

Messung der Eigenschaften atmosphärischer Aerosole

Fernerkundung und In-situ Messungen

Daniel Sauer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen

Fortbildungstag der DMG
Sektion München 
22. November 2019



Wissen für Morgen



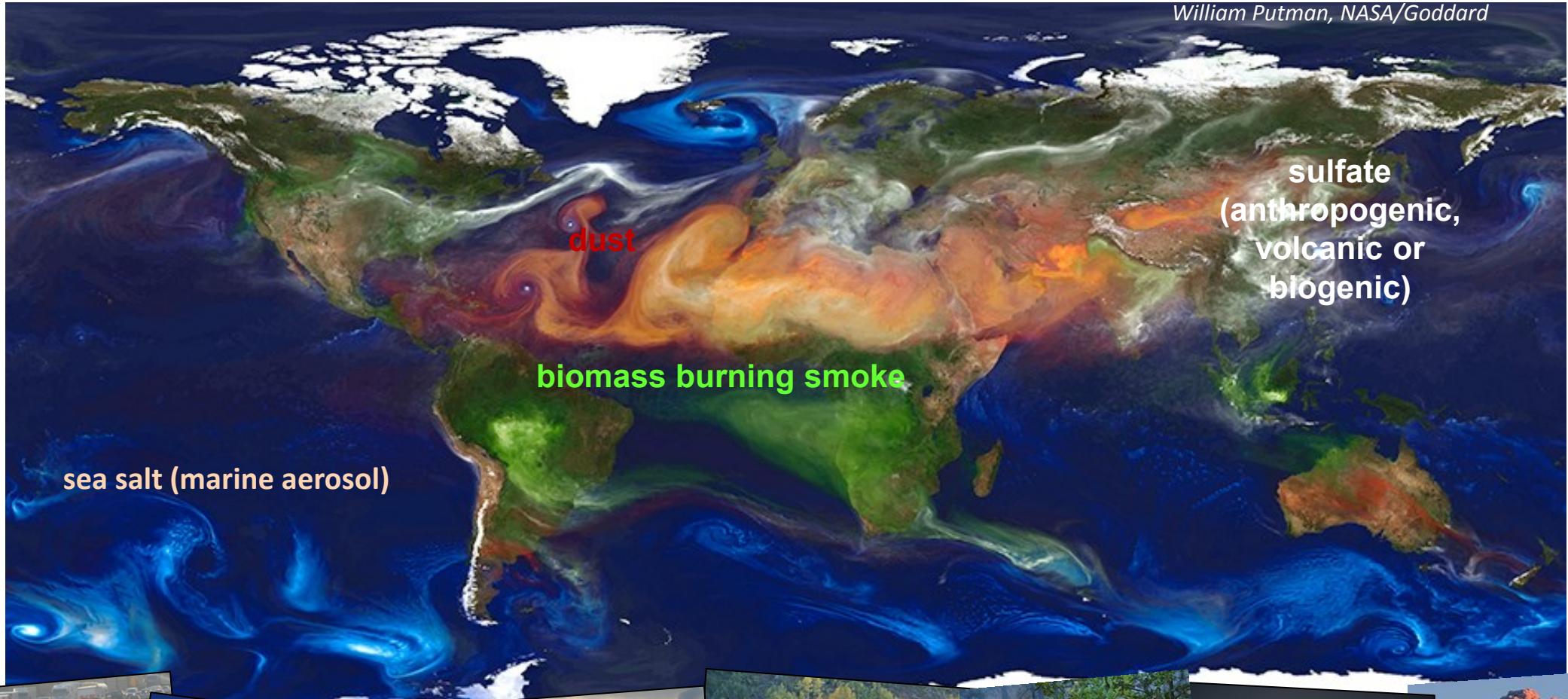
Überblick

- **Wesentliche messbare Aerosoleigenschaften**
- **Messmethoden – Fernerkundung vs. In-situ Messungen**
- **Fernerkundungsmessungen**
 - **Passive Fernerkundung**
 - **Aktive Fernerkundung**
- **In-situ Messungen**
 - **Messplattformen und Einlasssysteme**
 - **Messtechniken für physikalisch/optische Aerosoleigenschaften**

Zusammenfassung



William Putman, NASA/Goddard



sea salt (marine aerosol)

biomass burning smoke

dust

sulfate
(anthropogenic,
volcanic or
biogenic)

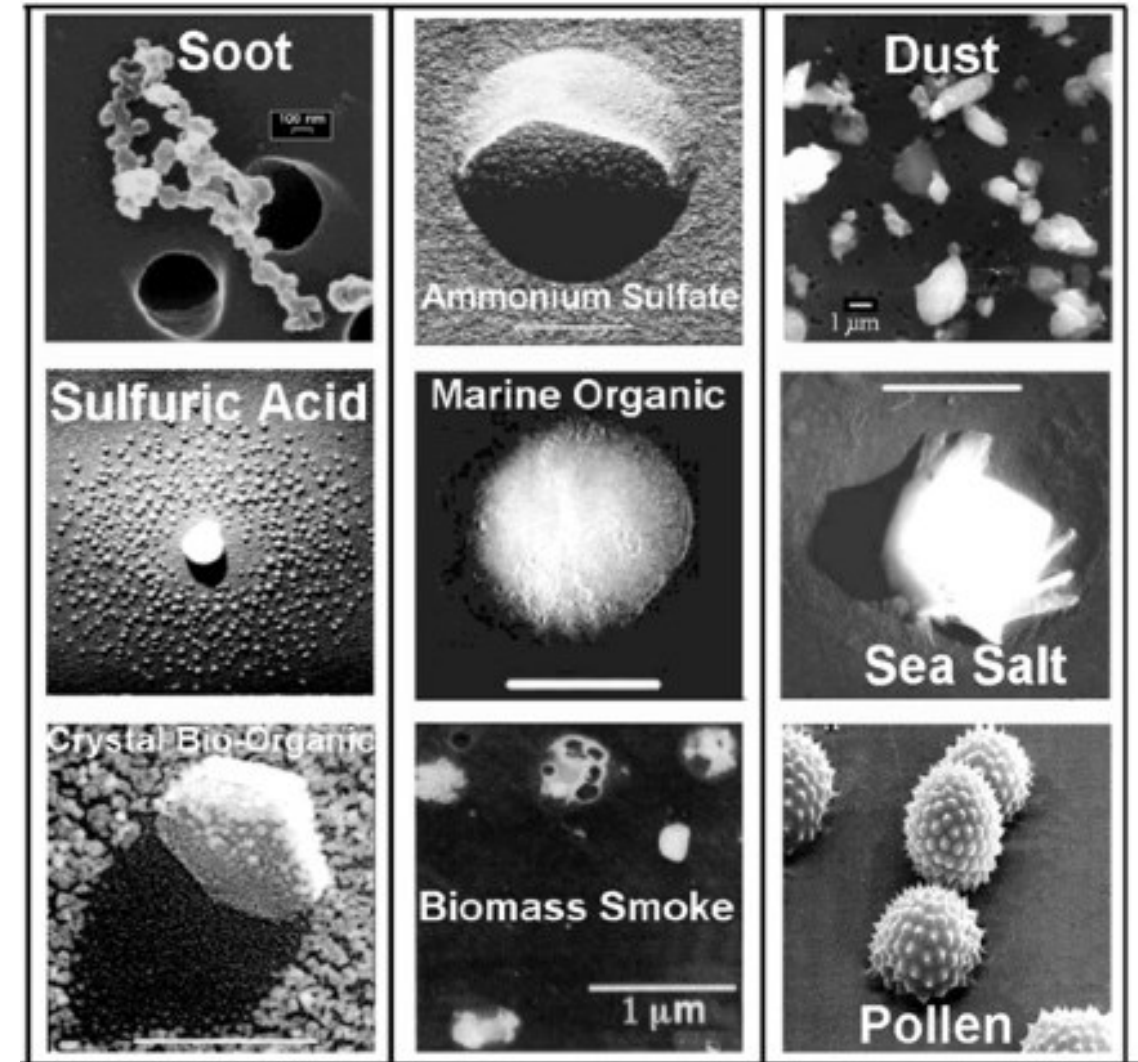


Messbare Aerosoleigenschaften



Eigenschaften von Aerosolpartikeln

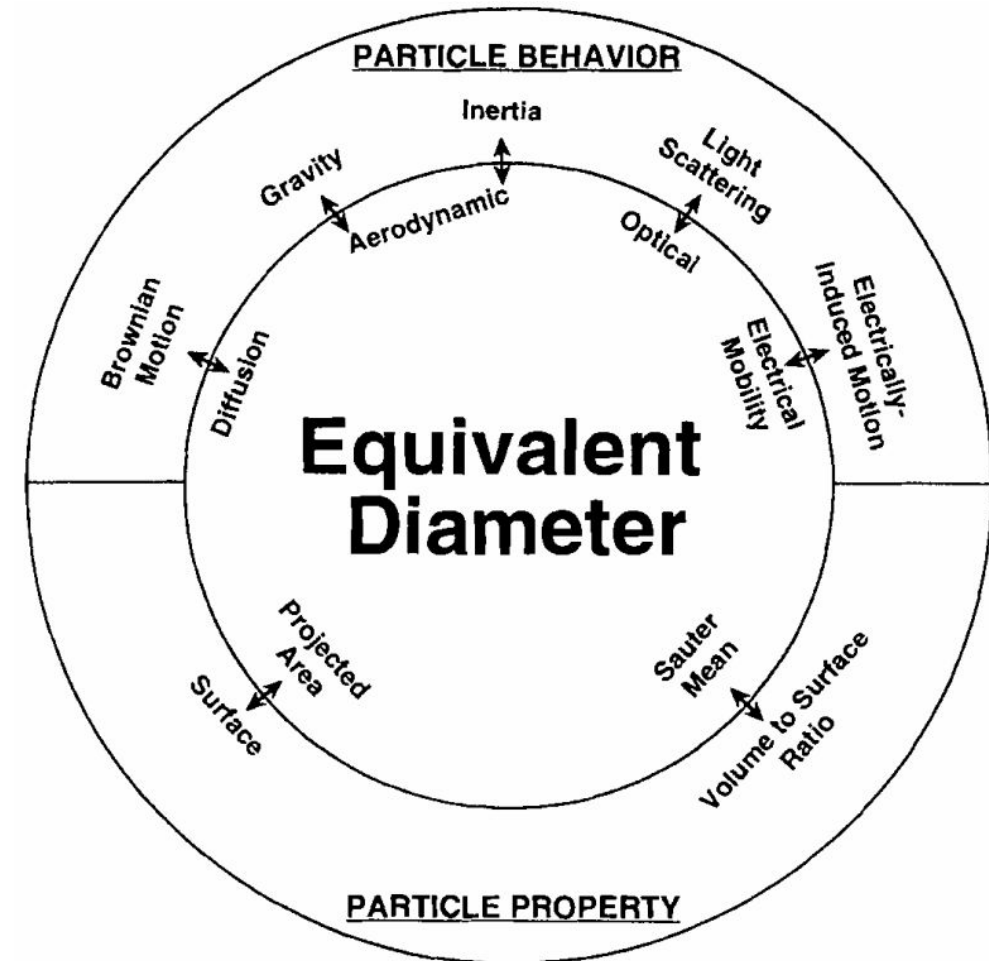
- Anzahlkonzentrationen → Partikelzahl pro Volumen Luft
- Größe bzw Größenverteilung, Oberfläche, Volumen
- Dichte → Masse
- Partikelformen, Oberflächenbeschaffenheit
- Optische Eigenschaften – Brechungsindex, (Streueigenschaften, Absorption) → „Farbe“
- Benetzung von Partikeln mit flüchtigen Substanzen
- Flüchtigkeit, Verdampfungspunkt
- Hygroskopizität, Benetzbarkeit, Eiskeimeigenschaften
- Chemische Zusammensetzung, Material
- Chemische Reaktivität → Alterungsprozesse



Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Konzepte für Partikelgrößen

- Die Definition des Partikeldurchmessers hängt von der **Messmethode** ab!
- Nachweisverfahren über Partikelverhalten bei externen Einflüssen oder direkte Partikeleigenschaften
- In der Regel wird ein Durchmesser einer Kugel angenommen, die die jeweils gemessenen Eigenschaften hat → **Äquivalenzdurchmesser**
Tatsächliche Partikelform oft nicht kugelförmig!
- Unterschiedliche Definitionen müssen beim **Vergleich** der Ergebnisse **verschiedener Messverfahren** beachtet werden.



Quelle: Kulkarni, Baron & Willeke, 2011



Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Größenbereiche und Größenverteilungen



Eigenschaften von Aerosolpartikeln Größenbereiche und Größenverteilungen

Grobe Einteilung in **Größenklassen**, zB basierend auf biologischer Wirksamkeit (→ Anhaltspunkt für **Luftqualität**)

- Grobstaub ($D > 10\mu\text{m}$), Feinstaub ($D < 10\mu\text{m}$), ultrafeine Partikel ($D < 0.1\mu\text{m}$)
- Üblicherweise Angabe der Gesamtmasse im jeweiligen Größenbereich

Für **quantitativere Anwendung** in der Wissenschaft:
Bestimmung einer **Partikelgrößenverteilung**

- Histogramm der Häufigkeit von Partikeln eines bestimmten Größenbereiches, bzw daraus abgeleitet, das Volumen (→Masse) in dem Größenbereich



Eigenschaften von Aerosolpartikeln Größenbereiche und Größenverteilungen

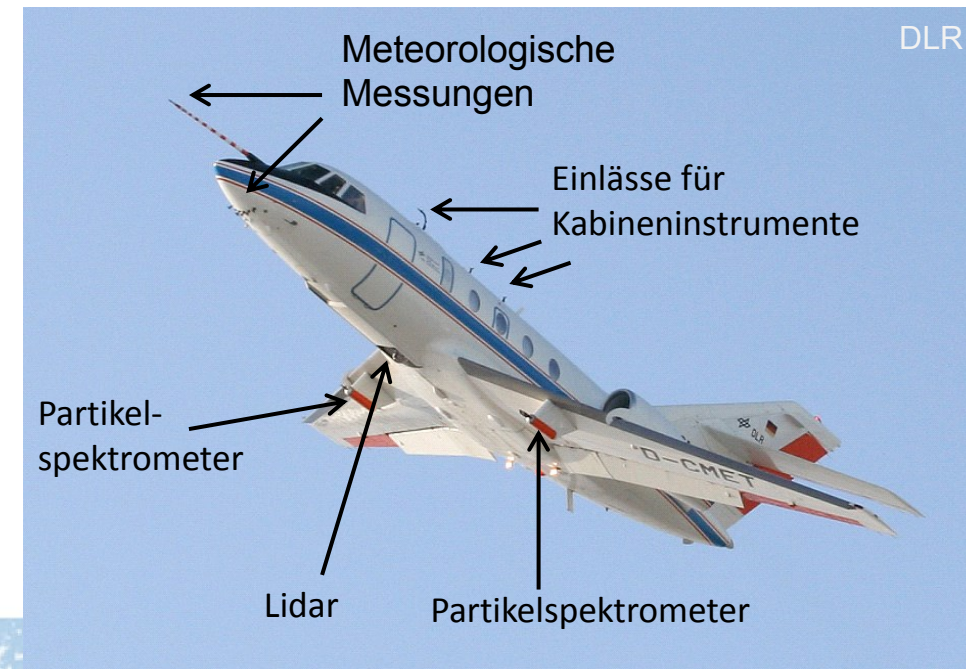
Grobe Einteilung in **Größenklassen**, zB basierend auf biologischer Wirksamkeit (→ Anhaltspunkt für **Luftqualität**)

→ Grobstaub ($D > 10\mu\text{m}$), Feinstaub ($D < 10\mu\text{m}$), ultrafeine Partikel ($D < 0.1\mu\text{m}$)

→ Üblicherweise Angabe der Gesamtmasse im jeweiligen Größenbereich

Für **quantitativere Anwendung** in der Wissenschaft: Bestimmung einer **Partikelgrößenverteilung**

→ Histogramm der Häufigkeit von Partikeln eines bestimmten Größenbereiches, bzw daraus abgeleitet, das Volumen (→Masse) in dem Größenbereich



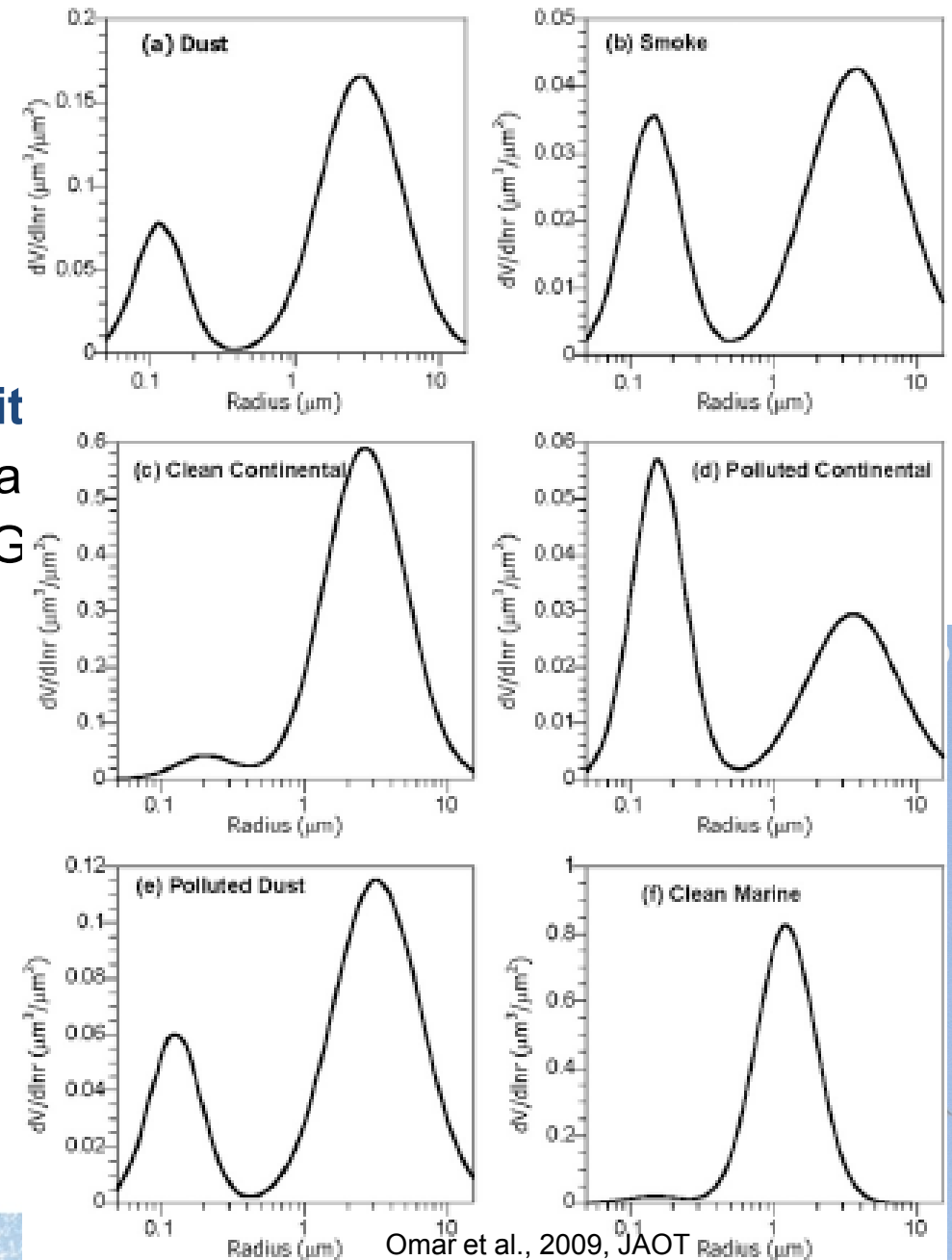
Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Größenbereiche und Größenverteilungen

Grobe Einteilung in **Größenklassen**, zB basierend auf biologischer Wirksamkeit (→ Anhaltspunkt für **Luftqualität**)
 → Grobstaub ($D > 10 \mu\text{m}$), Feinstaub ($D < 10 \mu\text{m}$), ultrafeine Pa
 → Üblicherweise Angabe der Gesamtmasse im jeweiligen G

Für **quantitativere Anwendung** in der Wissenschaft:
 Bestimmung einer **Partikelgrößenverteilung**

→ Histogramm der Häufigkeit von Partikeln eines bestimmten Größenbereiches, bzw daraus abgeleitet, das Volumen (→Masse) in dem Größenbereich



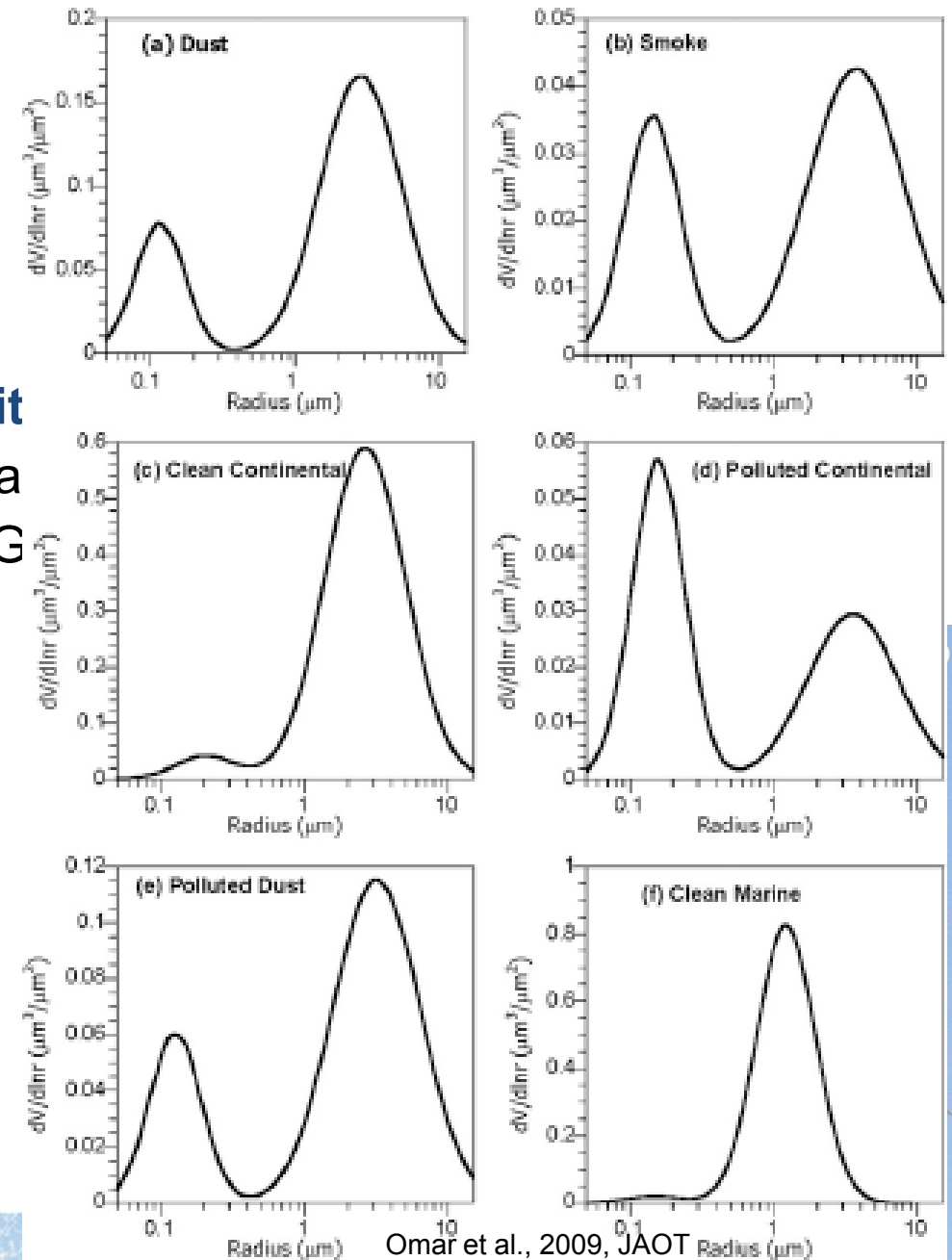
Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Größenbereiche und Größenverteilungen

