

# Die vierte Dimension der Stadtmeteorologie

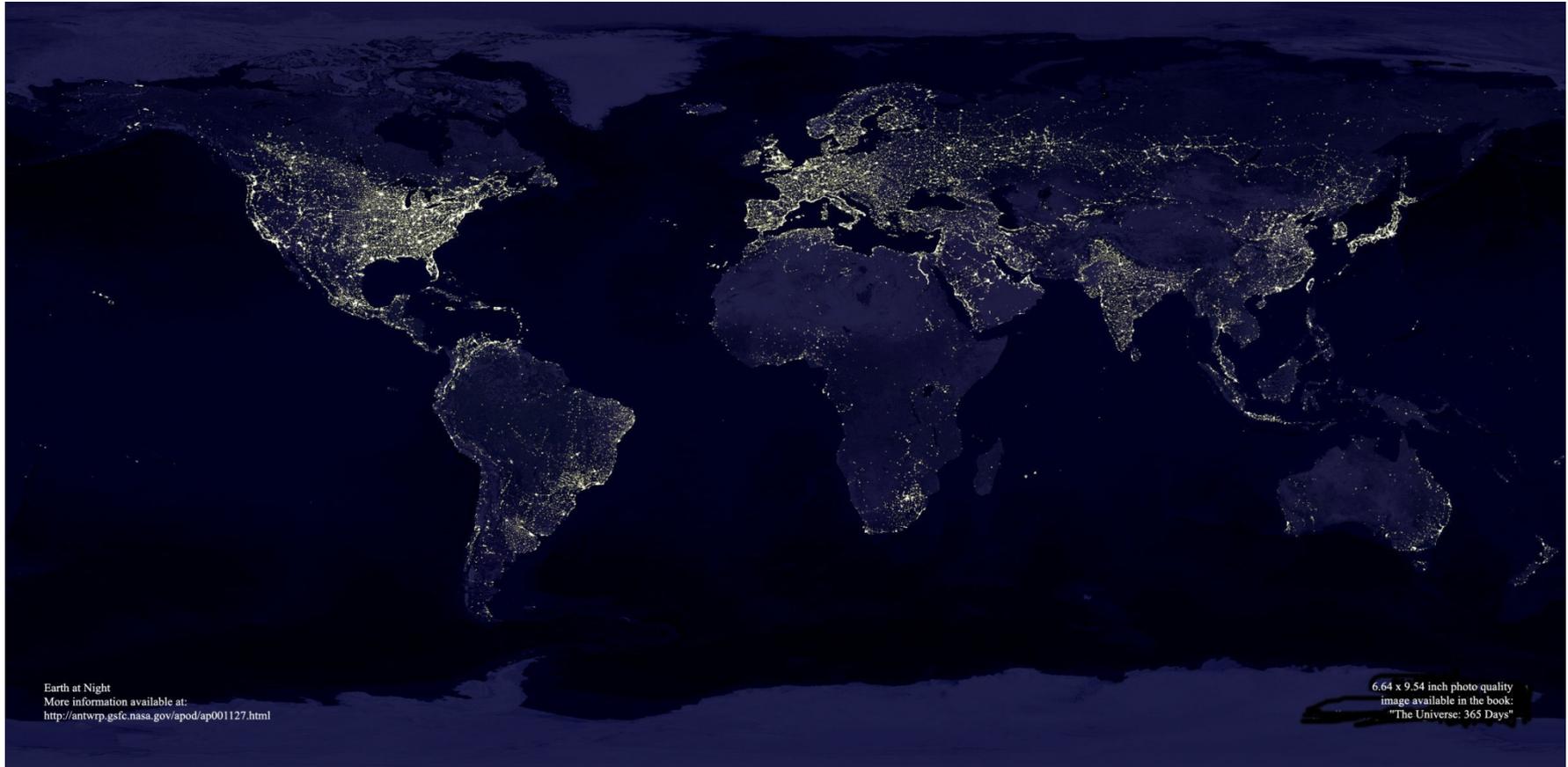
**Stefan Emeis**

**IMK-IFU, Karlsruhe Institute of Technology, Garmisch-Partenkirchen**

**[stefan.emeis@kit.edu](mailto:stefan.emeis@kit.edu)**

INSTITUTE OF METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH, Atmospheric Environmental Research





## Die globale Verstadterung und Vernetzung

## Herausforderungen / Hintergrund

Seit 2008 leben über die Hälfte aller Menschen in Städten

Städte sind dominierender Faktor für Stoff- und Energieflüsse, die sich wesentlich auf Klima und Umwelt auswirken (in beiden Richtungen)

Zukunftsfähigkeit und Resilienz urbaner Systeme hängt vom nachhaltigen Management dieser Stoff- und Energieflüsse ab

Anpassungs- und Vermeidungsstrategien für urbane Systeme müssen entwickelt werden (bei Erhaltung und Steigerung der Lebensqualität)

Urbane Ökosysteme, ihre Entwicklung und ihre Einbindung in Stadtentwicklungsprozesse bilden wichtiges Forschungsfeld

## Stadtmeteorologie und –klimatologie häufig auf den Menschen bezogen

Klima-Michel-Modell

urbane Indices

Strahlungshaushalt

Wärmeinsel

Windklima, Luftqualität

...

üblicherweise **zwei** horizontale und **eine** zeitliche Dimension

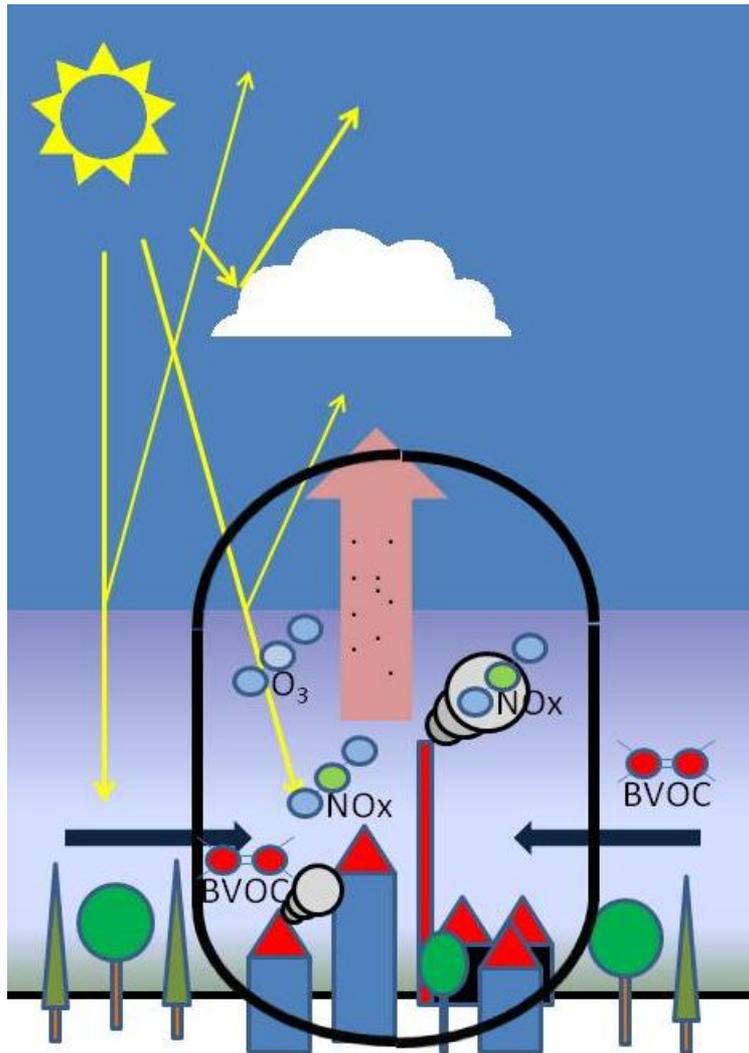
(Ausnahme: Rückwirkung auf den Niederschlag und die Gewitterbildung  
hier spielt auch die **vertikale, vierte** Dimension eine große Rolle)

