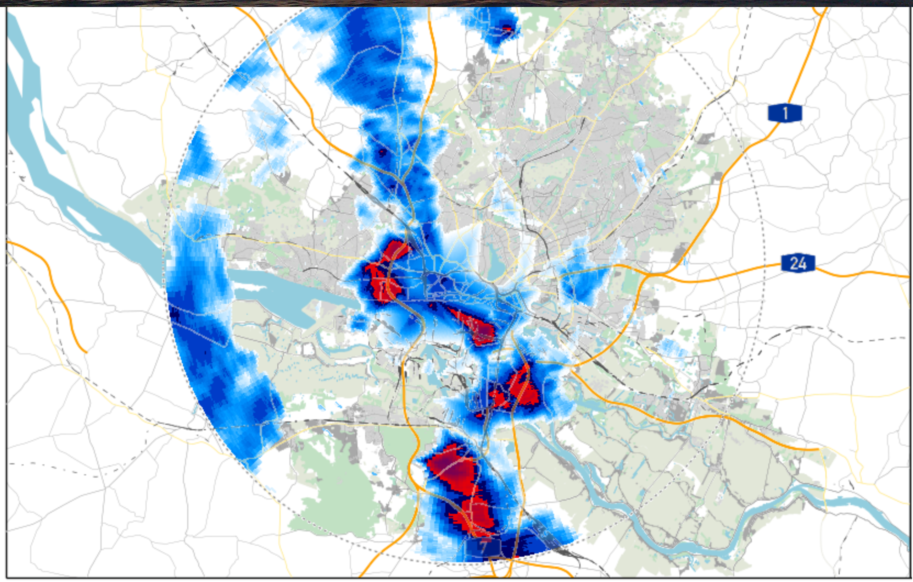
Elektromagnetische Streuung

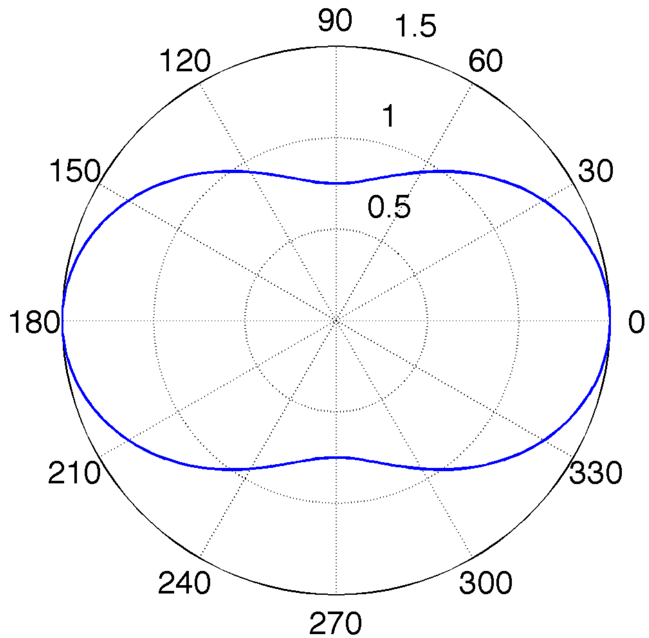


Quellen: Manfred Brath, wetterradar.uni-hamburg.de

Optik, Strahlung, Fernerkundung

Sommersemester 2018

Meteorologisches Institut
Universität Hamburg
Ausnahmsweise Manfred Brath



Terminplanung

- Dienstag 3. Juli, 8:30 Übung wie immer (1536a)

- Alternativ-Termin letzte Übung (bitte abstimmen):
  - Donnerstag, 5. Juli, 12:30 im Raum 1528 oder
  - Dienstag, 10. Juli, 8:30 wie immer
  - (Oder besteht Bedarf für beide?)

- Heute kein Hausaufgabenzettel mehr

- In der letzten Übung:
  - Besprechung Quizfragen
  - Fragestunde
  - (Ggf. Präsenzaufgabe, wenn es keine Fragen gibt)

Viele Grüße, Verena

Strahlungstransportgleichung (RTE)

$$\frac{dI}{ds} = -(\alpha + \sigma)I \;+\; \alpha B(T) \;+\; \sigma \int_{\Omega} P I \frac{d\Omega}{4\pi}$$

Extinktion *therm. Emission* *Streu-Emission*

Extinktion: $\alpha + \sigma$ (Absorption+Streuung)

Thermische Emission: Nur α

Streu-Emission: Nur σ

Folie übernommen von Stefan Bühler

Fahrplan

- Streuung (allgemein)
- Rayleigh-Streuung (ein “einfaches” Beispiel)
- Mie-Streuung

Streuung

- Was können wir uns unter elektromagnetischer Streuung vorstellen?

Streuung

- Schauen wir uns doch mal an, was uns die Natur an anzubieten hat…

Ein paar Beispiele aus der Atmosphäre...

- Regenbogen
- Korona

Quelle: Manfred Brath

Quelle: Wikipedia

- Frage: Was passiert hier?