Grobe Einteilung in **Größenklassen**, zB basierend auf biologischer Wirksamkeit (→ Anhaltspunkt für **Luftqualität**)
 → Grobstaub ($D > 10 \mu\text{m}$), Feinstaub ($D < 10 \mu\text{m}$), ultrafeine Pa
 → Üblicherweise Angabe der Gesamtmasse im jeweiligen G

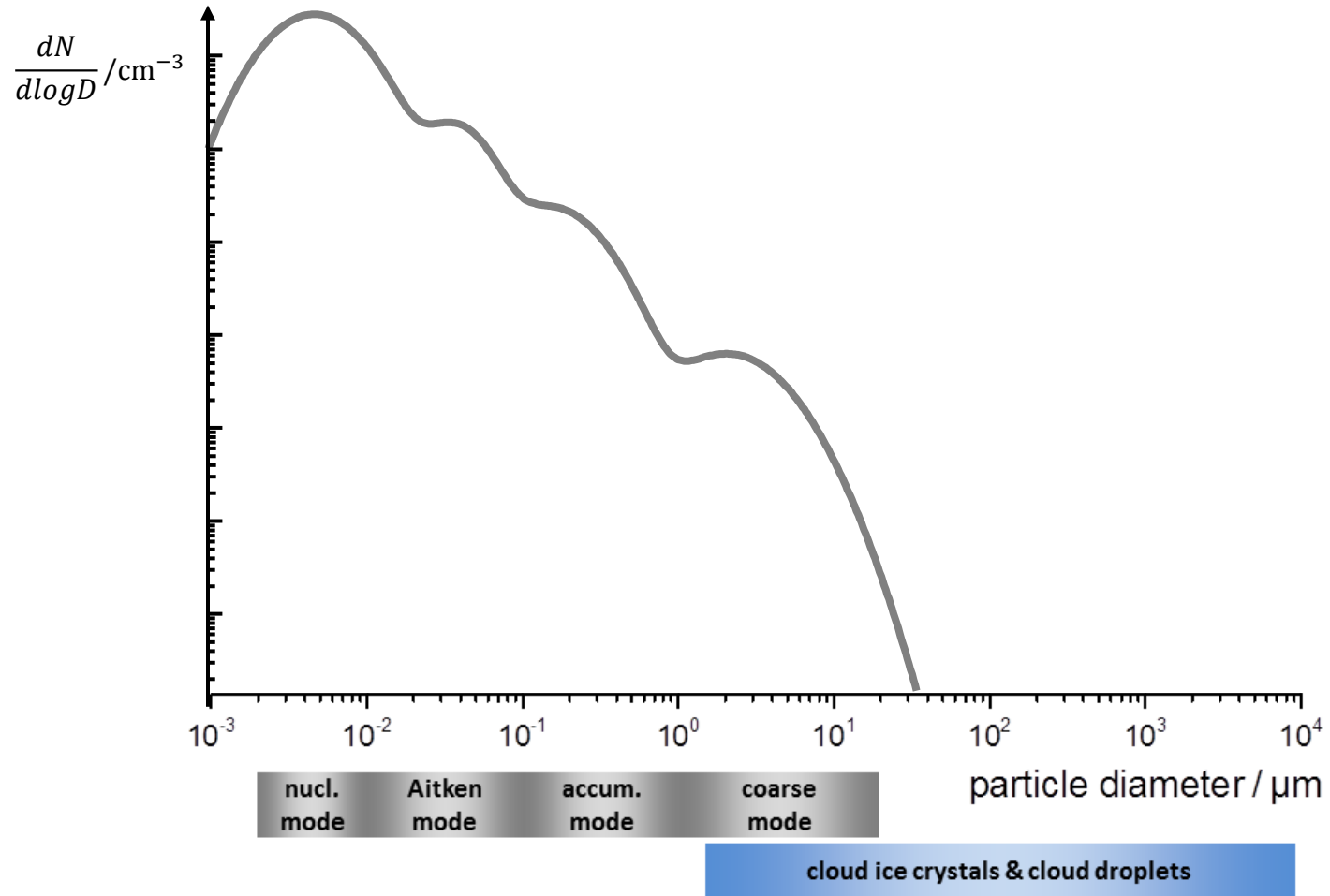
Für **quantitativere Anwendung** in der Wissenschaft:
 Bestimmung einer **Partikelgrößenverteilung**

→ Histogramm der Häufigkeit von Partikeln eines bestimmten Größenbereiches, bzw daraus abgeleitet, das Volumen (→Masse) in dem Größenbereich



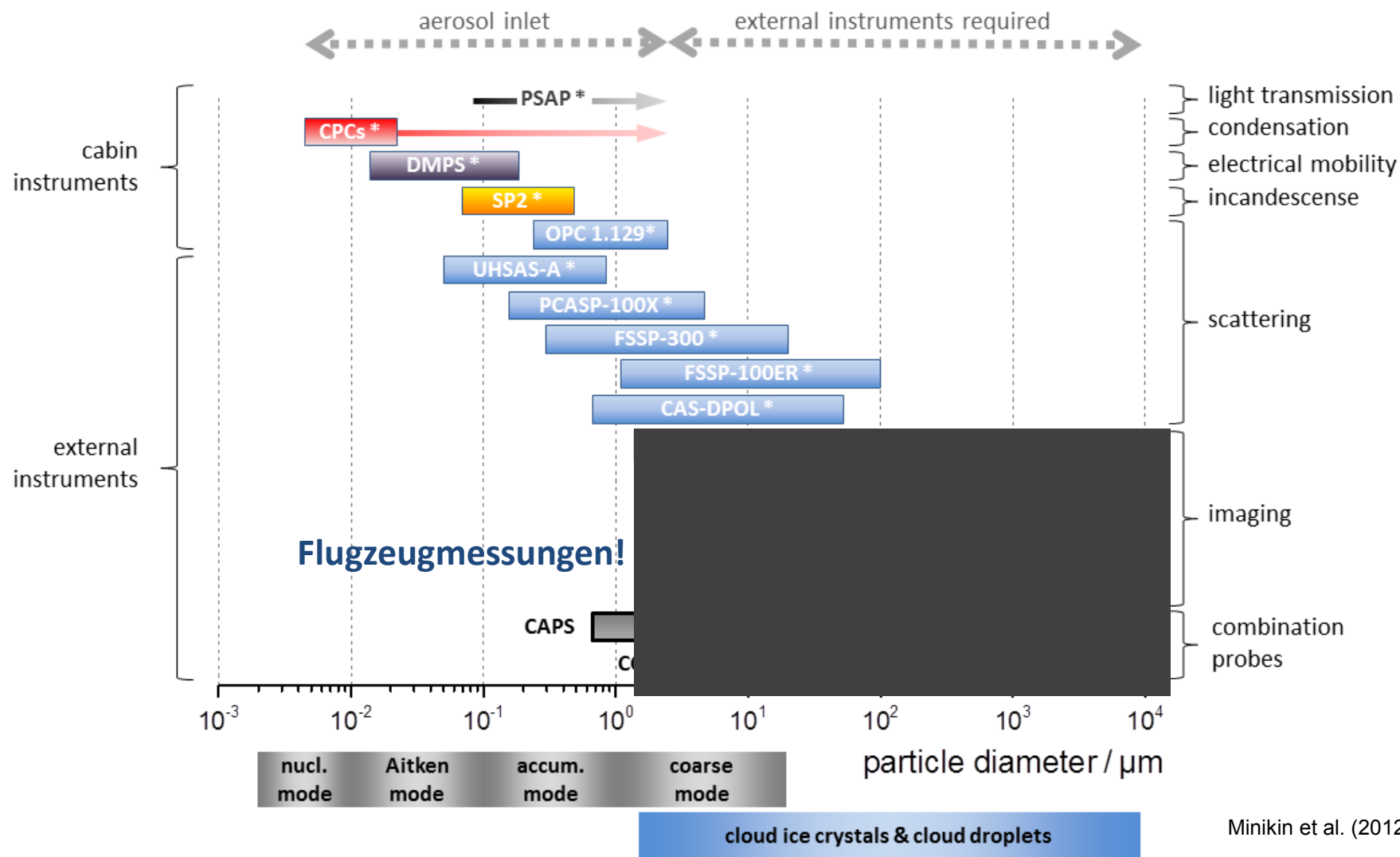
Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Messprinzipien nach Größenbereichen



Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Messprinzipien nach Größenbereichen



Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Optische Eigenschaften – Wechselwirkung mit Strahlung

- Einfallendes Licht wird an Aerosolpartikeln gestreut oder absorbiert
- Streuung, Absorption und deren Wellenlängenabhängigkeit werden durch die **optischen Eigenschaften** der Aerosole beschrieben

$$I(\lambda, z) = I_0(\lambda) \exp \left(- \int \alpha_{\text{ext}}(\lambda, z) dz \right)$$

Beer–Lambert–Bouguer Gesetz
→ Abschwächung von Licht in einem Medium



Eigenschaften von Aerosolpartikeln

Optische Eigenschaften – Aerosol Optische Dicke

Charakterisierung der „**Aerosol-Menge**“ in der gesamten atmosphärischen Säule

- AOD – **Aerosol Optical Depth**

→ Optische Messung der Abschwächung von Licht durch Aerosolschichten (wellenlängenabhängig)

Typische Werte:

0.02 - saubere, abgelegene Gebiete

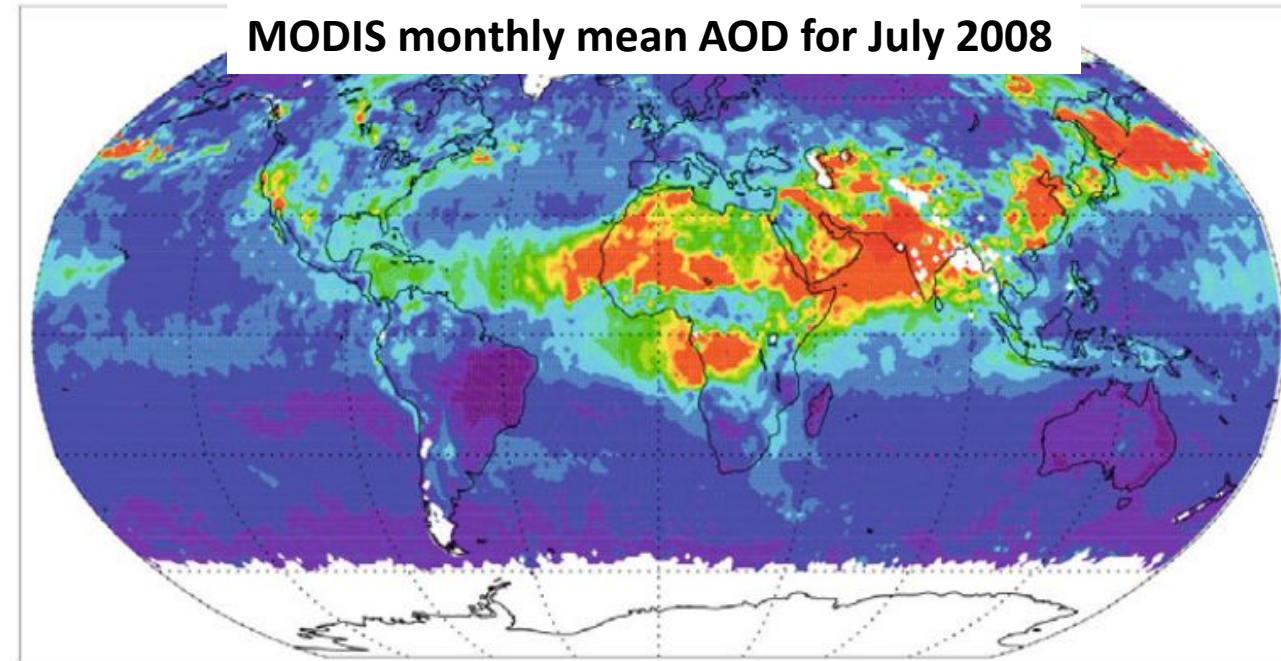
0.2 - saubere urbane Umgebung

0.4 - leicht verschmutzte urbane Umgebung

0.6 - stark verschmutzte urbane Umgebung

1.5 - hohe Aerosolbelastung,
zB durch Waldbrand oder Mineralstaub

MODIS monthly mean AOD for July 2008



AOD



Grundlegende Messansätze

Fernerkundung

→ Charakterisierung „aus der Ferne“

- Messung primär über Strahlungseigenschaften
- Größere Räumliche Abdeckung
Satelliten → global
Stationär → atmosphärische Säule
- Lange Zeiträume
- Geringe Ortsauflösung
- Nur wenige Parameter
- Limitationen Wetter (Wolken), Oberflächen, etc
- zT große Messunsicherheiten

In-Situ Messungen

→ Messung „am Ort“

- Andere Wechselwirkungen möglich
- Geringe räumliche Abdeckung → Punktmessung
- Kurze Messesequenzen (Kampagnen)
oder ortsfeste Langzeitmessungen
- Spezifische Messsituationen
- Viele Parameter erfassbar
- Gezielte Erfassung bestimmter Prozesse

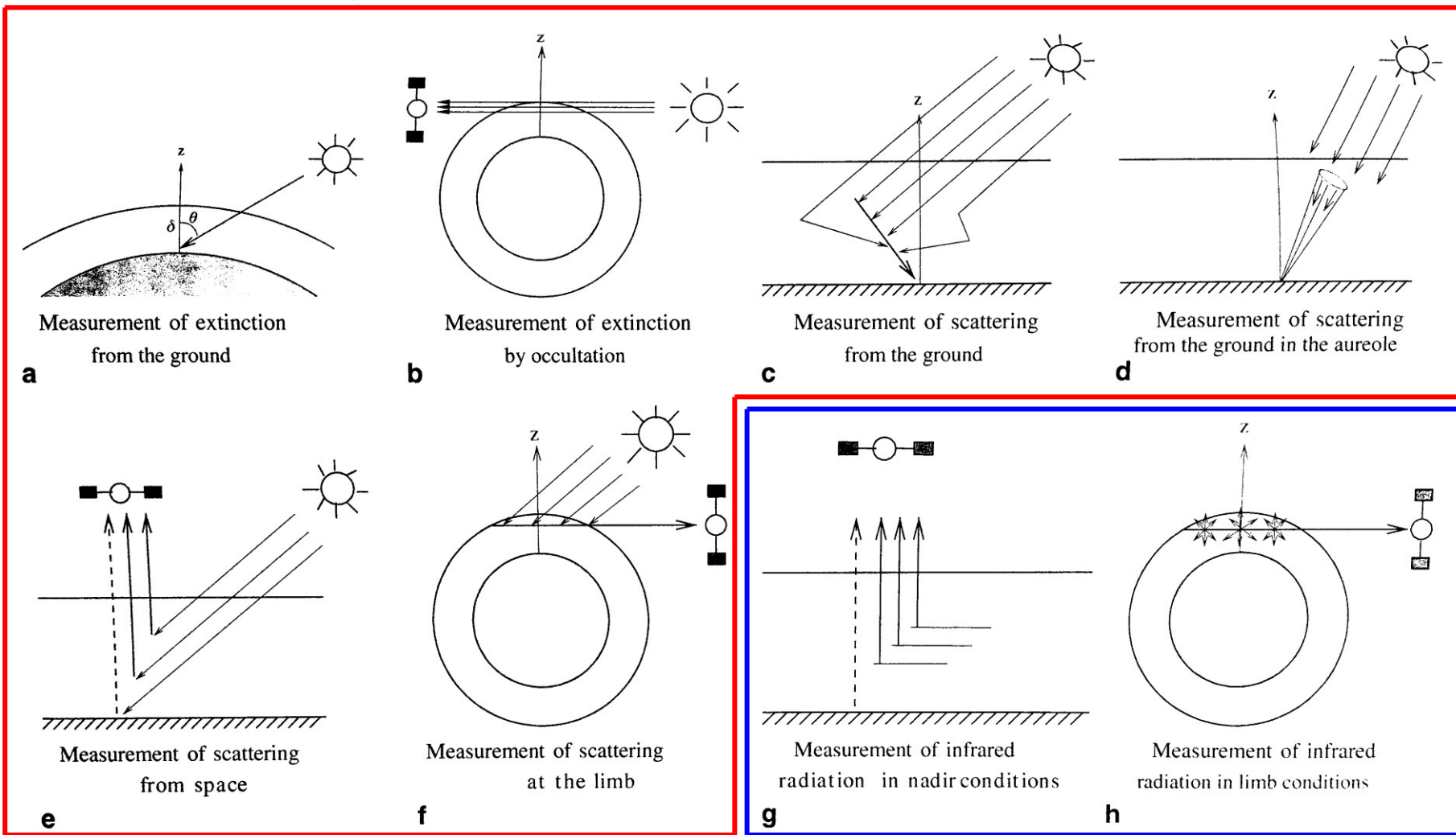
Kombination von beidem: Validierung, Interpretation und Optimierung von Fernerkundungsmethoden mit in-situ Messungen für große räumliche/zeitliche Abdeckung



Aerosolfernerkundung



Passive Fernerkundung



Strahlungsquelle:

Sonne

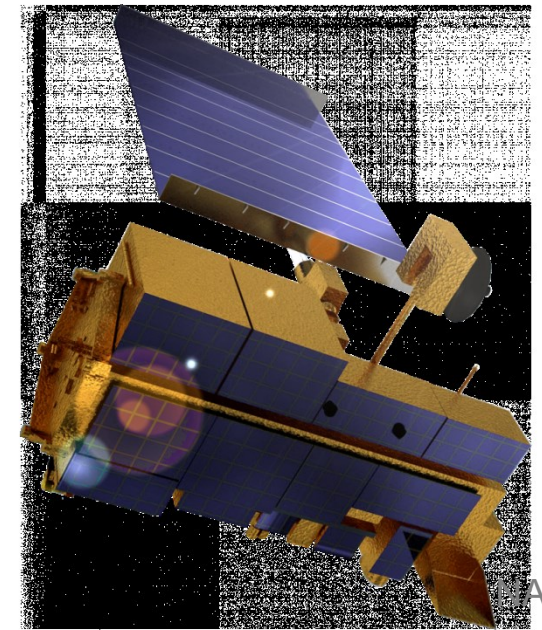
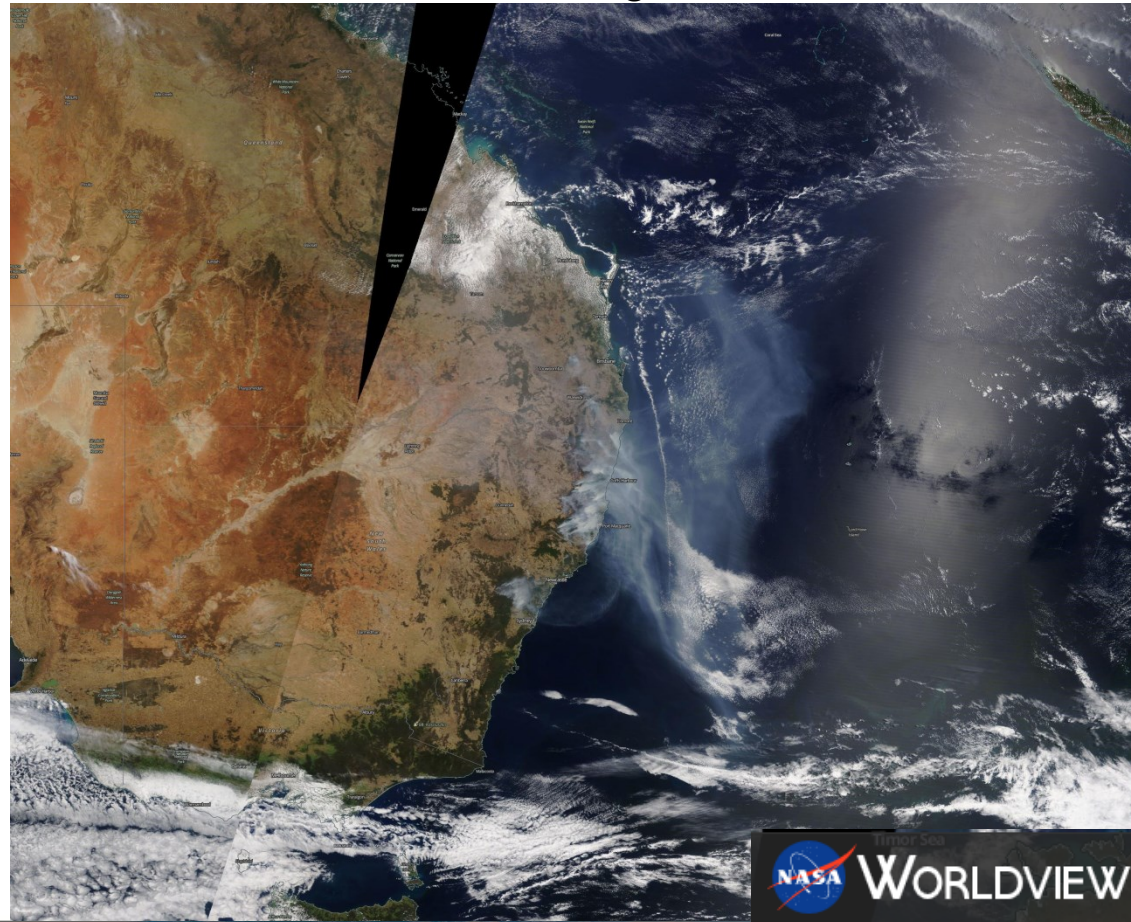
Terrestrische Strahlung



