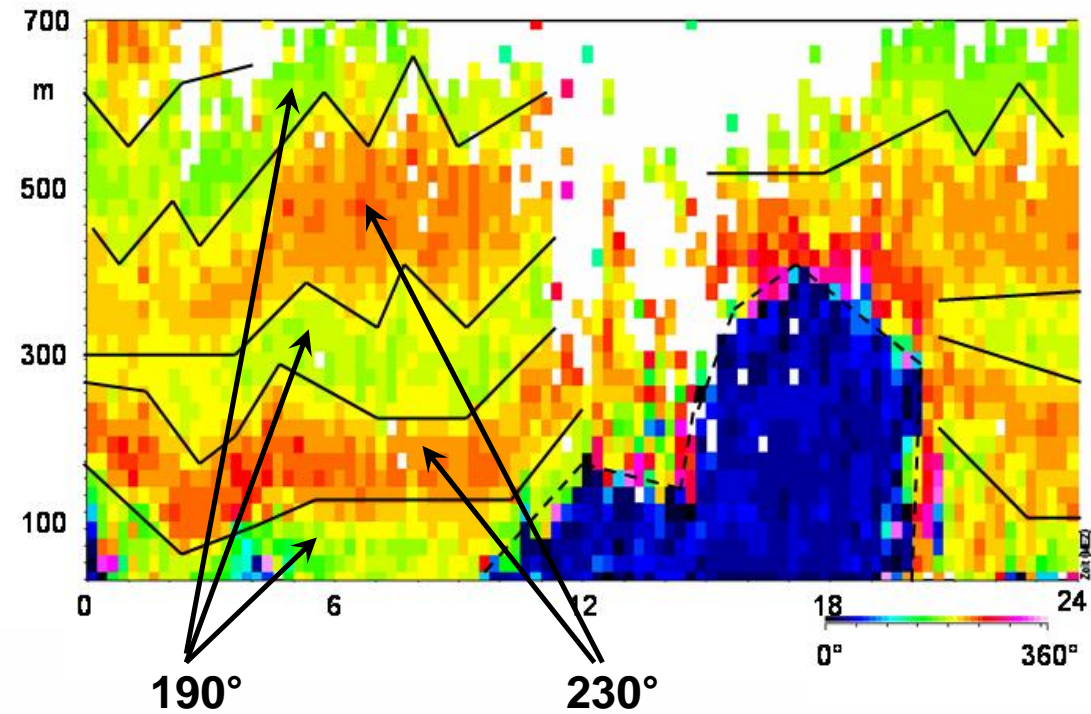
---

## SODAR-Messungen in einem winterlichen Alpental

29. Januar 2006

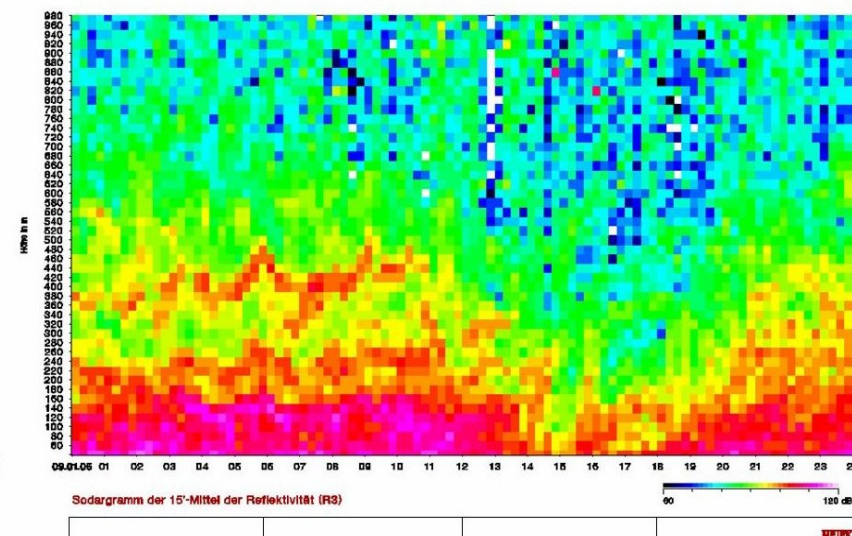
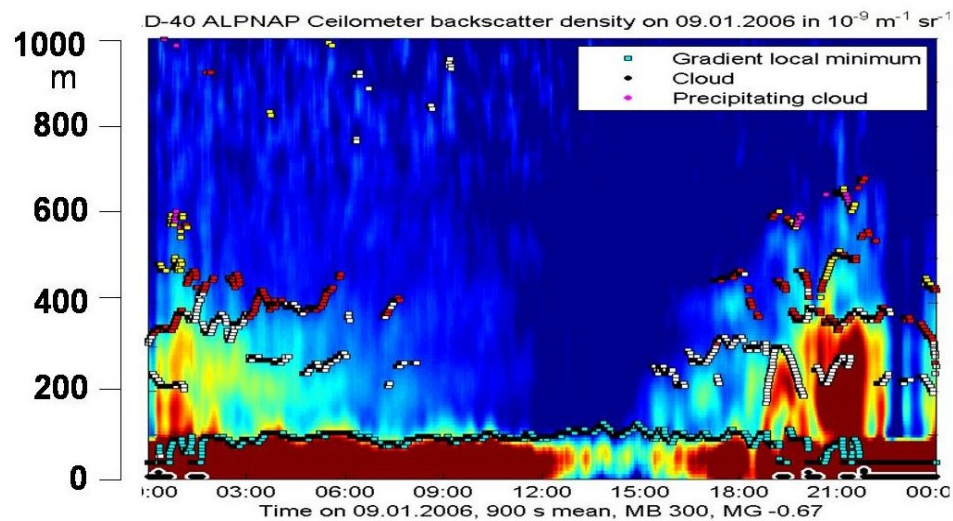
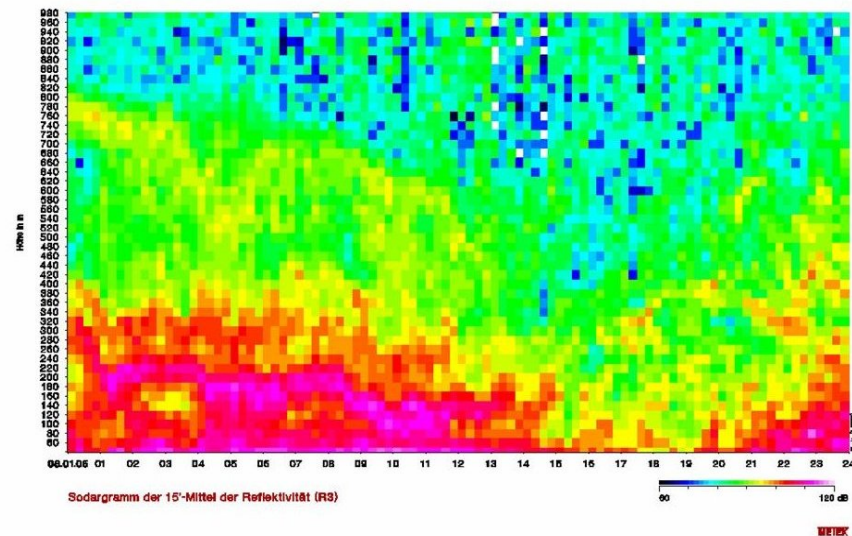
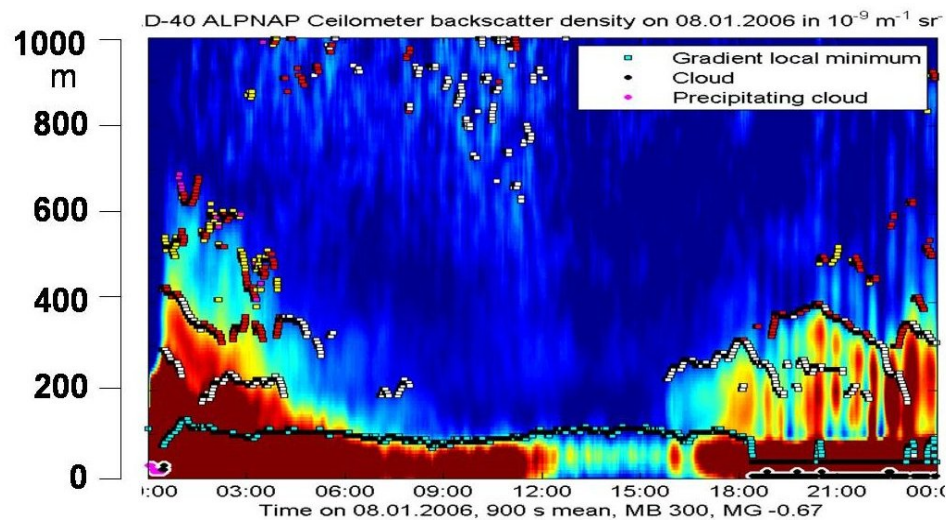


Rückstreuintensität



Windrichtung

# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft

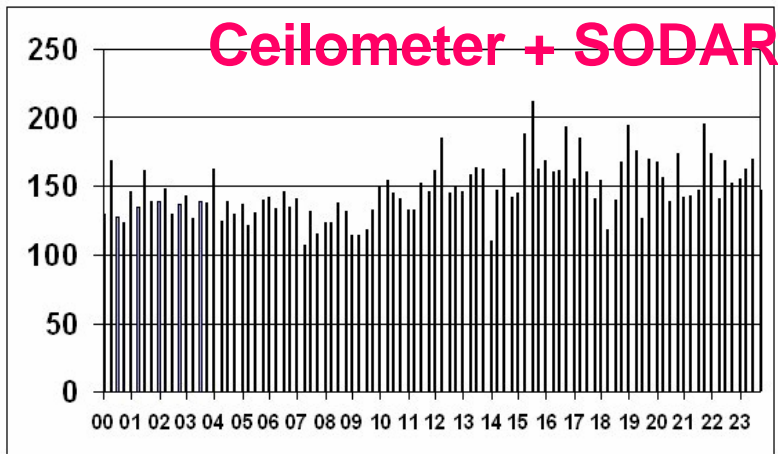


0 6 12 18 24 0 6 12 18 24

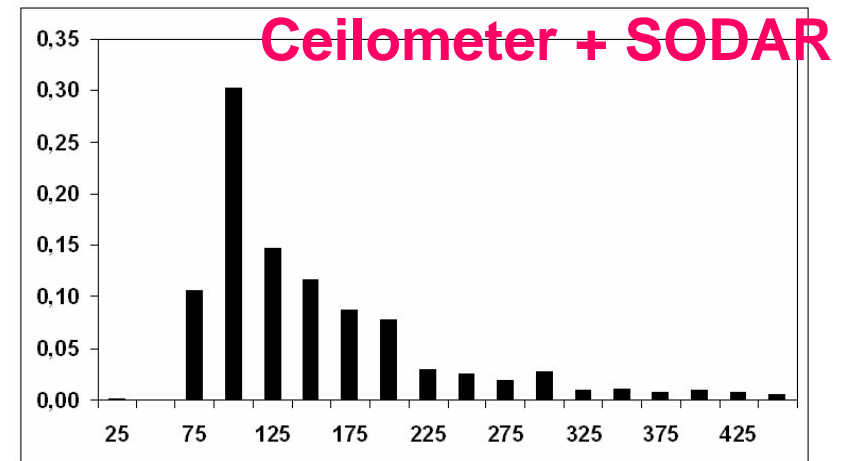


## Statistische Auswertungen der Messungen im Inntal (1.-18.1.6)

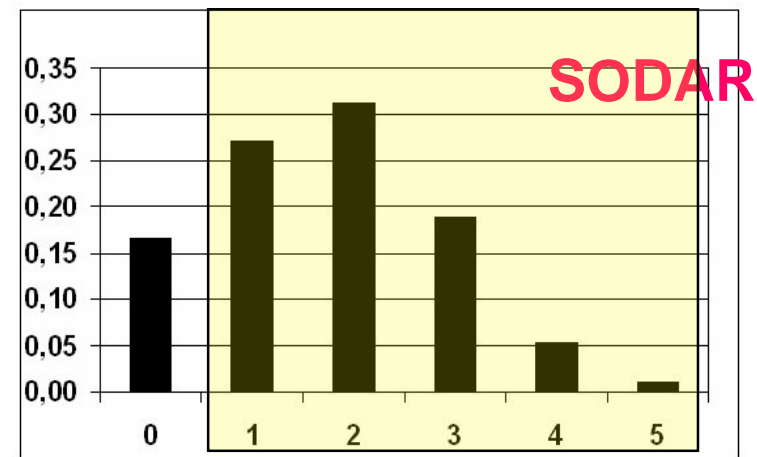
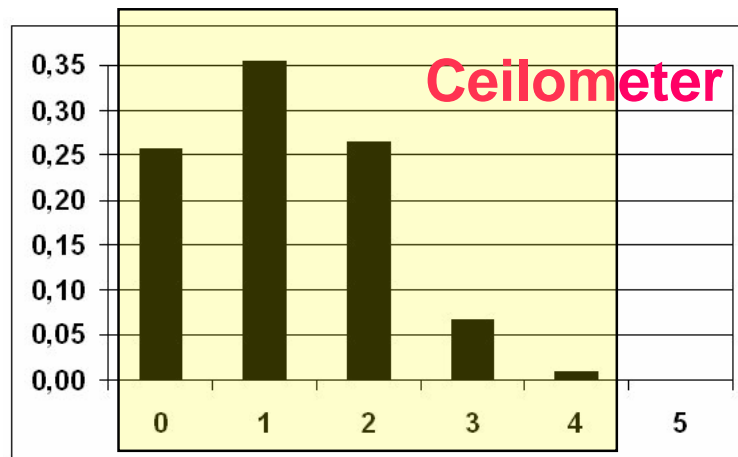
### MLH: Mittlerer Tagesgang



### MLH: Häufigkeitsverteilung



### mehrfache Inversionen



**Beispiel für den gemeinsamen Einsatz  
von einem SODAR und zwei Ceilometern (LD40 und CL31)**

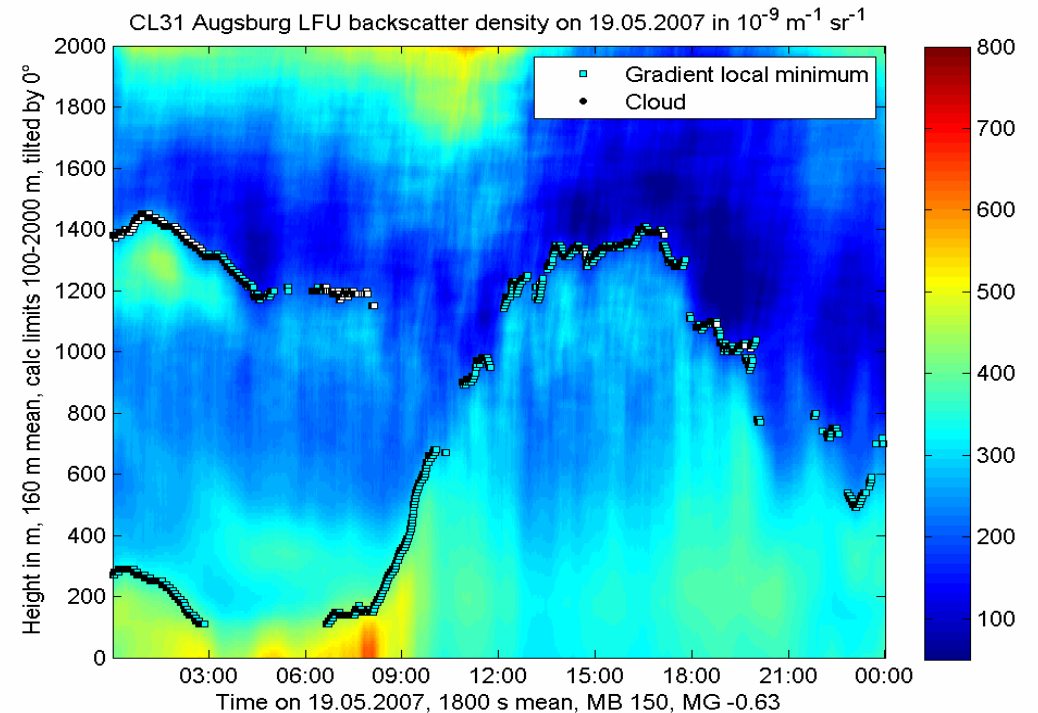
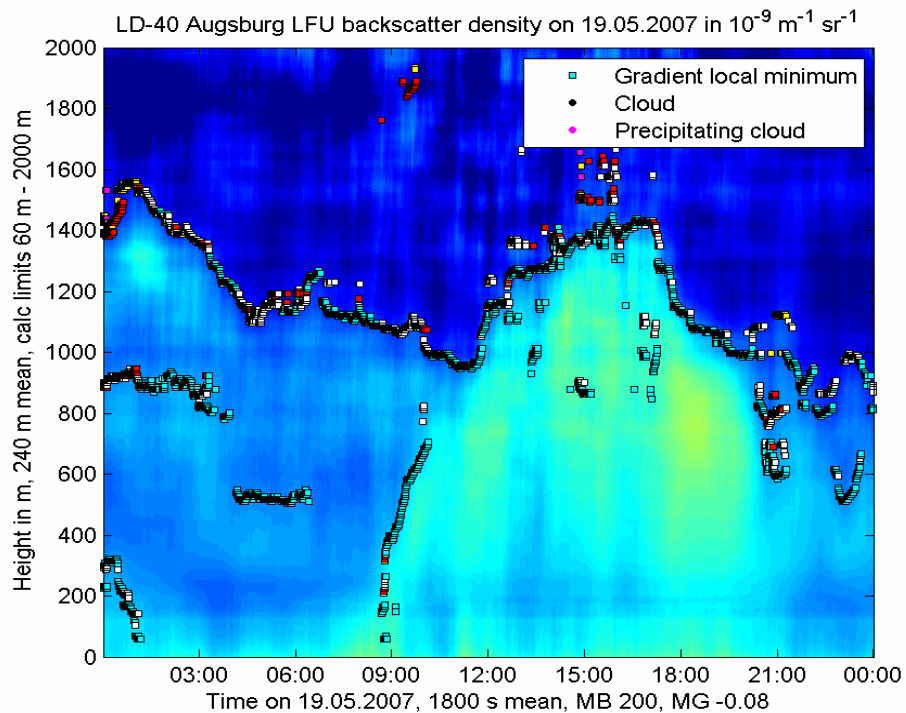
**räumliche Variation der MLH über Augsburg**