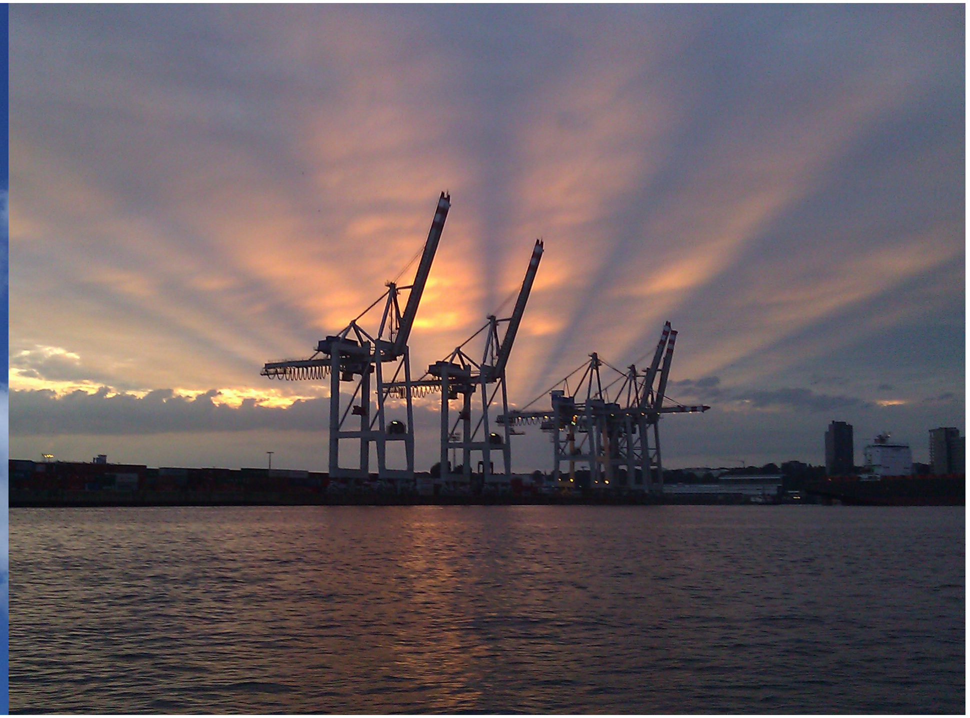
…weitere Beispiele aus der Atmosphäre

- Die Farben des Himmels

Blauer Himmel mit Wolken

Quelle: Wikipedia

Sonnenuntergang

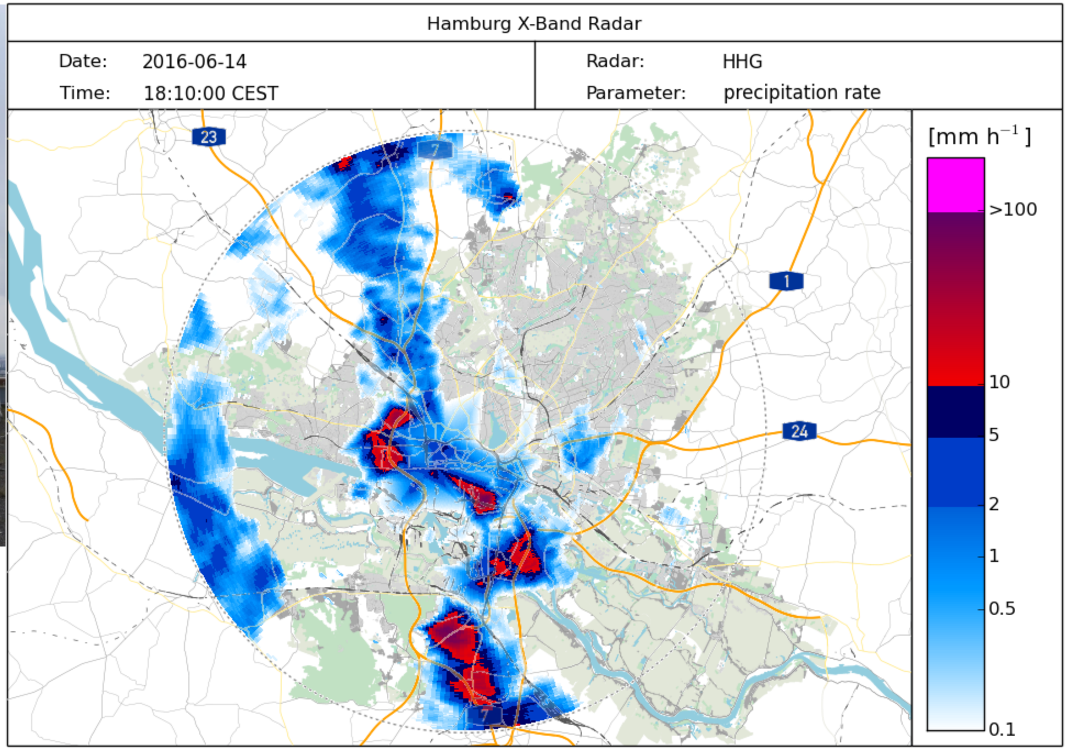


Quelle: Manfred Brath

- Frage: …und hier?