Einbindung von Städten in größere systemare Betrachtungen wird  
verstärkt die Berücksichtigung der **vierten** Dimension erfordern



Photo: 2011 Stefan Emeis

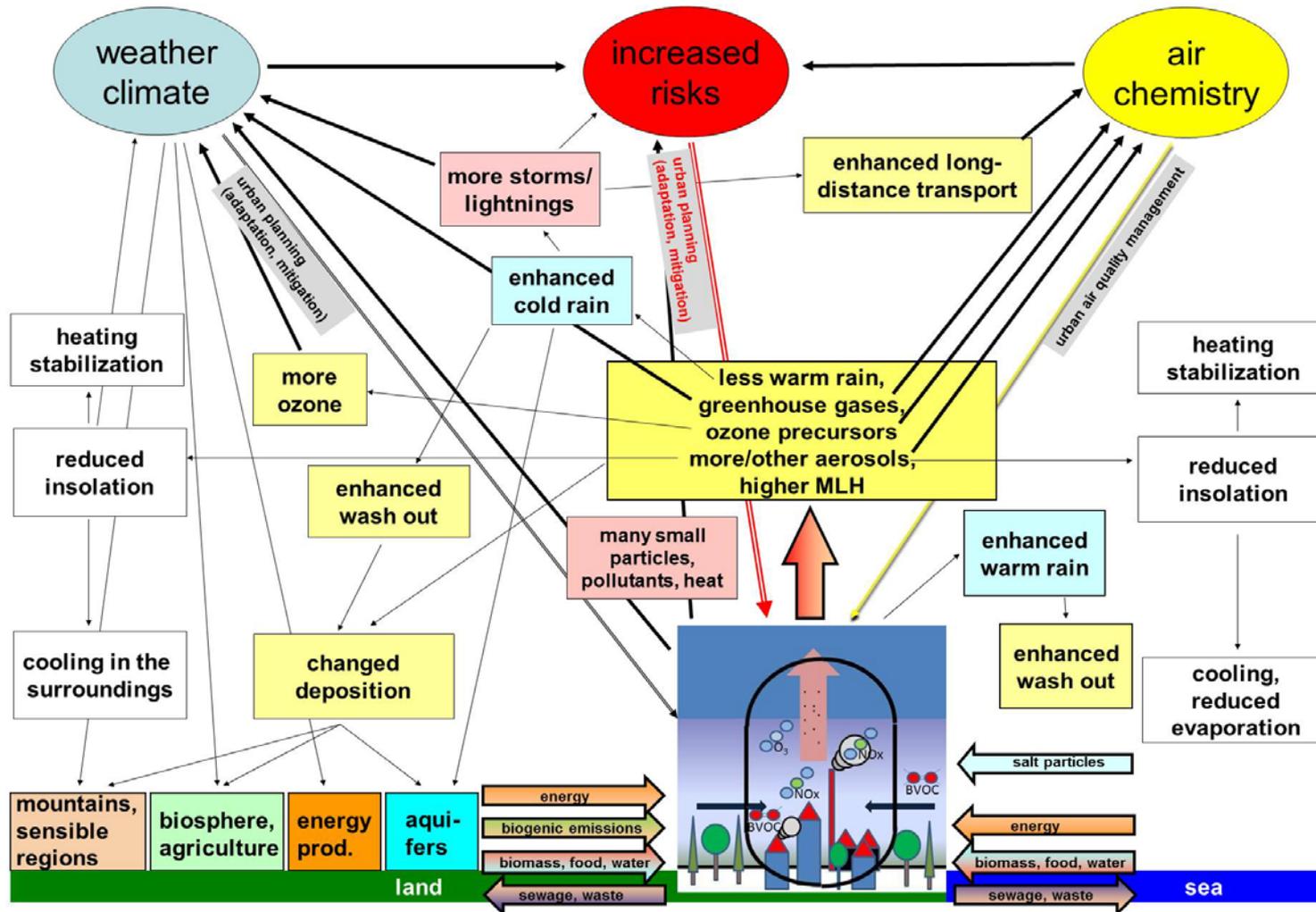
## **Warme Städte beeinflussen das lokale und regionale Klima (Wolken über Manhattan am 28. Mai 2011)**



**Interne Vorgänge und Austausch mit umgebenden Kompartimenten des Erdsystems**

- urbanes Wind- und Strahlungsregime
- urbane Wärmeinsel
- Sekundärzirkulationen und Stofftransporte
- natürliche Emissionen (innerhalb und außerhalb der Städte)
- anthropogene Emissionen
- Luftchemie, Aerosolbildung
- Wirkung auf lokale und regionale Luftqualität
- Wirkung auf regionales und globales Klima

# Verknüpfung des Systems Stadt mit anderen Kompartimenten des Erdsystems



**Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen bzgl. Luftqualität und Klimawandel sind notwendig, um die urbane Lebensqualität zu erhalten bzw. zu steigern.**

**In komplexen Systemen (wie dem Erdsystem als Ganzen oder den Städten als ein Untersystem) müssen Eingriffe wohl überlegt sein, da es viele nicht-lineare Wechselwirkungen gibt, deren Folgen kaum überschaubar sind.**

**→ Stadtforschung ist wichtig**

**→ kurz- und längerfristige Beobachtungen als Datengrundlage**

**→ Modelle zur Datenanalyse, zum Prozessverständnis, für Szenarien**

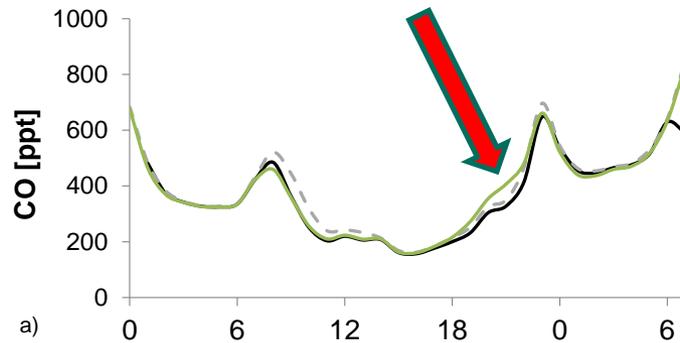
# Beispiel für einen Eingriff in ein komplexes System, um die urbane Wärmeinsel zu reduzieren:

- mehr Parks
- weiße Dächer

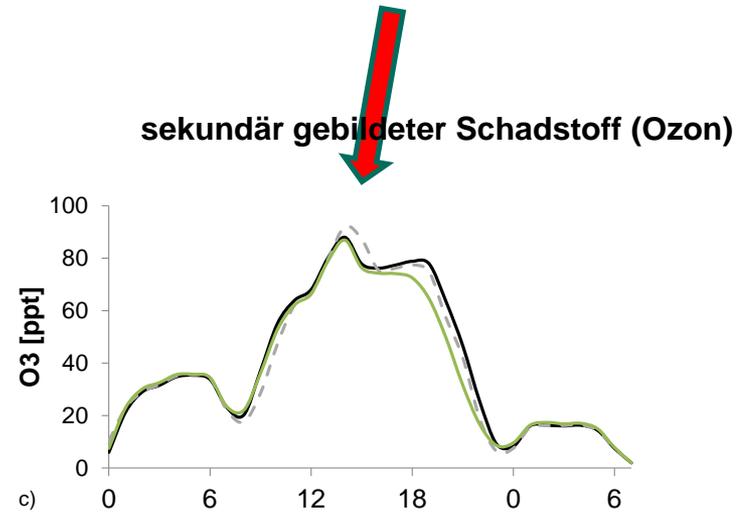
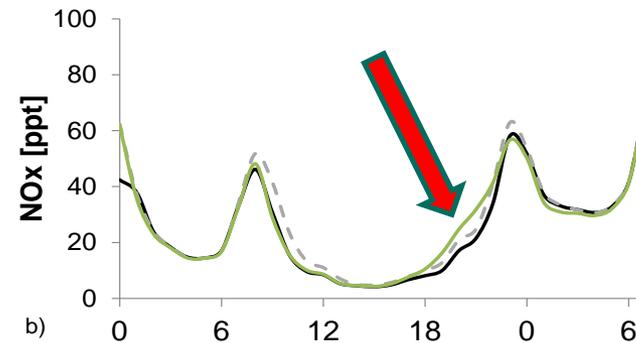
## WRF-Chem-Simulationen zeigen, dass das schlechtere Luftqualität zur Folge hat

(Fallmann, J., R. Forkel, S. Emeis, 2016: Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality. Atmos. Environ., 125, 199-211.)

- Kontrolle
- - - weiße Dächer
- Parks



### primär emittierte Schadstoffe (CO, NO<sub>x</sub>)



## **Weitere Beispiele für unerwünschte Nebenwirkungen:**

**das Pflanzen bestimmter Bäume (Pappeln, Platanen, ...) kann aufgrund der Isoprenemission zur Ozonbildung beitragen**

(<http://www.die-gruene-stadt.de/baeume-und-pflanzen-lassen-staedte-atmen.pdf>)

**das Pflanzen bestimmter Bäume und Sträucher kann zu einer Pollenemission beitragen, die für Allergiker ungünstig ist**

([http://www.pollenstiftung.de/uploads/media/Artikel\\_Allergo\\_Journal\\_2\\_2012.pdf](http://www.pollenstiftung.de/uploads/media/Artikel_Allergo_Journal_2_2012.pdf))

**das Pflanzen großer Bäume in engen verkehrsbelasteten Straßenschluchten kann aufgrund reduziertem Austausch die Luftqualität verschlechtern**

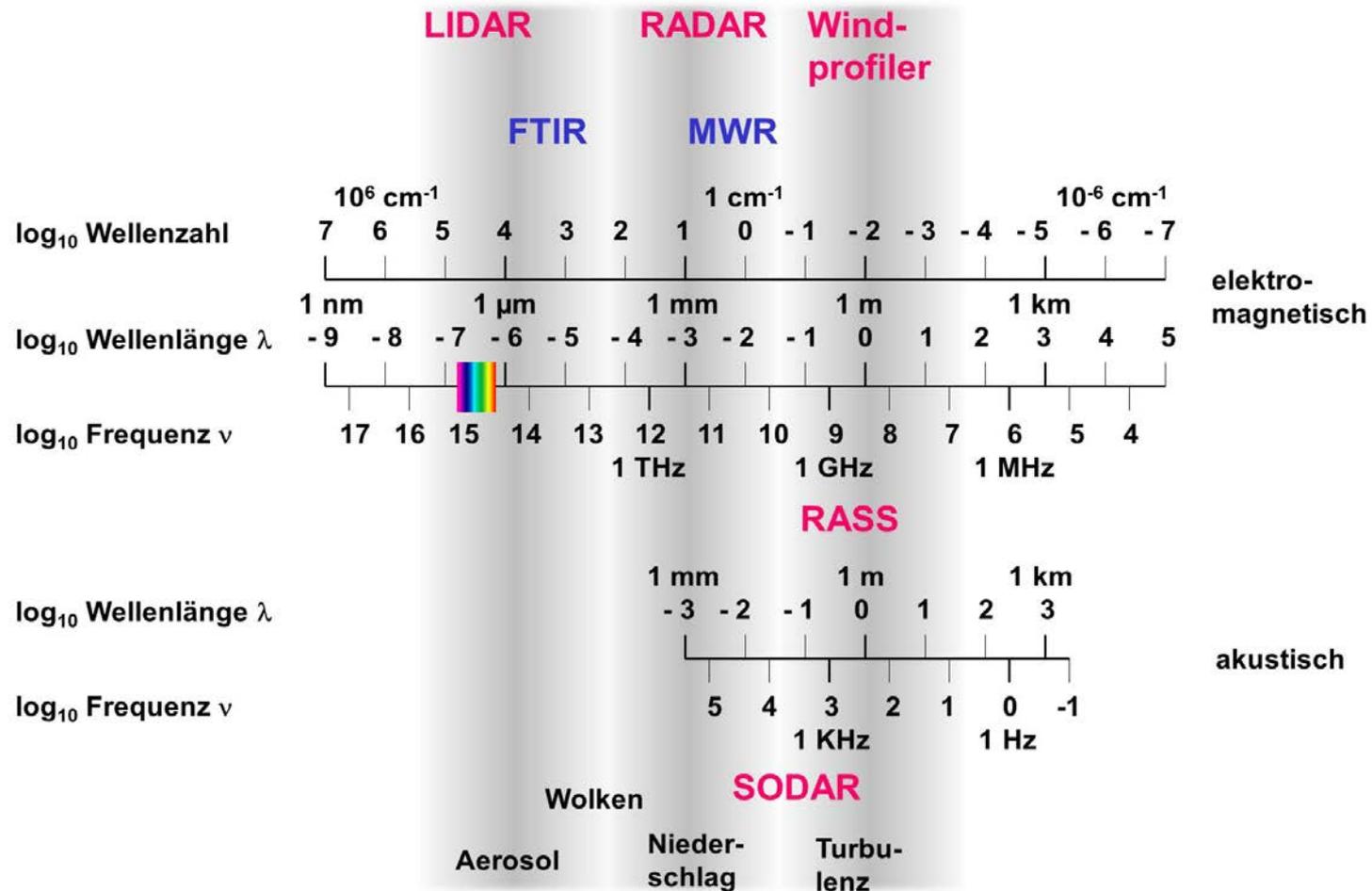
**größere Wasserflächen können Brutstätten für Insekten sein**

**größere Gebäude können stärkere Höhenwinde auf das Fußgängerniveau herab leiten**

...

# Fernmesstechnik und Drohnen zur Erkundung der vierten Dimension

## Frequenzen für Fernerkundungsverfahren



modifiziert nach Emeis, S., 2010: Measurement Methods in Atmospheric Sciences - In situ and remote. Borntraeger, Stuttgart, 272 pp., 103 figs, 28 tables, ISBN 978-3-443-01066-9.