**(Mess-Kampagne in Augsburg seit dem Winter 2006/07)**

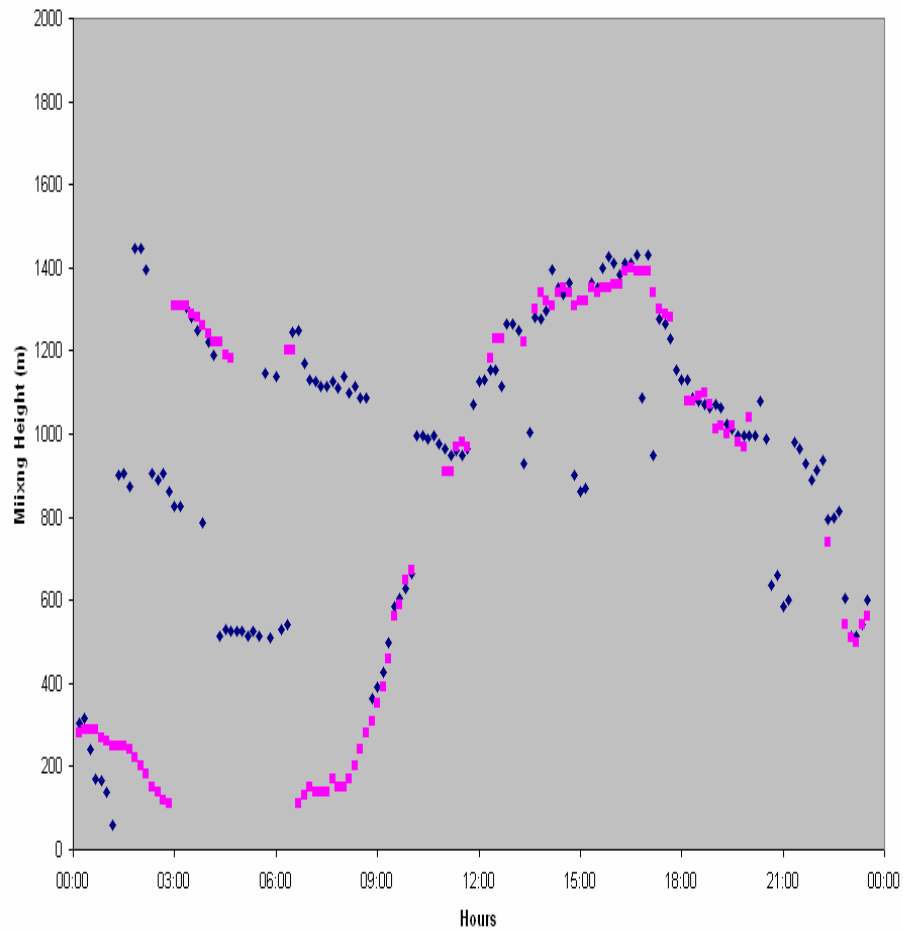
**(Zusammenarbeit mit Universität Augsburg, GSF, BfA, LfU, Stadt Augsburg)**

---

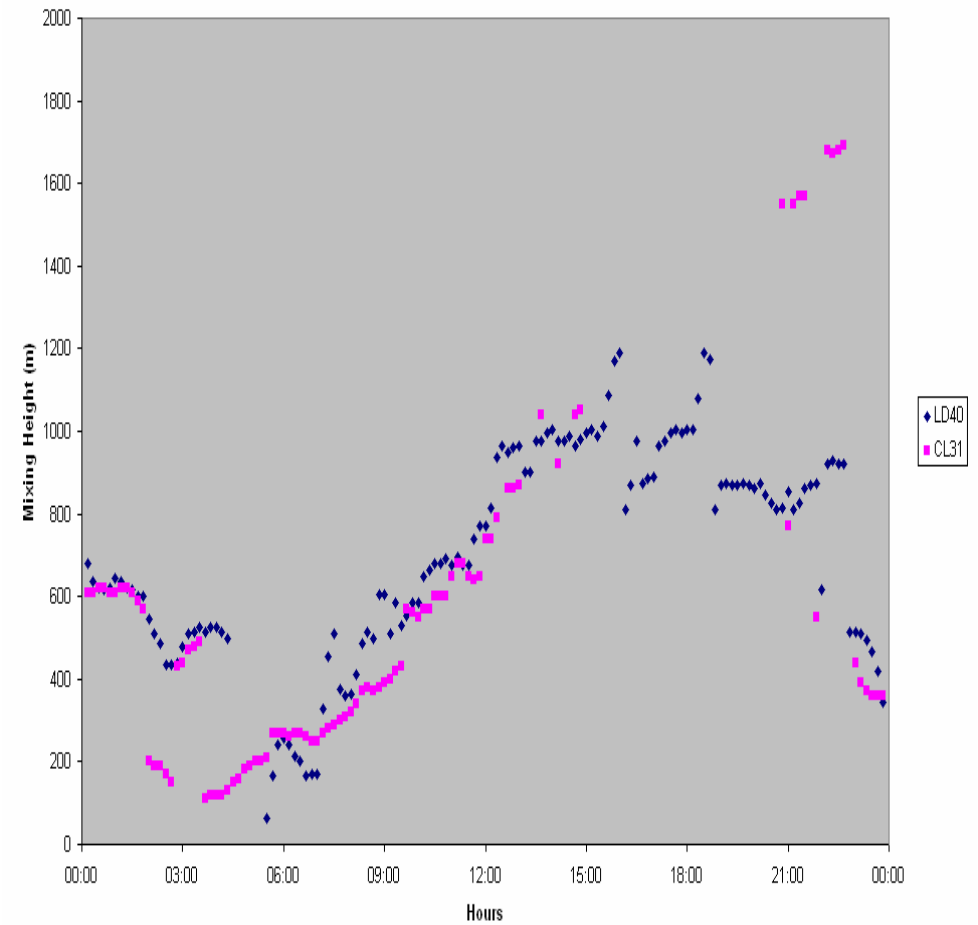
## 19. Mai 2007: Ceilometer LD40 und CL31



## Vergleich der MLH von Ceilometer LD40 und CL31

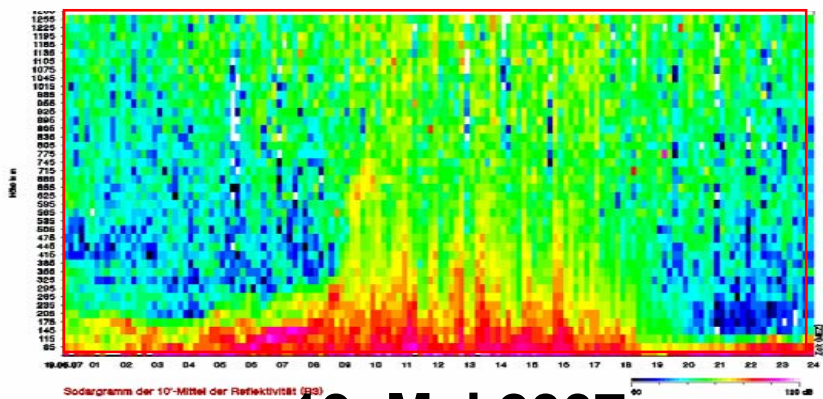
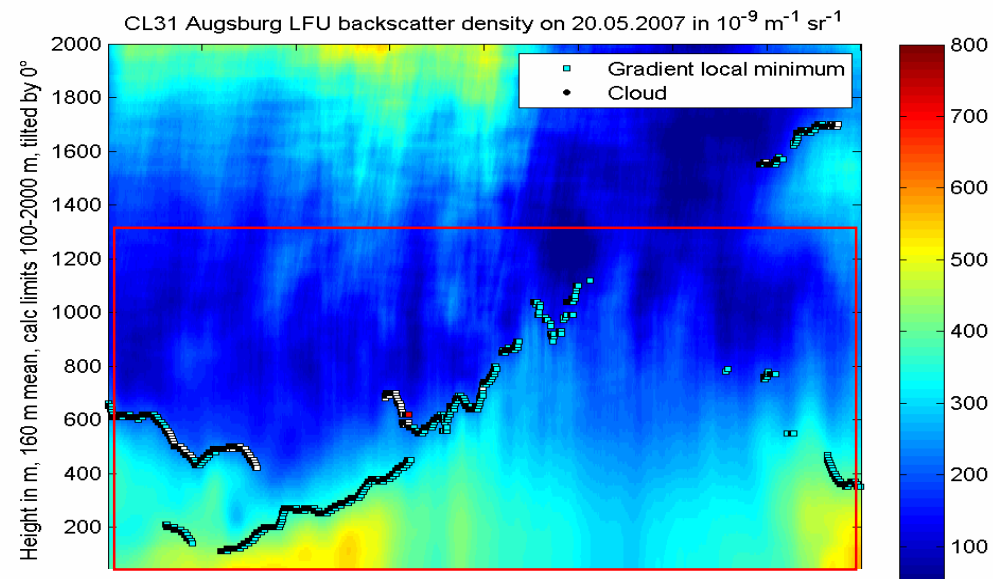
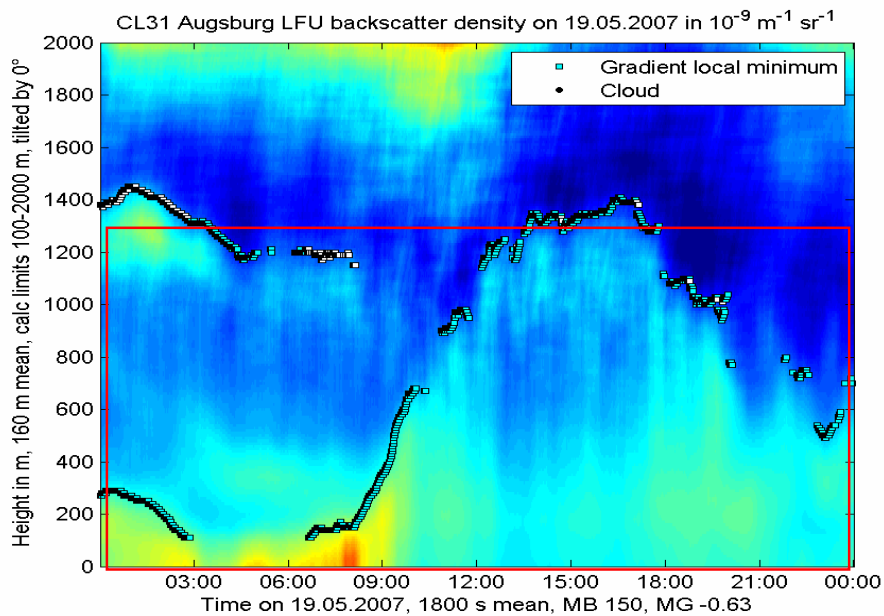