Passive Fernerkundung

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectrometer

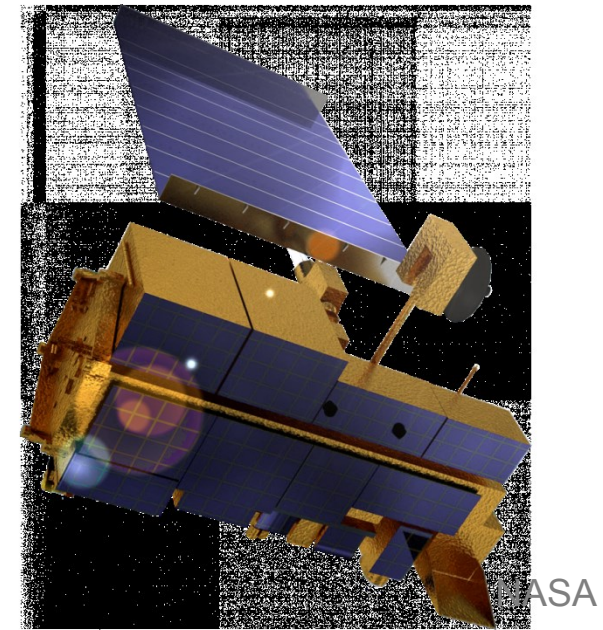
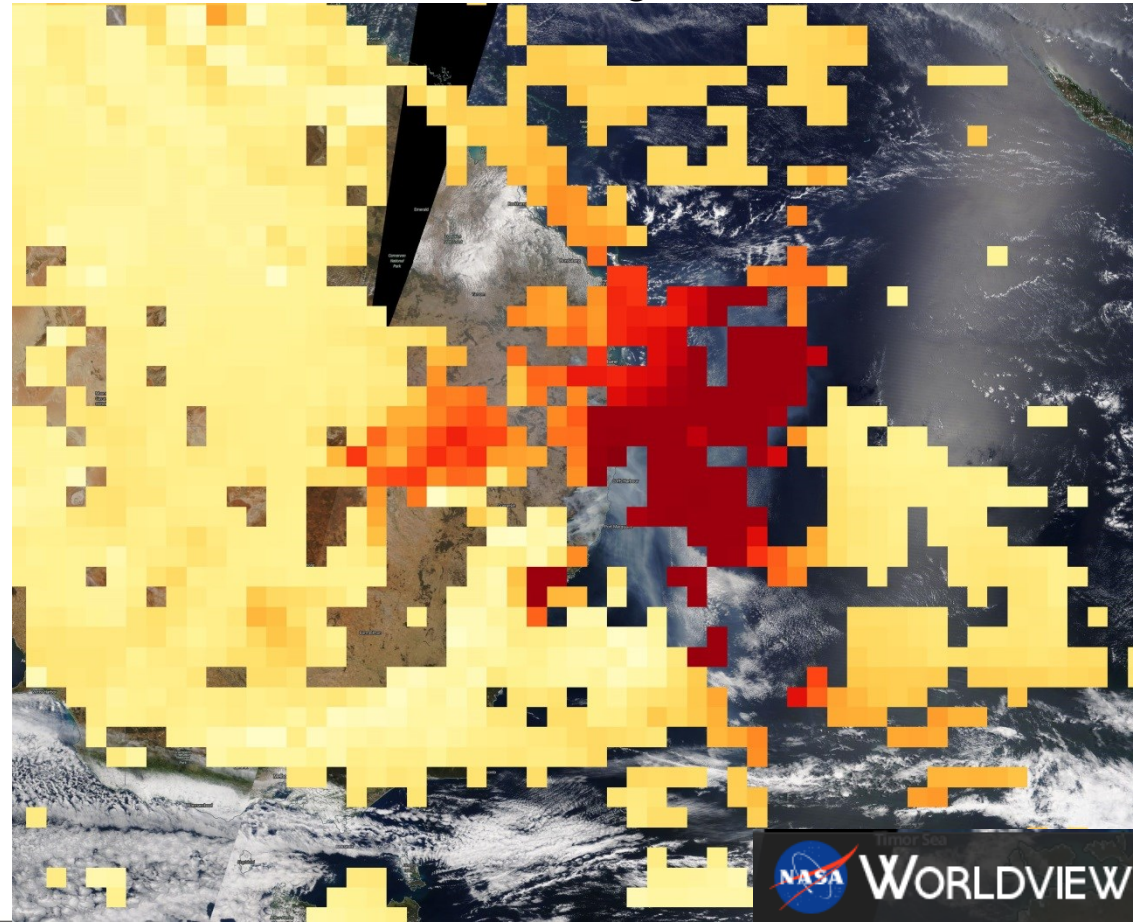
- Instrumente auf NASA Satelliten TERRA und AQUA
- Strahlungsmessung in 36 Kanälen mit Wellenlängen zwischen 0.41 und 15 μ m – 8 davon zur Aerosolerkennung
- Polarer Orbit
→ Erfassung der gesamten Erde innerhalb von 2 Tagen



Passive Fernerkundung

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectrometer

- Instrumente auf NASA Satelliten TERRA und AQUA
- Strahlungsmessung in 36 Kanälen mit Wellenlängen zwischen 0.41 und 15 μ m – 8 davon zur Aerosolerkennung
- Polarer Orbit
→ Erfassung der gesamten Erde innerhalb von 2 Tagen

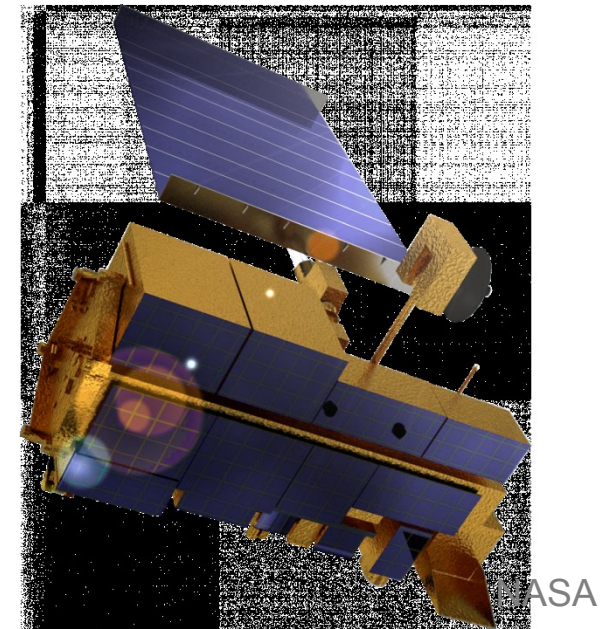
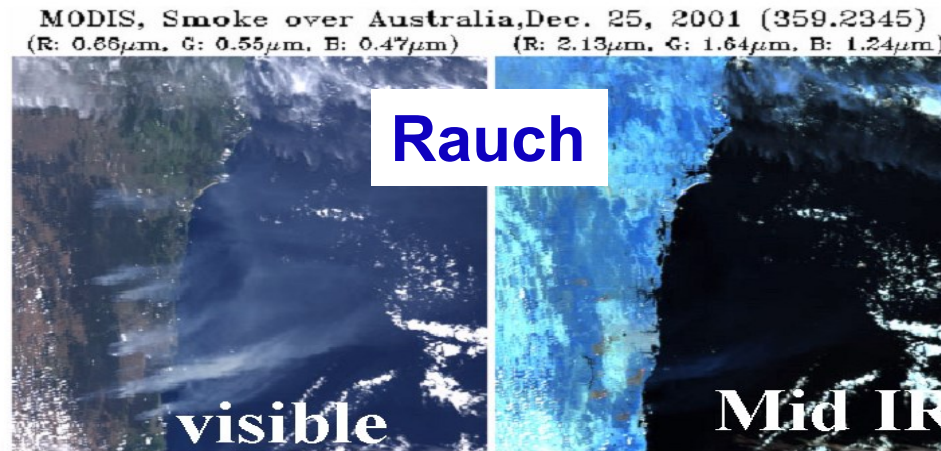
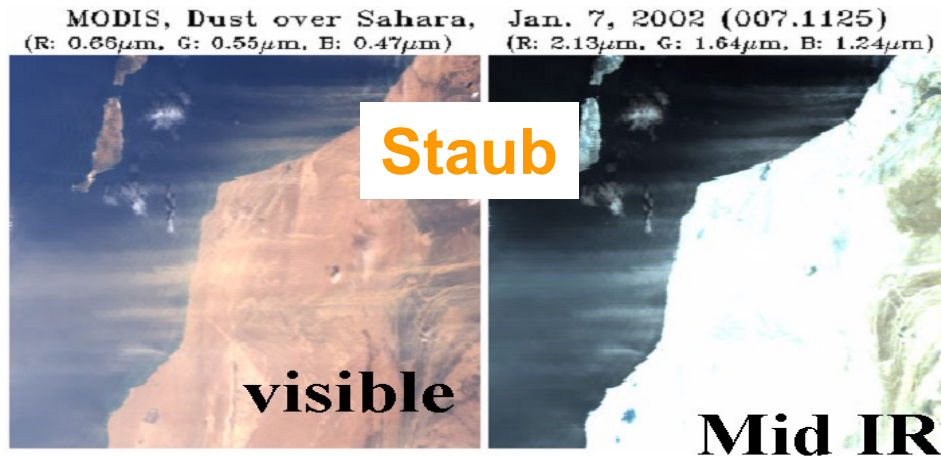


Ostküste Australiens
am 14. Nov 2019
- MODIS True Color
- AOD Overlay

Passive Fernerkundung

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectrometer

- Trennung von **Grobparkeln** und **Feinmode** über Vergleich der Beobachtung bei verschiedene Wellenlängen
- in **kurzwelligem Licht**
→ Staub und Rauch sichtbar
- In **langwelligem Licht**:
→ nur Staub sichtbar



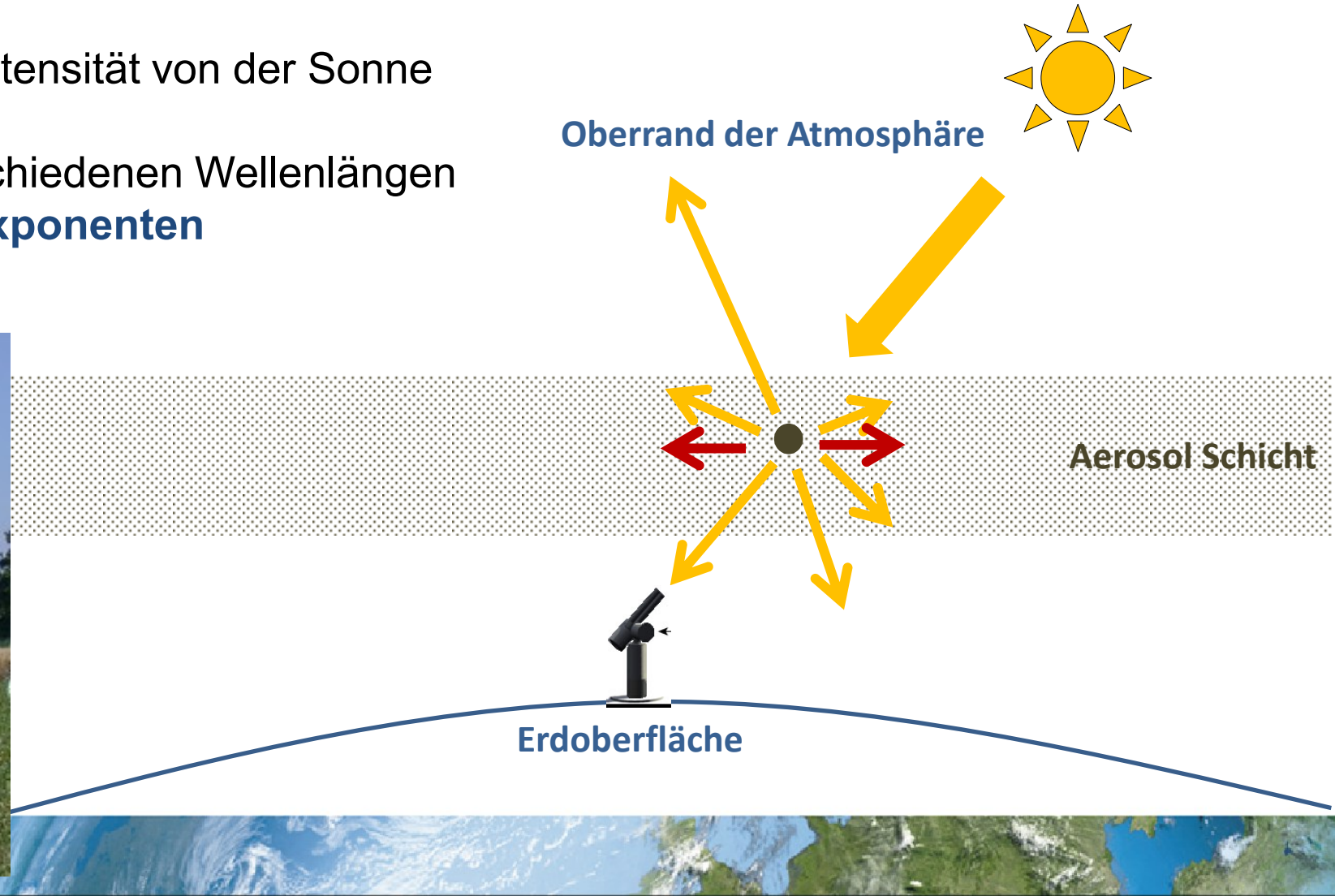
Passive Fernerkundung Sonnenphotometer

Direkte Messung der Strahlungsintensität von der Sonne

→ **Aerosol Optische Dicke**

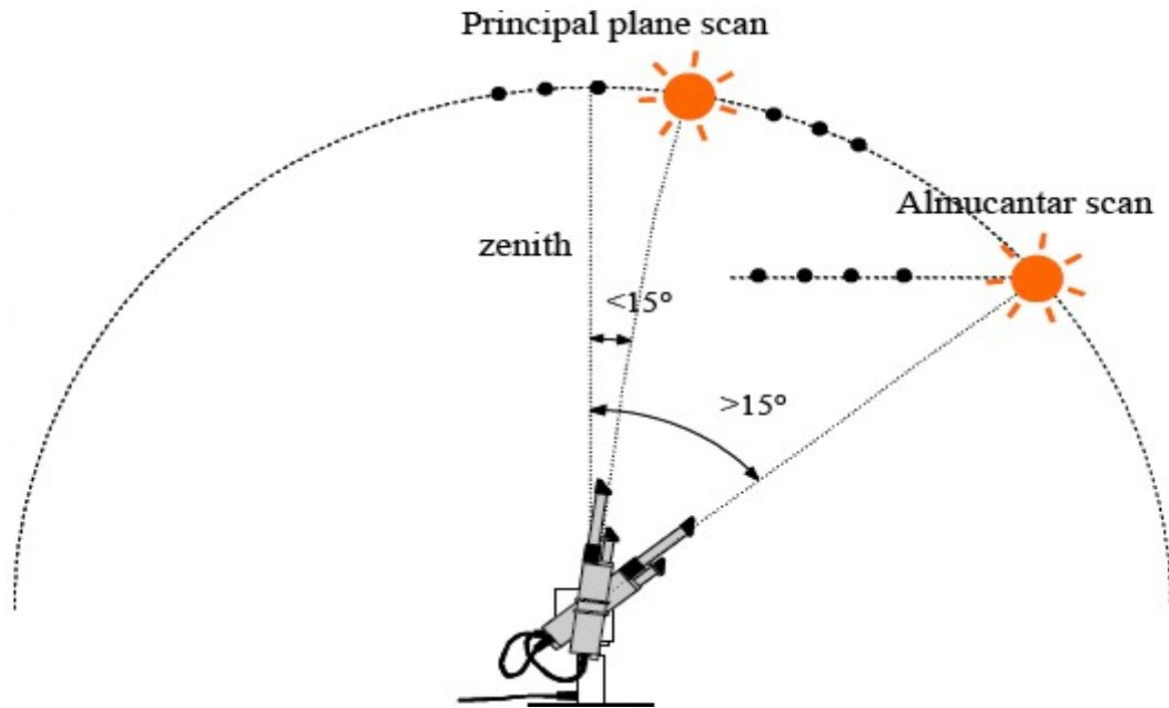
Messung typischerweise bei verschiedenen Wellenlängen

→ Bestimmung des **Angström-Exponenten**



Passive Fernerkundung Sonnenphotometer

Durch Messung der Strahlung aus verschiedenen Winkelbereichen um die Sonne
→ Ableitung zusätzlichen Aerosoleigenschaften



Source: Grant Petty

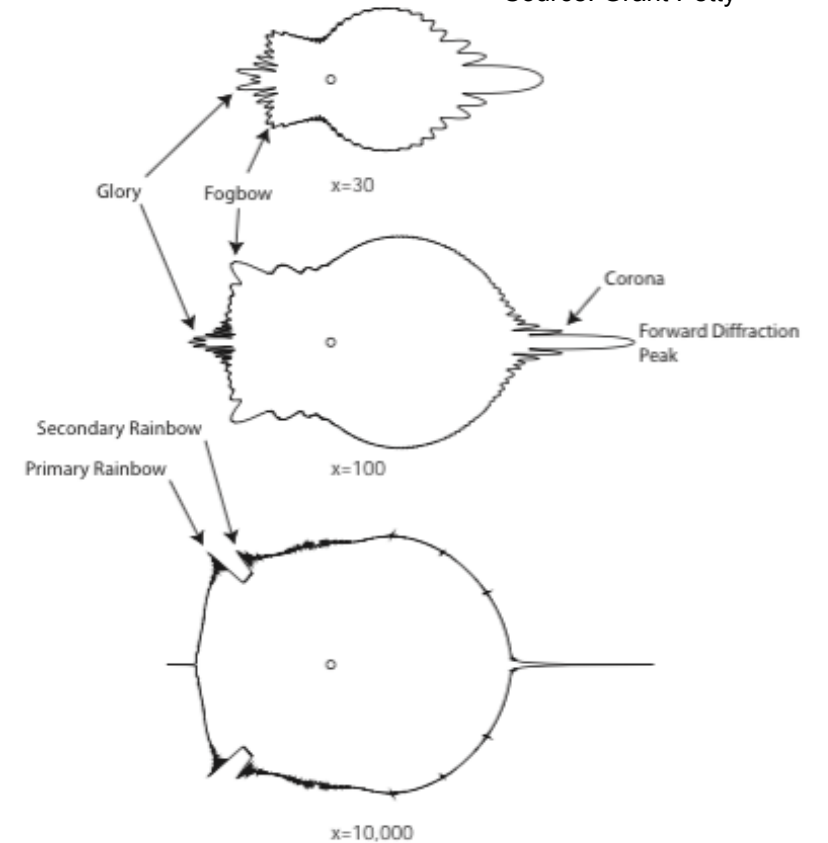
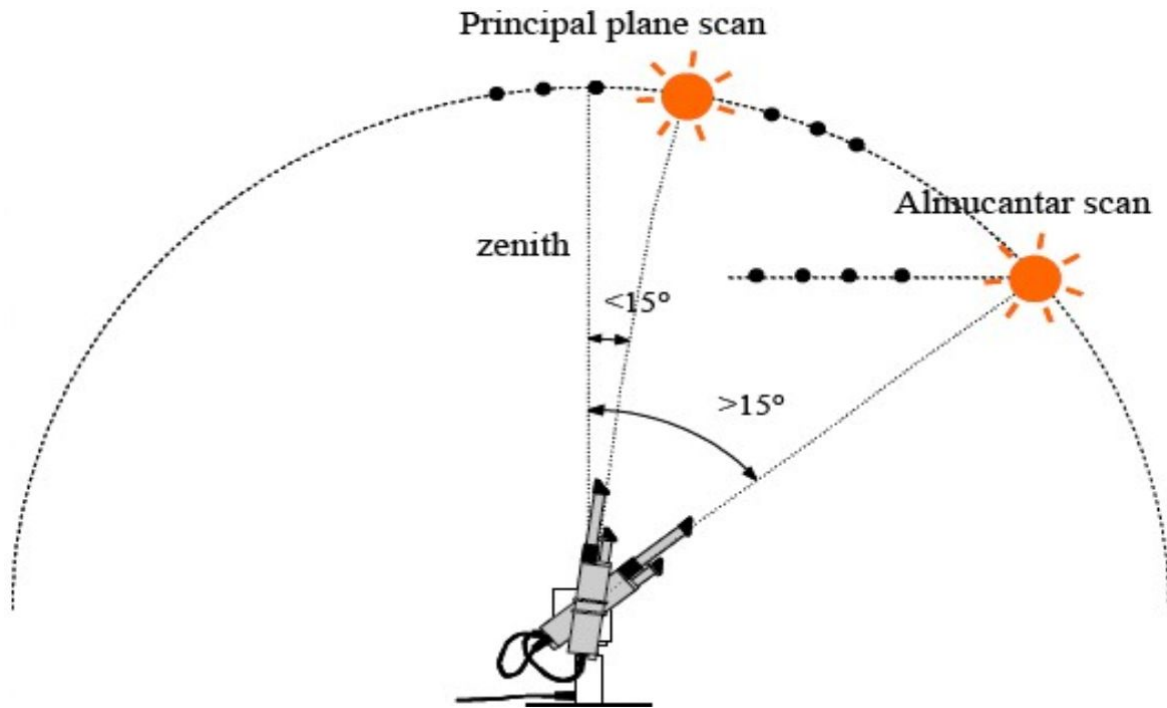


Fig. 12.9: Similar to Fig. 12.8, but plotted as $\log[p(\Theta)]$ so as to better accommodate the extreme variations in the amplitude of the phase function for large x . Commonly observed optical features associated with the phase function are indicated. Note the δ -function-like characteristic of the forward and backward peaks for the largest values of x .



Passive Fernerkundung Sonnenphotometer

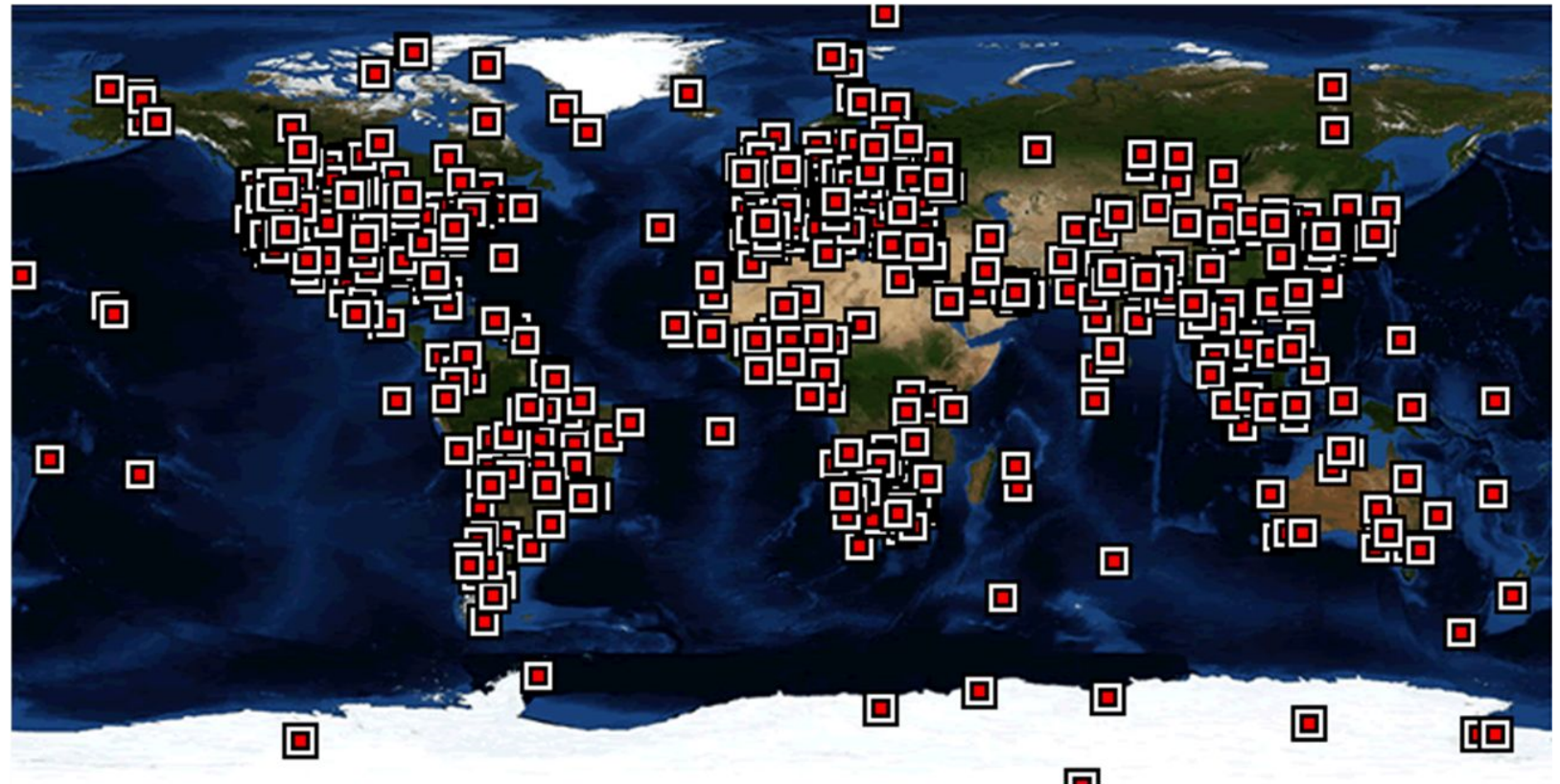
Durch Messung der Strahlung aus verschiedenen
Winkelbereichen um die Sonne
→ Ableitung zusätzlichen Aerosoleigenschaften