# bodengestützte Fernmesssysteme am IMK-IFU

**MiniSODAR**,  
akustische Rückstreuung, Doppler  
Analyse → Wind, Turbulenz



**SODAR-RASS (Doppler-RASS)**, akustische und  
elektro-magnetische Rückstreuung, bestimmt  
Schallgeschw. → Wind und Temperaturprofile



**Wind-LIDAR**, optische Rückstreuung, Doppler  
Analyse, Wellenlänge  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  → Wind und  
Aerosolprofile

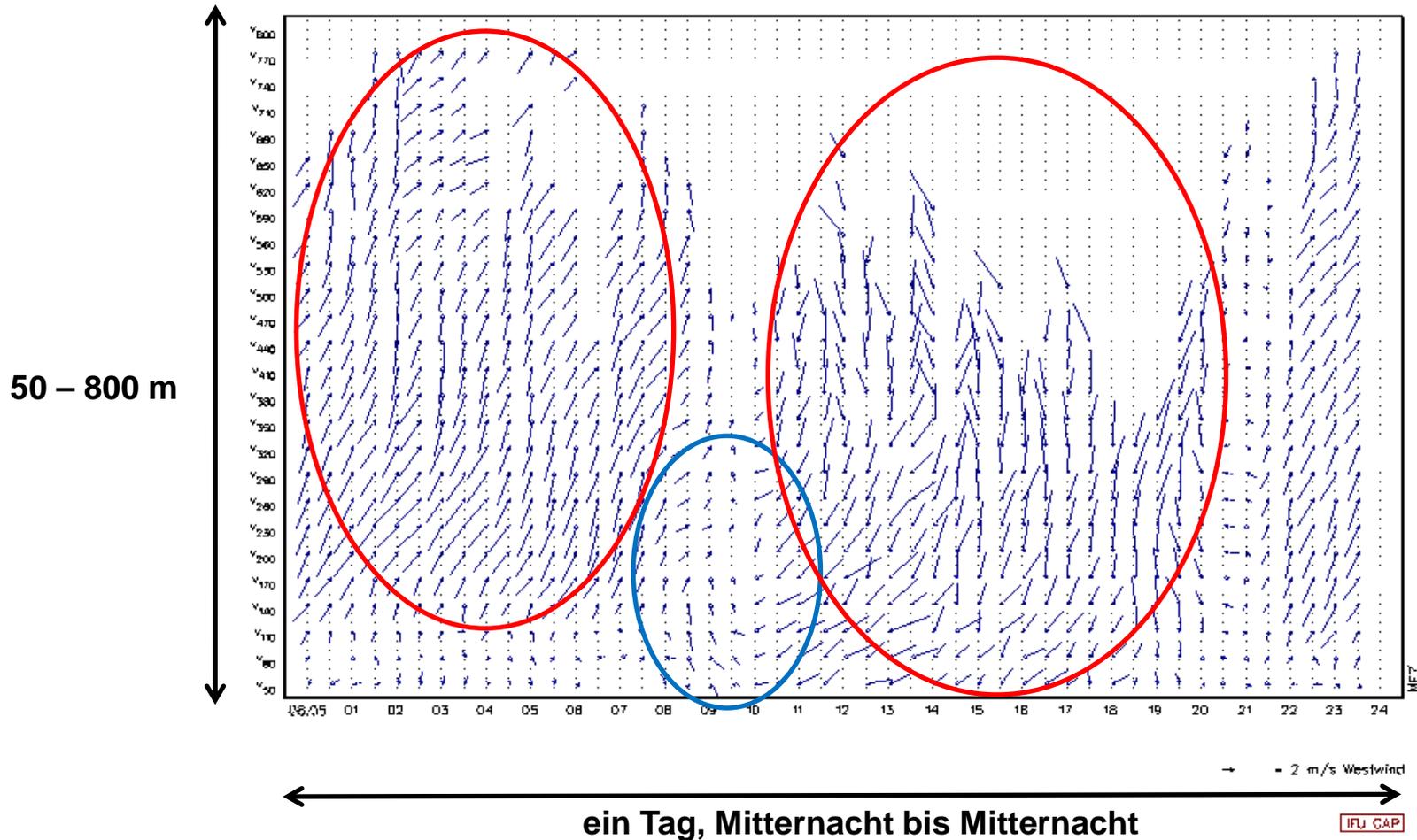


**Ceilometer**, optische  
Rückstreuung, Pulse  
Wellenlänge  $\sim 0.9 \mu\text{m}$   
→ Aerosolprofile

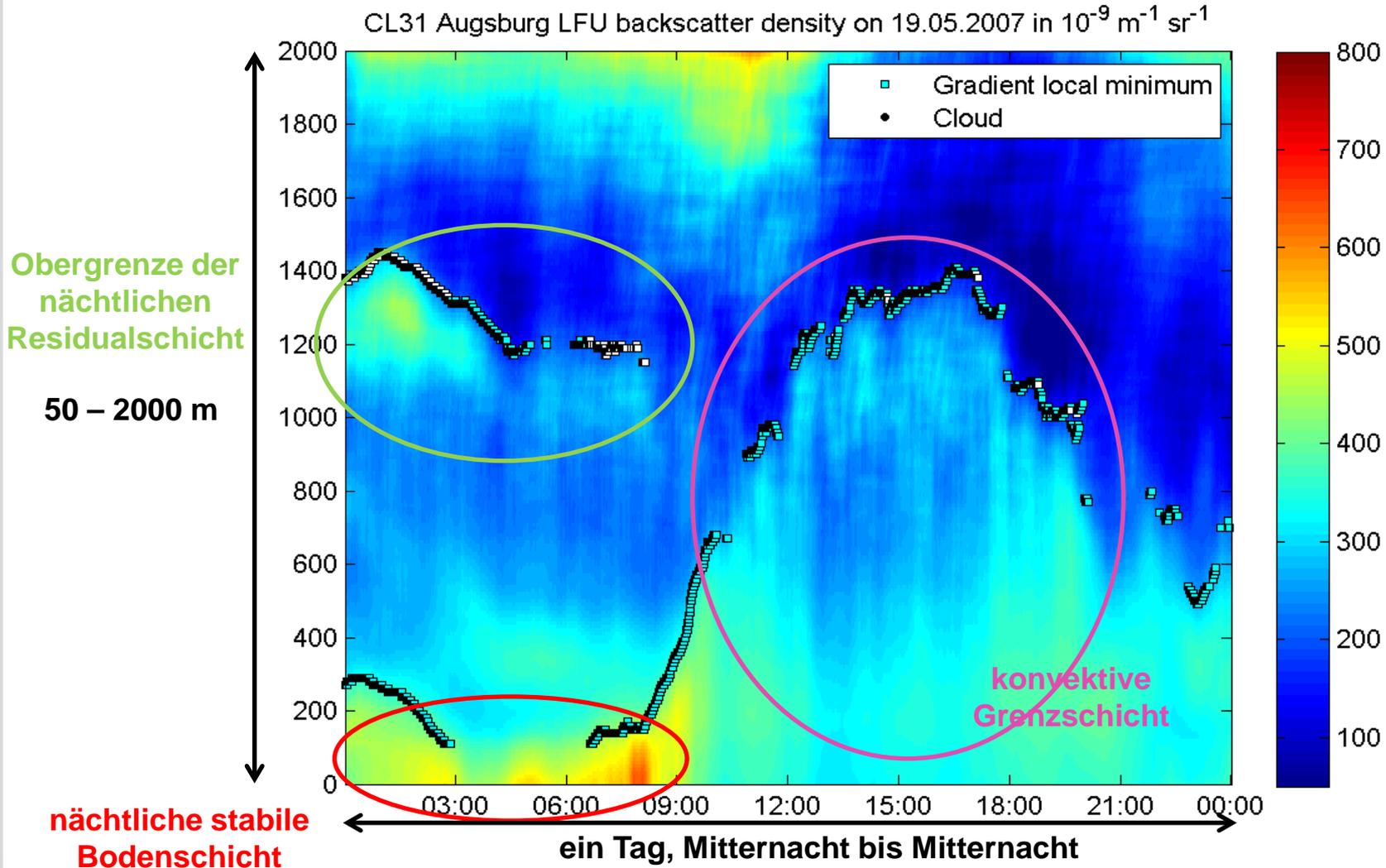


image:  
Halo Photonics

# Beispiel SODAR/Wind-Lidar: Zeit-Höhenschnitt der horizontalen Windgeschwindigkeit (gemittelt über ca. 30 min und ca. 30 m)



