

# Messungen zur Beschreibung der Mischungsschicht

# Gliederung

- Mischungsschicht – Definition u. Allgemeines
- Bodengestützte Fernerkundungsmethoden
  - SODAR
    - ARE-Methode
    - HWS-Methode
    - VVV-Methode
  - LIDAR
    - Schwellwert-Methode
    - Gradient- und Ableitungs-Methoden
    - Idealisierungsmethode
    - Varianz-Methode
  - elektromagnetische Fernerkundung („Wind-Profiler“, Doppler-Radar)
- Fazit

# Mischungsschicht – Definition:

- Schicht, i. d. Bodenrauigkeitseinflüsse auf Atmosphäre fühlbar sind, Turbulenz wichtige Rolle spielt, atmosph. Prozesse u. Luftbestandteile innerhalb ca. 1 Stunde nach Störungen wieder Gleichgewichtszustand bzw. gleichmäßige Durchmischung erreichen (DWD 2008)
- Schicht, i.d. aufgrund thermischer Struktur d. atmosph. Grenzschicht (ABL) vertikale Dispersion von Schadstoffen durch turbulente Durchmischung stattfindet (Seibert et al. 2000, Schäfer et al. 2006)

# Mischungsschicht – Allgemeines:

- häufig am Oberrand durch eine Temperaturinversion abgeschlossen, oberhalb stabile Schichtung  
=> Sperre im atmosphärischen Austausch
  - Großteil der Aerosol-Partikel i. Mischungsschicht (ML)
  - Mischungsschichthöhe (MLH): fundamentale Größe in vielen Ausbreitungsrechnungen, die die Konzentration von atmosphärischen (Schad-)Stoffen stark beeinflusst
  - beeinflusst auch Schallverbreitung
- MLH: <100m bis 2000m und mehr

# Bodengestützte Fernerkundungsmethoden

- Analyse eines Höhenprofils (laufzeitbestimmt) von Rückstreuungsintensitäten u. Doppler-Verschiebungen
  - akustisch (Schallwellen)
    - Sonic Detecting and Ranging (SODAR)
    - Streuung von Schallwellen an Temperaturgradienten
  - optisch (Laserpulse)
    - Light Detecting and Ranging (LIDAR), „ceilometer“
    - Streuung an Aerosolpartikeln
  - elektromagnetisch
    - Doppler-RADAR, Wind-Profiler
    - Streuung an Feuchtekonzentrationen u. Temperaturgradienten

# SODAR

- Streuung v. Schallwellen an kleinskaligen Temperaturschwankungen (Turbulenzen) u. scharfen Temperaturgradienten (Inversionen)
  - Maximalreichweite: 500-1000 m
  - untere Auflösungsgrenze: 20-60m
- Analysemethoden bzgl. MLH:
  - Methode d. akustisch empfangenen Echos (ARE)
  - Methode d. horizontalen Windgeschwindigkeit (HWS)
  - Methode d. vertikalen Windvarianz (VWV)

- ARE-Methode

- grundlegendste Methode

- keine Analyse von Doppler-Verschiebungen nötig, nur über Rückstreuungsintensität ( $I$ ) und Laufzeit

- Bestimmung d. MLH aus Rückstreuungsintensitätsprofil

- bei maximalem Rückgang (Gradient  $\Rightarrow dI/dz$ )

- bei wechselnder Krümmung (2. Abl.  $\Rightarrow d^2I/dz^2$ )

- bei Absinken unter best. Schwellwert (Kalibrierung!)

- Optimierung über weitere Variablen möglich

- z.B. Dopplerverschiebung  $\Rightarrow$  vert. Windgeschwindigkeitsvarianz (Emeis & Türk 2004)

- HWS-Methode

- erfordert Analyse der Dopplerverschiebungen

- Profil d. horizontalen Windgeschwindigkeiten (Stundenmittel)
    - Annahme: Windgeschwindigkeit u. -richtung annähernd konstant innerhalb ML, am Oberrand Übergang zur geostroph. Windgeschwindigkeit

- => beschränkt auf hoch entwickelte konvektive Grenzschichten (CBL)

- CBL oft oberhalb SODAR-Maximalreichweite
        - selbst innerhalb Reichweite dann oft zu geringe signal-to-noise-Rate