19. Mai 2007

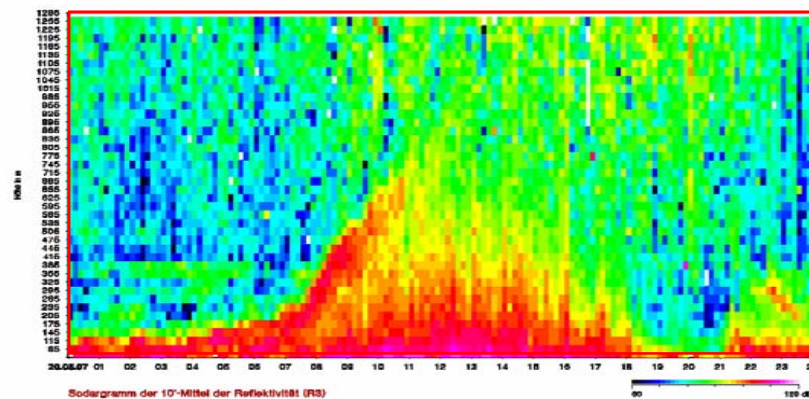


20. Mai 2007

# Vergleich optischer (oben) und akustischer (unten) Rückstreuintensität

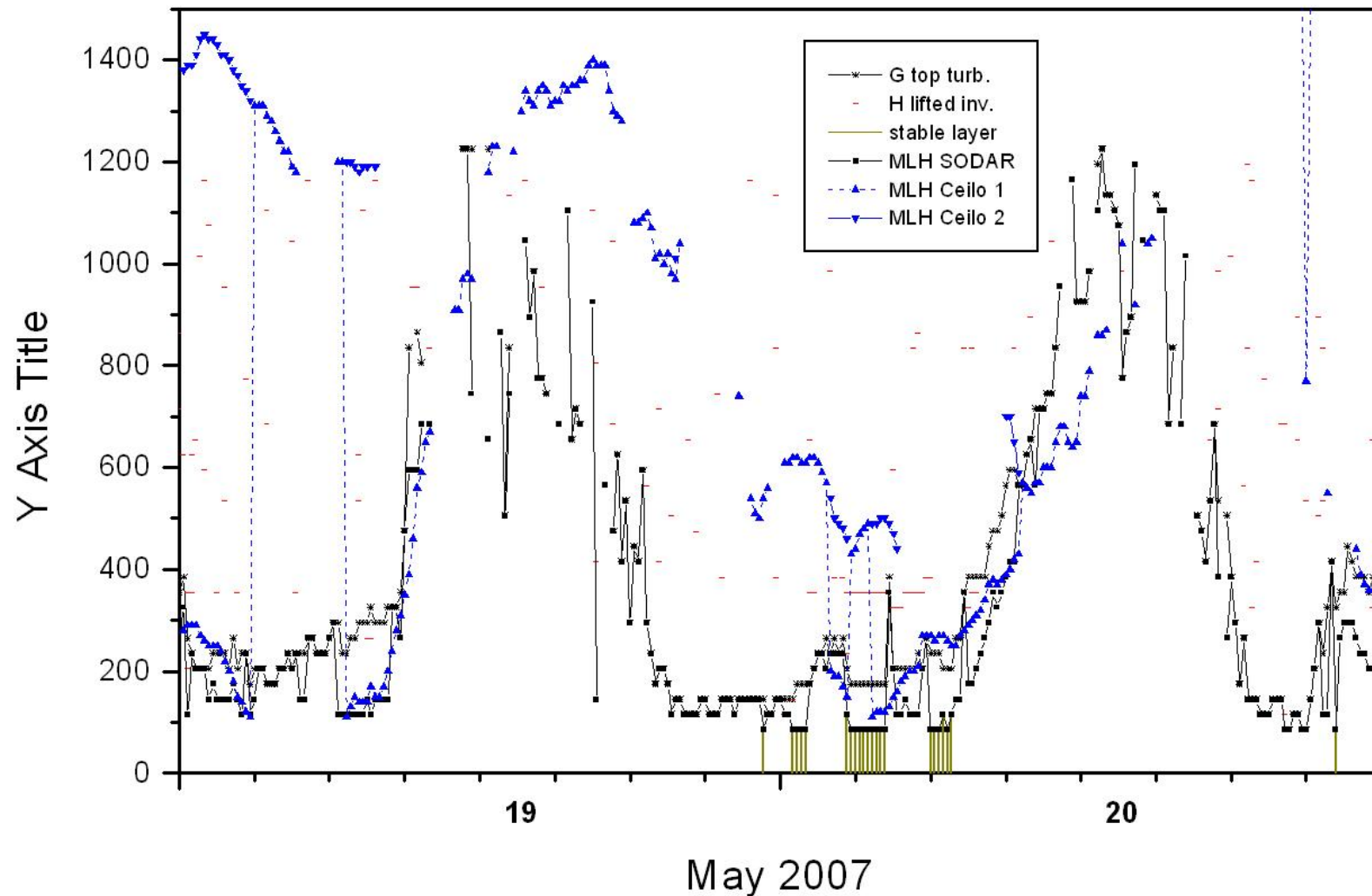


19. Mai 2007



20. Mai 2007

# Vergleich der MLH von Sodar und Ceilometer CL31



## **Beispiel für den Zusammenhang von MLH und Luftqualität**

**Herbst 2001 bis Frühjahr 2003 Hannover**

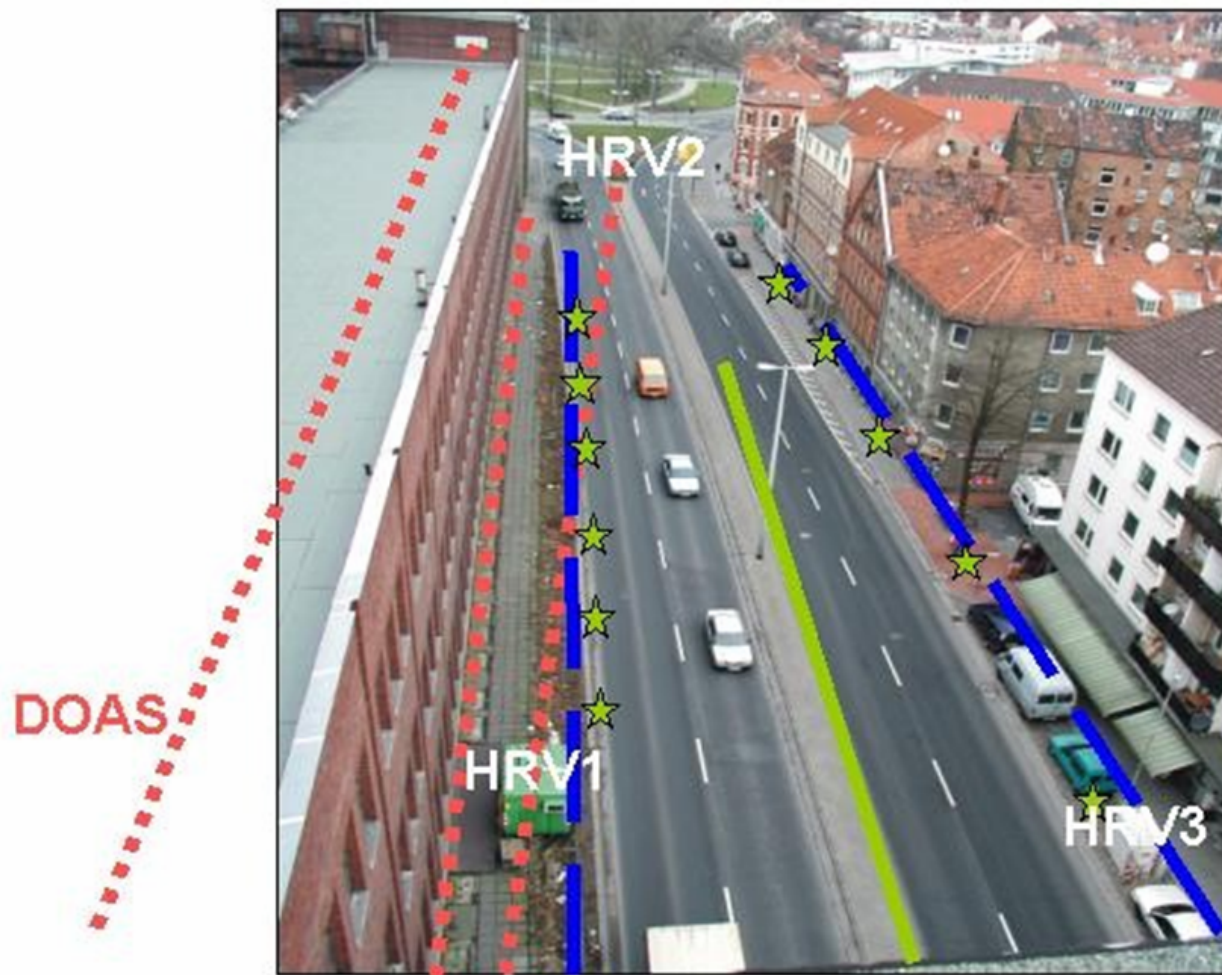
**(VALIUM-Kampagne)**

**(VALIUM war ein Projekt im AFO2000 Programm des BMBF, Nr. 07ATF12)**

Schäfer, K., Emeis, S., Hoffmann, H., Jahn, C., Müller, W., Heits, B., Haase, D., Drunkenmölle, W.-D., Bächlin, W., Schlünzen, H., Leitl, B., Pascheke, F., Schatzmann, M.: Field measurements within a quarter of a city including a street canyon to produce a validation data set. *International Journal of Environment and Pollution*, 25, 1/2/3/4 (2005), 201-216.

---

# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



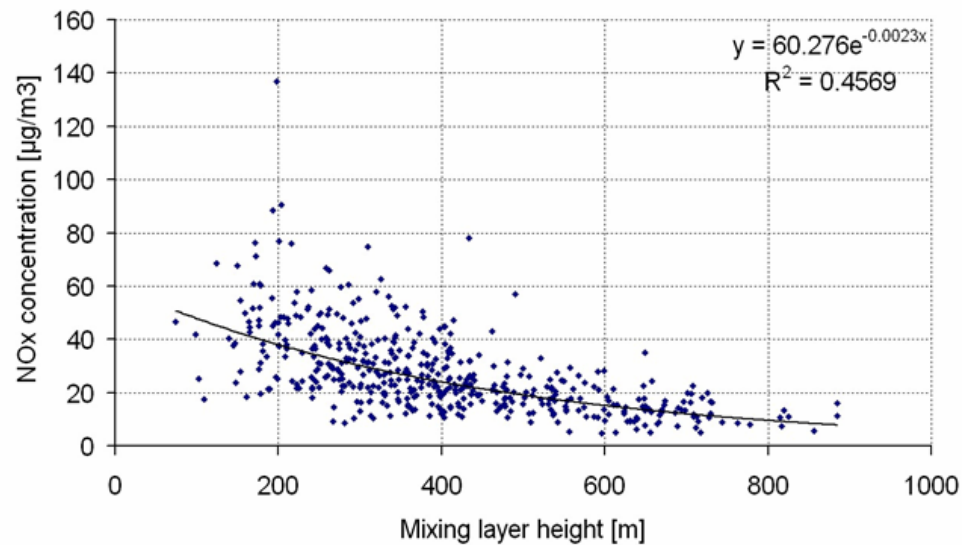
SF<sub>6</sub>-Linien-  
quelle  
(Straßenmitte)  
und Beutel-  
Sammelstellen  
(Sterne)

FTIR

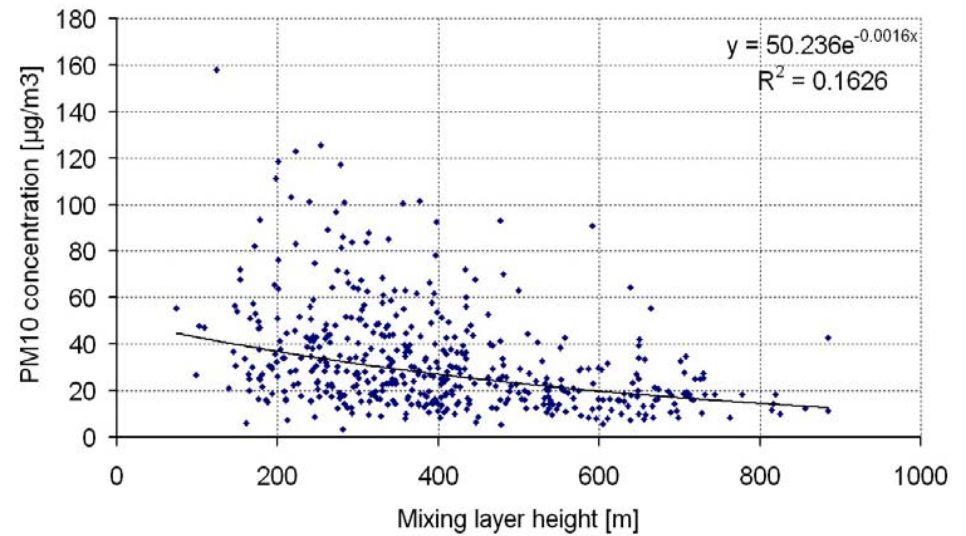


## Korrelation Schadstoff (Dachstation Gött.-Str.) - MLH

Oktober 2001 - April 2003

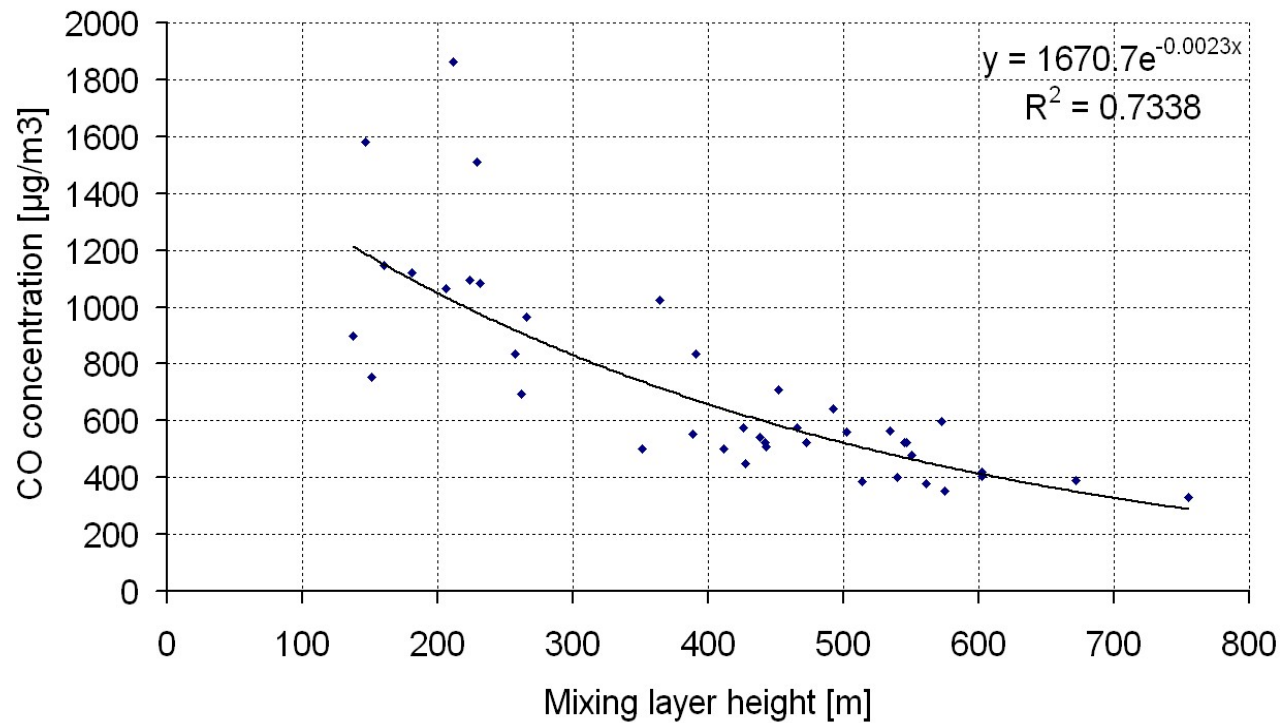


**NO<sub>x</sub>**



**PM<sub>10</sub>**

## Korrelation Schadstoff (Städtische Stationen München) - MLH



**CO**

## **Zusammenfassung und Ausblick**

**Kombination von akustischer und optischer Fernerkundung ermöglicht Erfassung der Struktur der Grenzschicht**

**Kenntnis der MLH wichtiger Parameter bei der Bewertung und der Vorhersage der Luftqualität**

**Kenntnis der MLH wichtiger Parameter bei der Abschätzung von Emissionsquellstärken aus Immissionsmessungen**

**Kenntnis der MLH wichtiger Parameter bei der Umrechnung atmosphärischer aerosol-optischer Dicken in bodennahe Luftqualitätsparameter**

**zukünftige Klimaentwicklung beeinflusst MLH und damit insbesondere die Lebensqualität in Städten**

---

# **Bestimmung der bodennahen räumlichen Verteilung von Schwebstaub-Konzentrationen mittels Satellitenbildern (ICAROS NET Plattform) und Messungen der Mischungsschichthöhe**

Klaus Schäfer, Stefan Emeis, Herbert Hoffmann, Carsten Jahn  
IMK-IFU, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Garmisch-Partenkirchen

---

## Hintergrund

Europäische Luftqualitätsrichtlinie 96/62/EC sowie Tochterrichtlinie 1999/30/EG:

Belastungskarten im Jahresmittel mit einer Auflösung von 200 m<sup>2</sup> oder ca. 14 m x 14 m für typische ‚micro-environments‘ (z. B. industriennahe Wohngebiete, Schwerpunkte des Kfz-Verkehrs)

Messnetze können diese Informationen nicht liefern – Alternativen:

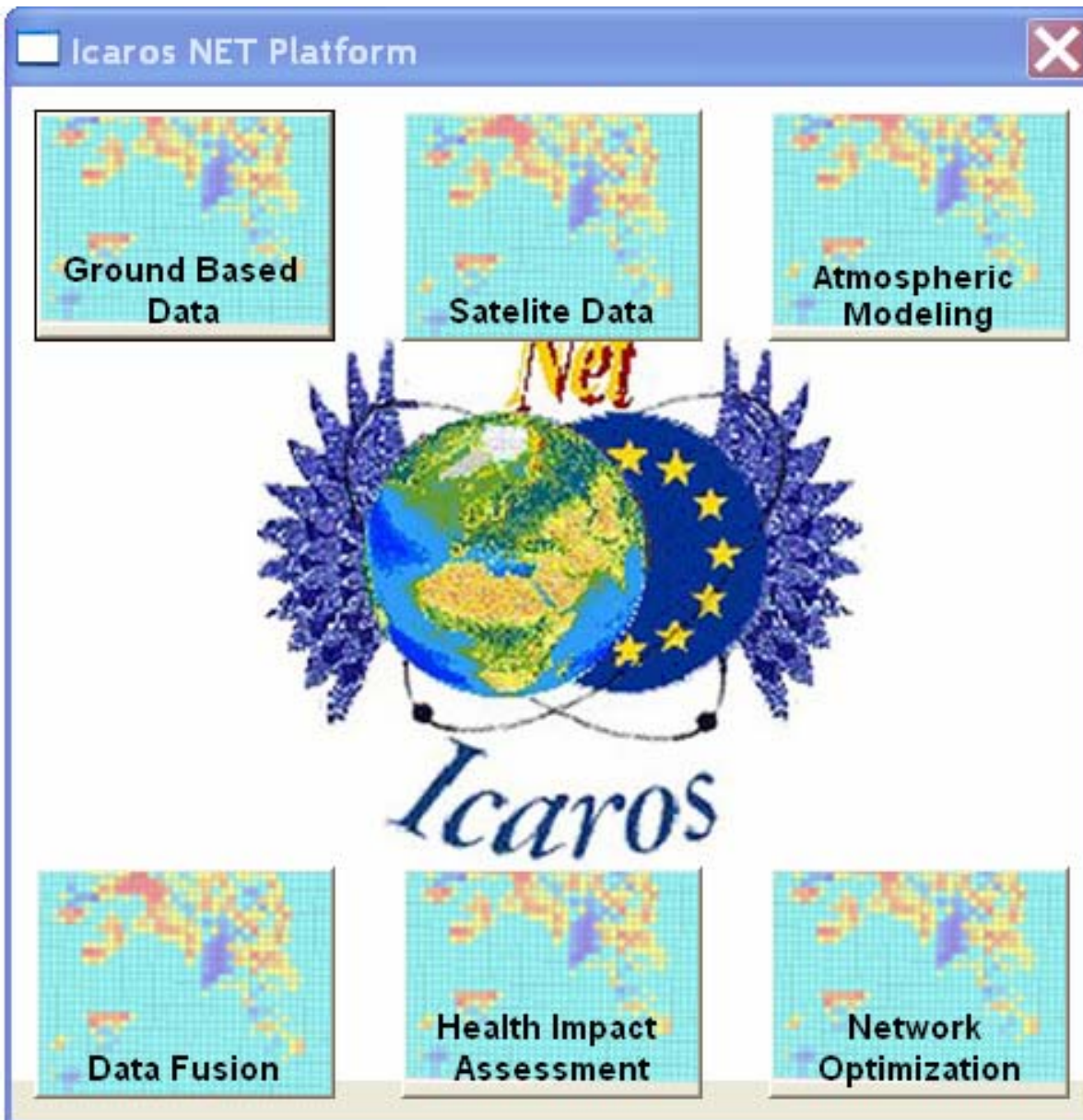
- Meso- / mikroskalige Modellsysteme – erfordern Validierung
- Satellitendaten – nur Bilder haben die geforderte räumliche Auflösung