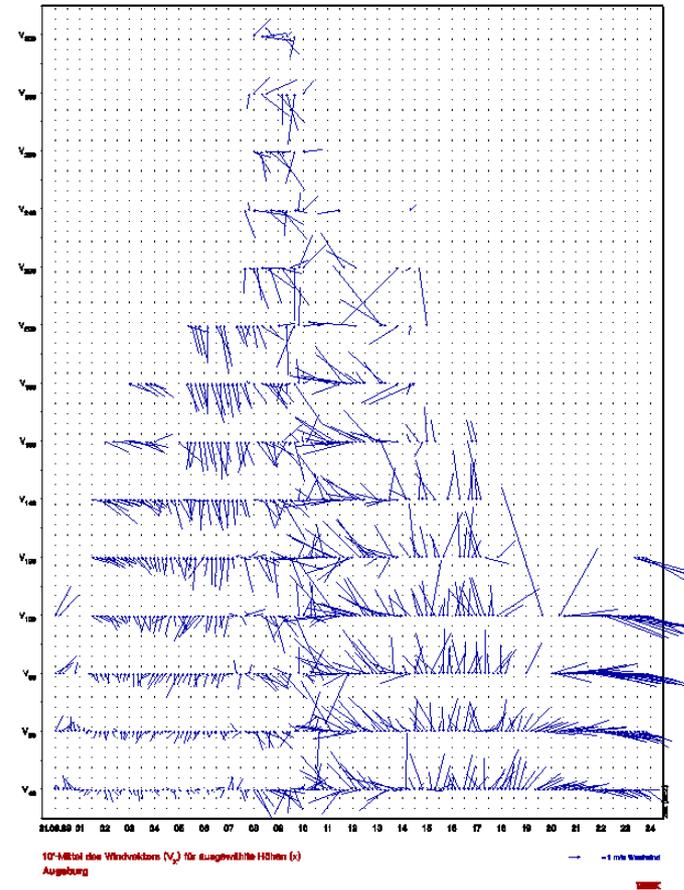
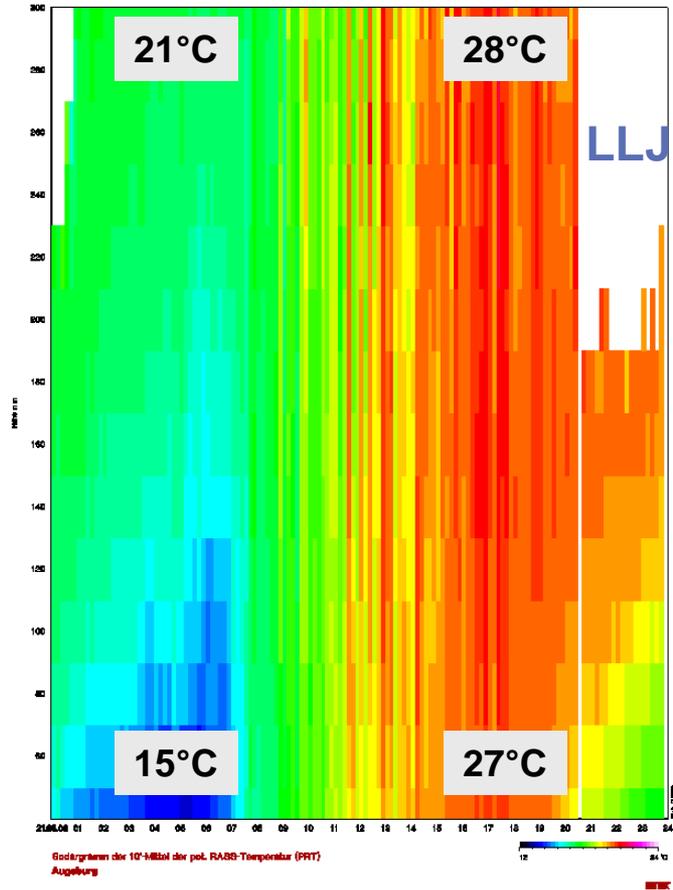
# Beispiel Ceilometer: tägliche Variation der Struktur der Grenzschicht (15 s und 150 m-Mittel)



# Beispiel RASS: Sommertag

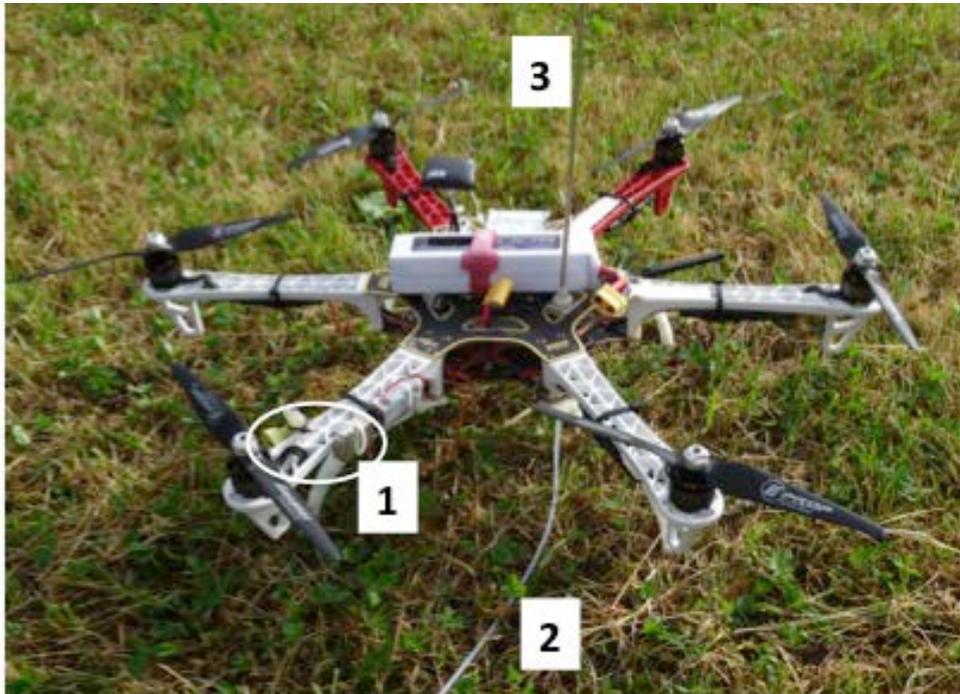
## potentielle Temperatur (links), horizontaler Wind (rechts)