- nur eingeschränkte Nutzbarkeit



- VVV-Methode
  - erfordert Analyse der Dopplerverschiebungen
    - Profil der Varianz der Vertikalgeschwindigkeit
  - anwendbar nur für CBL
    - empirische Ergebnisse: Maximum der Vertikalgeschwindigkeitsvarianz bei  $x \cdot \text{MLH}$  (typische Werte:  $0,35 < x < 0,4$ )  
=> Extrapolationsmethode
    - erlaubt Analyse von MLH oberhalb SODAR-Maximalreichweite
- Methode unverlässlich (Beyrich 1997)

# LIDAR

- Streuung an Aerosolpartikeln
  - Annahme: vertikale Aerosolverteilung passt sich schnell thermischer Struktur d. Grenzschicht an, vertikale Aerosolverteilung nicht von Advektion dominiert
  - Auflösungsbereich: 15m bis mehrere km
  - (Best. d. Spurengaskonzentr. mit 2 Impulsen versch. Wellenl.)
  - primäre (direkt aus Aerosolkonzentr.) MLH-Analysemethoden:
    - Schwellwertmethode
    - Gradient- und Ableitungs-Methoden
    - Idealisierungsmethode
    - Aerosol-Varianzmethode
  - Sekundärmethoden: HWS- o. VWV-Methode mit Doppler-LIDAR

- Schwellwert-Methode

- nur laufzeitbasiert, keine Analyse von Doppler-Verschiebungen
- Schwellwertüberschreitung der Rückstreuungsintensität
  - höchste Überschreitung = MLH
- Kalibrierung!?  
=> subjektive MLH-Analyse

- Gradient- und Ableitungs-Methoden
  - MLH-Diagnose über
    1. absolutes Minimum von  $dI/dz$  ( $H4_{GM}$ )
    2. absolutes Minimum von  $d^2I/dz^2$  („inflection point method“;  $H4_{IPM}$ )
      - meist etwas niedrigere Höhen als 1.
      - größte Korrelation zu MLH-Bestimmungen aus Radiosonden-Messungen
    3. absolutes Minimum von  $d(\log(I))/dz$  ( $H4_{LGM}$ )
      - meist größte Höhen für MLH