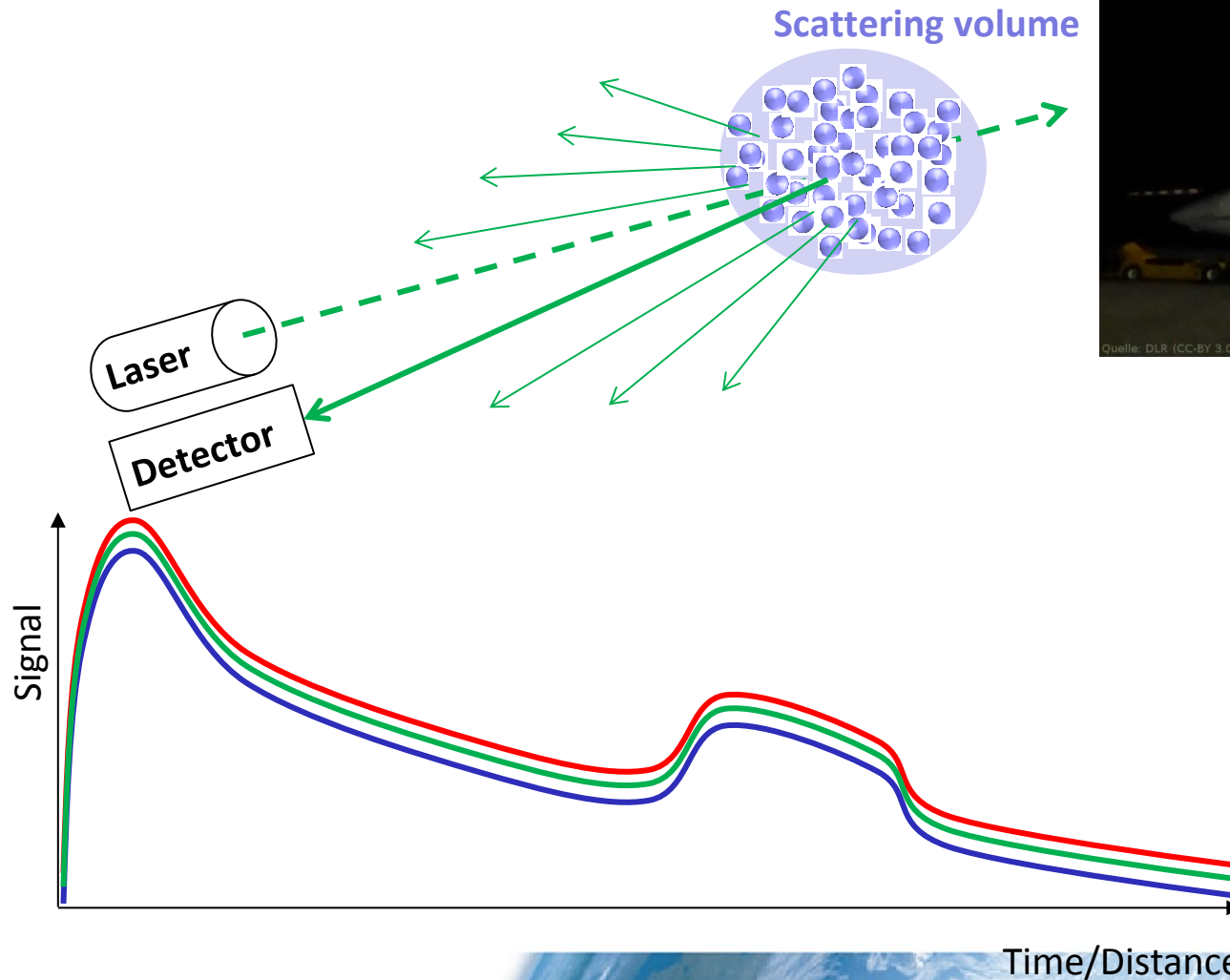
AERONET – Aerosol Robotic Network

- Bodengebundenes weltweites Netzwerk von Sonnenphotometern
- Reichhaltiger Datensatz aus ~25 Jahren automatisierter Beobachtungen von Aerosoleigenschaften

<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

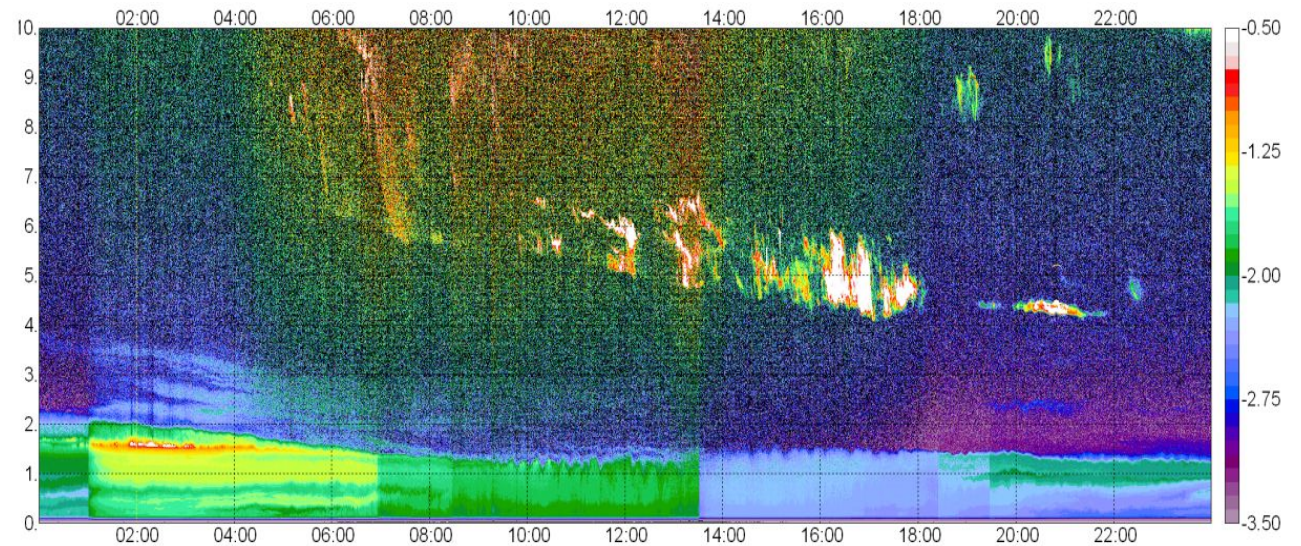
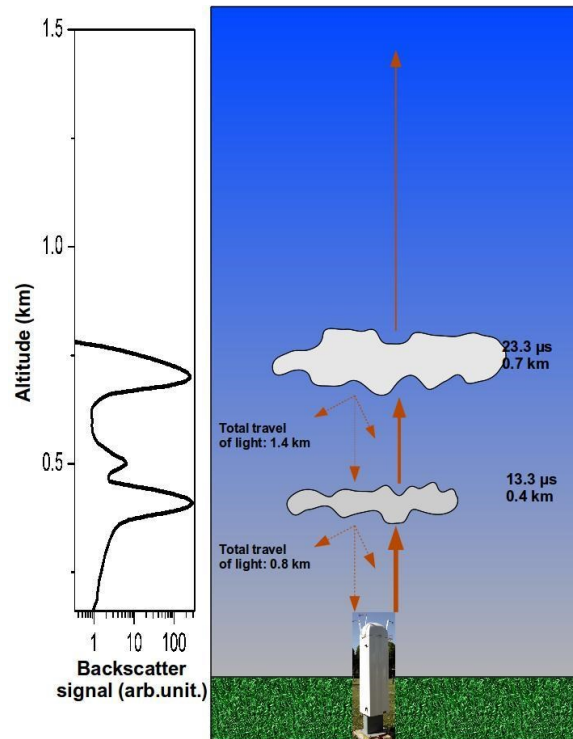


Aktive Fernerkundung – Lidar „Light Detection and Ranging“



Aktive Fernerkundung – Lidar

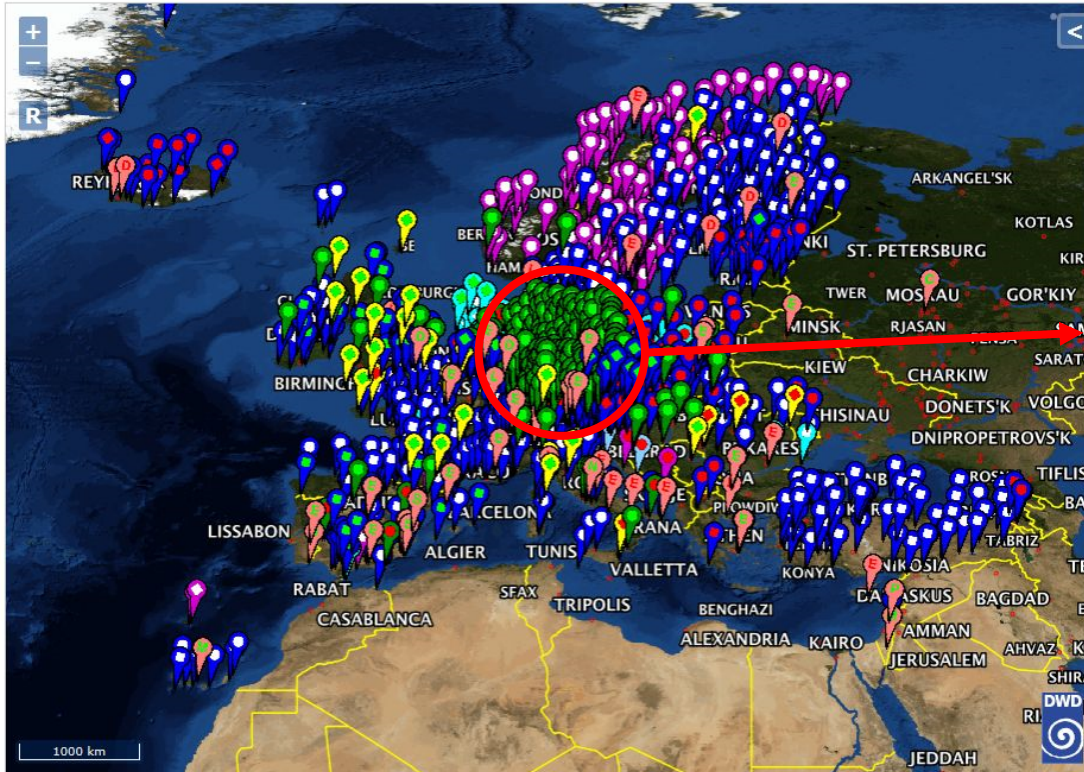
Einfaches Rückstreulidar - Ceilometer



Bestimmung von Wolken und dickeren Aerosolschichten

→ Flächendeckendes Beobachtungsnetzwerk

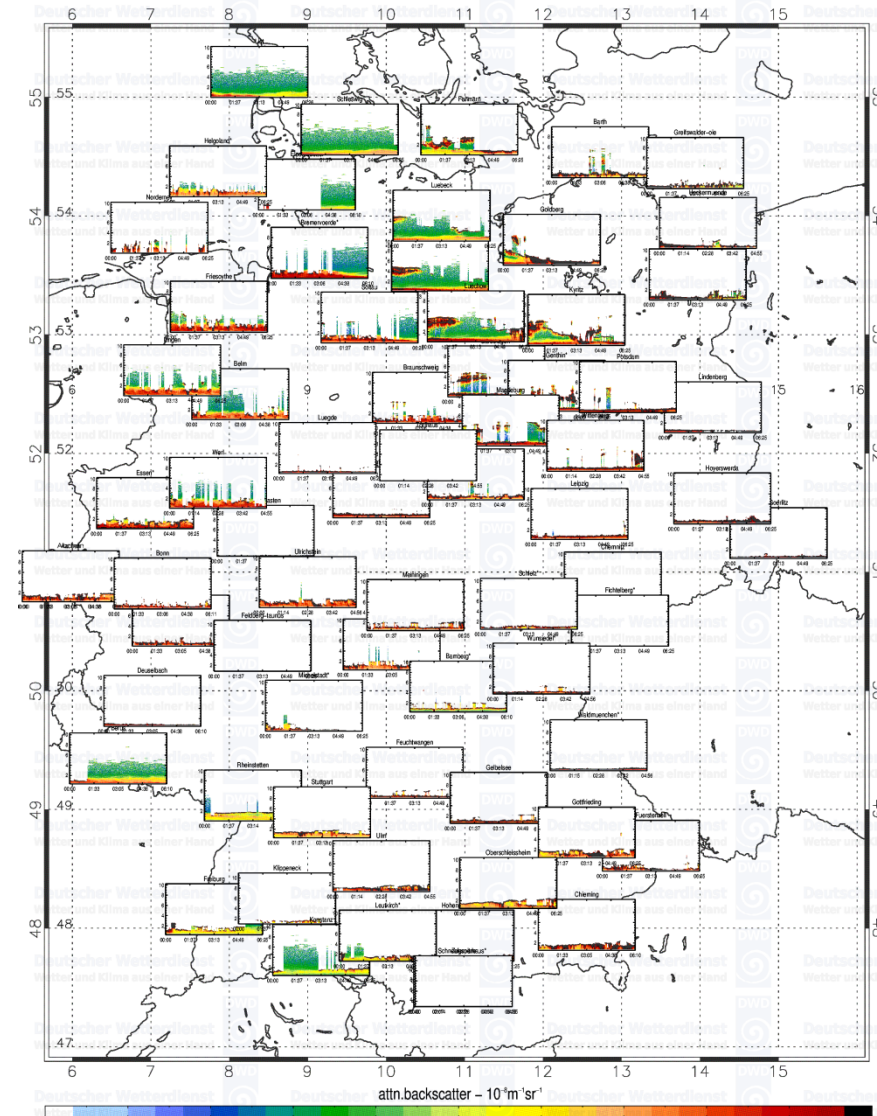
DWD Ceilometernetzwerk



https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/aerosol/inh_nav/aerosolprofile_node.html

DWD Ceilonet – Attenuated Backscatter

11 Dec 2018



Aktive Fernerkundung – Lidar

Grundprinzip der Messung - Lidargleichung

$$P(r) = P'_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{c \Delta \tau}{2} \right) O(r) \beta(r) T(r, \lambda)$$



Foto: M. Dollner



Aktive Fernerkundung – Lidar

Grundprinzip der Messung - Lidargleichung

$$P(r) = P'_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{c \Delta \tau}{2} \right) O(r) \beta(r) \exp \left(-2 \int_0^r \alpha(r, \lambda) dr \right)$$

Lidar Systemparameter



Foto: M. Dollner



Aktive Fernerkundung – Lidar

Grundprinzip der Messung - Lidargleichung

$$P(r) = P'_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{c \Delta \tau}{2} \right) O(r) \beta(r) \exp \left(-2 \int_0^r \alpha(r, \lambda) dr \right)$$

Lidar Systemparameter

Atmosphäre

Rückstreuoeffizient

Transmission



Foto: M. Dollner



Aktive Fernerkundung – Lidar

Grundprinzip der Messung - Lidargleichung

$$P(r) = P'_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{c \Delta \tau}{2} \right) O(r) \beta(r) \exp \left(-2 \int_0^r \alpha(r, \lambda) dr \right)$$

Lidar Systemparameter Atmosphäre

Rückstreukoeffizient Transmission

Rückstreukoeffizient β und Extinktion α enthalten Informationen über die Eigenschaften der streuenden Partikel

Definition Lidar-Verhältnis: $S = \frac{\alpha_{aer}}{\beta_{aer}} \rightarrow$ notwendig zu Ableitung von Aerosoleigenschaften

\rightarrow S aus Annahmen über Annahmen oder über direkte Messung:
Raman-Streusignal oder High-Spectral-Resolution Lidar Technik



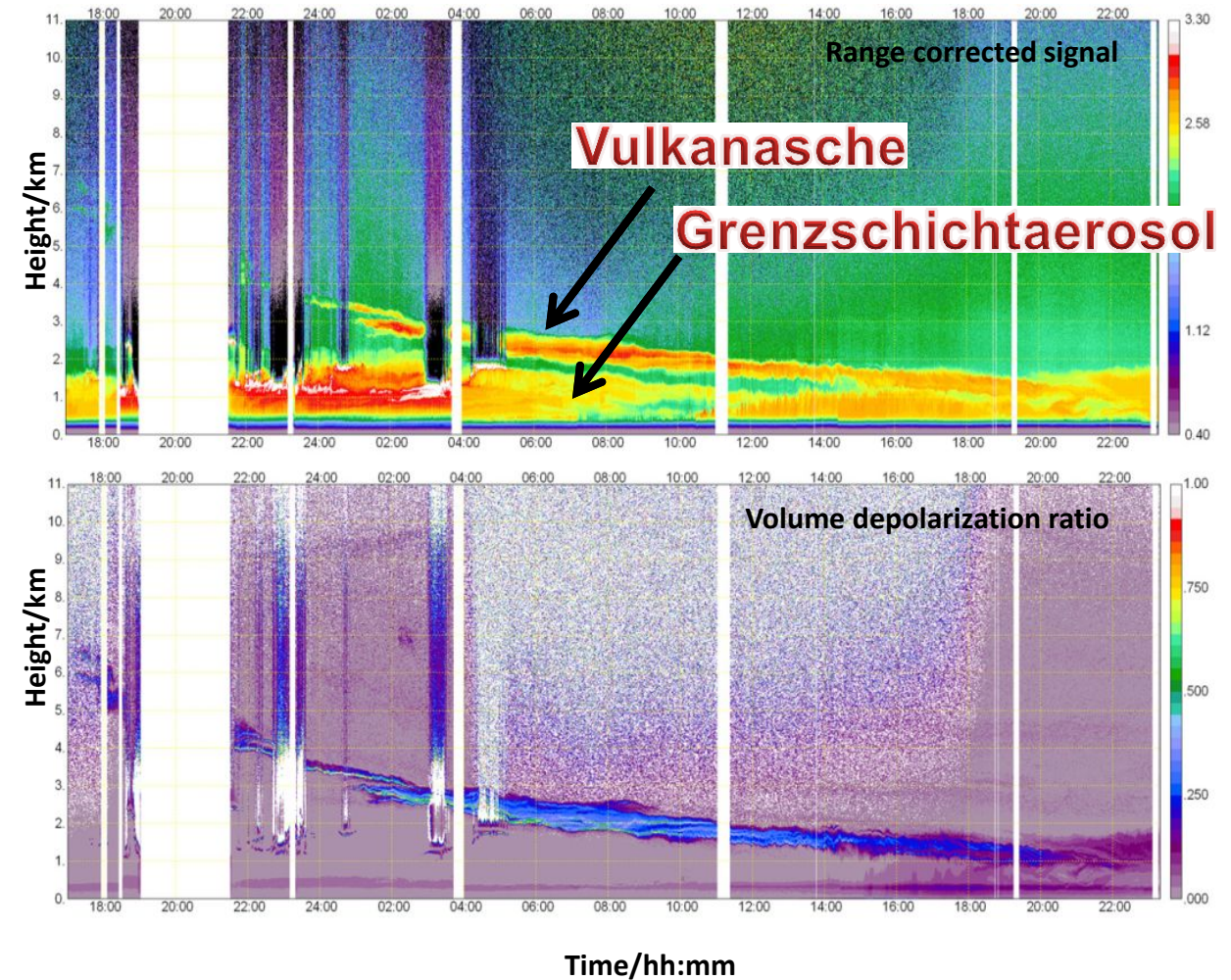
Foto: M. Dollner

Aktive Fernerkundung – Lidar

Weitergehende Techniken

Zusätzliche Informationen über Aerosoleigenschaften durch

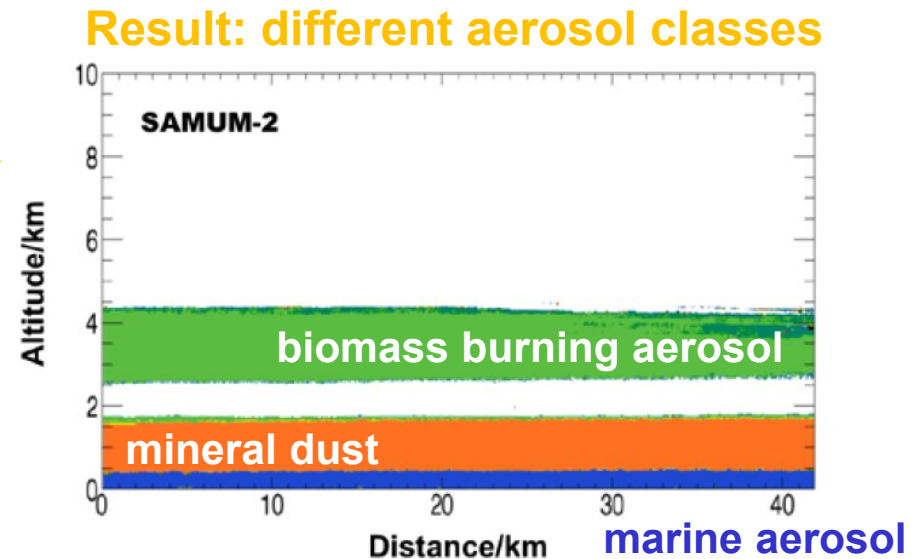
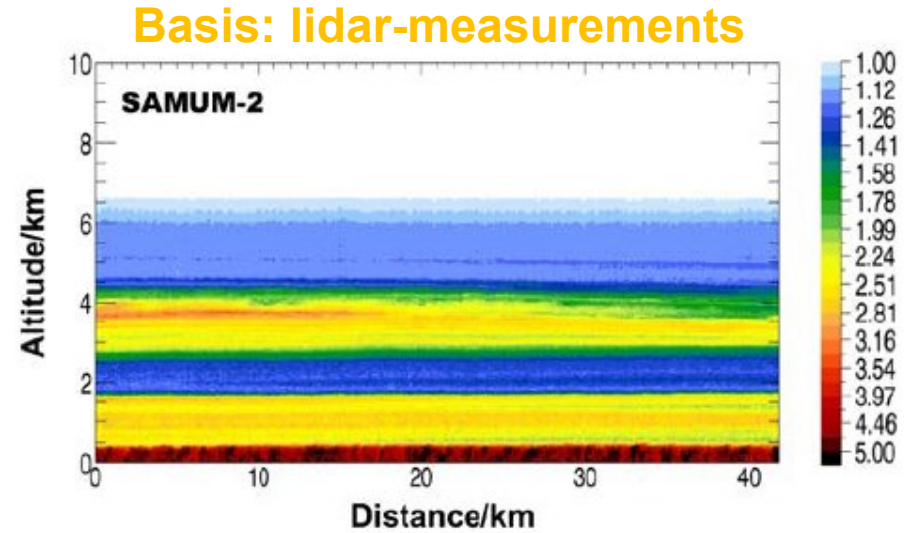
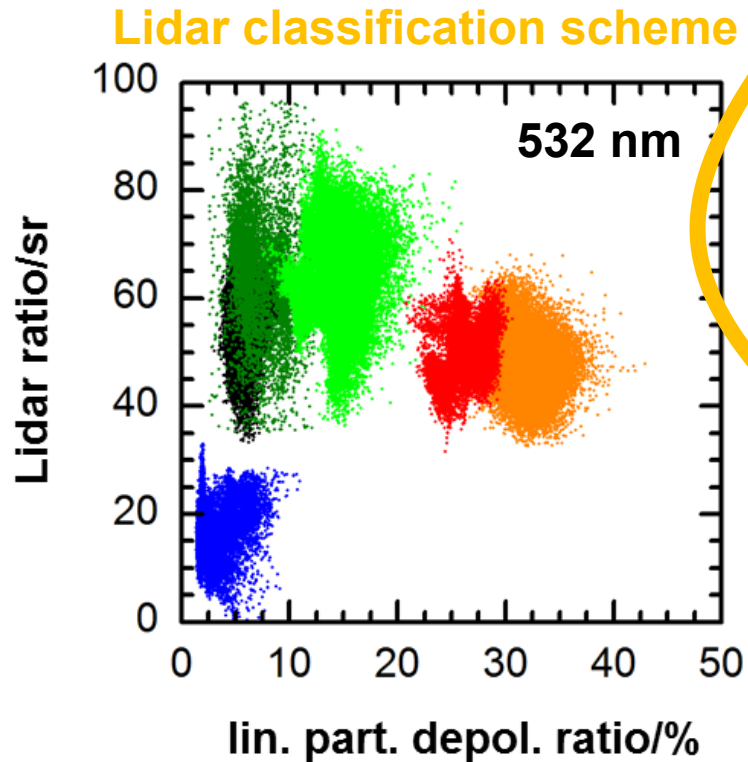
- Nutzung mehrerer **Wellenlängen**
- Auswertung des Signals **elastischer Streuvorgänge** (Raman-Streuung)
- Trennung von **Molekül- und Partikelstreuung** durch schmal-bandige Filter (High-Spectral-Resolution Lidar)
- Nutzung der Änderung in der **Polarisation** des rückgestreuten Lichts