## Zielstellungen

Operationelles Instrument zur Überwachung der Luftbelastung

- **Integration von Informationen** aus Satellitenbeobachtungen, bodengebundenen Messungen und numerischen Simulationen der Luftbelastungen in der Computer-Plattform ICAROS NET
- Informationen über **Schwebstaub-Konzentrationen** in einem Gebiet von ca. 100 km x 100 km mit einer Auflösung von ca. 30 m x 30 m

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



EU-Projekt “*Integrated Computational Assessment of Air Quality via Remote Observations Systems Network*” (ICAROS NET),  
Vertragsnummer IST-2000-29264.

Zusammenarbeit mit  
Dimosthenis Sarigiannis und  
Alberto Gotti vom JRC, Nicolas  
Sifakis vom NOA, Nikolaos  
Soulakellis von der Ägäischen  
Universität, Peter Köpke,  
Matthias Wiegner, Frank  
Wagner und Birgit Heese vom  
MIM, Konrad Nitzinger und  
Peter Rabl vom LfU, Siegfried  
Vogt vom IMK sowie den  
Diplomanden Andreas Harbusch  
und Gabriel Peicu

## ICAROS NET Plattform

Multi-spektrale Bilder von SPOT und Landsat:

- Bilder im grünen Spektralbereich
- Information über Partikel mit Durchmessern im wesentlichen von 0.2 - 1.0  $\mu\text{m}$
- Aerosole im Akkumulationsmode
- Sekundäre Partikel



Feinstaubkonzentrationen der Mischungsschicht und in Bodennähe aus der Aerosol-Extinktion:

- Bestimmung der optischen Dicke aus Satellitenbildern
- Annahmen: wesentlicher Beitrag zur Aerosol-Extinktion in der Mischungsschicht, Mischungsschicht homogen - Bestimmung der Höhe der Mischungsschicht (MLH):
  - kontinuierliche Fernerkundung (SODAR, Ceilometer, RASS)
  - Radiosonden und Flugzeuge oder
  - numerische Simulationen

## Datenauswertung in der ICAROS NET Plattform

- Erfassung von **Bildern zu unterschiedlichen Zeiten** bei nahezu wolkenlosem Himmel
  - eines während klarer atmosphärischer Bedingungen (Referenzbild) und
  - eines vom gleichen geografischen Gebiet in der gleichen Jahreszeit während belasteter Bedingungen
- **Radiometrische Angleichung** der beiden Bilder
- Anwendung der Inversionsalgorithmen für die optische Dicke auf der Basis der **Einflüsse auf Sichtweiten, Schärfe und Schatten**

## Datenauswertung in der ICAROS NET Plattform

- Anpassung an die zu untersuchende Region:  
Bestimmung der **Korrelation des Extinktionskoeffizienten der Mischungsschicht von Sonnen-Photometer-Messungen mit bodengebundenen Messungen der Massen-Konzentrationen von PM10, PM2,5 und PM1 am gleichen Ort**

$$\text{AOD} = \beta_{\text{Ext.}} \times \text{MLH}$$

**Korrelation - empirischer Zusammenhang mit Massen-Konzentration:**

$$\text{PM} = a \beta_{\text{Ext.}} = a \text{AOD} / \text{MLH}$$

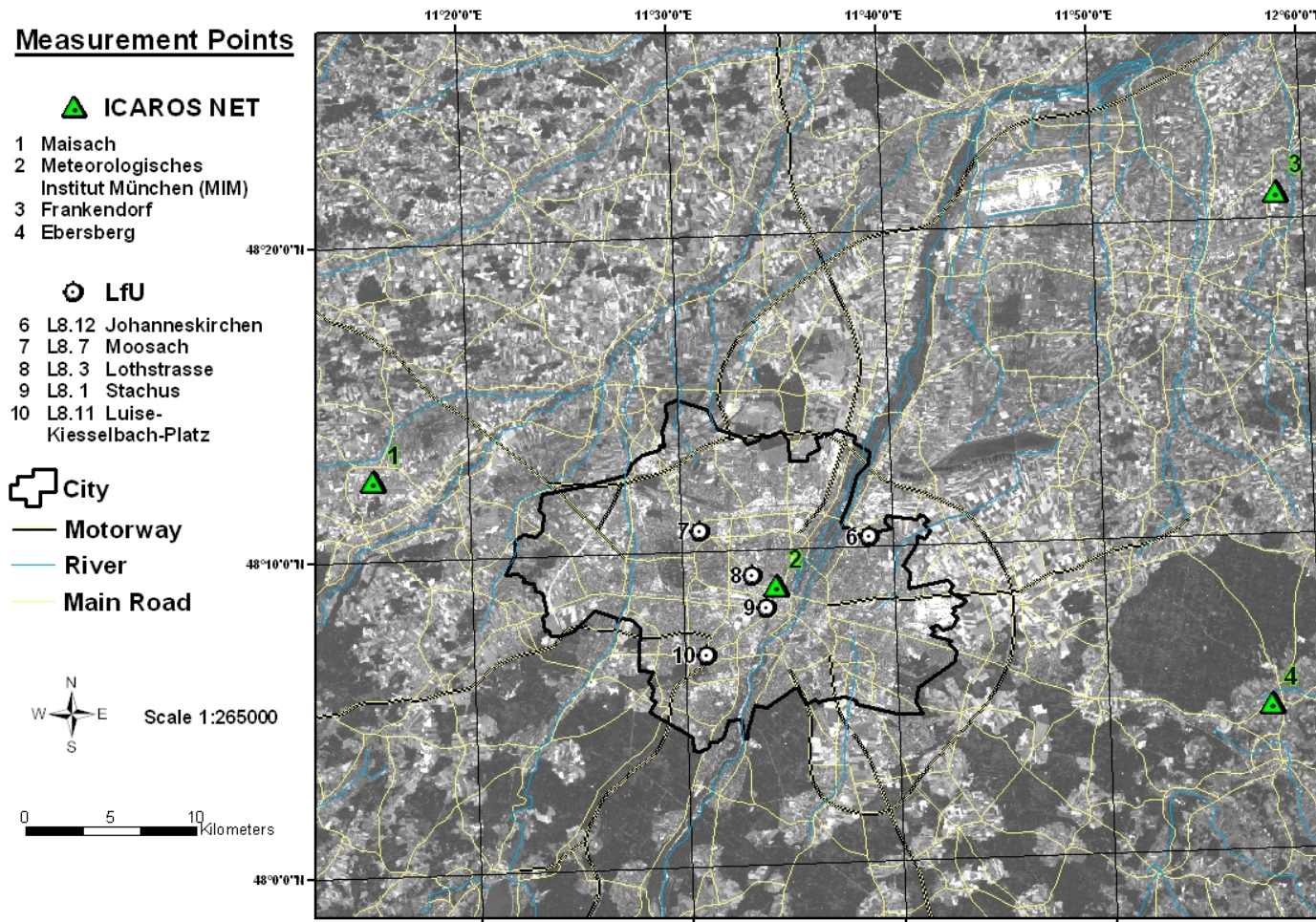
- **Nutzung von Luftqualitätsindizes**, um die gesundheitliche Gefährdung der Bürger zu ermitteln

## Anwendung in der Region München

### Bodengebundene Messungen

- **Partikel-Massen-Konzentrationen, 24-h-Mittel**  
PM10, PM2.5 and PM1 in Maisach, MIM und Frankendorf
- **Aerosol-optische Dicke (AOD)** von Sonnen-Photometern  
Maisach (AERONET), MIM
- **MLH** aus SODAR (Maisach), Ceilometer und RASS (nahe Frankendorf)

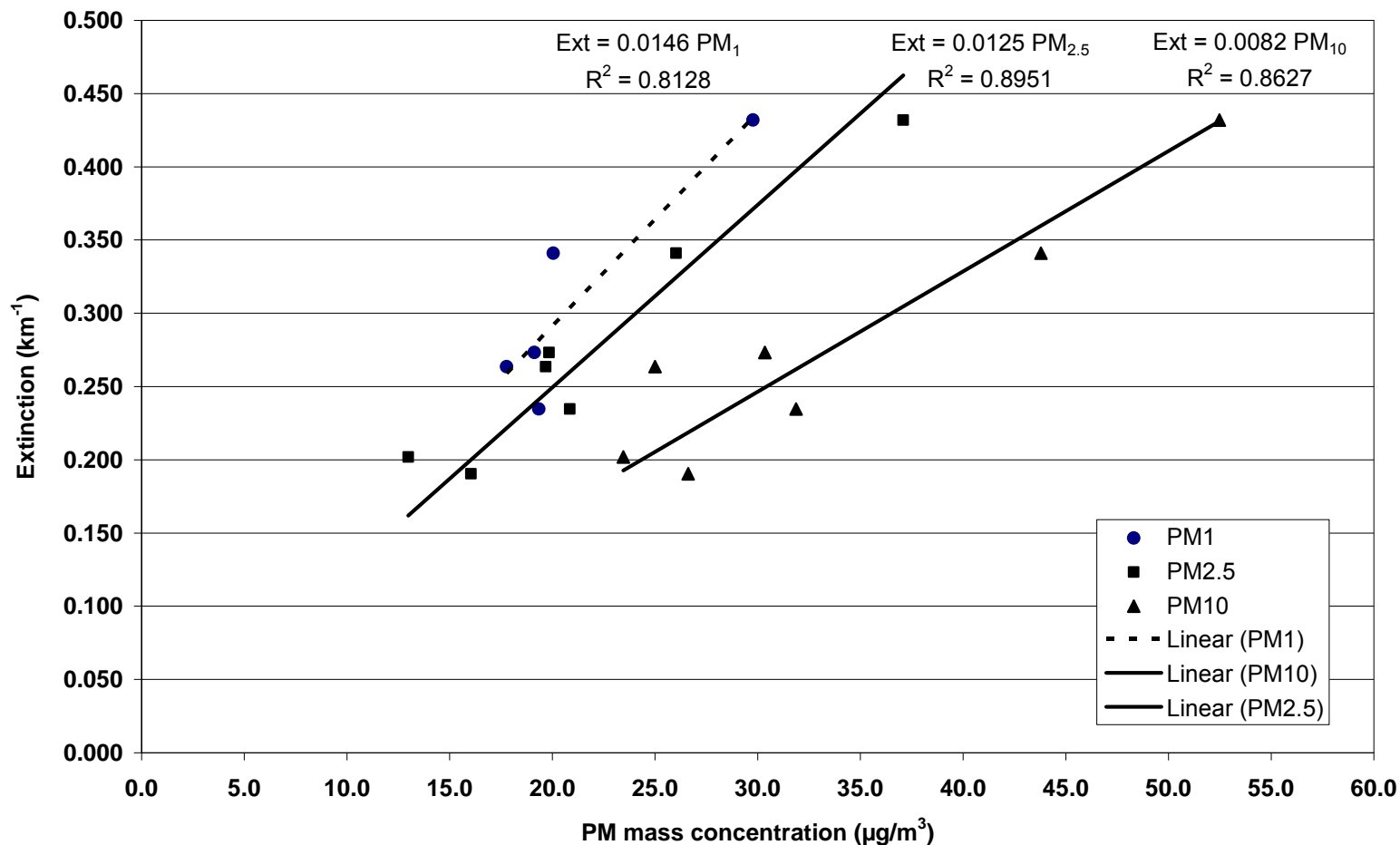
## Anwendung in der Region München



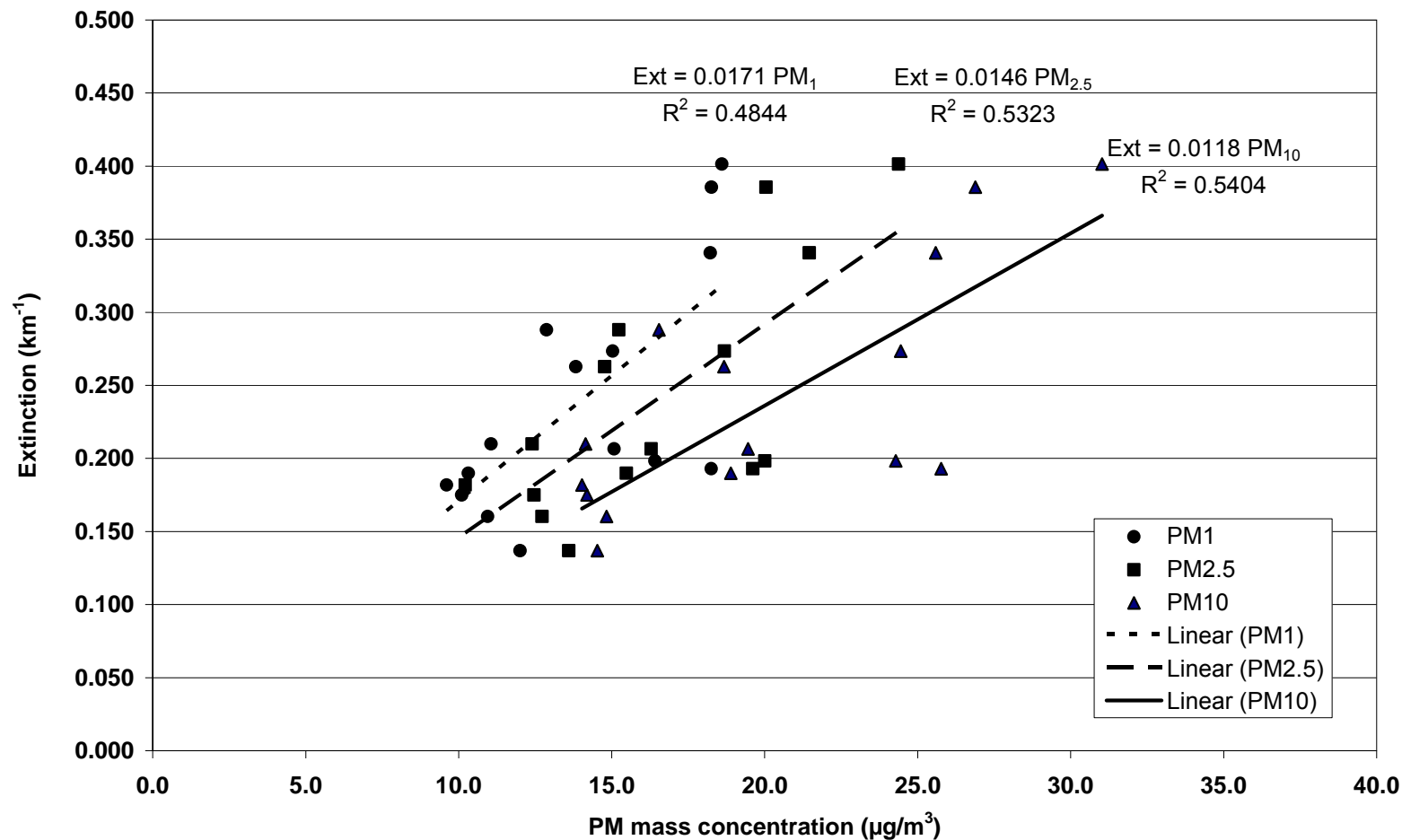
# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten der Mischungsschicht (in  $\text{km}^{-1}$ ) von der PM-Massen-Konzentration (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) während der Winter-Messkampagne MLH gemessen mit SODAR in Maisach, AOD und PM in Maisach und MIM