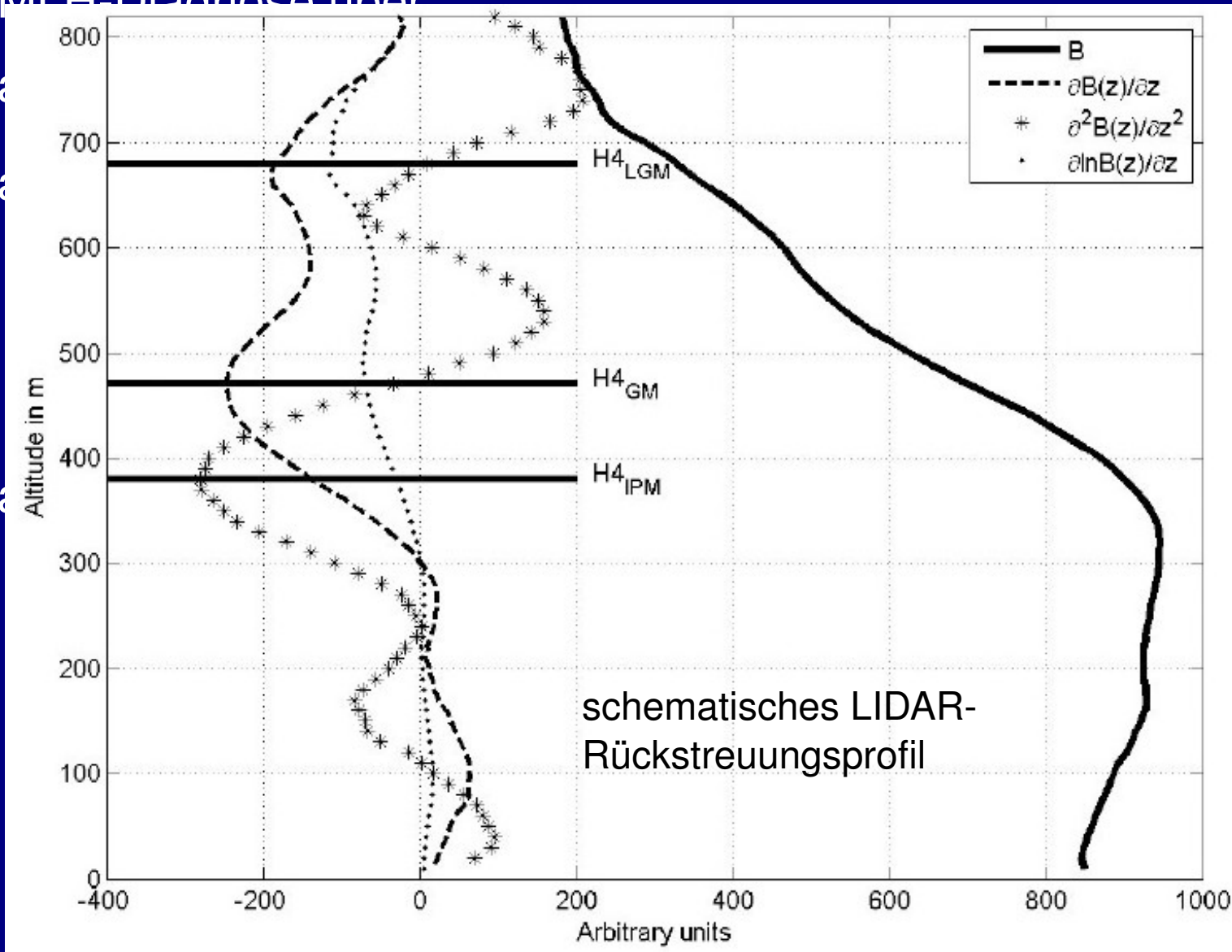
# • Gradient- und Ableitungs-Methoden

– MLH-Diagnose über

1. a

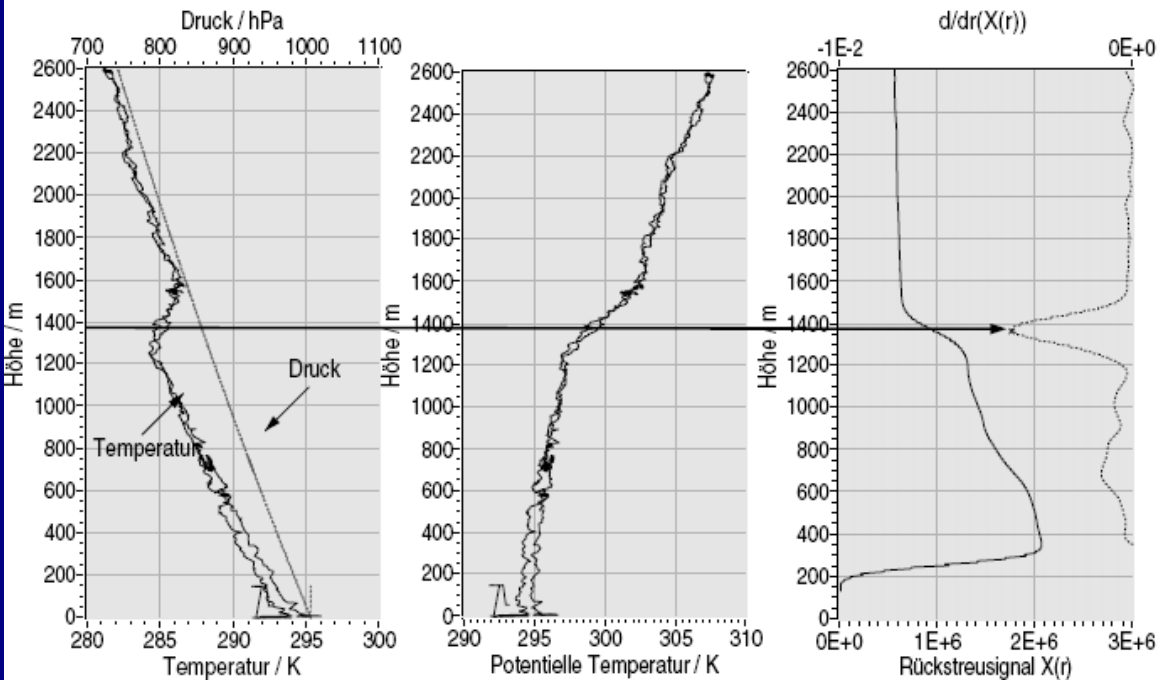
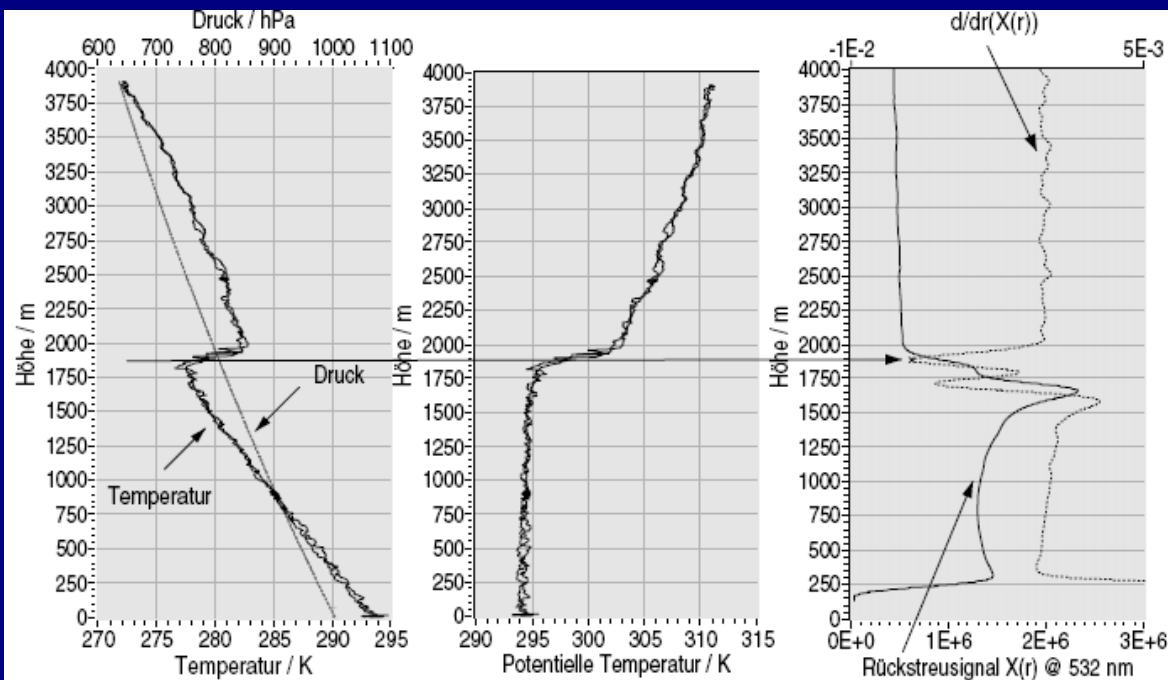
2. a