Groß et al., 2012



Aktive Fernerkundung – Lidar Aerosolklassifizierung

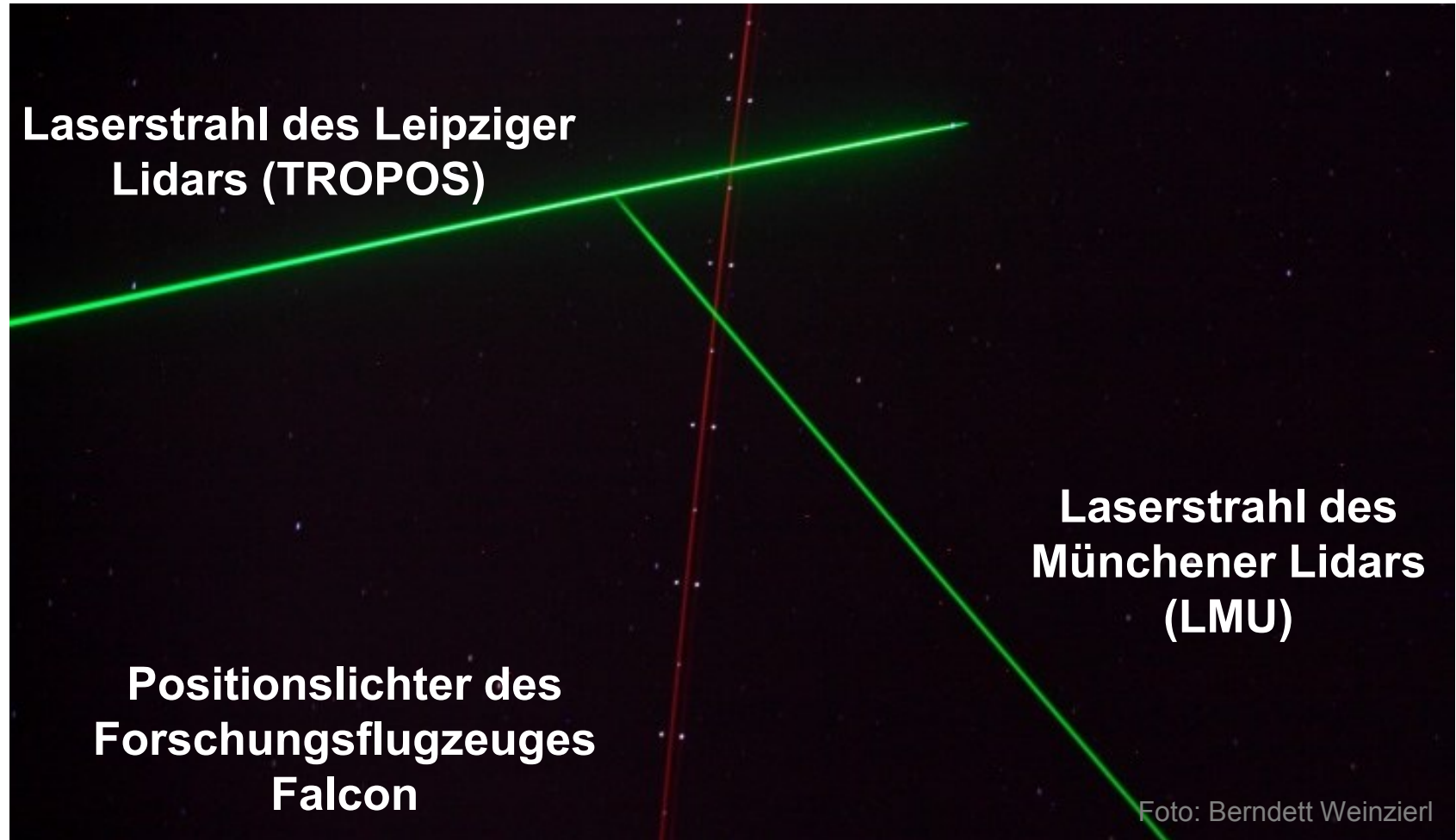


Validierung durch eine Reihe von in-situ-Messungen

Validierung von Fernerkundungsmessungen

Durch koordinierte in-situ
Messungen können Datenretrieval-
Algorithmen validiert werden.

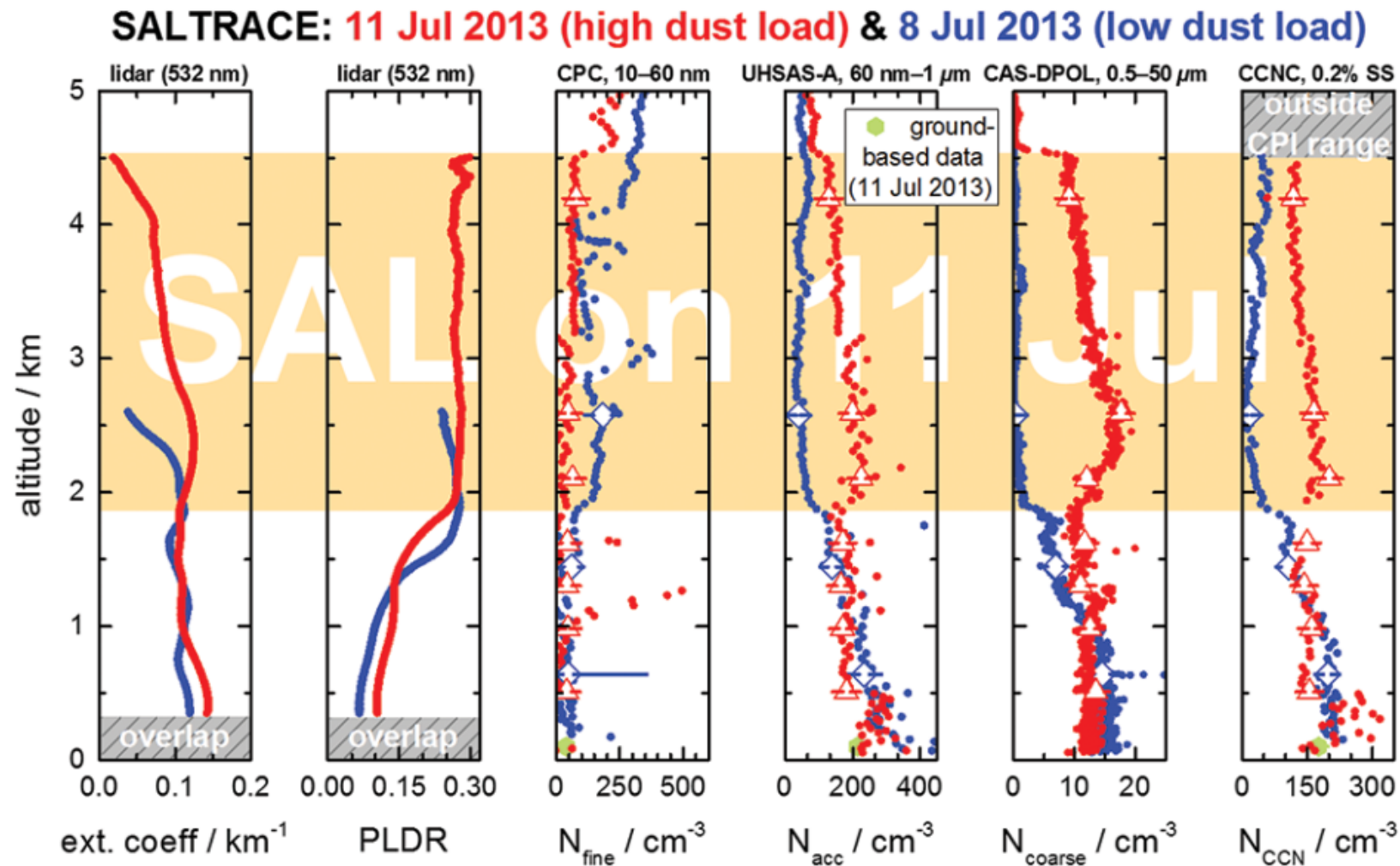
- Überflüge über Lidar-Stationen
- Satelliten-Unterfliegungen



Validierung von Fernerkundungsmessungen

Durch koordinierte in-situ Messungen können Datenretrieval-Algorithmen validiert werden.

- ➔ Überflüge über Lidar-Stationen
- ➔ Satelliten-Unterfliegungen

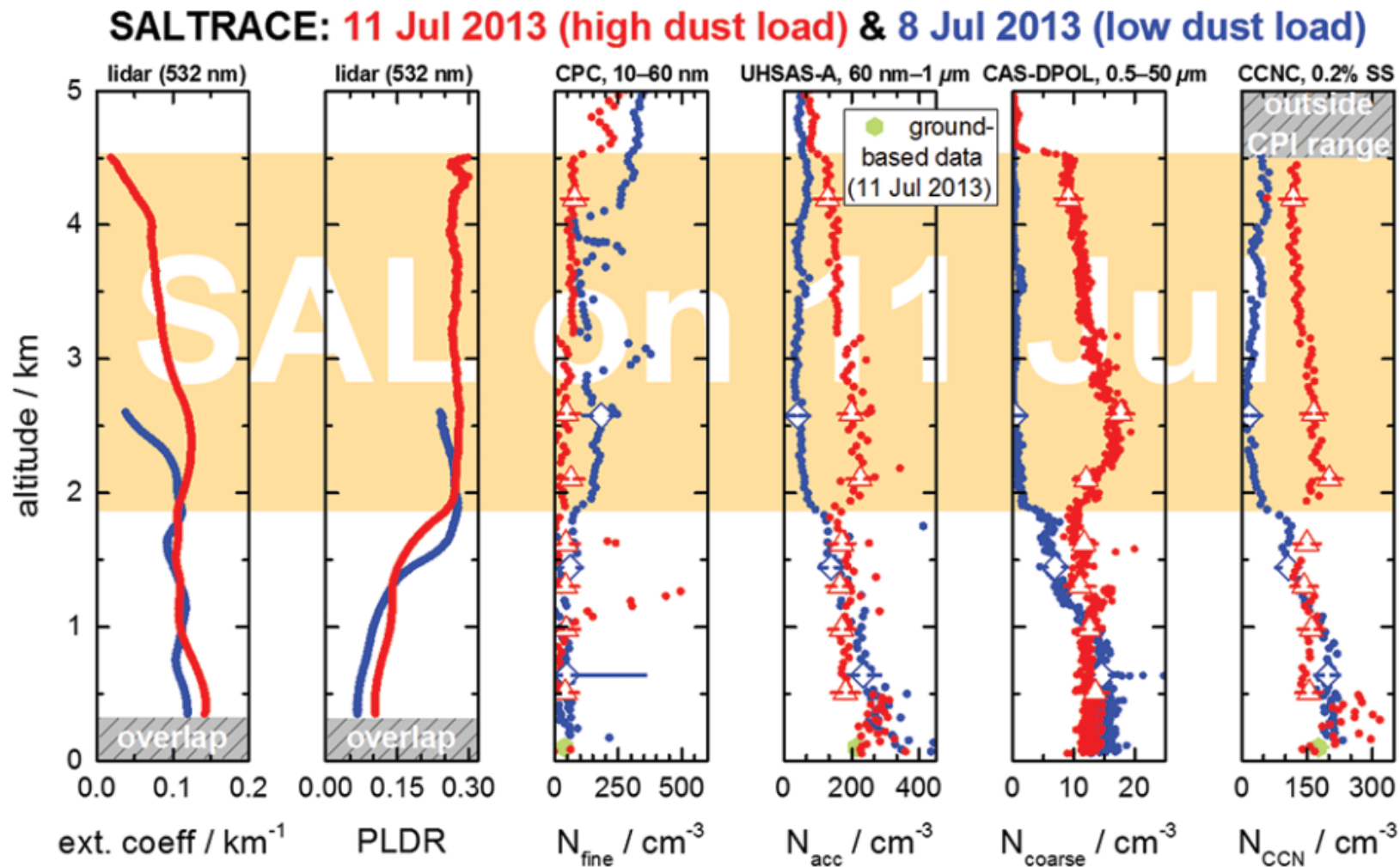


Weinzierl et al (2017)

Validierung von Fernerkundungsmessungen

Durch koordinierte in-situ Messungen können Datenretrieval-Algorithmen validiert werden.

- ➔ Überflüge über Lidar-Stationen
- ➔ Satelliten-Unterfliegungen

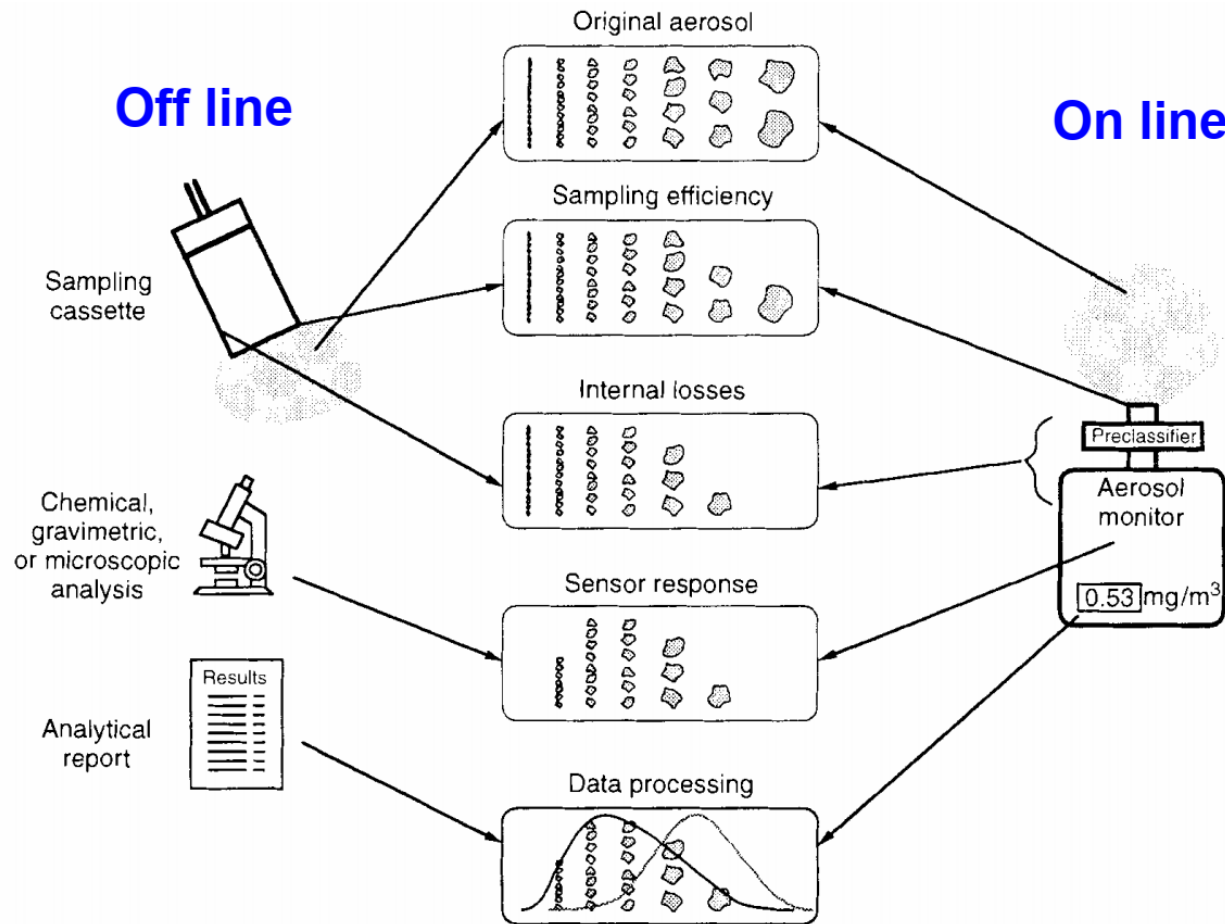


Weinzierl et al (2017)

In-situ Messungen



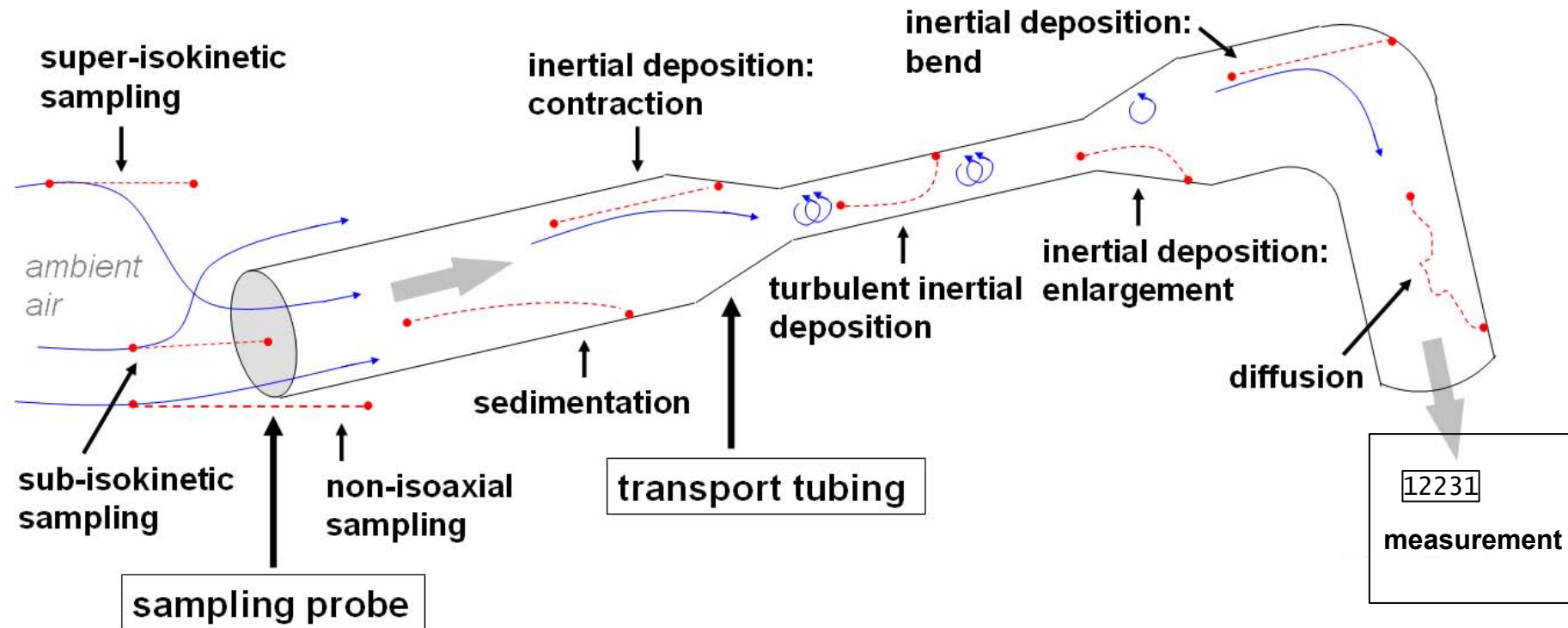
Veränderung der Aerosolgrößenverteilung durch Messung



Eine gute **Charakterisierung** des Messsystems hinsichtlich **Detektionseffizienz** und **Partikelverluste** ist unerlässlich, um auf die ursprünglichen Aersoleigenschaften in der Atmosphäre rückschließen zu können!

Baron and Willeke, Aerosol Measurement, 2001.

Verluste in Einlässen und Leitungen

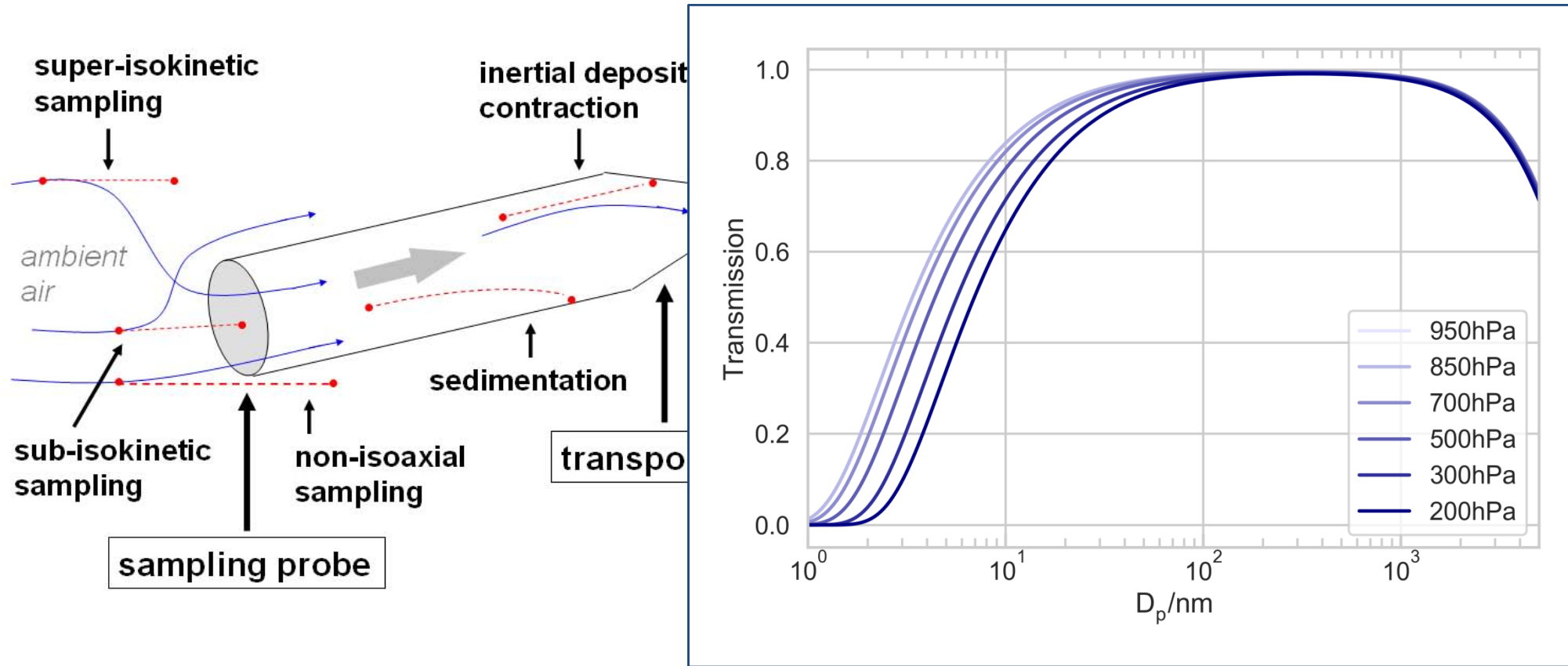


von der Weiden et al, (2009)

Sammeleffizienz des Gesamtsystems ergibt sich aus dem Produkt der Effizienzen der Einzelkomponenten
→ Detaillierte Charakterisierung aller Verlustprozesse wichtig!