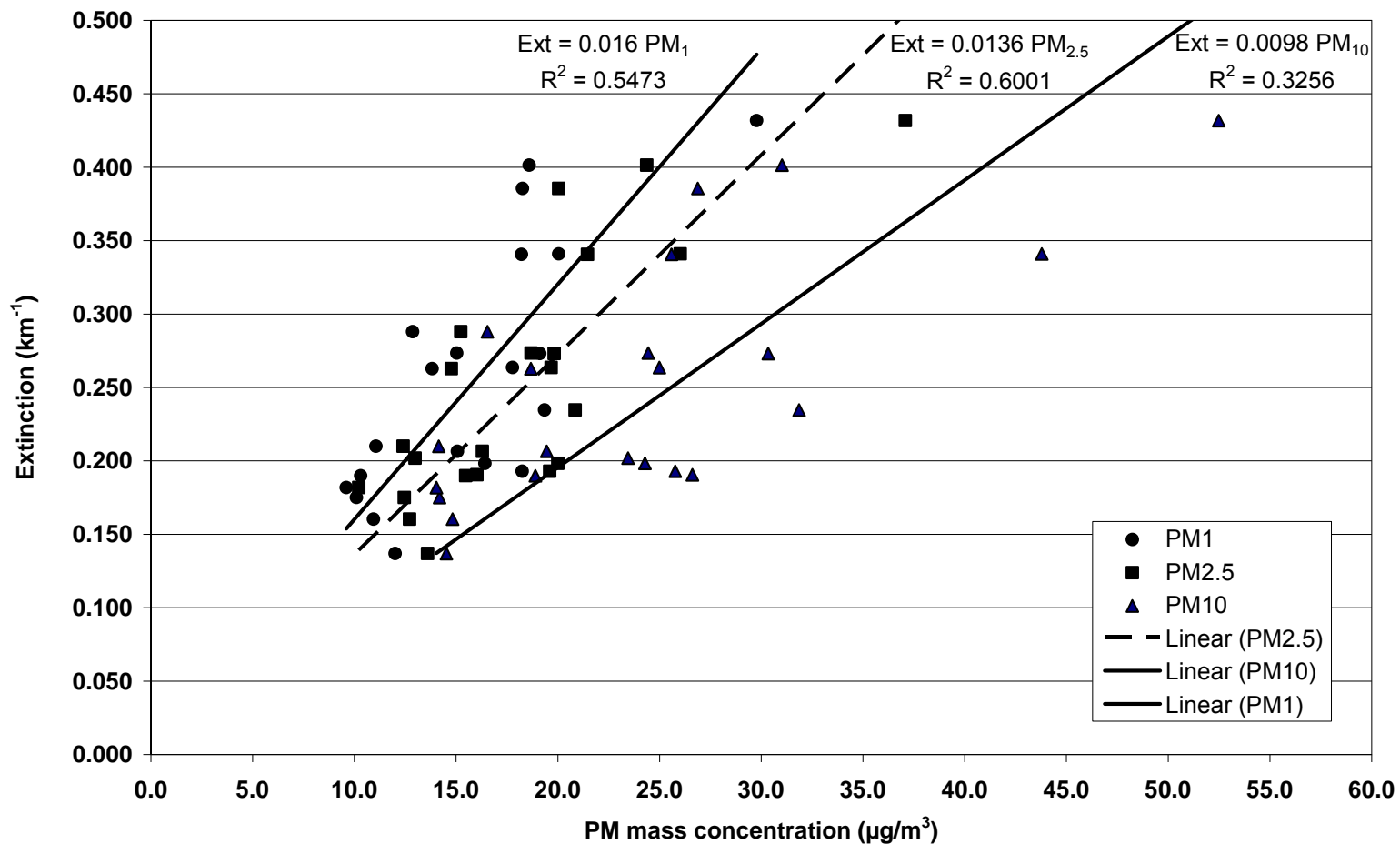


Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten der Mischungsschicht (in  $\text{km}^{-1}$ ) von der PM-Massen-Konzentration (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) während der Sommer-Messkampagne MLH gemessen mit SODAR in Maisach, AOD und PM in Maisach und MIM





Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten der Mischungsschicht (in  $\text{km}^{-1}$ ) von der PM-Massen-Konzentration (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) während der beider Messkampagnen MLH gemessen mit SODAR in Maisach, AOD und PM in Maisach und MIM



## Anwendung in der Region München

Lineare Abhängigkeiten des Extinktionskoeffizienten der Mischungsschicht von der Feinstaub-Massen-Konzentration im Bereich der Stadt München und deren Umgebung

Anwachsen der Partikel mit der Luftfeuchtigkeit muss berücksichtigt werden – besonders bei  $PM_{10}$

---

# PM<sub>10</sub>-Konzentrationen am 01. April 2003 im Zentrum von München Referenzbild vom 16. April 2000 von Landsat

## Legend

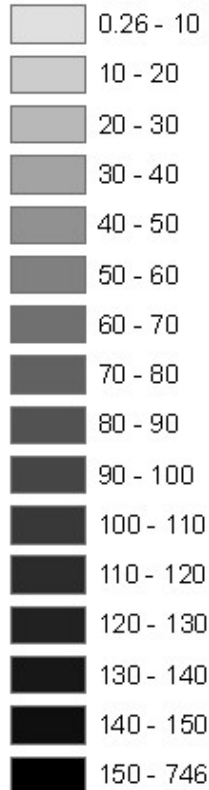


LfU



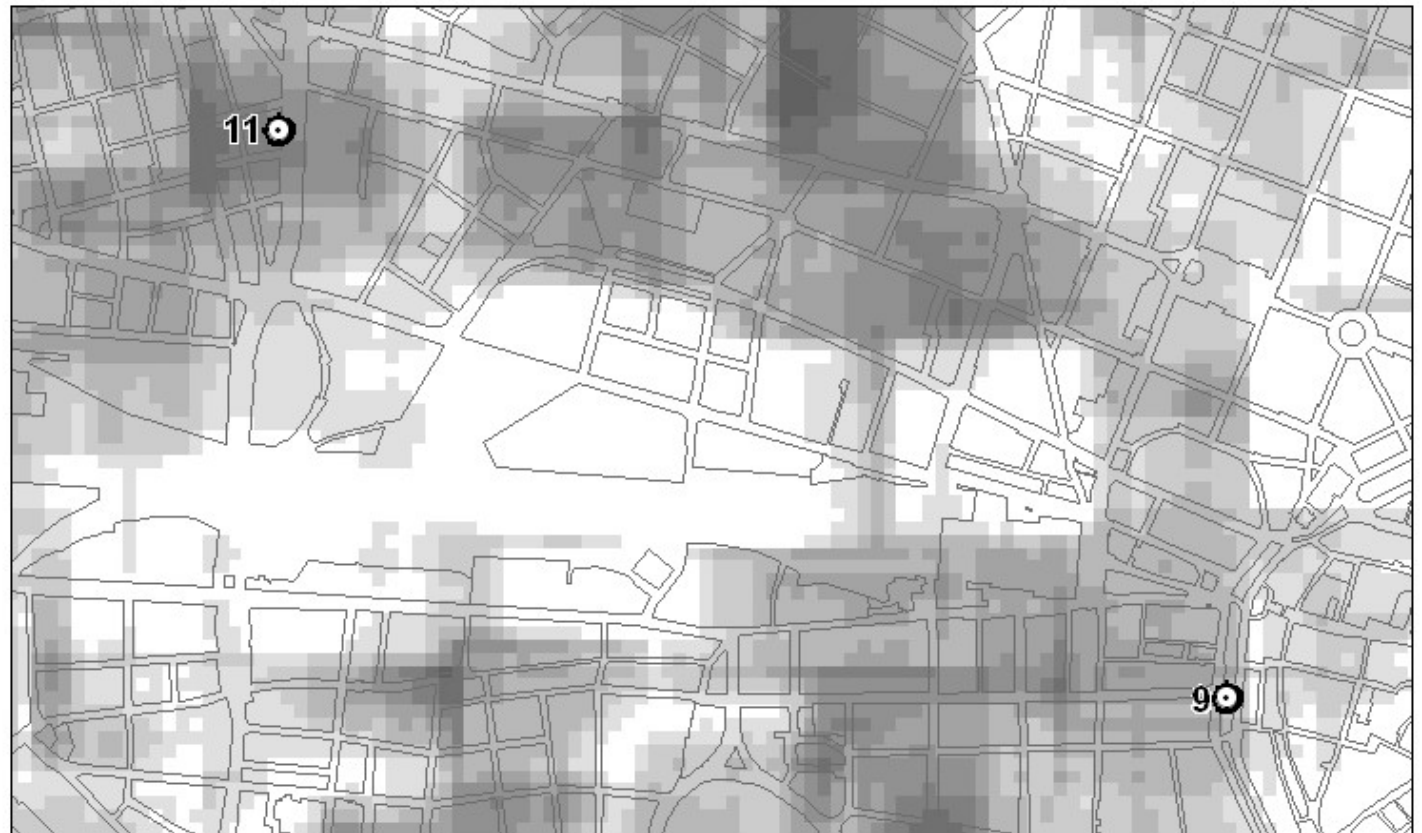
Buildingcontour

PM 10 in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
from 1 April 2003

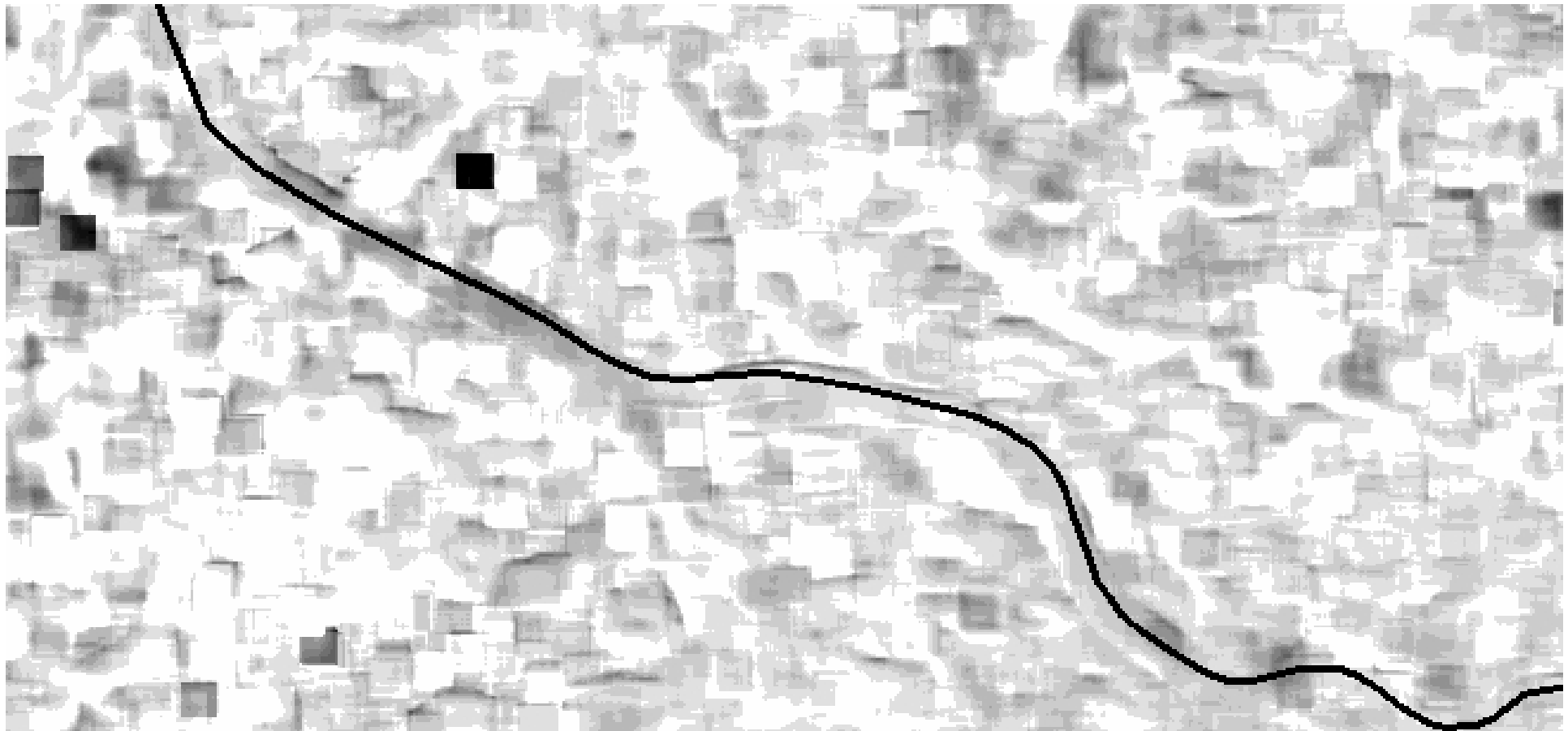


Scale 1:16,453

0 0.2 0.4 Kilometers



PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  am 01. April 2003 im Süd-Westen von München mit der Autobahn A8 München-Salzburg  
Referenzbild vom 16. April 2000 von Landsat



Vergleich der PM<sub>10</sub>-Ergebnisse in µg/m<sup>3</sup> der ICAROS NET Plattform mit den gemessenen Konzentrationen an den LfU-Messstationen Stachus, Lothstraße und Luise-Kiesselbach-Platz zwischen 9 und 12 Uhr MEZ: Konzentration im Bild-Pixel enthält keine Hintergrundwerte, da Konzentrationen des Referenzbildes nicht verwendet

	<b>Stachus</b>	<b>Lothstraße</b>	<b>Luise-Kiesselbach-Platz</b>
<b>PM<sub>10</sub> Messstationen 01.04.2003</b>	53	49	32
<b>PM<sub>10</sub> ICAROS NET 01.04.2003</b>	26.5	1 – 13 in der Umgebung	6.5

## Schlussfolgerungen

ICAROS NET Plattform kann erfolgreich angewendet werden

Konzentrationen von  $PM_{2,5}$  und  $PM_1$  können angegeben werden, die zur Zeit routinemäßig nicht erfasst werden

Die Ergebnisse lassen sich verbessern, wenn aus numerischen Simulationen mit den Messnetz-Daten die Hintergrundkonzentrationen addiert werden

# **Bestimmung der Emissionsquellen auf Flughäfen mittels inverser Ausbreitungsmodellierung zur Untersuchung der Luftqualität**

Klaus Schäfer, Gregor Schürmann, Stefan Emeis, Carsten Jahn, Herbert Hoffmann

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Meteorologie und Klimaforschung,

Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen

---

## Luftqualität auf Flughäfen

auf Grund des wachsenden Luftverkehrs trotz zahlreicher  
Emissionsreduktionsmaßnahmen ein Problem  
bei Erweiterung von Flughäfen zu bewerten

Grundlage für eine Verbesserung der Luftqualität ist die  
genaue Kenntnis aller Emissionen bzw. ein Emissionskataster

Daten-Lücken, da Messungen vor Ort stark eingeschränkt



## Zielstellung: Bestimmung der Emissionen auf Flughäfen

Messungen der Emissionsindizes der Abgaskomponenten der  
**Flugzeuge** im operationellen Betrieb

keine Installationen am Flugzeug erlaubt

keine Beeinträchtigungen des Flugbetriebs gestattet

Bestimmung der **Emissionen aller Quellen** des Flughafens

heterogene Verteilung

Emissionsfaktoren lückenhaft

**bisher üblich:**

Emissionen von Flugzeugtriebwerken werden nach den **Vorschriften der ICAO** bei der Zertifizierung am neuen Triebwerk gemessen