3. a



4<sub>IPM</sub>)

nden-



Quelle: Frey 2002

MLH-Bestimmung über Berlin  
am 4. u. 25.08.99 aus LIDAR-Daten  
(Gradient-Methode),  
zum Vergleich zeitgleich gemessene  
Daten aus OLAK-Messkampagne  
(Temperatur, pot. Temp., Druck)

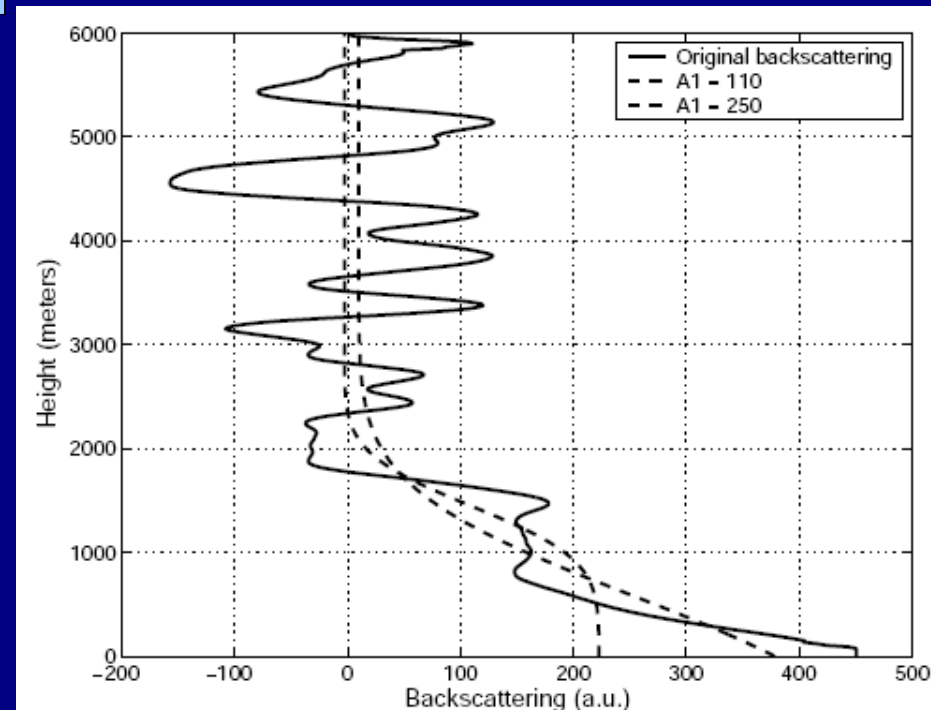
- Idealisierungsmethode (Eresmaa et al. 2006)