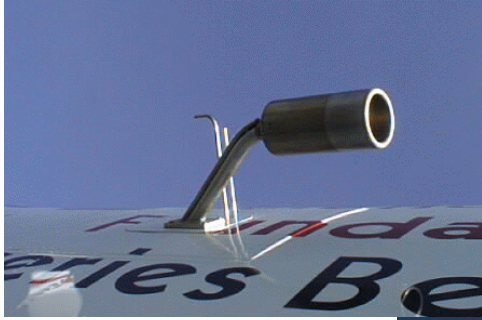
Verluste in Einlässen und Leitungen



Sammeleffizienz des Gesamtsystems ergibt sich aus dem Produkt der Effizienzen der Einzelkomponenten
 → Detaillierte Charakterisierung aller Verlustprozesse wichtig!



Einlasssysteme für Flugzeugmessungen



Einlasssysteme für Flugzeugmessungen HALO Aerosoleinlass – HASI (HALO Subr

Ziel: Messung von **interstitiellen** sub-mikrometer Aerosolen unter **Erhaltung der Größenverteilung**

→ Isokinetischer Einlass

- Verlangsamung des Luftstroms
- Abgriffe der Probenluft mit gleicher Geschwindigkeit
- Vermeidung von scharfen Kurven und zu langen Leitungen zur Reduktion von Partikelverlusten

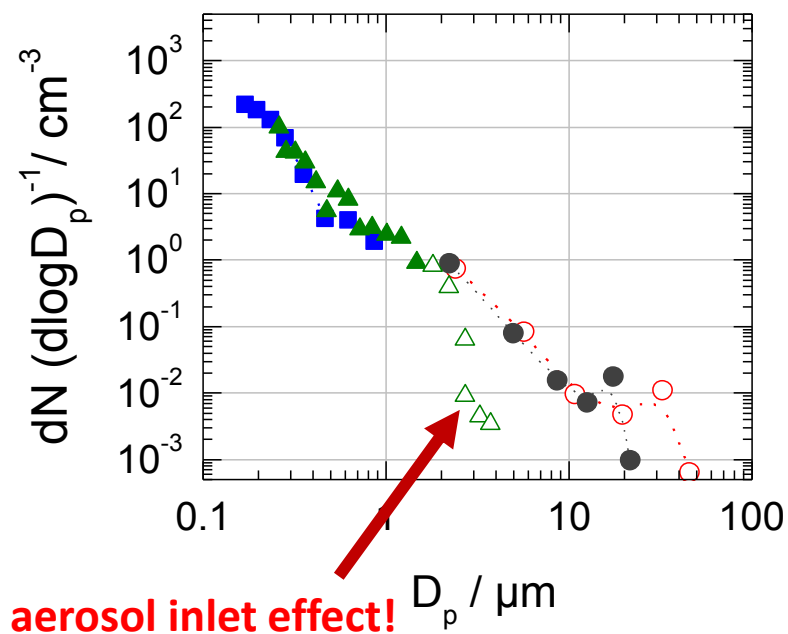


Einlasssysteme für Flugzeugmessungen HALO Aerosoleinlass – HASI (HALO Subr)

Ziel: Messung
Aerosolen unter

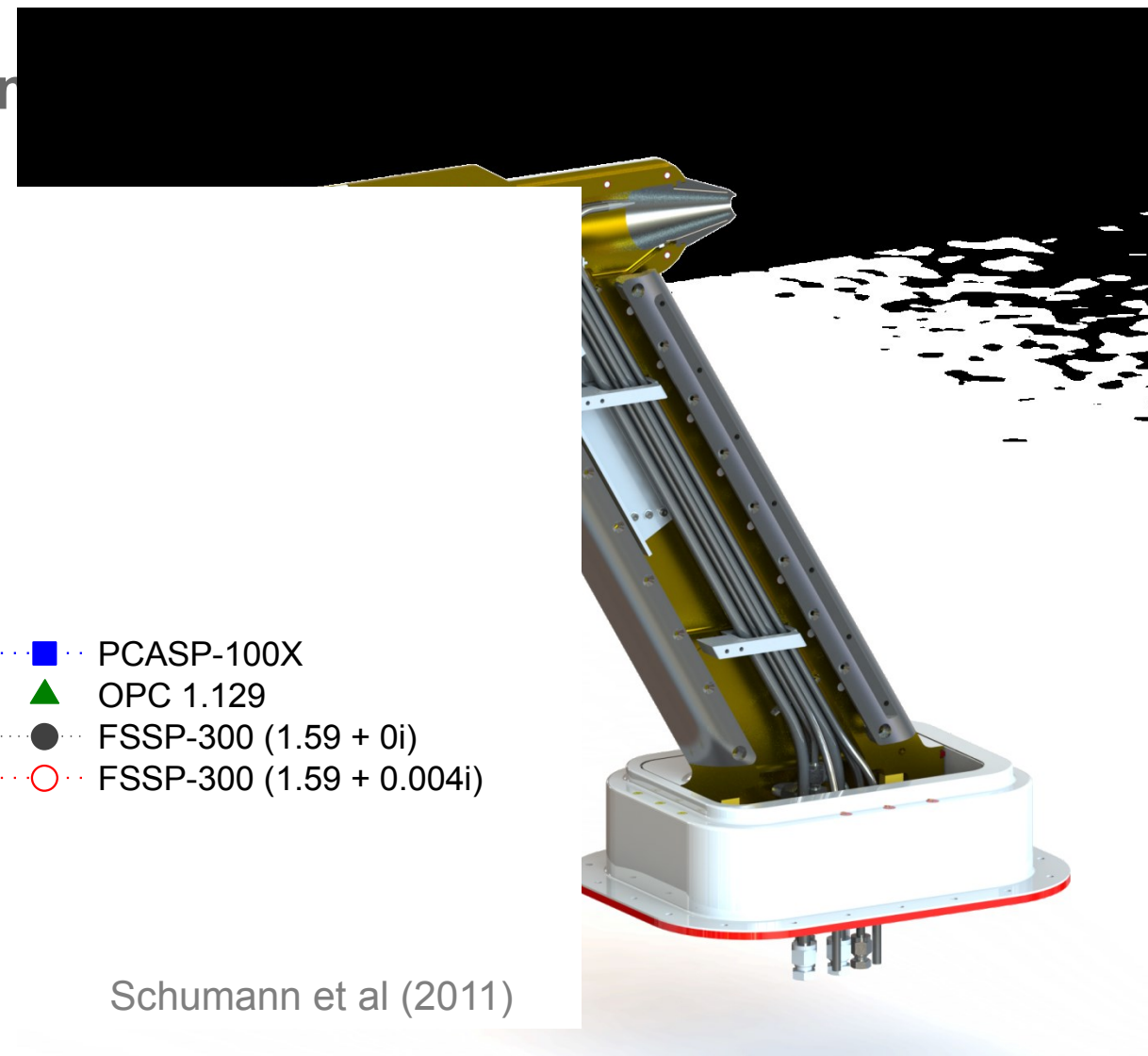
→ **Isokinetisch**

- Verlangsamung
- Abgriffe durch
Geschwindigkeit
- Vermeidung
langen Lages
Partikelver



- PCASP-100X
- OPC 1.129
- FSSP-300 (1.59 + 0i)
- FSSP-300 (1.59 + 0.004i)

Schumann et al (2011)

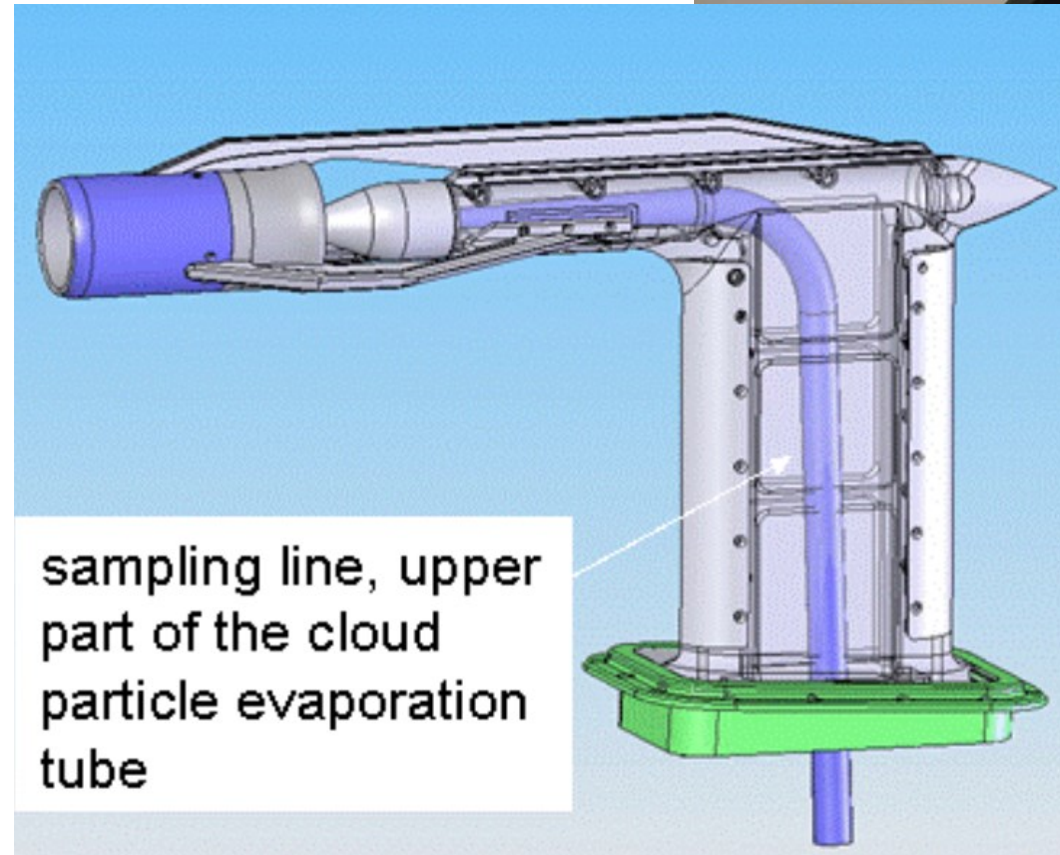
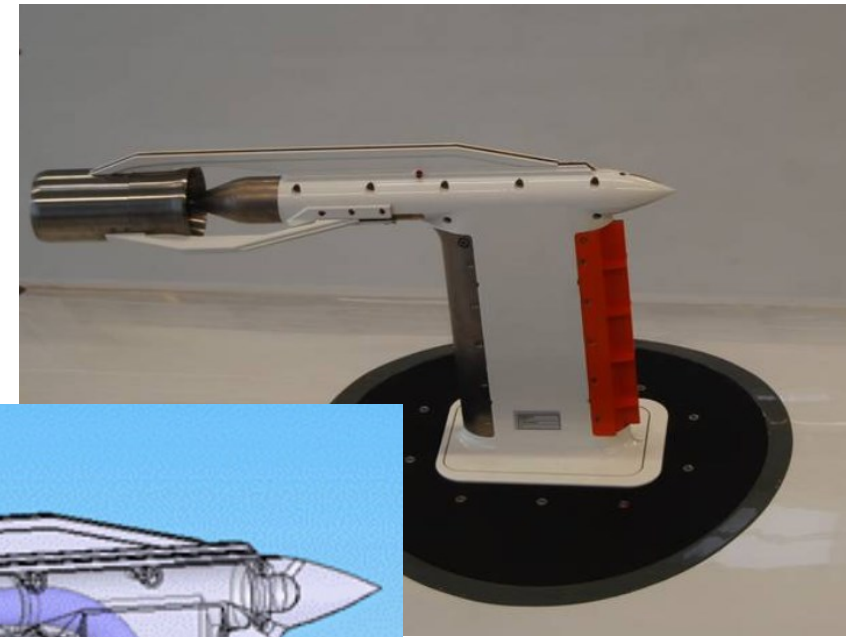


Einlasssysteme für Flugzeugmessungen Counterflow Virtual Impactor Inlet

Gezieltes Sammeln von
Wolkentropfen und **Eispartikeln**.

Verdampfen des Wassers im
Einlasssystem

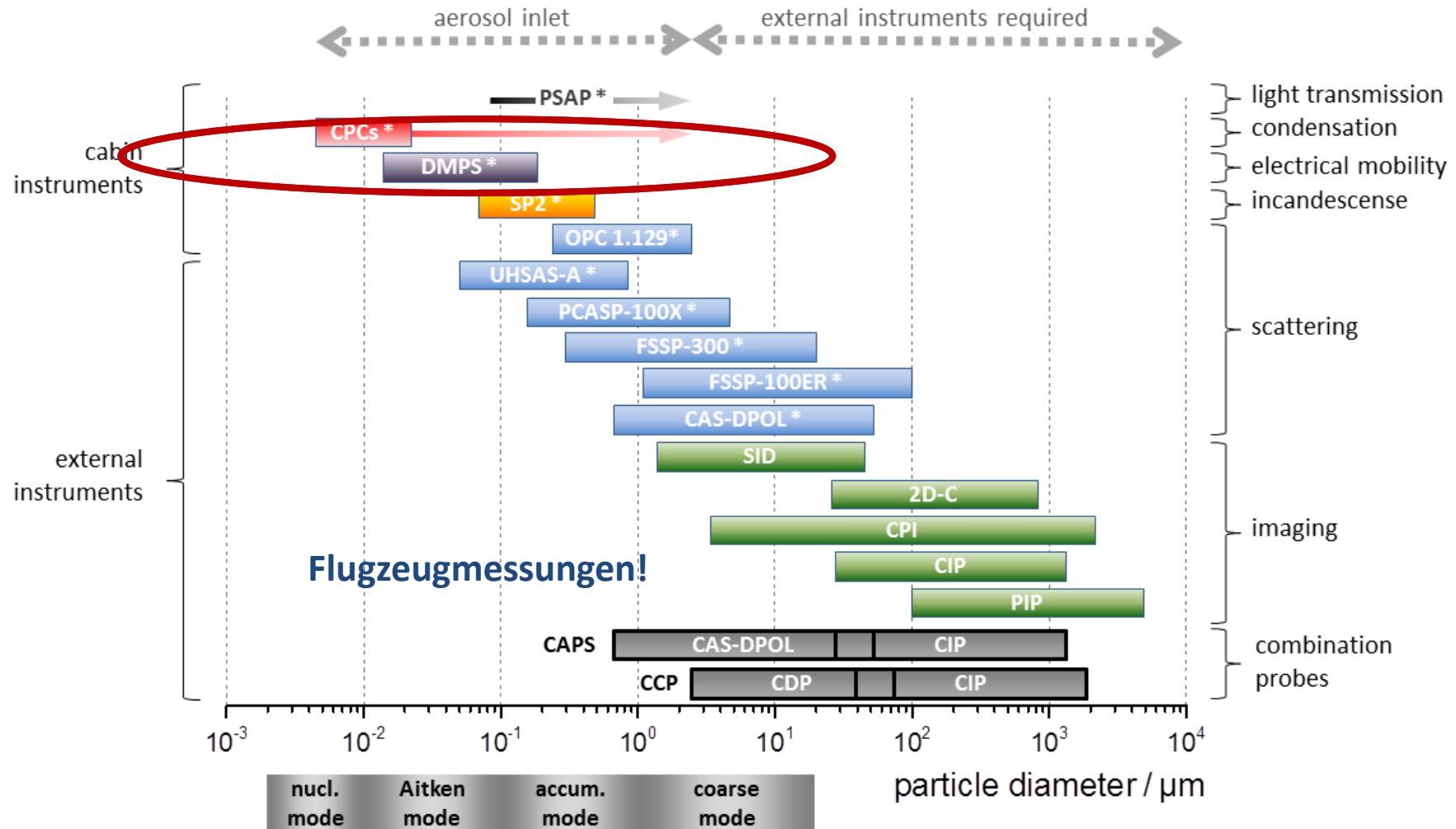
➔ Analyse der **zurückbleibenden
Aerosolpartikel** mit
entsprechenden Geräten



TROPOS



In-situ Messmethoden - Kondensationspartikelzähler



In-situ Messmethoden - Kondensationspartikelzähler

Gesamtpartikelkonzentrationen

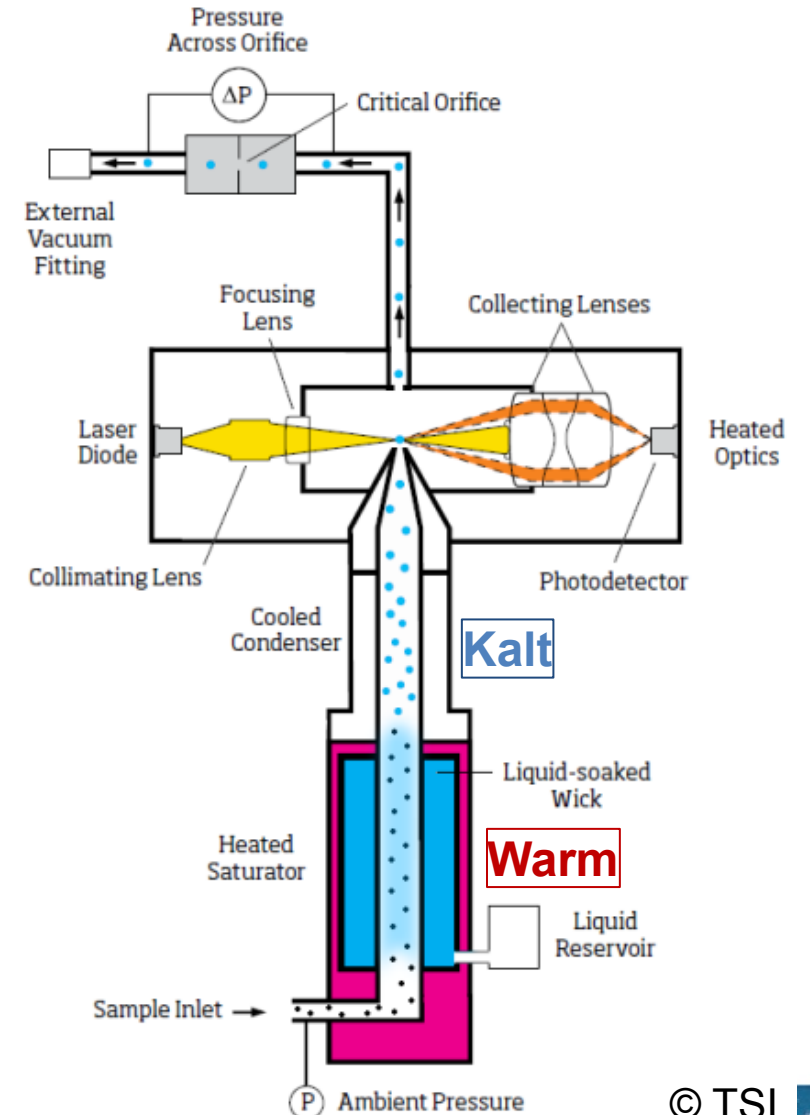
Partikel werden in eine dampfübersättigten Atmosphäre gebracht und wachsen dort bis zu Streulicht-detektierbaren Größen an.

→ **Gesamtpartikelanzahl** oberhalb eines charakteristischen „**Cut-off**“ **Durchmessers**

→ Sehr kleine Partikel (bis < 5nm) nachweisbar

→ Keine direkte Größeninformation

→ Indirekte Größeninformation durch Abhängigkeit des Cutoffs von der Temperaturdifferenz zwischen Saturator und Kondensator.

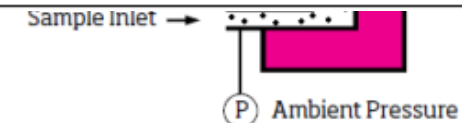
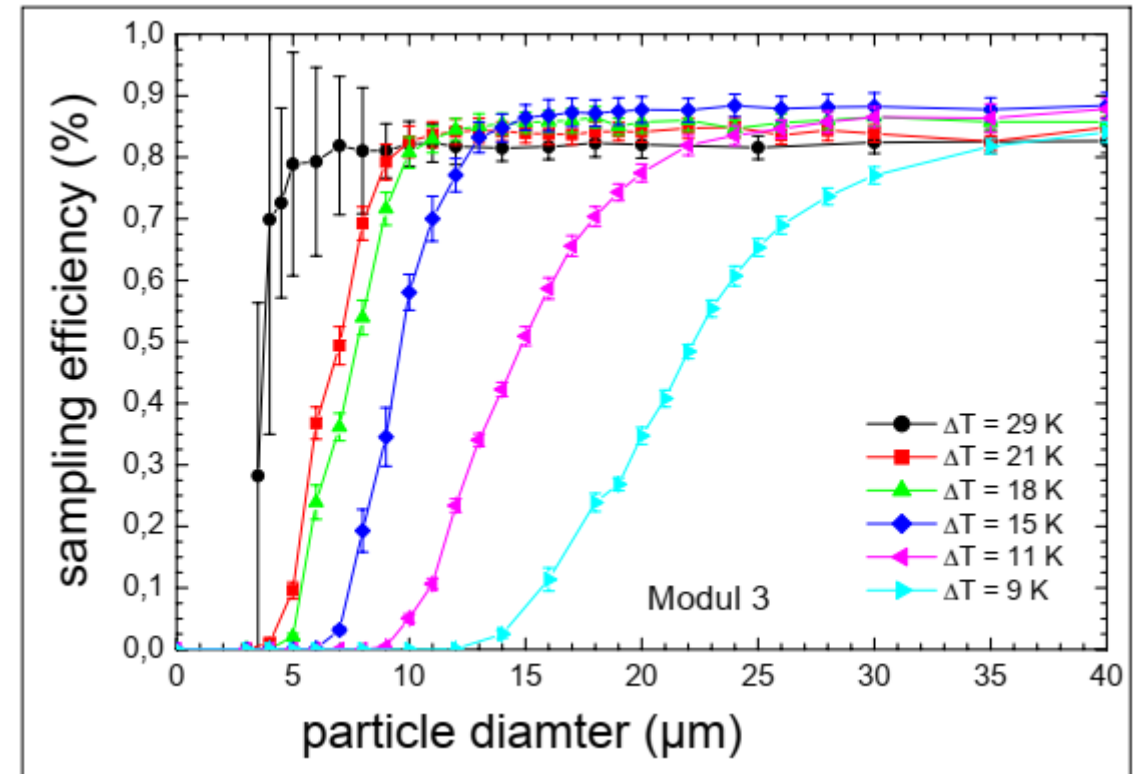
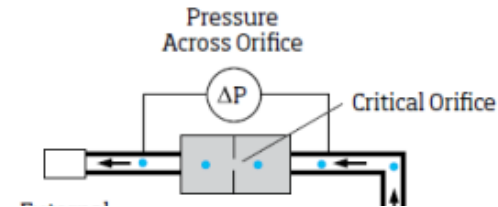


In-situ Messmethoden - Kondensationspartikelzähler

Gesamtpartikelkonzentrationen

Partikel werden in eine dampfübersättigten Atmosphäre gebracht und wachsen dort bis zu Streulicht-detektierbaren Größen an.

- **Gesamtpartikelanzahl** oberhalb eines charakteristischen „**Cut-off**“ **Durchmessers**
- Sehr kleine Partikel (bis < 5nm) nachweisbar
- Keine direkte Größeninformation
- Indirekte Größeninformation durch Abhängigkeit des Cutoffs von der Temperaturdifferenz zwischen Saturator und Kondensator.