**in situ** Messverfahren für CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO, UHC und Ruß

**LTO-Zyklus:** 7, 30, 85 und 100 % des maximalen Schubs

Erfassung in Datenbank

**hier neu:**

Messung der Emissionsindizes **der Flugzeuge auf Flughäfen**

Berührungslose Messverfahren sind die einzige Möglichkeit, die

**Emissionsquellstärken am Ort der Abgasfreisetzung**

**zu bestimmen**

## Messverfahren

### FTIR-Emissionsspektrometrie

- **passive Messung der Strahlungsemission des Abgases**
- **Messung direkt hinter dem Düsenausgang**
- **Auswertung spektraler Signaturen von CO, NO, CO<sub>2</sub>**
- **Messzeiten ca. eine Minute**

## Messsysteme:

- FTIR-Spektrometer gekoppelt mit Infrarot-Kamera
- Abtastendes Drehspiegelsystem zur Erfassung der Abgasfahne

## Messgenauigkeit:

- Kalibration mittels Bestimmung der Gerätefunktion aus CO-Zellen-Messung
- Vergleich mit Abgasprobenahme und in situ Messverfahren
- $\pm 30 \%$

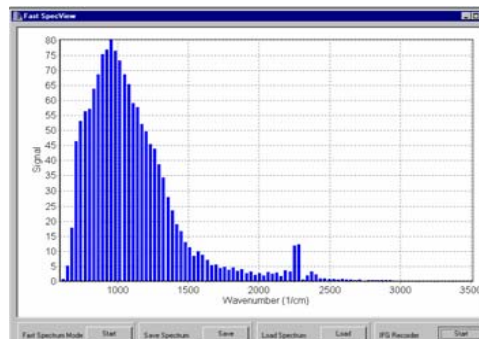
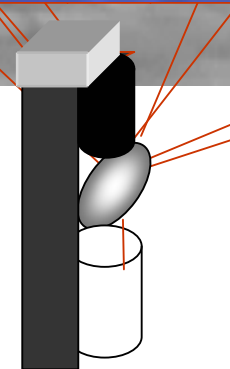
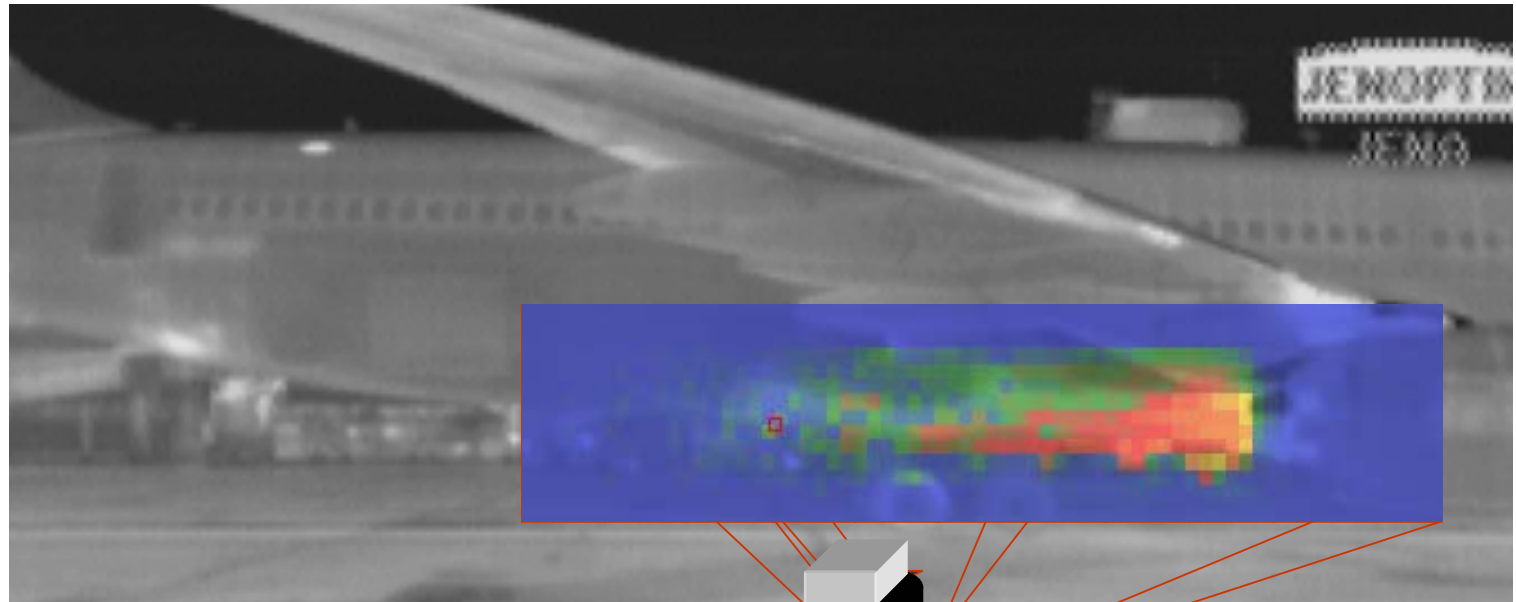
Bestimmung der **Emissionsindizes** von Triebwerken und Auxiliary Power Units (APU) am stehenden Flugzeug

---

## Scanning Infrared Gas Imaging System (SIGIS)

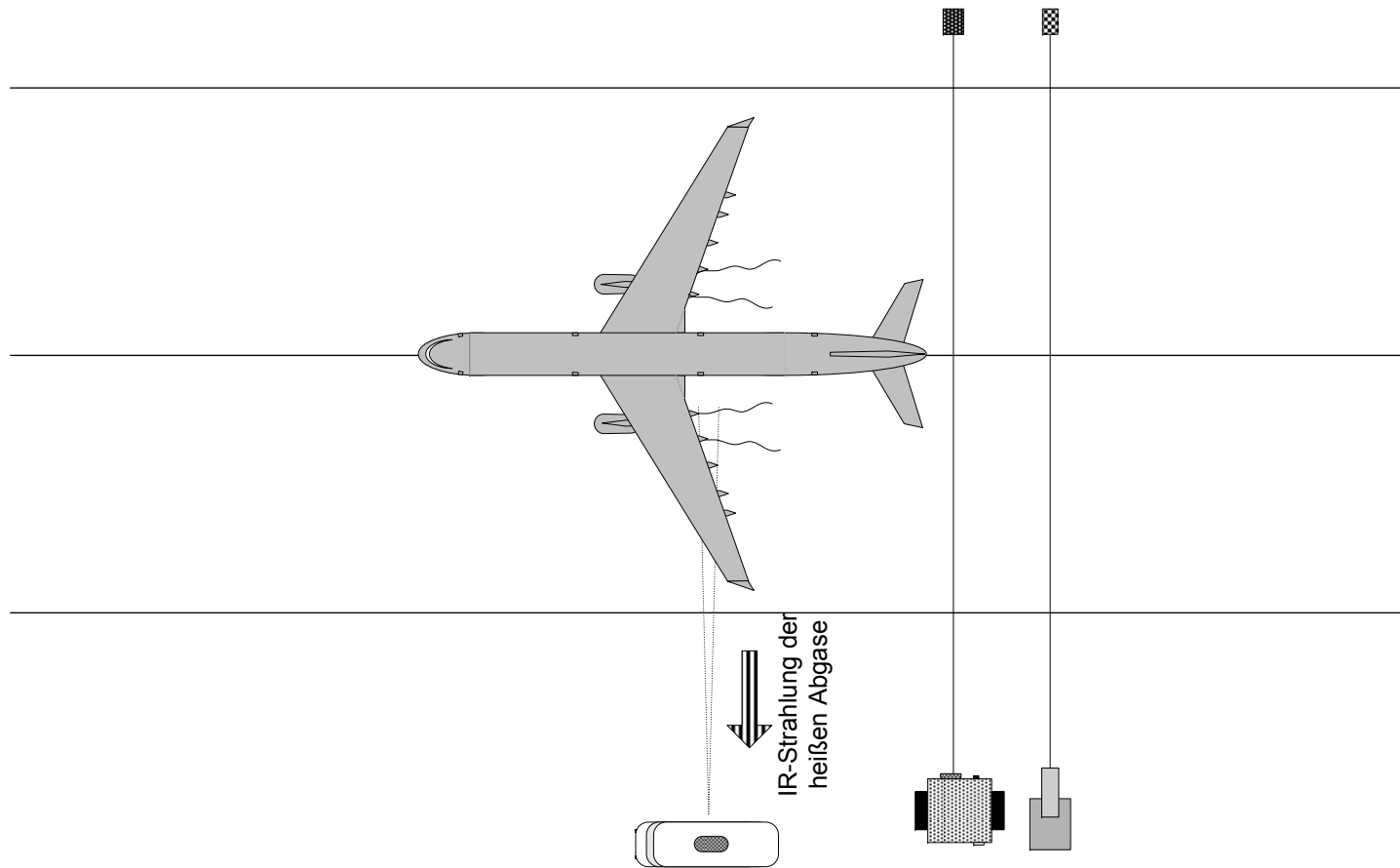


# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



## Offen-Pfad-Messungen mit FTIR und DOAS

### Bestimmung von CO, NO, NO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>



## Ergebnisse für einzelne Flugzeuge

**Vergleich** der Triebwerks-Messergebnisse von ca. 100 verschiedenen Flugzeugen im Leerlauf mit den Angaben der **ICAO-Datenbank**

**CO-Emissionsindex maximal 30 % höher**

**NO<sub>x</sub>-Emissionsindex geringer (ca. 50 %)**

Schäfer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B., Bacher, M.: Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports. Atmospheric Environment 37, 37 (2003), 5261-5271

**Wegen Treibstoffeinsparungen ist der Schub der Triebwerke geringer als 7 % des Maximums**



Daten gleicher **APU-Typen** haben eine **große Schwankungsbreite**  
unterschiedliche Lastzustände der angetriebenen Generatoren und  
Kompressoren für die Bordversorgung des Flugzeuges  
(Beleuchtung, Klimatisierung, Anlassen der Triebwerke)

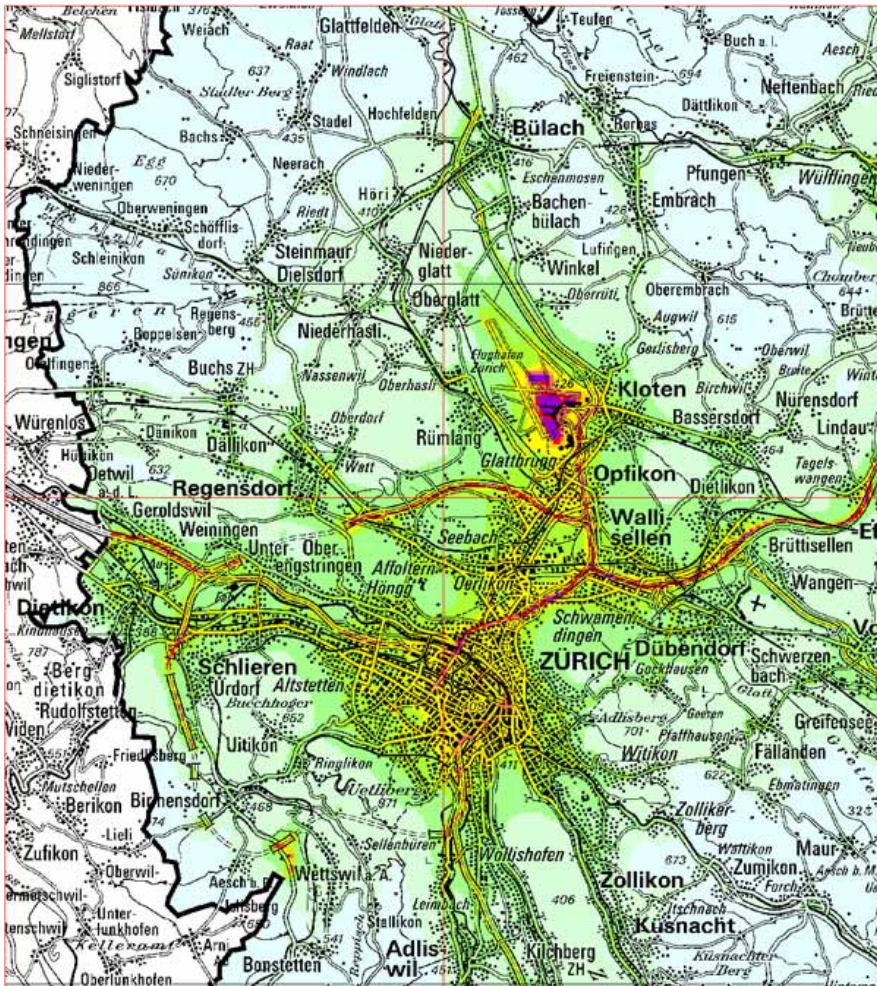
**NO-Emissionen der APU auf Flughäfen** sind eine ernst zu nehmende  
**Luftbelastung**

NO-Emissionsindex der APU kann von gleicher Größe wie der NO-  
Emissionsindex der Triebwerke sein

Treibstoffverbrauch der APU zwar geringer als der der Triebwerke,  
aber wesentlich längere Betriebszeiten

# Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft

Erfassung heterogener Emissionsquellverteilungen auf dem Flughafengelände



# Inverse Ausbreitungsmodellierung

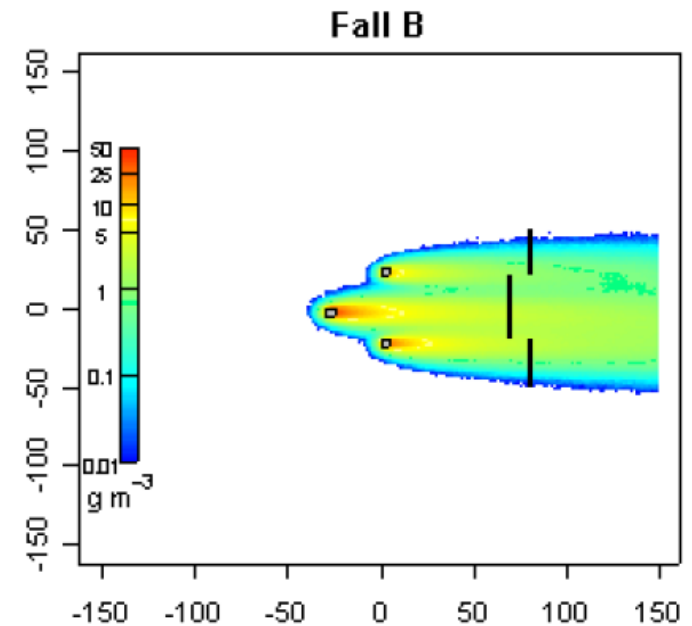
Quellen

Ausbreitung

Konzentration



$$\underline{c}_{\text{mess}} = \mathbf{g}(\underline{q}) + \varepsilon$$

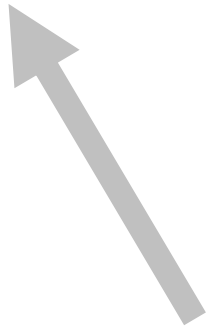


## Erste Lösungsmethode

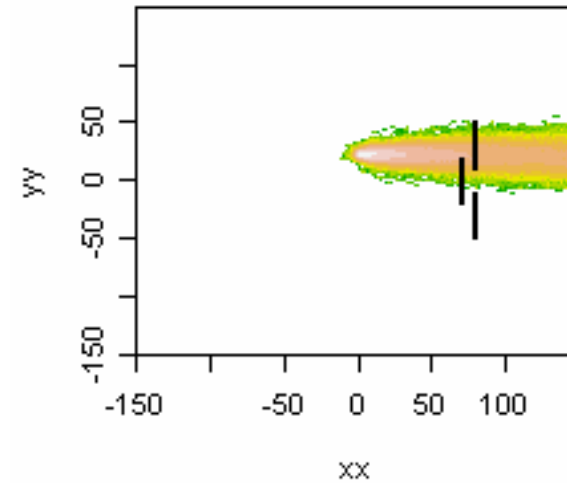
$$|g(\underline{q}) - \underline{c}_{\text{mess}}| = \min$$