300 m



# Luftgestützte Messsysteme am IMK-IFU

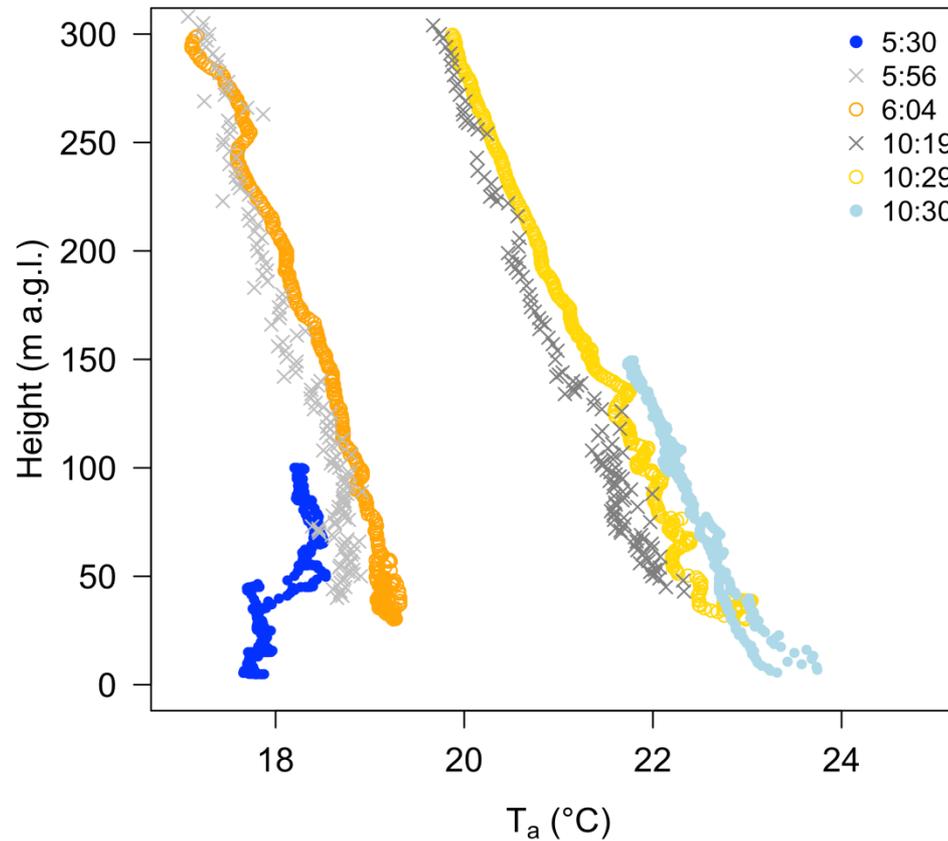
## Drohne (Hexakopter)



- 1 Air temperature and humidity sensors
- 2 Teflon tube
- 3 Tube extension above hexacopter

# Beispiel Drohne: Sommertag aktuelle Temperaturprofile im Laufe des Vormittags

Vertical air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) profiles - 15.07.2015



## **Herausforderungen bei der Modellierung:**

**es wird ein Modell(system) gewünscht, dass alle Vorgänge von der Straßenschlucht bis zur regionalen Stadt-Umland-Wechselwirkung abbildet**

### **(z.B. Vorgabe BMBF-Stadtklimaausschreibung 2015):**

Es soll mikroklimatische Simulationen für Großstädte mit allen für das Stadtklima und darüber hinaus relevanten Klimavariablen durchführen können. Eine Simulation von Modellflächen mit einer Größe von 1 000 bis 2 000 km<sup>2</sup> soll mit diesem Modell möglich sein.

- Das Stadtklimamodell soll in der Lage sein, Gebäude aufzulösen und eine Gitternetzweite von 10 m oder kleiner simulieren können.
- Es soll mit komplexen Geländeformen umgehen können (Integration von digitalen Geländemodellen).
- Es soll mit regionalen und globalen Klimamodellen gekoppelt (Nesting) und mit Messdaten angetrieben und gesteuert werden können (Nudging/Forcing).

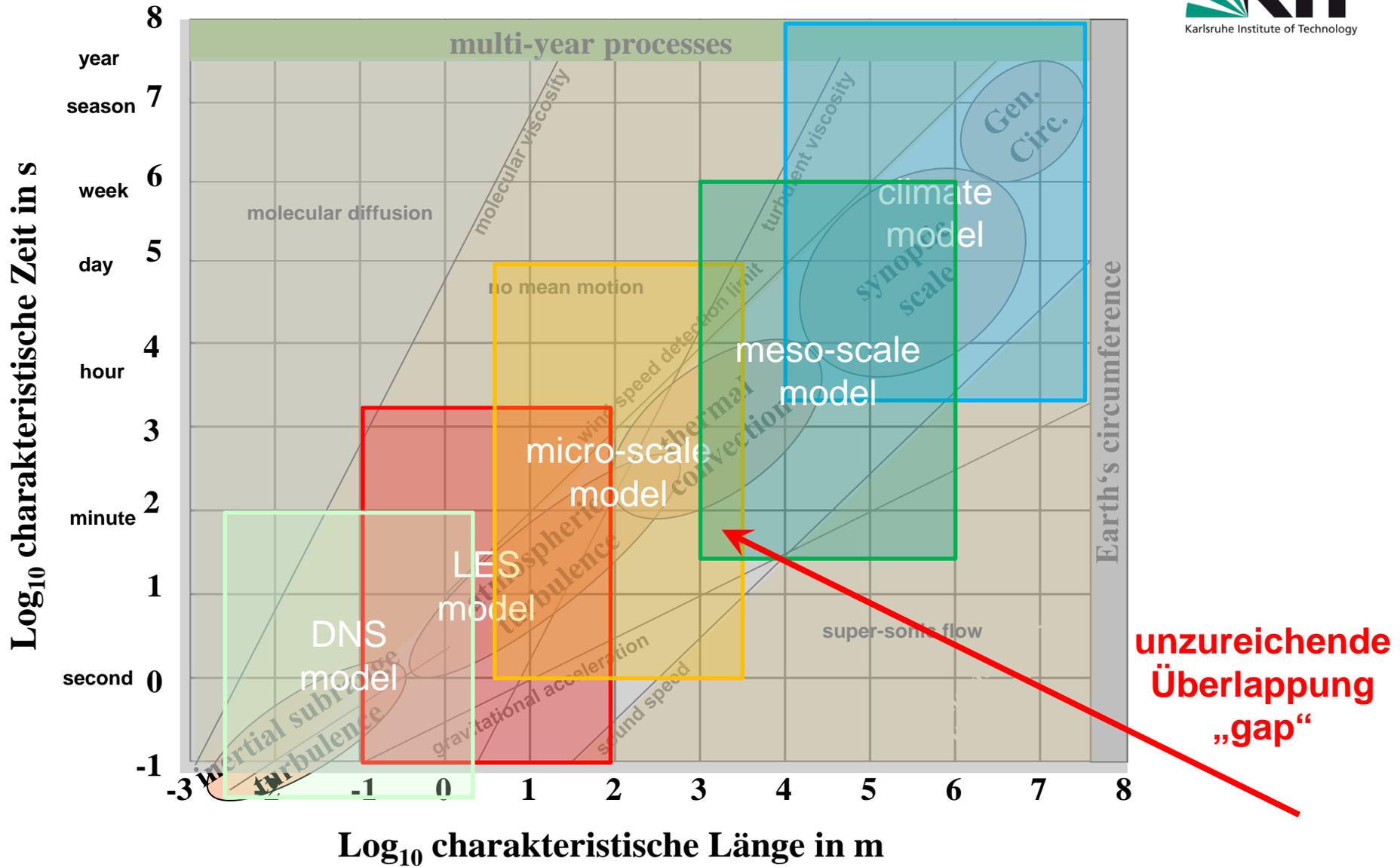
**Existierende numerische Modelle** können aber nur bestimmte Skalenbereiche abbilden, weil