In-situ Messmethoden – Größenaufgelöste Messung mit einem Elektrostatischen Klassifizierer (DMA - Differential Mobility Analyzer)

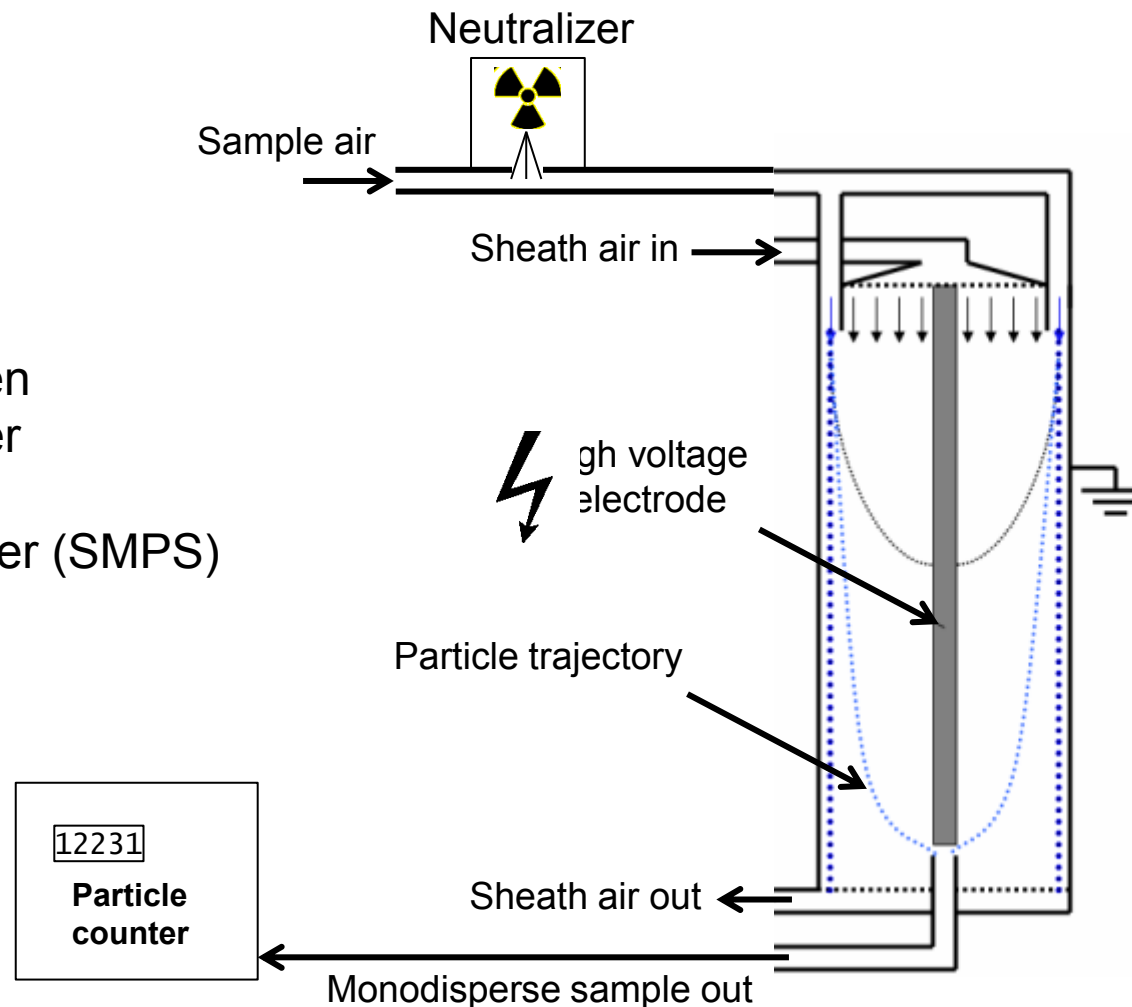
Selektion von Größenbereichen über die Mobilität der Partikel in einem elektrischen Feld

→ **Elektrische Mobilität**

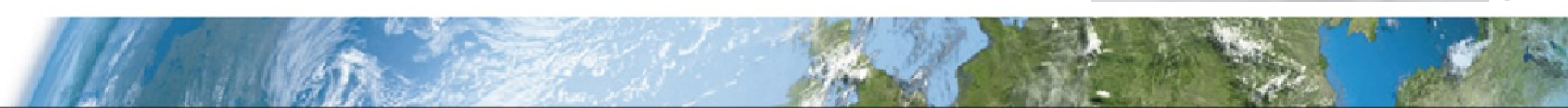
Durchscannen von verschiedenen Spannungen zur Bestimmung der **Größenverteilung**

→ Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Erfordert zeitlich **stabile Größenverteilung** über die Dauer des Scans.



Grimm Aerosol Technik, Ainring



In-situ Messmethoden – Größenaufgelöste Messung mit einem Elektrostatischen Klassifizierer (DMA - Differential Mobility Analyzer)

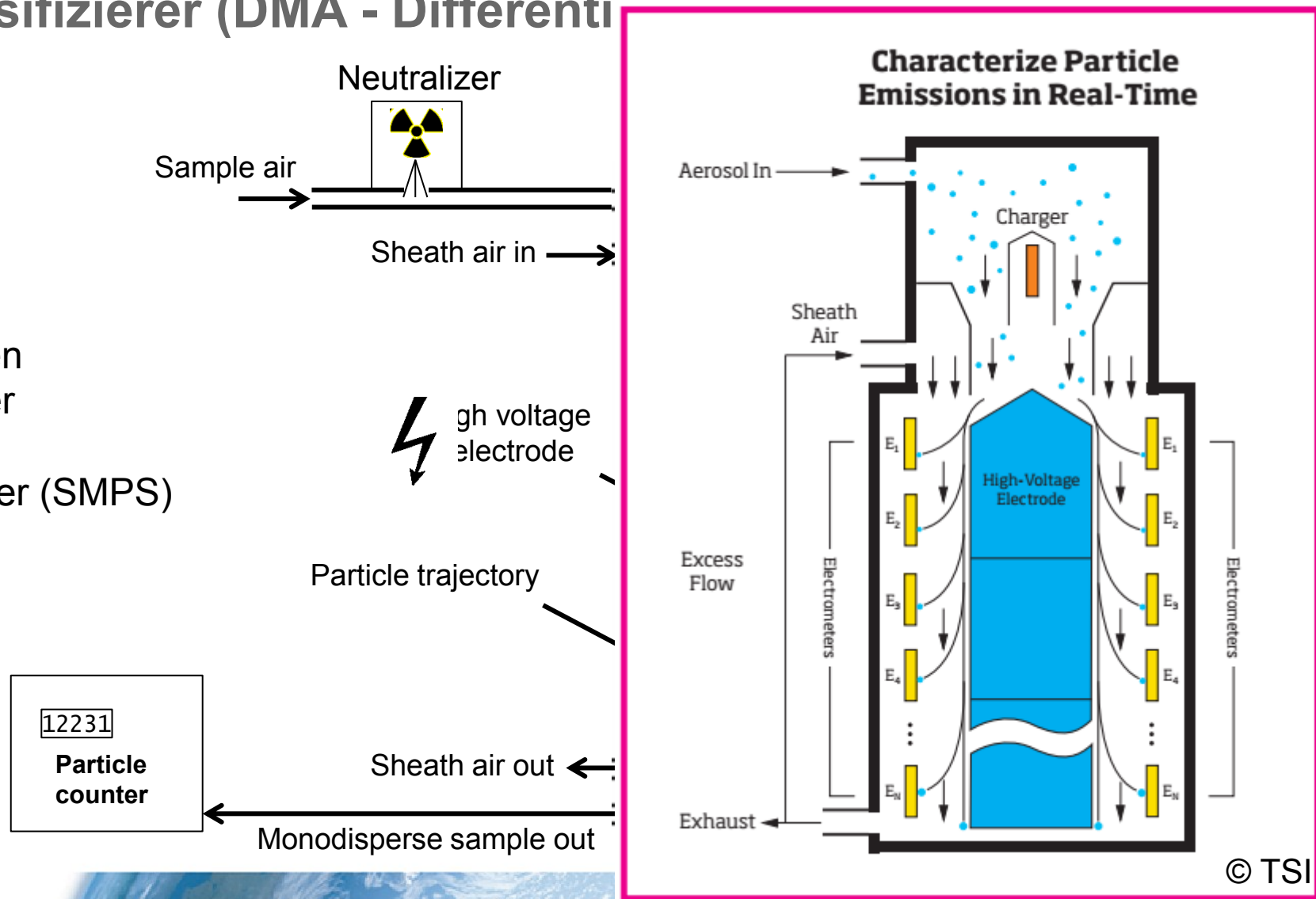
Selektion von Größenbereichen über die Mobilität der Partikel in einem elektrischen Feld

→ Elektrische Mobilität

Durchscannen von verschiedenen Spannungen zur Bestimmung der Größenverteilung

→ Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Erfordert zeitlich stabile Größenverteilung über die Dauer des Scans.

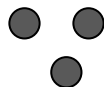


Bestimmung physikalisch-chemischer Aerosoleigenschaften Volatilität und Mischungszustand

Durch Heizen der Probenluft können leicht-flüchtige Partikel entfernt werden
→ Information über Mischungszustand des Gesamtaerosols

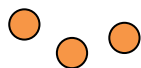
Nicht-volatile Komponenten

Mineralstaub, Seesalz, Ruß,...



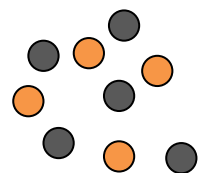
Volatile Komponenten

Schwefelsäure, Sulfate, flüchtige organische Substanzen,...

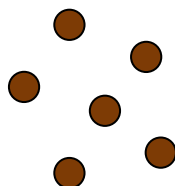


Mischungszustände

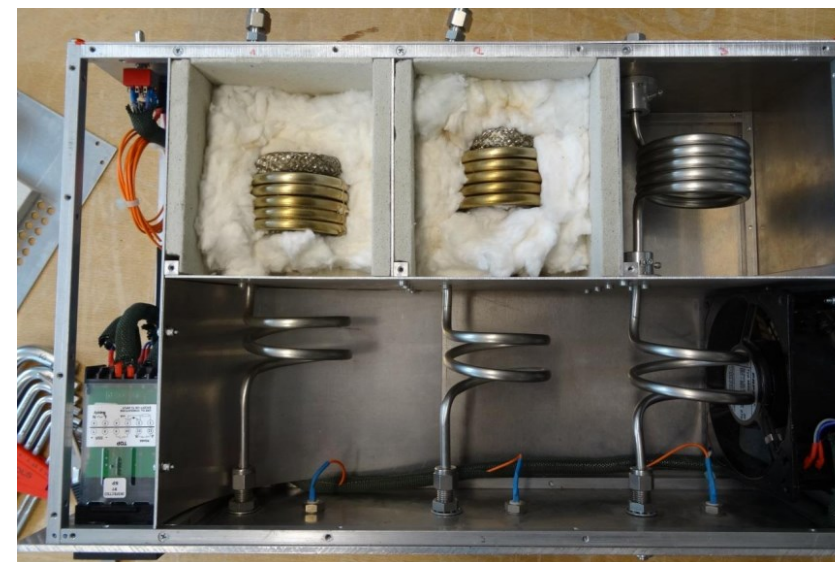
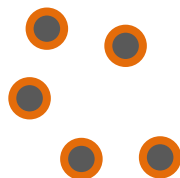
extern



intern



non-vol. mit coating oder Kombinationen
daraus



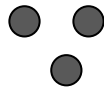
Bestimmung physikalisch-chemischer Aerosoleigenschaften

Volatilität und Mischungszustand

Durch Heizen der Probenluft können leicht-flüchtige Partikel entfernt werden
→ Information über Mischungszustand des Gesamtaerosols

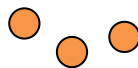
Nicht-volatile Komponenten

Mineralstaub, Seesalz, Ruß,...



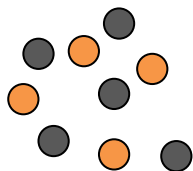
Volatile Komponenten

Schwefelsäure, Sulfate, flüchtige organische Substanzen,...

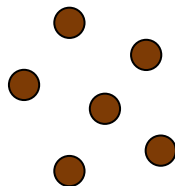


Mischungszustände

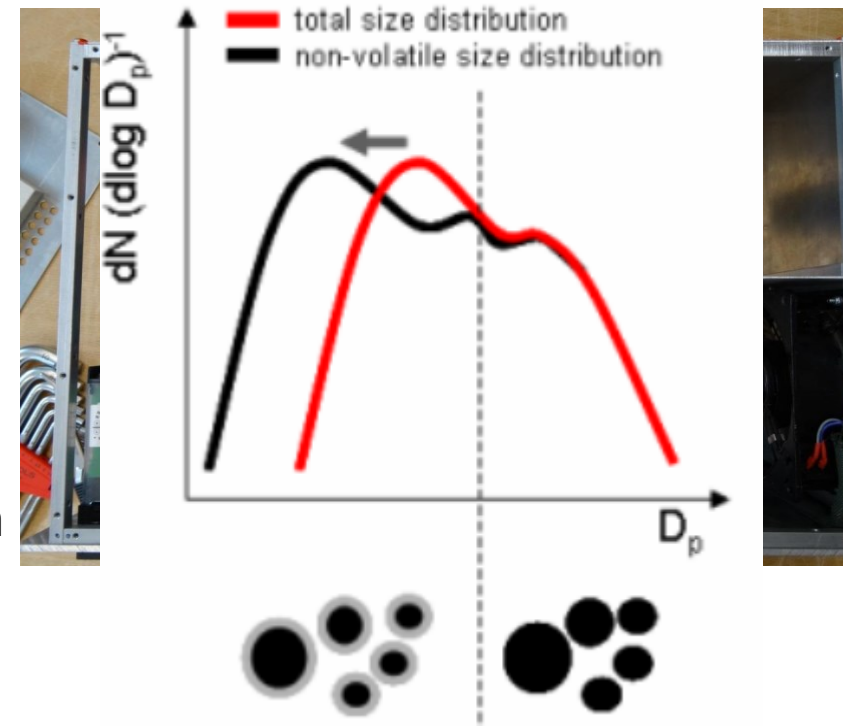
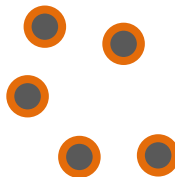
extern



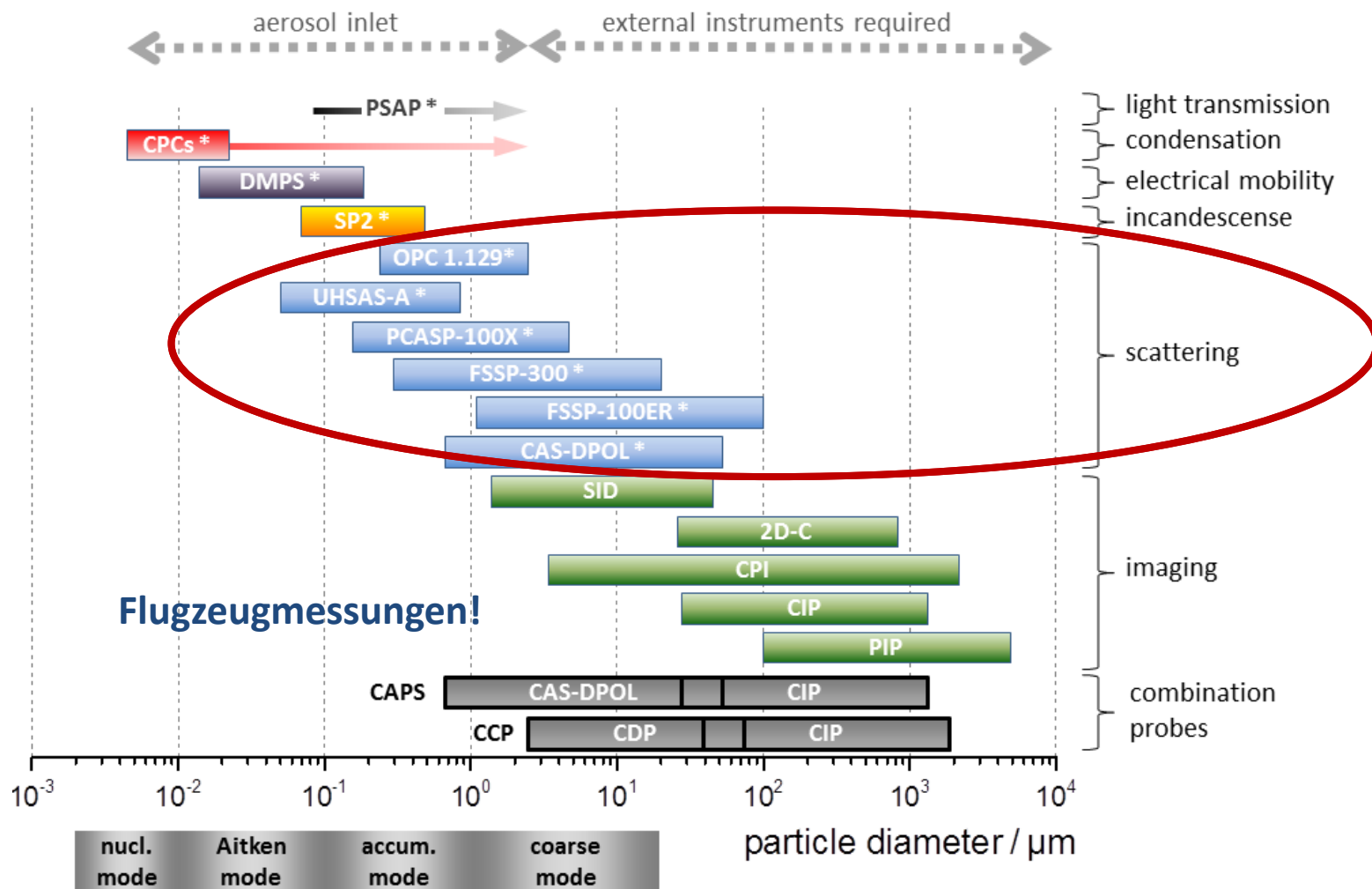
intern



non-vol. mit coating oder Kombinationen
daraus



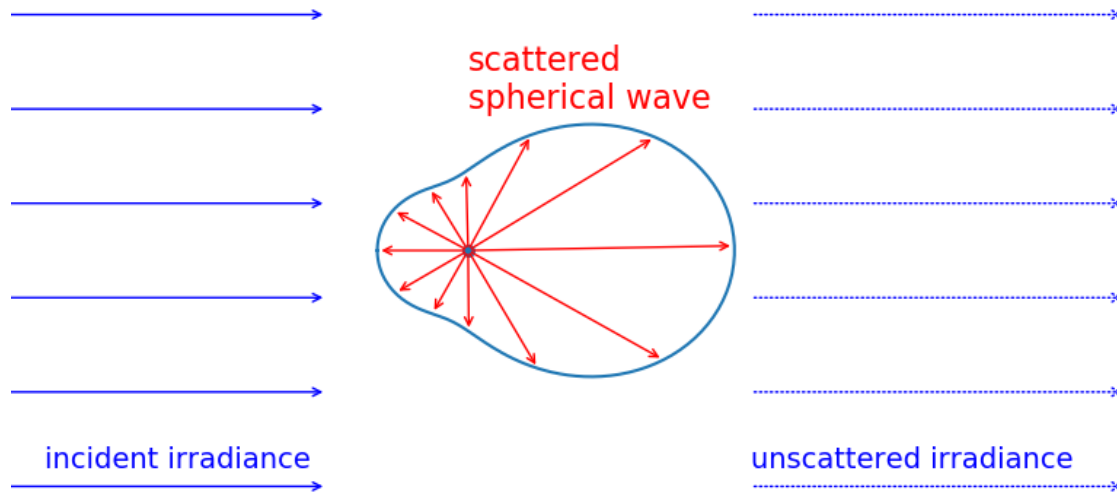
Größenaufgelöste Messungen mit Streulichtspektrometern



Minikin et al. (2012)

Größenaufgelöste Messungen mit Streulichtspektrometern

Streuung von Licht an Partikeln



Grundprinzip

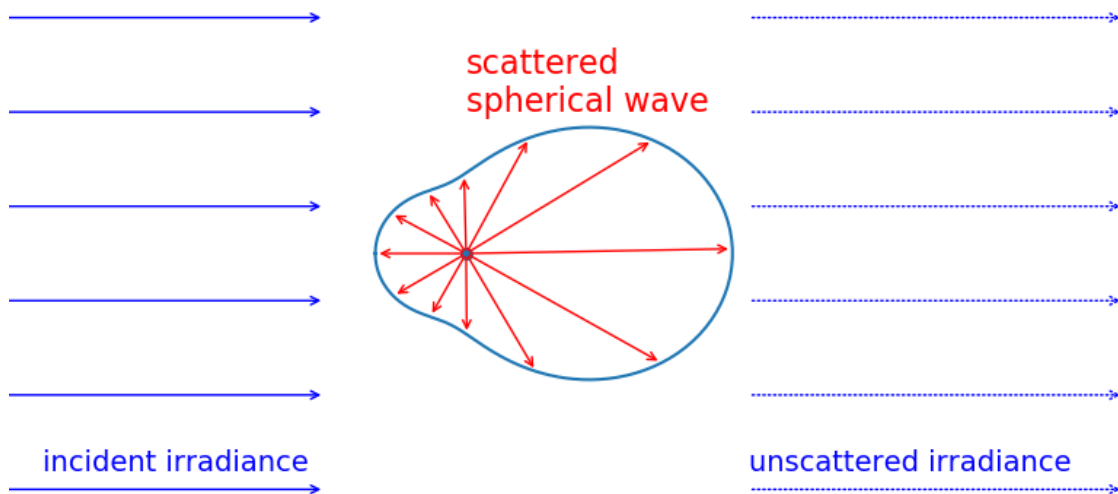
Die Intensität von an Partikeln gestreutem Licht in einem bestimmten Winkelbereich hängt u.a. vom Partikeldurchmesser ab.

Aber: Zusätzlich müssen viele andere Parameter als bekannt vorausgesetzt werden



Größenaufgelöste Messungen mit Streulichtspektrometern

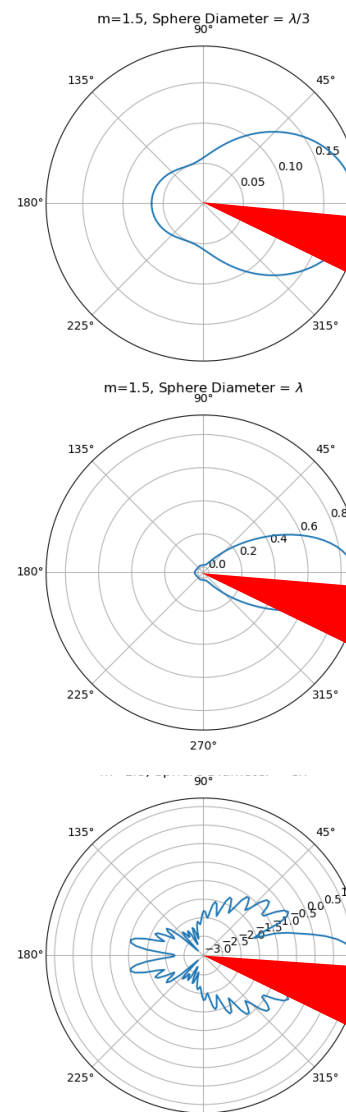
Streuung von Licht an Partikeln



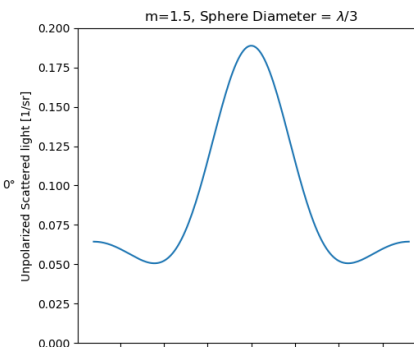
Grundprinzip

Die Intensität von an Partikeln gestreutem Licht in einem bestimmten Winkelbereich hängt u.a. vom Partikeldurchmesser ab.