$$|G\underline{q} - \underline{c}_{\text{mess}}| = \min$$

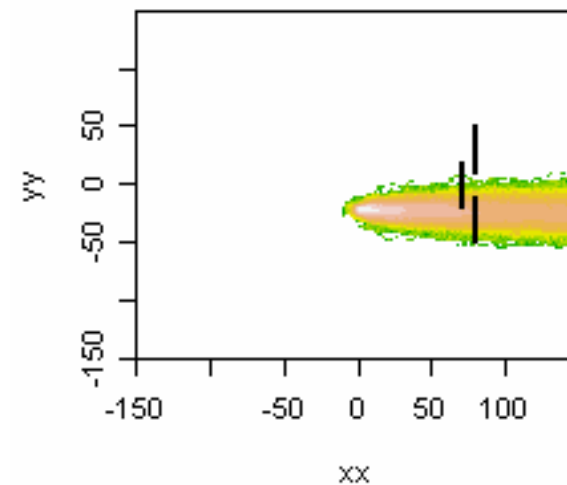
Lagrange'sches  
Dispersionsmodell

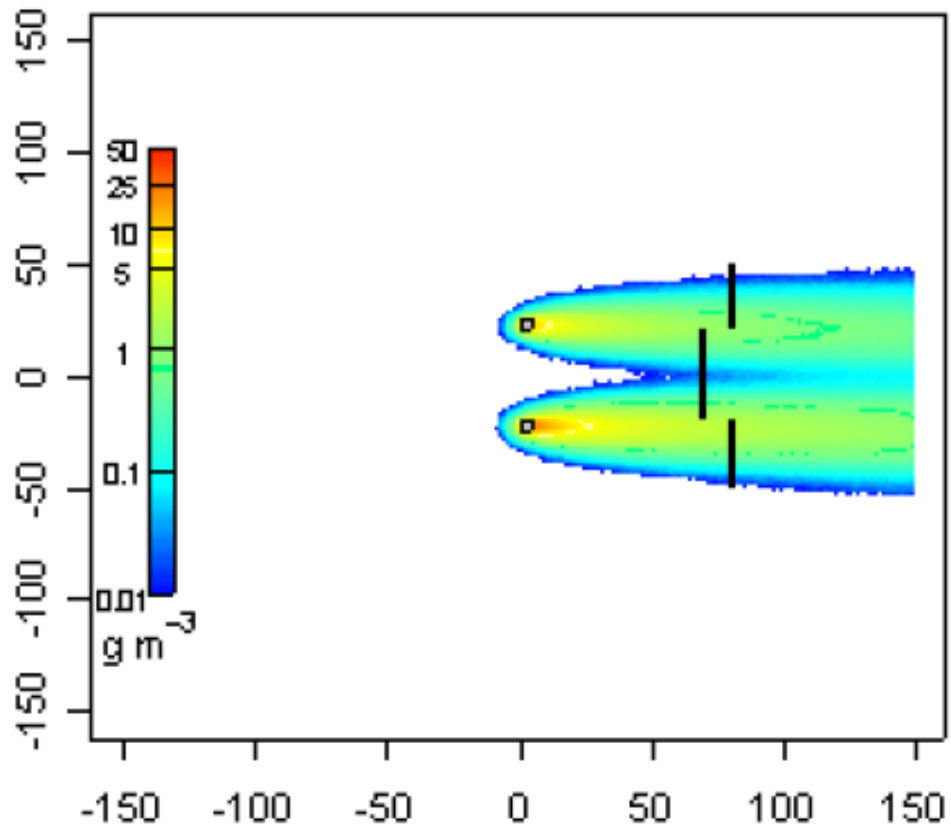


1



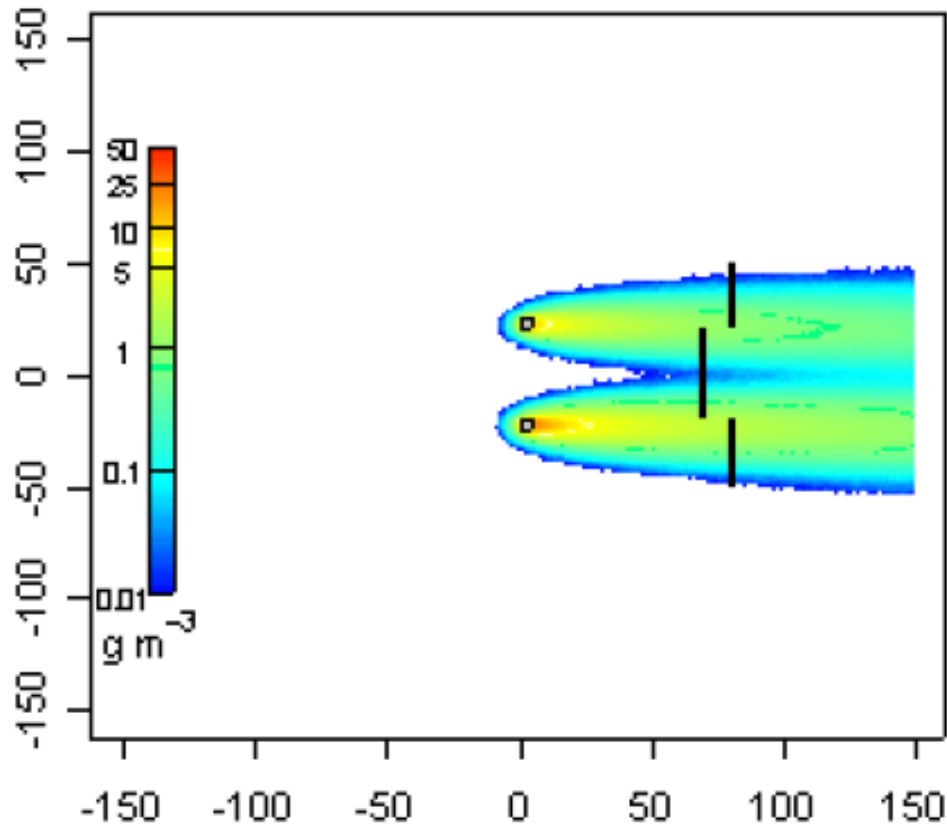
2



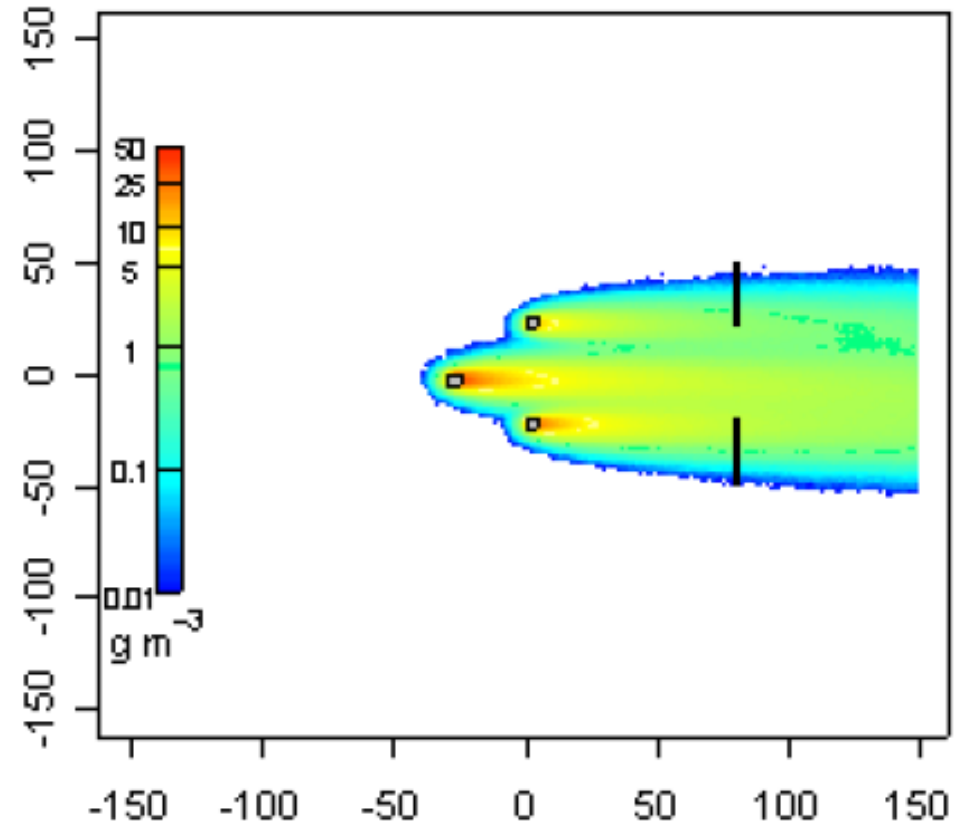


Überbestimmte

Probleme



Überbestimmte



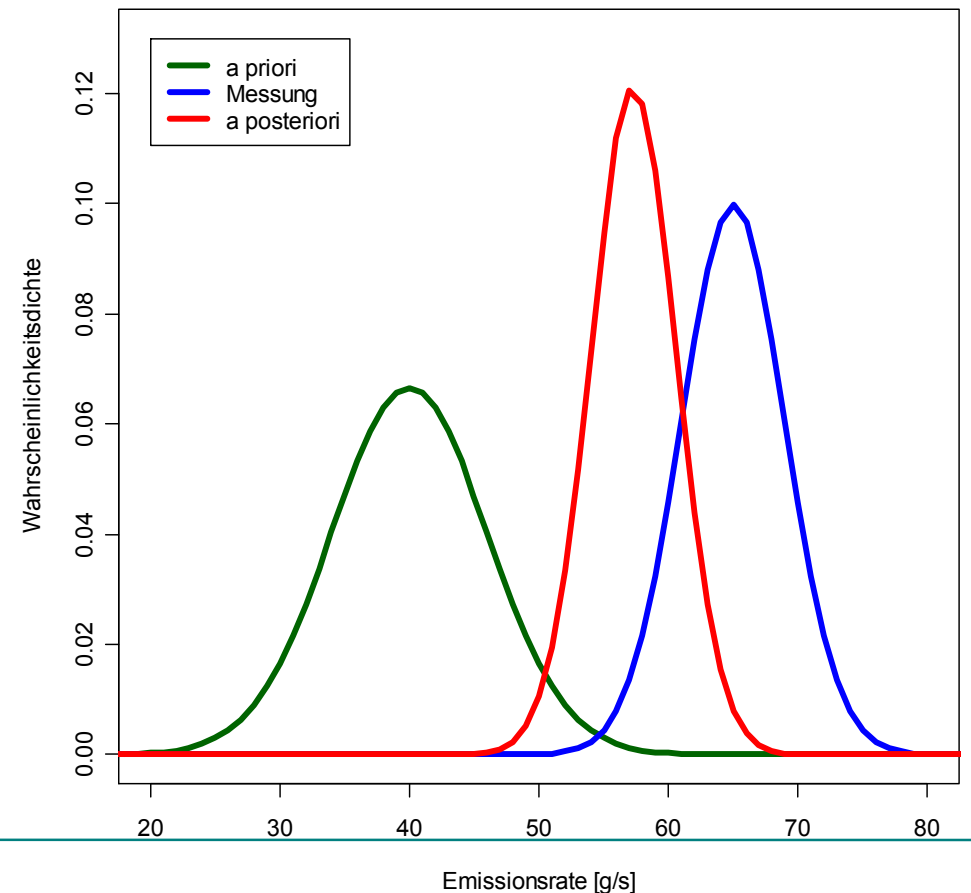
Unterbestimmte

Probleme

## Alternative Lösungsmethode nach Bayes (Benutzung von Vorwissen)

$$\bullet (\underline{G}\underline{q}-\underline{c}_{\text{mess}})^T \underline{C}_M^{-1} (\underline{G}\underline{q}-\underline{c}_{\text{mess}}) + (\underline{q}_{\text{prio}}-\underline{q})^T \underline{C}_A^{-1} (\underline{q}_{\text{prio}}-\underline{q})$$

- $\underline{q}_{\text{prio}}$ : A-priori Emissionsrates
- $\underline{C}_M$ : Kovarianz der Messung
- $\underline{C}_A$ : Kovarianz des a-priori



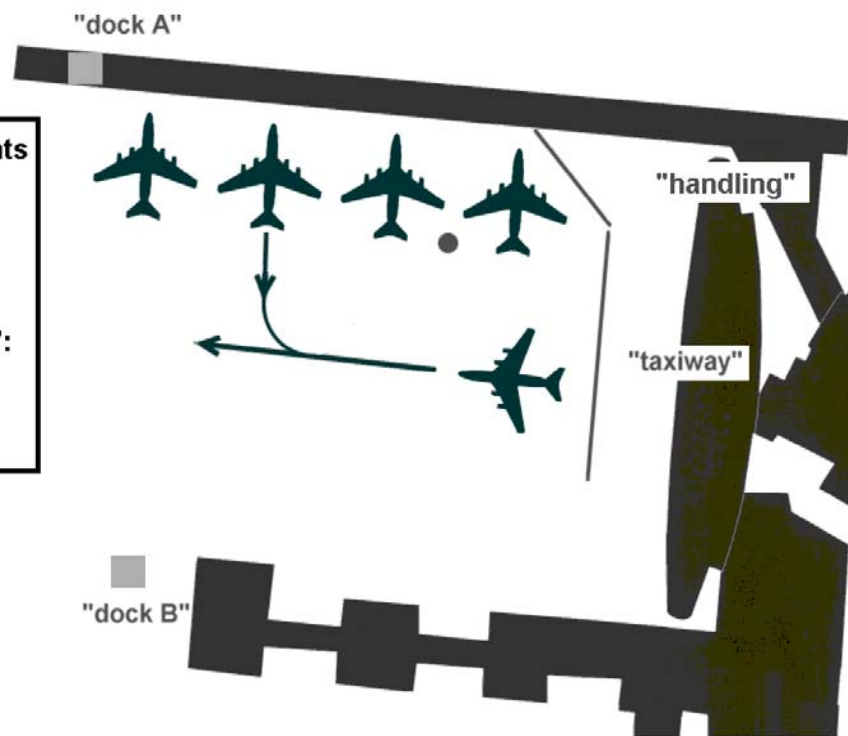
# Flughafen Zürich

● Measurement of Wind    — Open path measurement    ■ In situ measurement

Measured components

"dock A"/"dock B":  
NO  
NO<sub>2</sub>

"handling"/"taxiway":  
NO  
NO<sub>2</sub>  
CO



Offen-Pfad-Messungen über die Rollbahn und die Standplätze der Flugzeuge am Terminal (DOAS & FTIR)

Detaillierte Beobachtung der Flugzeugbewegungen und der Abfertigungsaktivitäten



# Dispersionsmodell

Wind field

**Austal 2000**

(Ingenieurbüro Janicke)