- bestimmte Parametrisierungen (Turbulenz, Konvektion) nicht für alle Skalen gelten
- Computerressourcen begrenzt sind

Daher wurden verschiedene Modelltypen entwickelt:

- großskalige (globale) Modelle ( $\Delta x \sim o(10 - 100 \text{ km})$ )
- mesoskalige (regionale) Modelle ( $\Delta x \sim o(1 - 10 \text{ km})$ )
- ??? ( $\Delta x \sim o(100 \text{ m} - 1 \text{ km})$ )
- mikroskalige (lokale) Modelle ( $\Delta x \sim o(10 - 100 \text{ m})$ )
- LES-Modelle ( $\Delta x \sim o(1 - 10 \text{ m})$ )
- DNS-Modelle ( $\Delta x \sim o(1 \text{ m})$  oder weniger)

# Skalenbereiche von atmosphärischen Modellen



# Das “gap”

## Problem #1

Im Bereich zwischen ca. 100 m und 1000 m sind die Turbulenzskalen und das Modellgitter von derselben Größenordnung

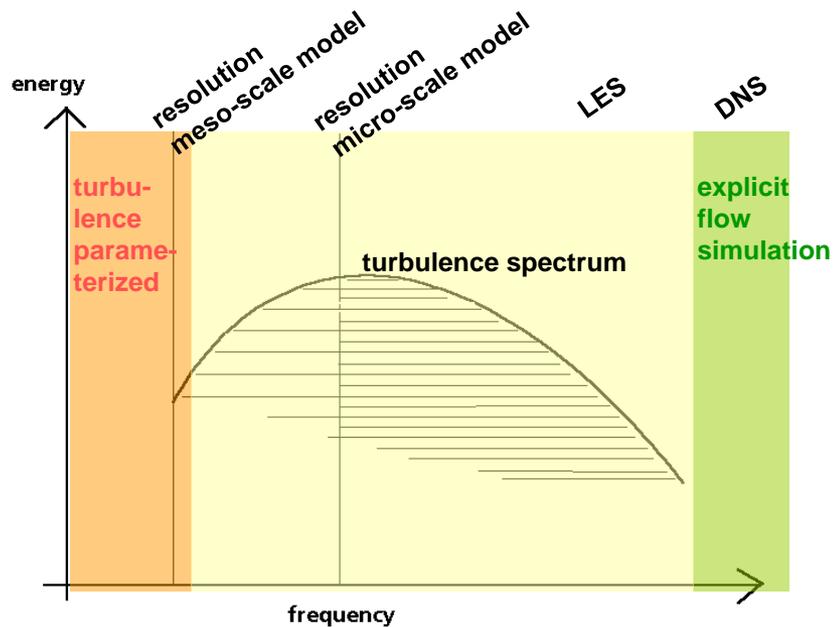
→ die Turbulenzparametrisierung muss in diesem Bereich stark von der gewählten Gitterweite abhängen

Die Turbulenz in diesem Bereich wird “gray zone turbulence” genannt, oder die Region selbst wird als “terra incognita” (Wyngaard 2004, J Atmos Sci **61**, 1816-1826) bezeichnet

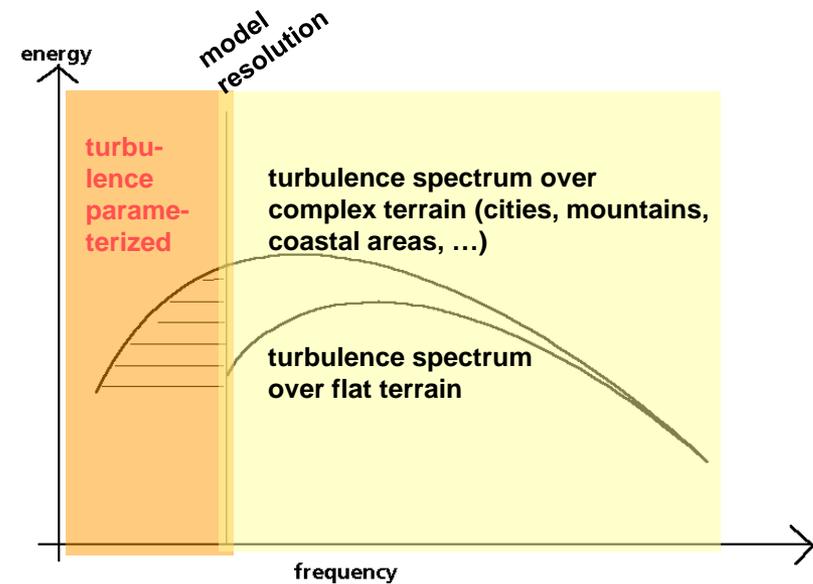
Wenn eine kleinere Gitterweite mit einer angepassten Turbulenzparametrisierung benutzt wird, können zwar größere Turbulenzelemente aufgelöst werden, aber:

●\* die Ergebnisse repräsentieren nicht mehr ein Ensemblemittel, so wie es die Parametrisierung tut, sondern nur eine mögliche Realisation (Martilli 2007, Int J Climatol **27**, 1909–1918)