- Erweiterung der Gradient-Methode
- idealisiertes Rückstreuprofil als Fit des vermessenen Profils
  - Nutzung des gesamten Vertikalprofils, nicht nur des Bereichs um die MLH => robustes Verfahren

- $$I(z) = \frac{I_m + I_u}{2} - \frac{I_m - I_u}{2} * \operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{\Delta h}\right)$$

$I_m$ : mittlere Intens. i. ML  
 $I_u$ : mittlere Intens. o. ML  
 $\Delta h$ : „Entrainment“-Schichtdicke  
 $h$ : MLH

- damit Gradient-Methode
  - anfällig gegenüber Anfangsannahmen (s.r.)



- Aerosol-Varianz-Methode

- Hintergrund: Einströmen von klaren Luftmassen am Oberrand der CBL führt dort zu starken Schwankungen d. Aerosolkonzentration
- MLH-Diagnose aus Vertikalprofil der Varianz der optischen Rückstreuungsintensität: MLH = Höhe maximaler Varianz
- nutzbar nur tagsüber für CBL



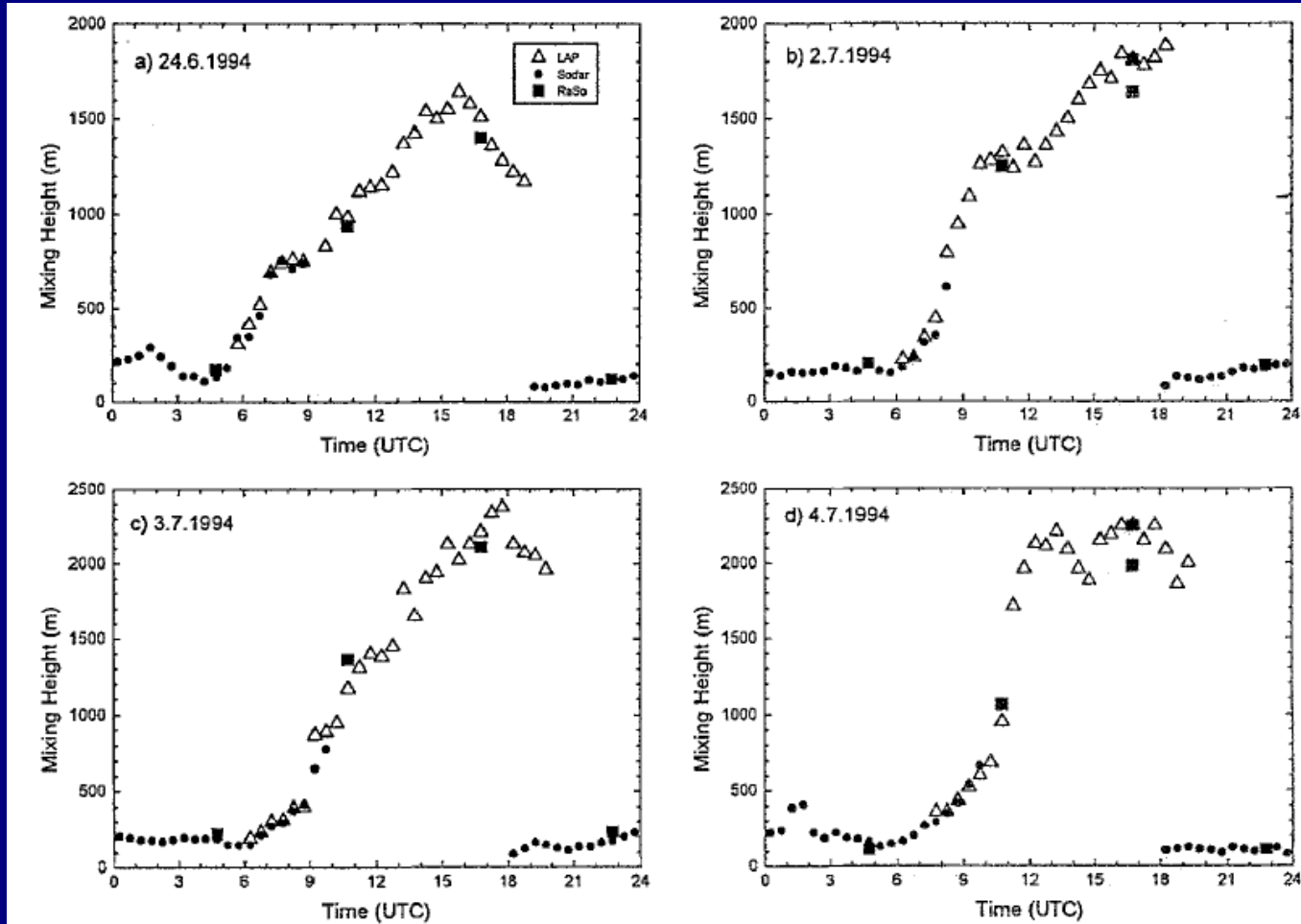
# Elektromagnetische Fernerkundung

- Rückstreuungsintensität abhängig von Feuchte- und Temperaturschwankungen
  - MLH-Bestimmung: div. Möglichkeiten mit Temperatur-, Feuchte-, Windgeschwindigkeitsprofilen
- zu hohe Auflösungsuntergrenze für niedrige MLH
  - typischer Auflösungsbereich: 200-3000m für Wind-Profiler

# Kombination verschiedener Messinstrumente

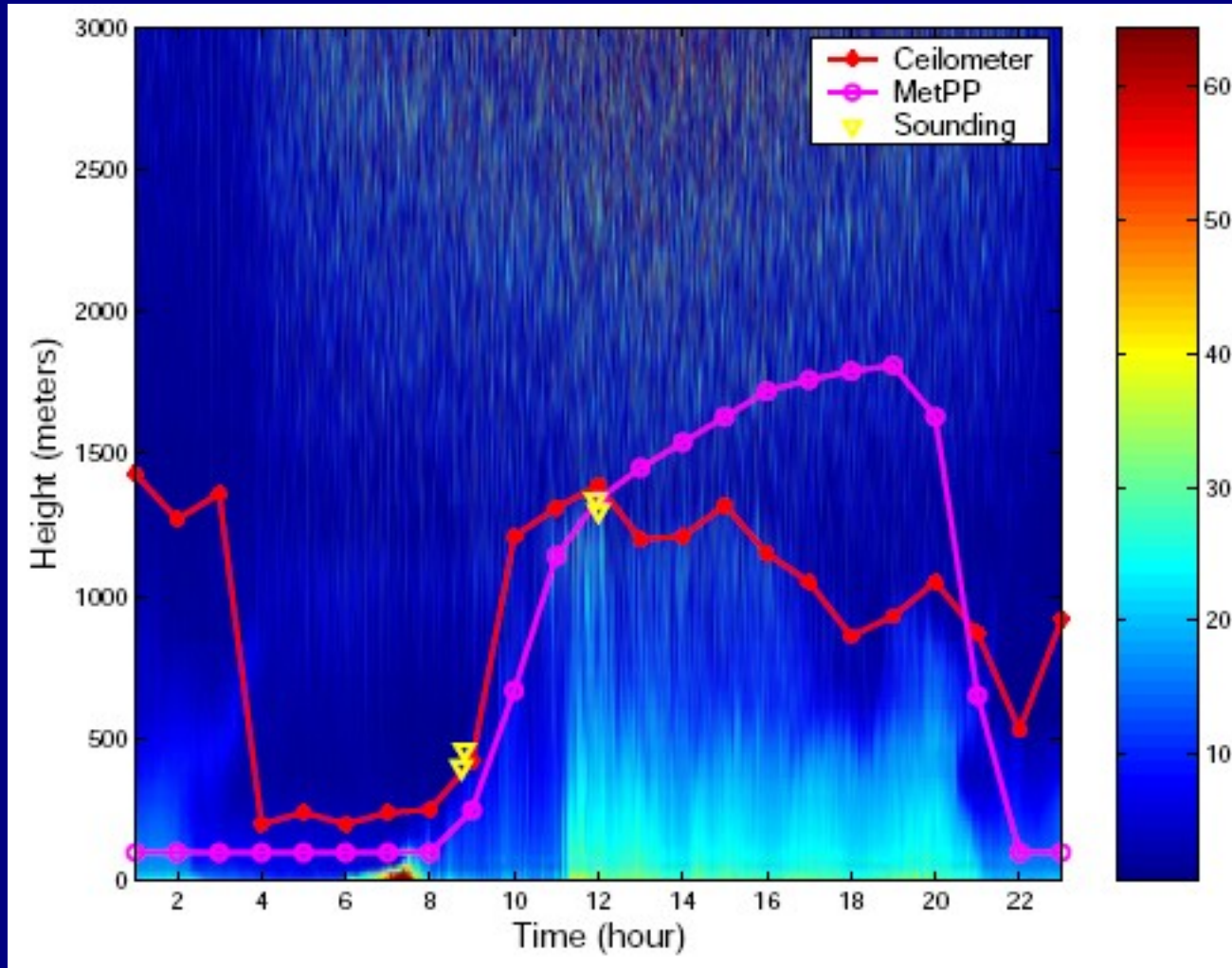
- SODAR+Wind-Profiler:
  - gute Übereinstimmung für sich entwickelnde CBL
  - vertikale Auflösung der 2 Instrumente ergänzt sich
  - erlaubt Aufzeichnung des gesamten Tagesgangs der ML
- SODAR+“ceilometer“
  - bisher meist nur zu Zwecken der Kreuzevaluation
  - gleiche Vorteile wie SODAR+Wind-Profiler