Erfassung der  
Gebäudeumströmung

Vorherrschend westliche  
Winde



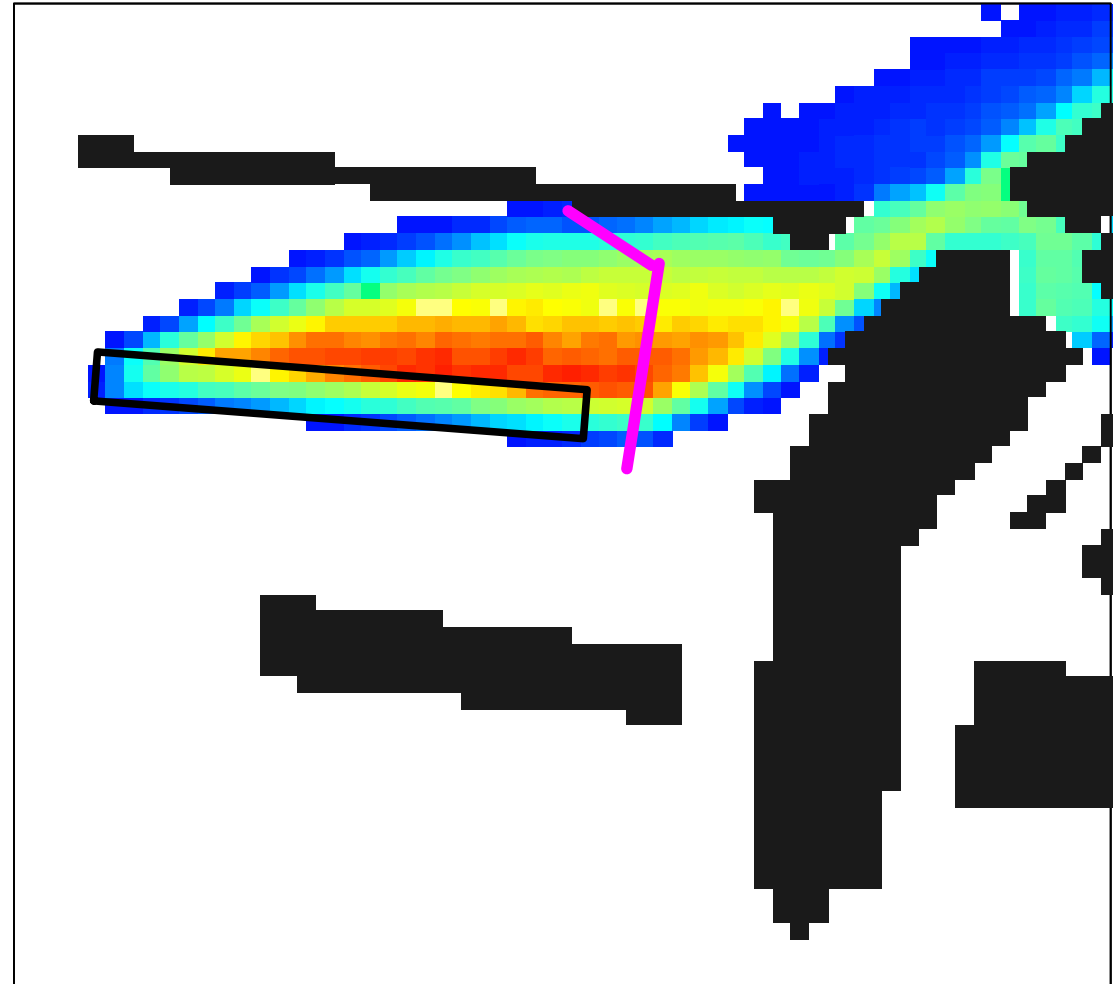
# Inverse Methode

## Aufsetzen des Modells

- Emissionsquellen sind Volumen- oder Flächenquellen
- Offen-Pfad-Messungen vorteilhaft für die Erfassung heterogener Quellkonfigurationen

## Inverse Methode

- Least Squares Fit von modellierten und gemessenen Konzentrationen



# Ergebnisse Zürich

Flugzeuge auf Rollbahn  
Halb-Stunden-Emissionen:

CO: 0.4 – 7.5 g/s  
NO: 0.3 – 300 mg/s  
NO<sub>2</sub>: 13 – 407 mg/s

Abfertigung:

CO ist um den Faktor 10 geringer  
NO und NO<sub>2</sub> vergleichbare  
Emissionsraten

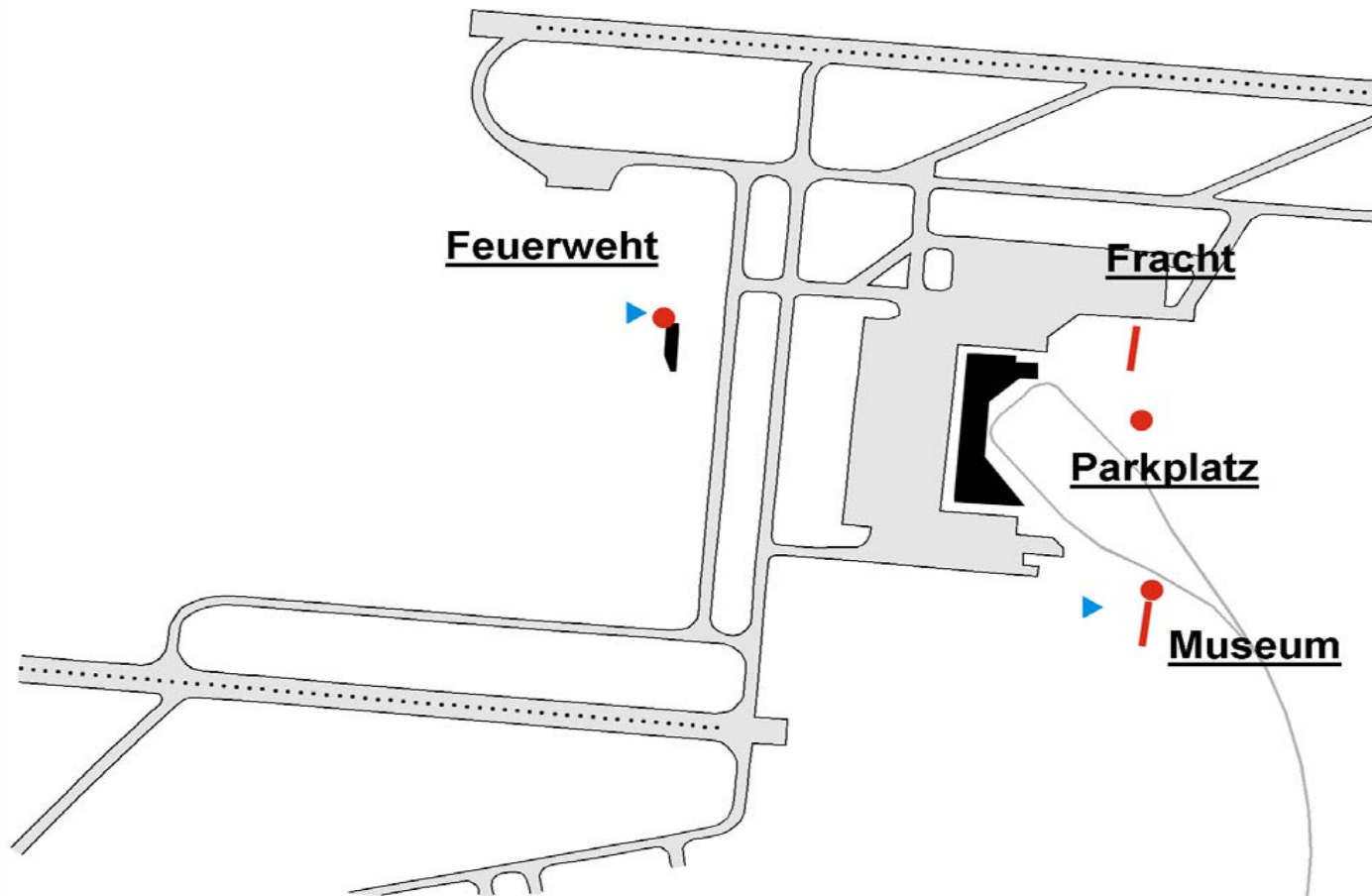
Schürmann, G., Schäfer, K., Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E., Rappenglück, B.:  
The impact of NO<sub>x</sub>, CO and VOC emissions on the air quality of the airport Zurich. Atmospheric  
Environment 41 (2007), 103-118

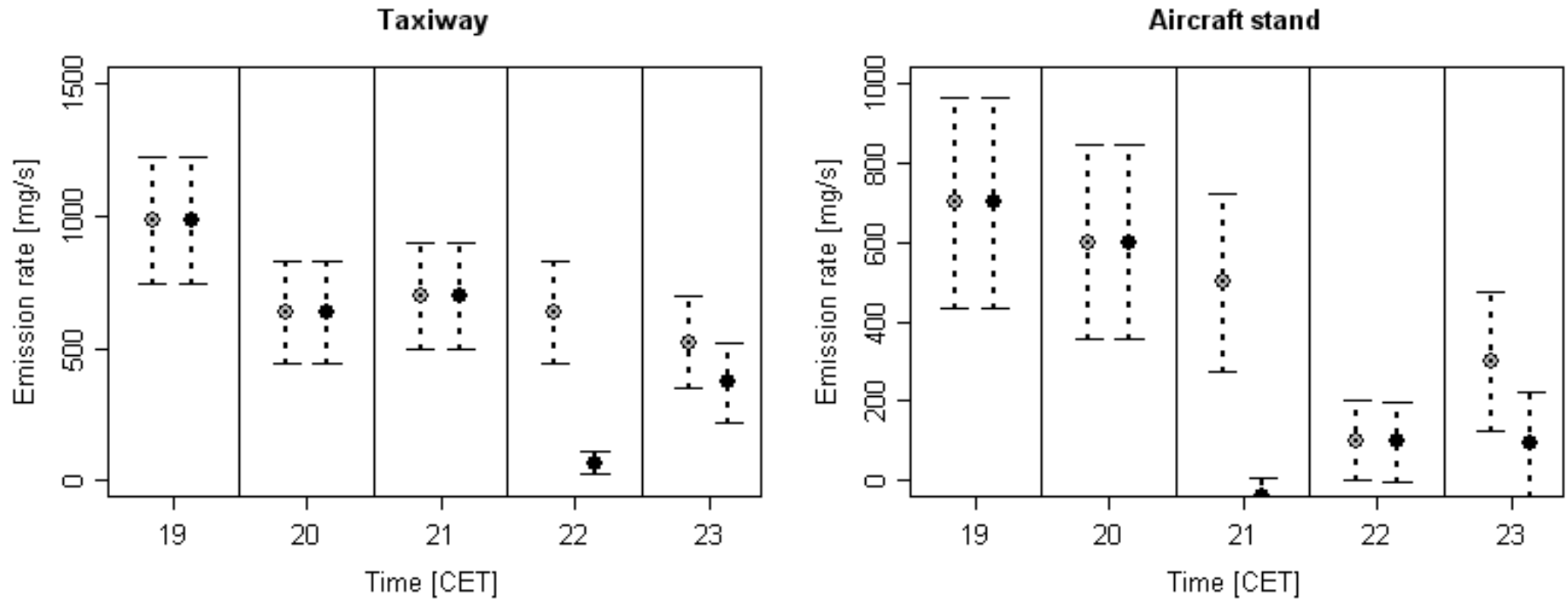
# Flughafen Budapest

0 100 200 300 Meter

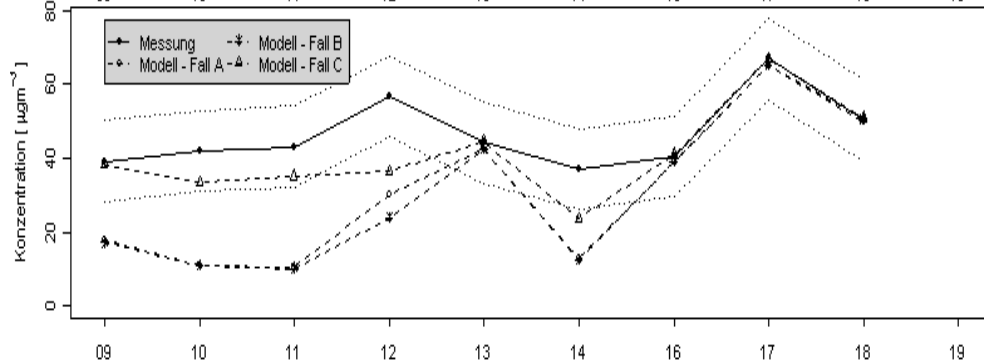
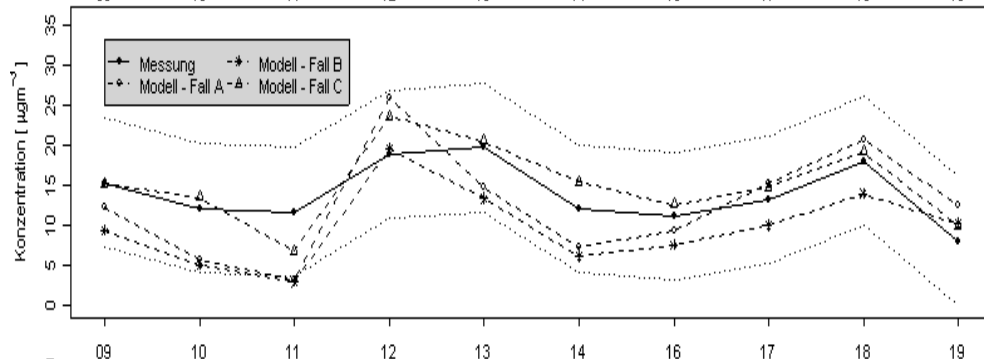
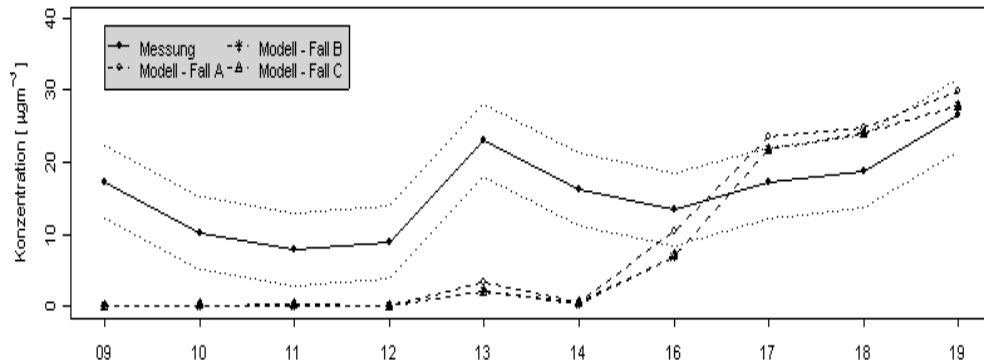


- In Situ
- DOAS/K300
- ▶ Meteo





# Ergebnisse Budapest



NO<sub>x</sub>

Standplatz (pro Flugz.) ~ 20 mg/s  
Rollbahn (pro Flugz.) ~ 40 mg/s  
Rollbahn (max) 1500 mg/s  
Parkplatz (max) 3000 mg/s  
Fracht (max) 1500 mg/s

wichtigste Quelle Parkplatz,  
gefolgt von Rollbahn und Fracht

# Schlussfolgerungen

- Verkehr, Frachtareale und Abfertigungsprozesse sind wichtige Quellen für  $\text{NO}_x$  auf Flughäfen
- CO wird im Wesentlichen von Flugzeugen emittiert (mit Ausnahme der Startvorgänge)
- Inverse Methoden sind ein brauchbares Instrument zur Bestimmung von Emissionen aus der Ferne. Der Flughafenbetrieb wurde während den Messungen nicht gestört
- Inverse Methoden können dazu benutzt werden, Emissionsinventare zu überprüfen

Förderung dieser Arbeiten im Rahmen der Projekte AEROJET (BRPR-CT-96-142), AEROJET II (BRPR-CT-98-0618), ARTEMIS (1999-RD.10429) und AEROTEST (AST3-CT-2004-502856) sowie der Lufthansa AG und ONERA

Ohne die Kooperation mit den Flughäfen und Fluggesellschaften wären diese Ergebnisse nicht möglich gewesen

---



# **Emissionsmessung von N<sub>2</sub>O an der Bodenoberfläche auf einer Skala von 100 m**

**Klaus Schäfer, Carsten Jahn, Stefan Emeis, Herbert Hoffmann**  
**IMK-IFU, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Garmisch-Partenkirchen**

**Michael Wiwiorra**

**Institut für Bodenkunde, Universität Hannover**

**Armin Raabe**

**Institut für Meteorologie, Universität Leipzig**

---

## Zielstellungen

**Bestimmung der N<sub>2</sub>O-Emissionsraten an der Bodenoberfläche**

- **Beitrag zur Bestimmung der N<sub>2</sub>O-Emissionsraten aus dem Grundwasser**
- **Beitrag zur Erfassung der Einflüsse auf die N<sub>2</sub>O-Emissionsraten an der Bodenoberfläche**

**Up Scaling von gleichzeitigen Glockenmessungen, die auf einer Fläche von ca. 0,05 m<sup>2</sup> erfolgen, auf eine Fläche von ca. 500 m<sup>2</sup>**

---

## Zielstellungen

**Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit in der ungesättigten Zone durch Messung der Emissionsraten des in den Boden injizierten Tracers  $SF_6$  an der Bodenoberfläche (Zusammenarbeit mit Konsortium):**

**$SF_6$  wird gasförmig auf die Oberfläche der gesättigten Zone injiziert**

**Untersuchung der Diffusionseigenschaften der ungesättigten Zone**

## Aufgabenstellungen

**Messung der Emissionsraten der aus der gesättigten und ungesättigten Zone emittierten Gase  $N_2O$  und  $SF_6$  an der Bodenfläche auf einer Fläche von ca. 500 m<sup>2</sup>**

**Langfristige Messungen zur Erfassung der Verhältnisse bei unterschiedlichen Grundwasserständen und Wassergehalten der ungesättigten Zone**

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



## Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft**



Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Messergebnisse