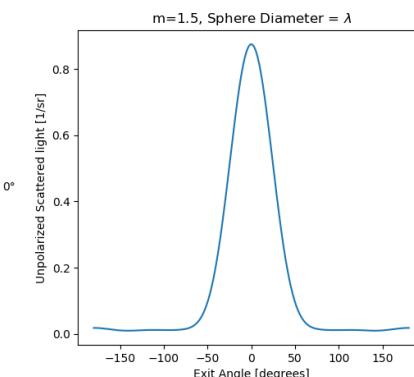
Aber: Zusätzlich müssen viele andere Parameter als bekannt vorausgesetzt werden



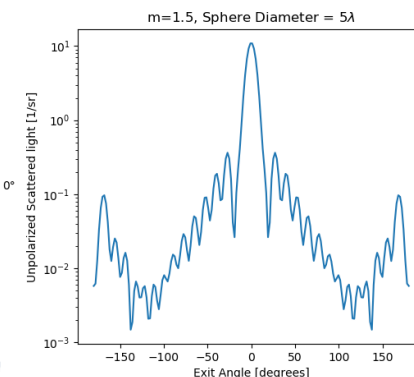
Für Licht mit $\lambda = 600\text{nm}$



200nm



600nm

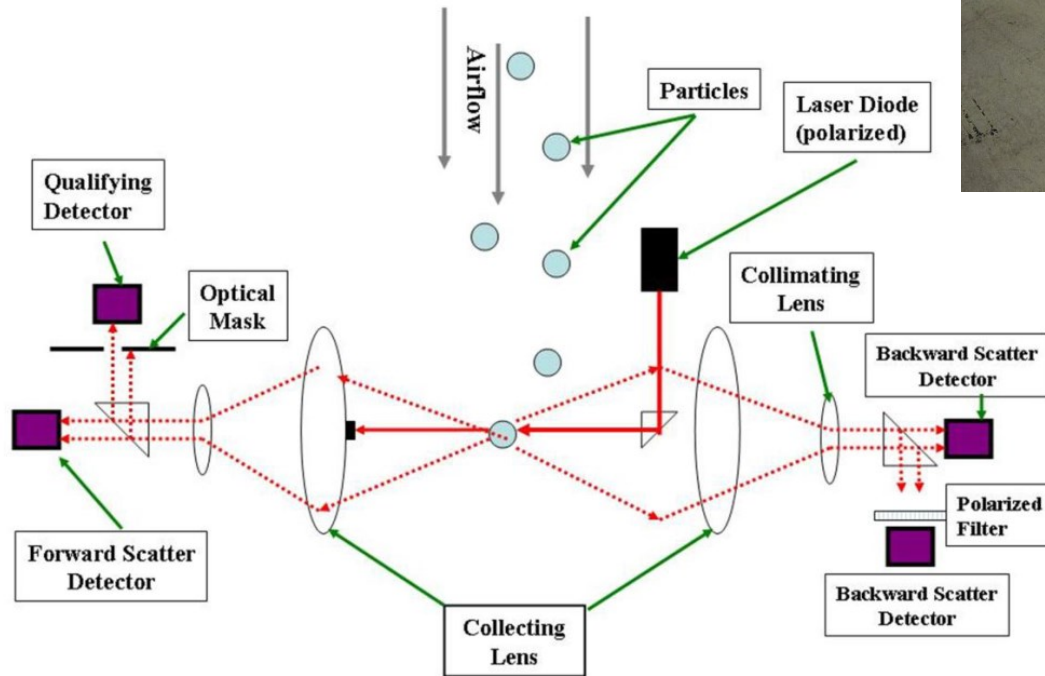


3μm

Logarithmische Skalierung!

Größenaufgelöste Messungen mit Streulichtspektrometern Beispiel

Cloud and Aerosol Spectrometer CAS-DPOL



Forward/Backscatter Sensor Optical Path Diagram

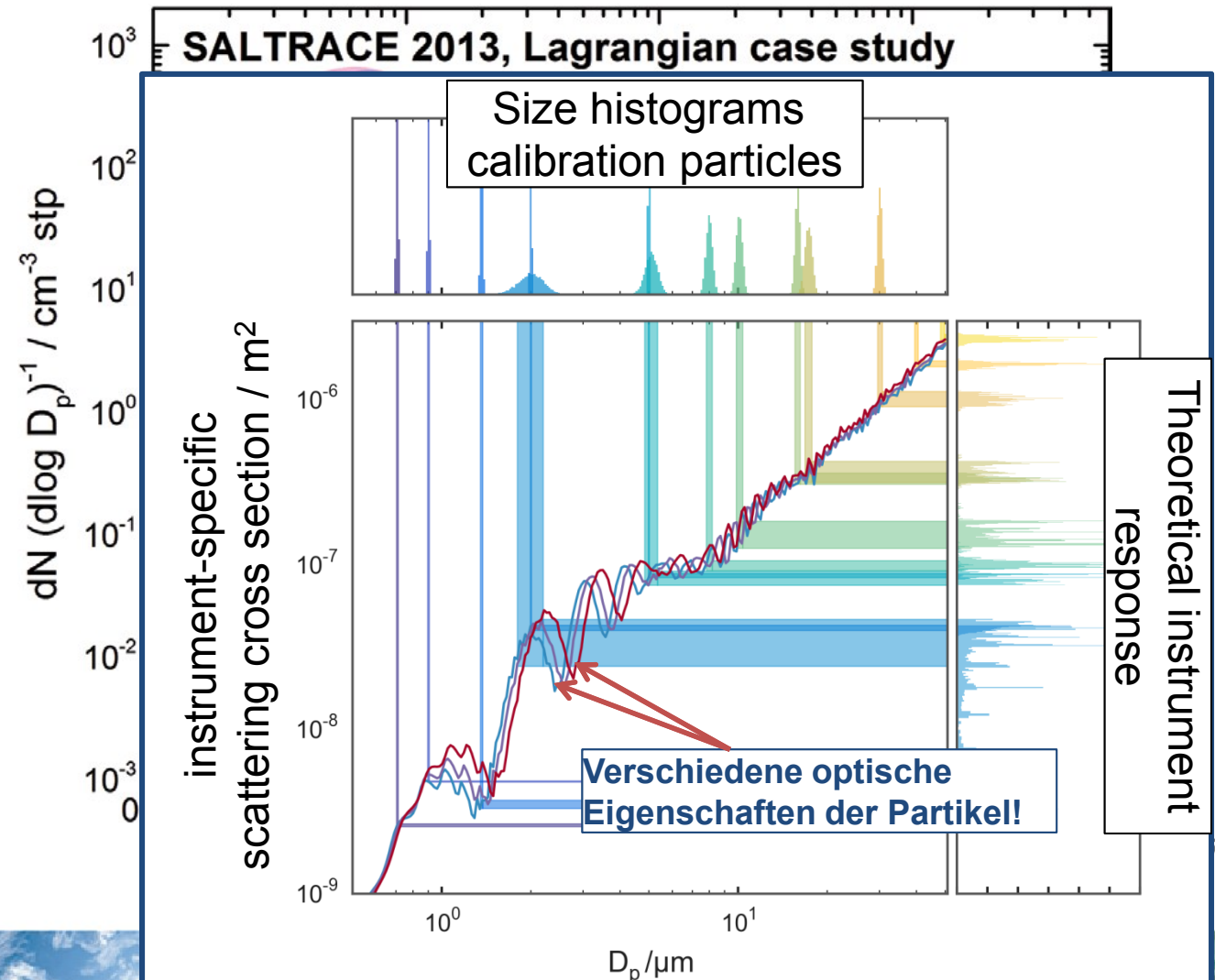
DMT Inc. <http://www.dropletmeasurement.com>



Größenaufgelöste Messungen mit Streulichtspektrometern

Mit Streulichtspektrometern lassen sich, je nach Messgeometrie und verwendeter Lichtquelle, Partikel größenaufgelöst zwischen ca **90nm und 50-100µm** messen.

Die korrekte Interpretation erfordert **Informationen** über das Messsystem aber auch über die **optischen Eigenschaften der Partikel** selbst!



Optische Eigenschaften Streuung und Absorption

Particle soot absorption photometer
Multi-angle absorption photometer
Tricolor-Absorption-Photometer

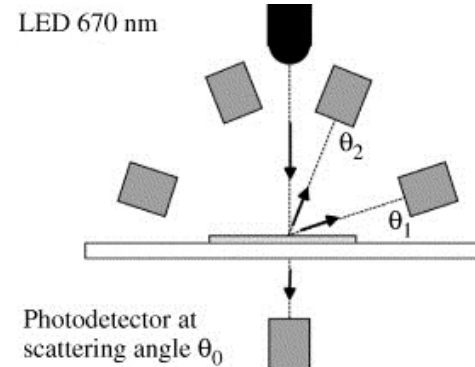
Absorptionseigenschaften des
Gesamtaerosols
→ Messung der Transmission von Licht
verschiedener Wellenlängen durch Filter

Nephelometer
(Winkelabhängige) Streueigenschaften
eines großen Volumens Probenluft

PSAP



TAP



MAAP



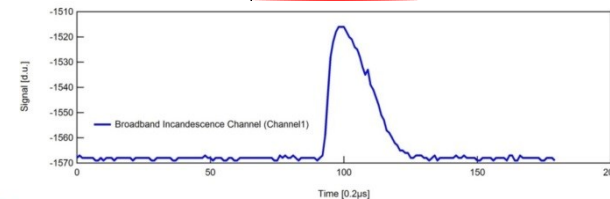
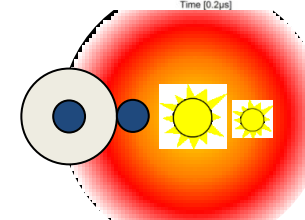
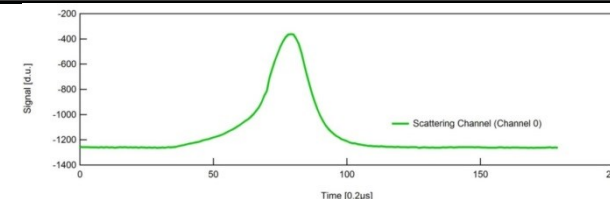
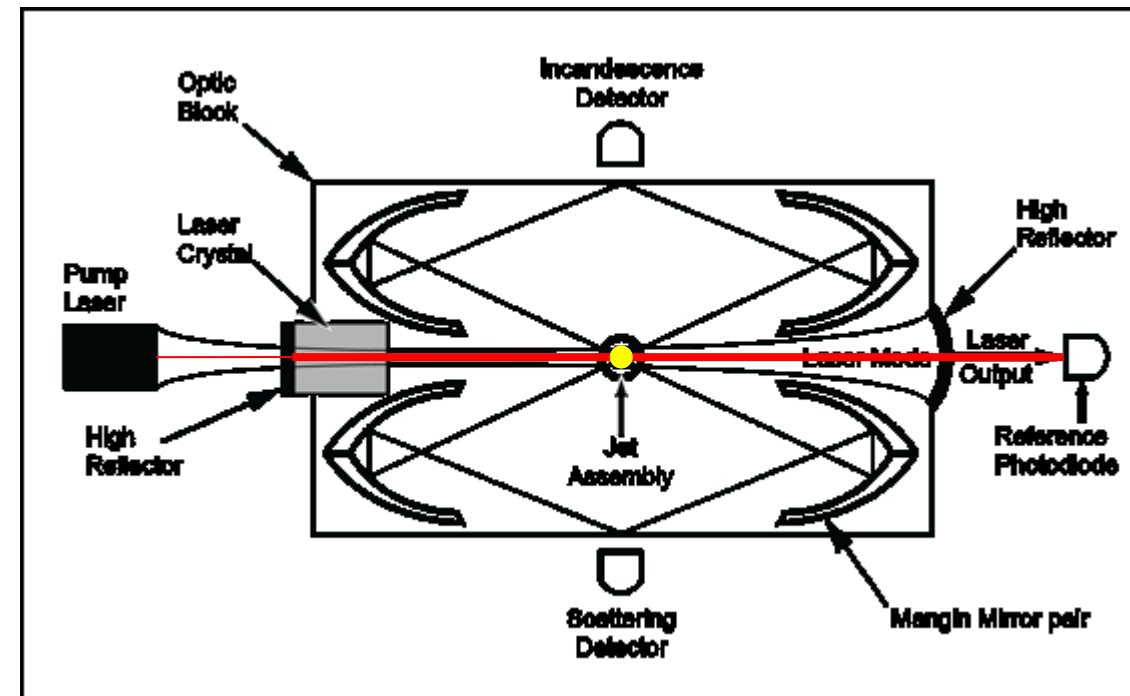
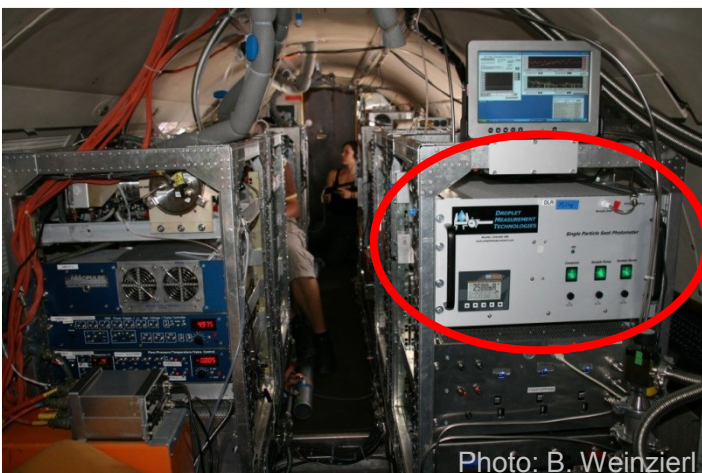
Rußmassenbestimmung mit Laser Induced Incandescence (LII)

Grundprinzip

Bestimmung von Rußmassen durch Verdampfung von Rußpartikeln in einem starken Laser und Nachweis der emittierten Wärmestrahlung.

Beispiel: Single Particle Soot Photometer (SP2)

→ Einzelpartikelmessung von Rußpartikeln zwischen 90nm und 800nm



Zusammenfassung und weitere Gedanken

- Aerosolphysik und -chemie ist ein weites Feld mit vielen Aspekten!
- Es gibt noch viele weitere Methoden und Strategien zur Aerosolcharakterisierung als hier gezeigt
- Aerosolmessungen komplex und zum Teil schwer zu interpretieren
- Kombination komplementärer Messungen, sowie in-situ und Fernerkundungs-Ansätze hilft Unsicherheiten zu reduzieren
- Messunsicherheiten v.a. bei Feldmessungen führen zu großen Unsicherheiten zB in Klimamodellen
 - In vielen Punkten noch erheblicher Forschungsbedarf
 - gezielte Messungen helfen, das Prozessverständnis zu verbessern





VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

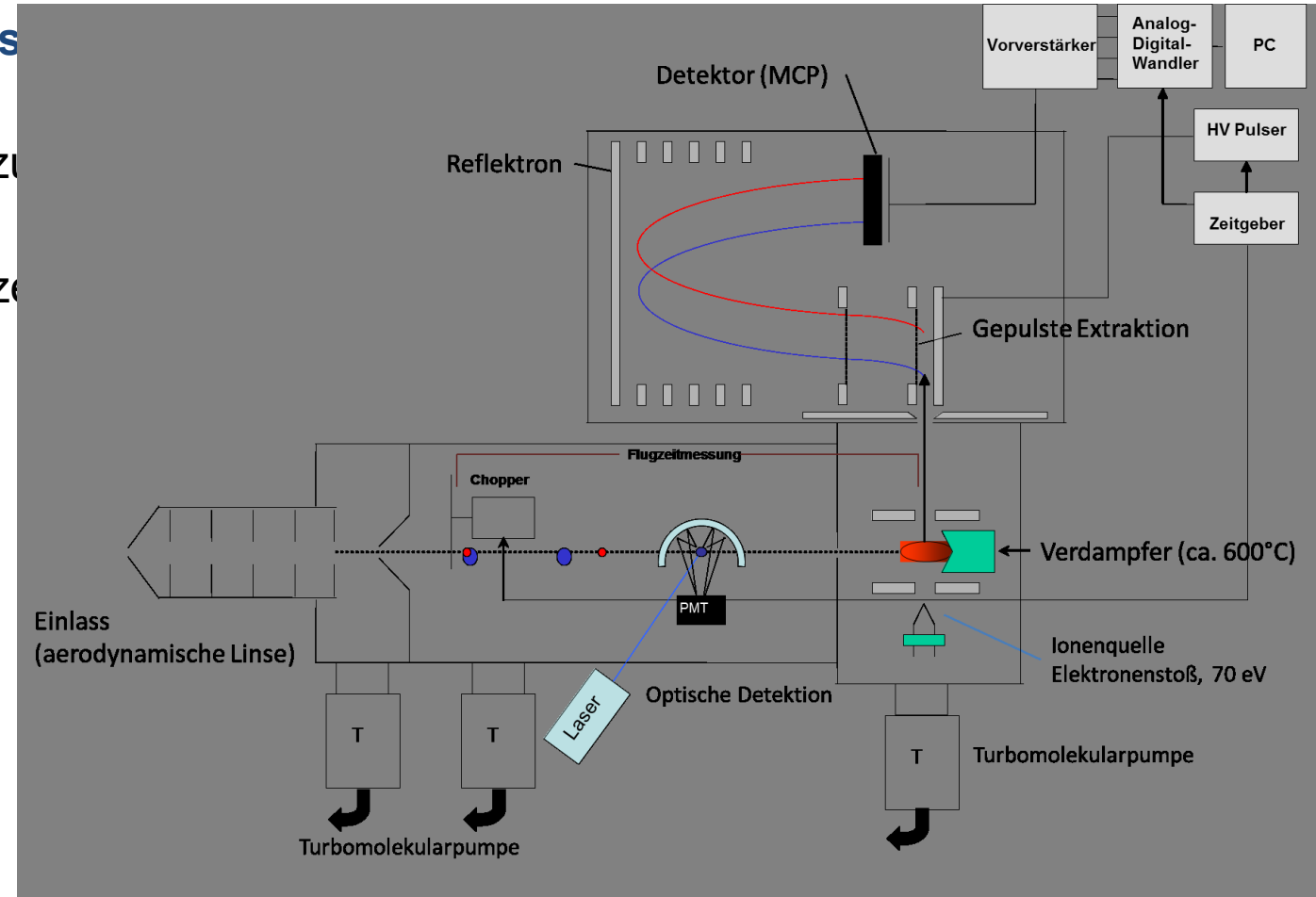


Chemische Zusammensetzung – Aerosolmassenspektrometer

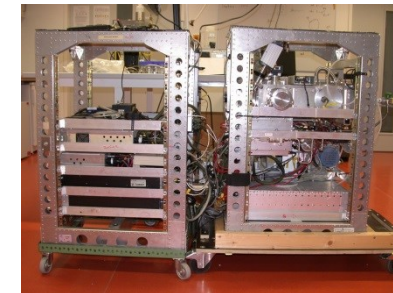


Beispiel: Compact Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer

- Massenspektren → chemische Zusammensetzung
 - Größenverteilungen, chemisch aufgelöst
 - Zeitreihen und relative Anteile der Massenkonzentration
 - Einzelpartikel-Spektren
-
- Größenbereich: ca. 40 nm – 1 μm
 - Quantitative Messung von Konzentrationen
 - Zeitreihen
 - Größenverteilungen
 - Auch Einzelpartikelanalyse möglich
 - Weitere Auftrennung der Organik durch mathematische Nachanalyse möglich

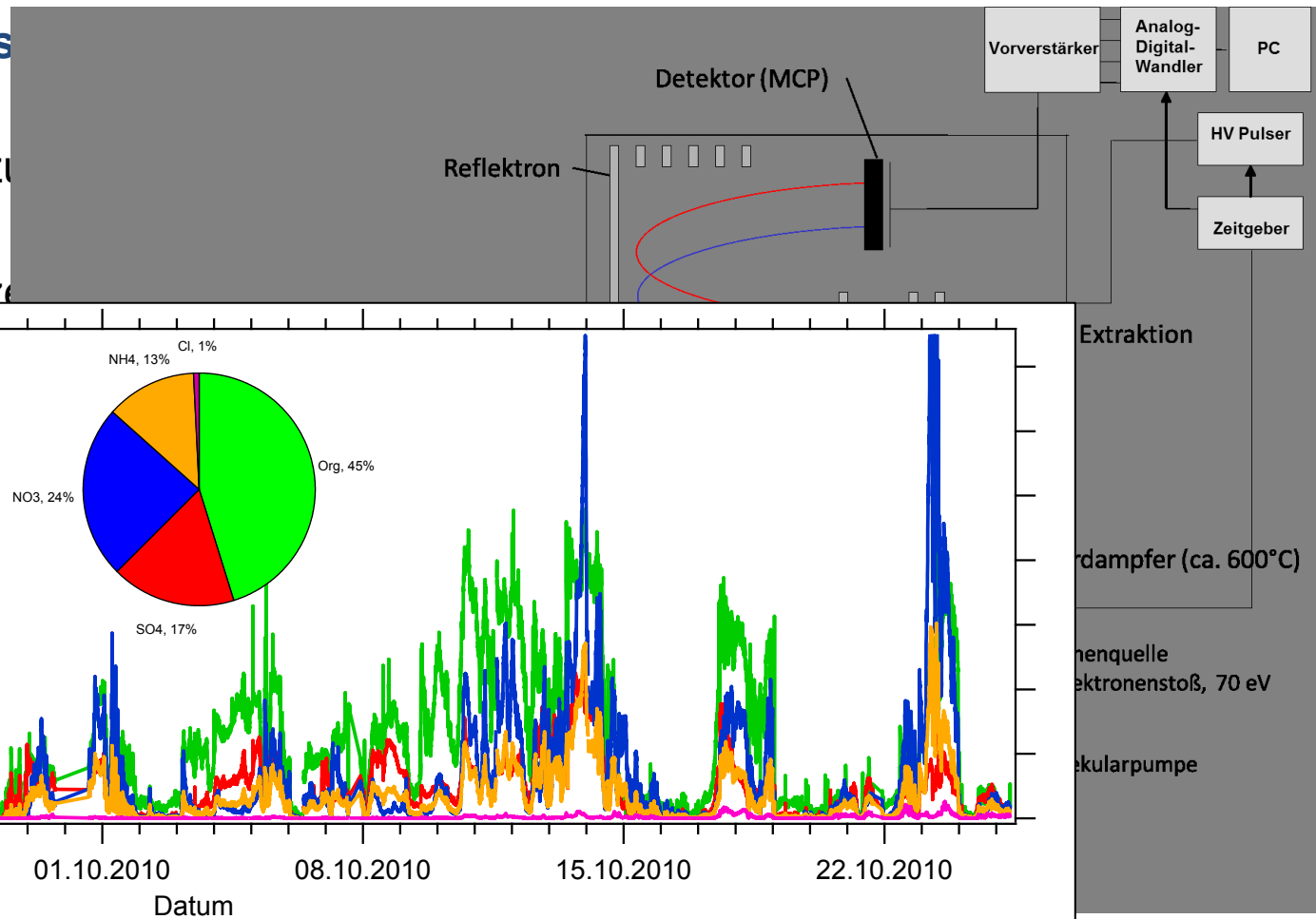


Chemische Zusammensetzung – Aerosolmassenspektrometer



Beispiel: Compact Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer

- Massenspektren → chemische Zusammensetzung
- Größenverteilungen, chemisch aufgelöst
- Zeitreihen und relative Anteile der Massenkonzentration
- Einzelp...



- Größen...
- Quantit...
- Zeitreih...
- Größen...
- Auch E...
- Weitere mathem...