# Messergebnisse



MLH-Entwicklung: Juni/Juli 1994 Lindenberg (Beyrich 1995)

# Messergebnisse



MLH-Entwicklung: 29.05.2002 Vantaa, FIN (Eresmaa 2006)

# Fazit

- akustische u. elektromagnetische Fernerkundungsmethoden basieren direkt auf meteorologischen Parametern (Temperatur, Feuchte)
- optische (Primär-)Fernerkundungsmethoden basieren auf Aerosolkonzentrationen, die sich atmosph. Schichtung anpassen
- akustische und optische Verfahren für stand-alone-Bestimmung d. MLH geeignet (Auflösungsuntergrenze: LIDAR 15m, SODAR 20-60m)
- elektromagnetische Verfahren mit zu hohen Auflösungsuntergrenzen für stand-alone-Bestimmung d. MLH
- LIDAR für kompletten Tagesgang geeignet, SODAR mit geringer Maximalreichweite
- SODAR geeignet für hochauflösende Bestimmung flacher MLH (Nacht)

# Fazit

- akustische Verfahren = Lärmbelästigung für evtl. Anwohner
- optische Verfahren erfordern Schutz für Augen
- elektromagnetische Verfahren erfordern Abschirmung gegenüber Menschen und Interferenz mit Kommunikationsmitteln (frequenzabhängig)
  
- LIDAR benötigt klaren Himmel (Wolken, Nebel, Niederschlag beeinträchtigen Messungen)
- SODAR beeinträchtigt von Starkniederschlag und Umgebungslärm

# Quellen

- Beyrich 1997: Mixing height estimation from SODAR data – a critical discussion. *Atmospheric Environment* Vol. 31 No. 23, 3941-3953
- DWD 2008: Mischungsschichthöhen. Online:  
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_result\\_page&portletMasterPortlet\\_i1gsbDocumentPath=](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&portletMasterPortlet_i1gsbDocumentPath=)  
- abgerufen 27.01.2008, 19:58 Uhr
- Emeis et al. 2008: Surface-based remote sensing of the mixing-layer height – a review. *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 17 No. 5, 621-630
- Emeis & Türk 2004: Frequency distributions of the mixing height over an urban area from SODAR data. *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 13 No. 5, 361-367
- Frei 2002: Laser-Fernerkundung der planetaren Grenzschicht. Dissertation am FB Physik der Freien Universität Berlin
- Schäfer et al. 2006: Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban area. *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 15 No. 6, 647-658
- Seibert et al. 2000: Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment* Vol. 34(7), 1001-1027

Vielen Dank !!!



# Gauss'sche Fehlerfunktion

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x d\tau e^{-\tau^2}$$