# Turbulenzparametrisierung VS. Modellauflösung



# Turbulenzparametrisierung VS. Turbulenzspektrum

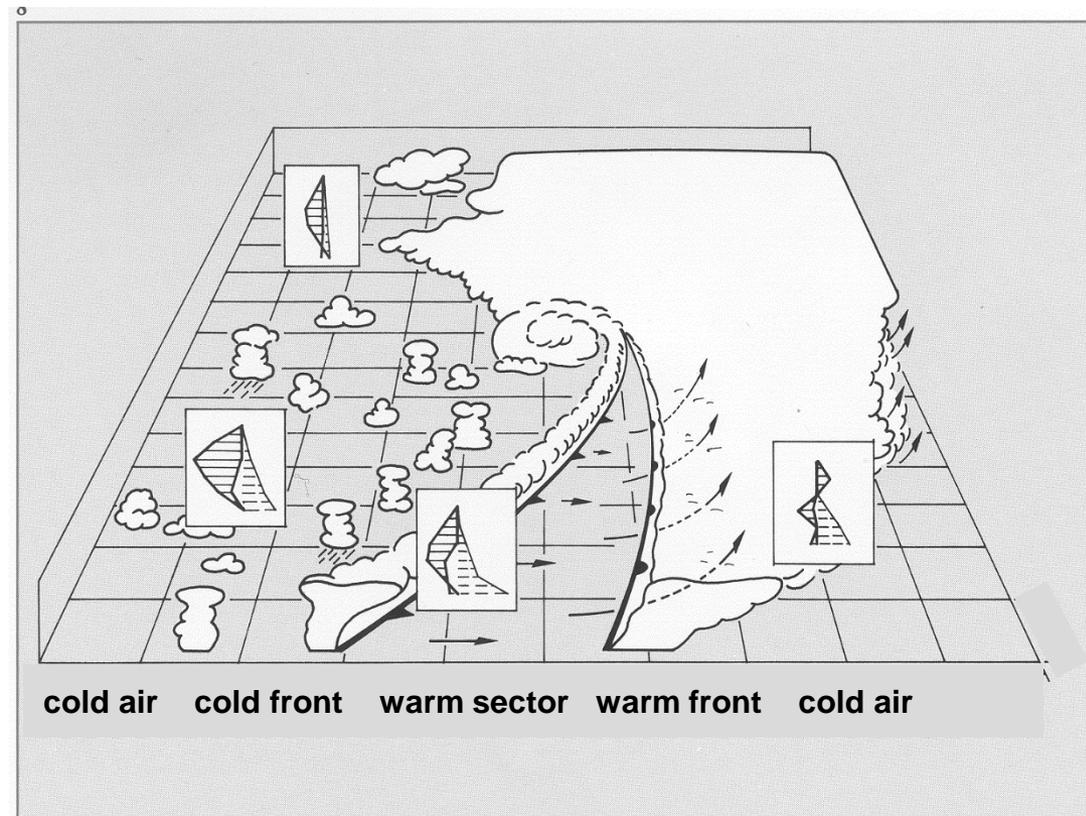


# Das “gap”

## Problem #2

Im Bereich zwischen ca. 100 m und einigen Kilometern sind die horizontalen Abmessungen von Konvektionszellen und das Modellgitter von derselben Größenordnung

→ Die Parametrisierung von konvektiven Wolken und der Niederschlagsbildung muss stark von der Gitterweite abhängen



Dies “**gaps**” verhindern, dass Simulationen gemacht werden können, die gleichzeitig den großskaligen Antrieb berücksichtigen und mikroskalige Phänomene auflösen (kann auch durch „**Zwei-Wege-Kopplung**“ nicht einfach gelöst werden.)

Möglich: großskalige Randbedingungen an kleinskalige Modelle übergeben  
kaum möglich: kleinskalige Ergebnisse auf die große Skala übergeben

### Anwendungsbeispiele:

- Urbane Studien: Kombination von Straßenskala mit großskaligem Antrieb (siehe Martilli (2007) für eine detaillierte Analysis dieses Problems)
- Windenergie: Kombination von Standortbedingungen in komplexem Gelände mit großskaligem Antrieb
- Komplexes Gelände: Kombination von Hang- und Berg-Talwinden mit großskaligem Antrieb

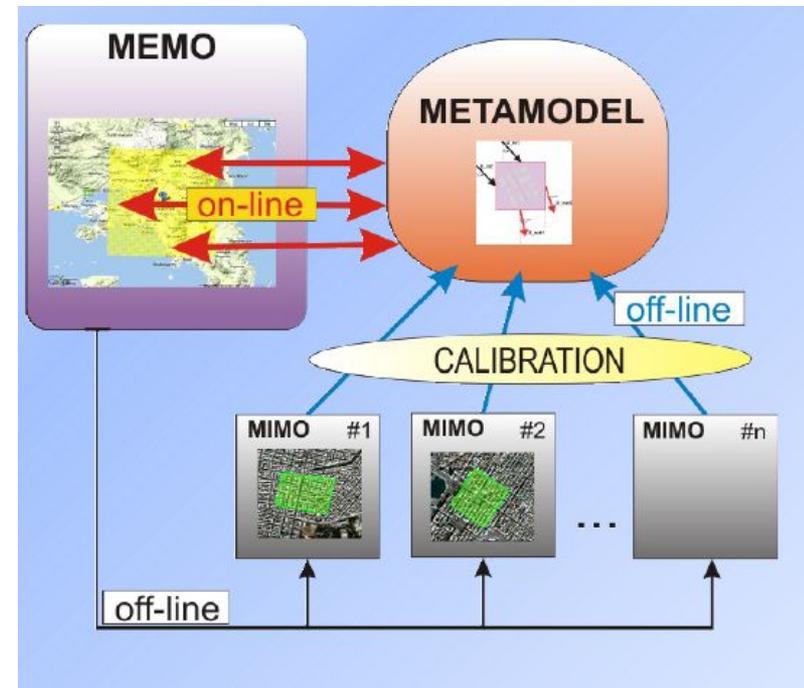
# Das Kopplungsproblem:

das feedback von der Mikroskala zur Mesoskala.

Parametrisierungen auf der Mesoskala produzieren Ensemble-Mittel.

Daher müssen viele mikroskalige Realisationen erzeugt werden, um die Auswirkung auf die Mesoskala zu berechnen.

Eine Idee ist es, ein "Meta-Modell" für die Zwei-Wege-Kopplung dazwischen zu schalten  
(Tsegas et al. 2011, IJEP 47, 278-289).



# Heutige Stadtforschung

## auf vielen Ebenen - lokale/nationale/internationale Programme

Reallabore in einzelnen Städten (z.B. Karlsruhe)

Stadtforschung an Universitäten und Großforschungseinrichtungen bis hin zu größeren Ingenieurbüros

Helmholtz-Stadtforschungsinitiative (Antrag für Phase 2 liegt vor)

UrbENO: urbanes Observatorium, Verzahnung mit HGF-Stadtforschungsinitiative

Innovationsplattform Zukunftsstadt

(BMUB, BMBF)

Nachfolge NPZ



Quelle: IPZ

nationale und internationale Projekte

(Bärnin 2014, H2020, ...)

BMBF-Stadtklimaprojekt ab 2016



Quelle: NPZ

nationale, europäische und internat. Ökosystem- und Stoffstrombeobachtungsnetzwerke (TERENO, ICOS, LTER, NEON, ...)

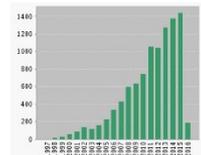
in der DMG ist die Stadtmeteorologie zuhause

im Fachausschuss Umweltmeteorologie

auf den Fachtagungen METTOOLS regelmäßig seit 1990

in Sonderheften der Meteorologischen Zeitschrift

28.3.–1.4.1990	METTOOLS <sup>I</sup> ,	Hamburg	Met. Rdsch. <b>44</b> (1–4), 1991
13.9.–17.9.1993	METTOOLS <sup>II</sup> ,	Hohenheim	Meteorol. Z. <b>3</b> (3), 1994
10.3.–12.3.1997	METTOOLS <sup>III</sup> ,	Freiburg	Meteorol. Z. <b>7</b> (1), 1998
3.4.–5.4.2000	METTOOLS <sup>IV</sup> ,	Stuttgart	Meteorol. Z. <b>10</b> (4), 2001
6.10.–8.10.2003	METTOOLS <sup>V</sup> ,	Essen	Meteorol. Z. <b>13</b> (5), 2004
24.4.–26.4.2007	METTOOLS <sup>VI</sup> ,	Garmisch-P.	Meteorol. Z. <b>17</b> (3), 2008
1.9.–3.9.2009	METTOOLS <sup>VII</sup> ,	Hamburg	Meteorol. Z. <b>20</b> (1), 2011
20.3.–22.3.2012	METTOOLS <sup>VIII</sup> ,	Leipzig	Meteorol. Z. <b>22</b> (2), 2013
17.3.–19.3.2015	METTOOLS <sup>IX</sup> ,	Offenbach	Meteorol. Z. <b>25</b> (2), 2016





**Vielen Dank für  
Ihre  
Aufmerksamkeit**



## ein urbanes Observatorium