… oder oben auf dem Geomatikum

- das Wetterradar des Instituts



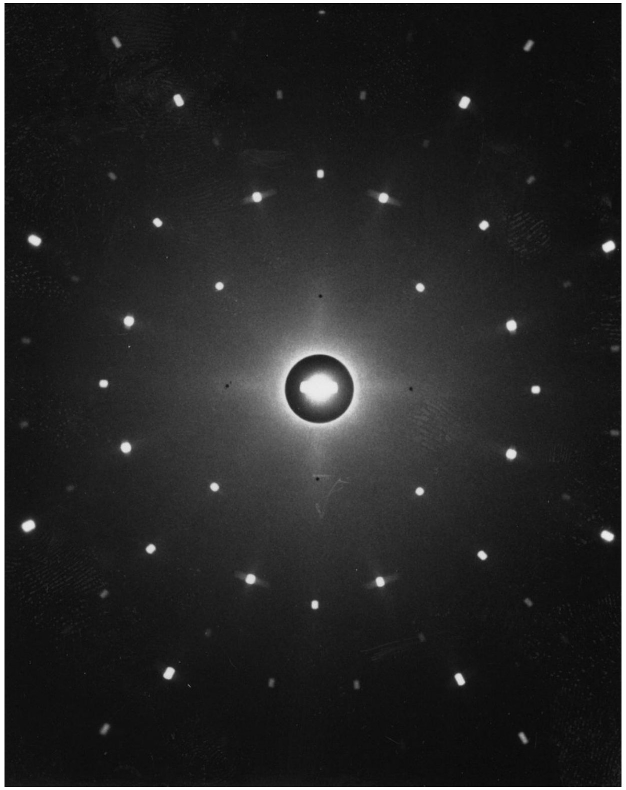
- Frage: Was wird hier gemessen?

Quelle: wetterradar.uni-hamburg.de

Noch ein paar Bespiele…

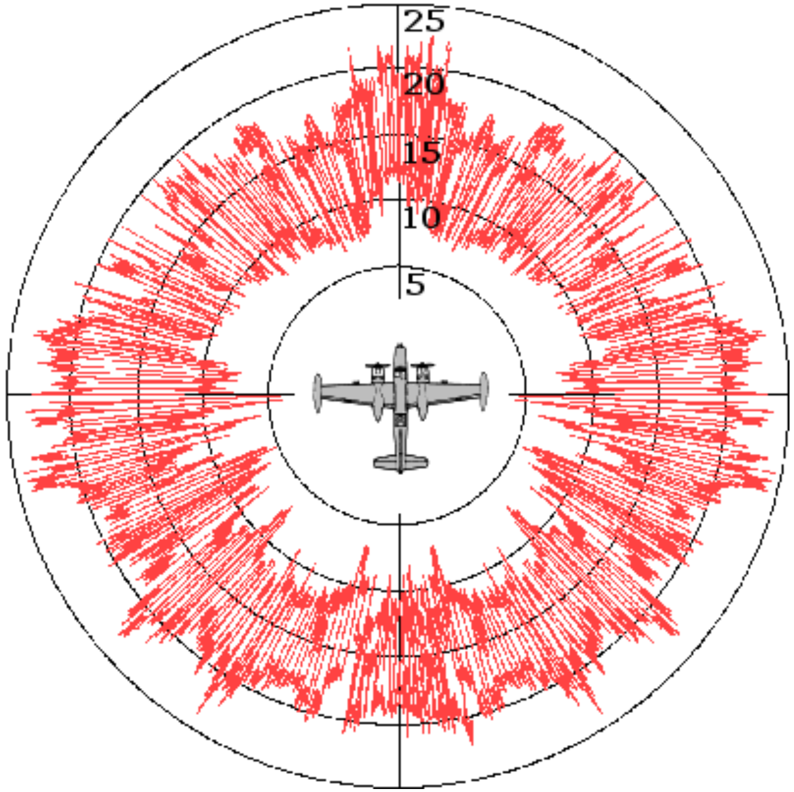
- Schauen wir mal über den Tellerrand…

Röntgenbeugung an einem Si-Kristall



Quelle: Institut f. Physik, Uni Halle

Radarsignatur eines Flugzeugs



Quelle: Wikipedia

Erste Ergebnisse

- Frage: Was können wir aus den gezeigten Bilder über elektromagnetische Streuung schon einmal schließen?

Streuung ist…

- richtungsabhängig sowohl von der Beobachtungsposition wie von der Position der Strahlungsquelle relativ zum Streuobjekt.
- abhängig von der Wellenlänge/Frequenz.
- von der Größe des Streuobjekts abhängig.
- abhängig von der Form des Streuobjekts.
- abhängig vom Medium.

Werden wir ein bisschen genauer...

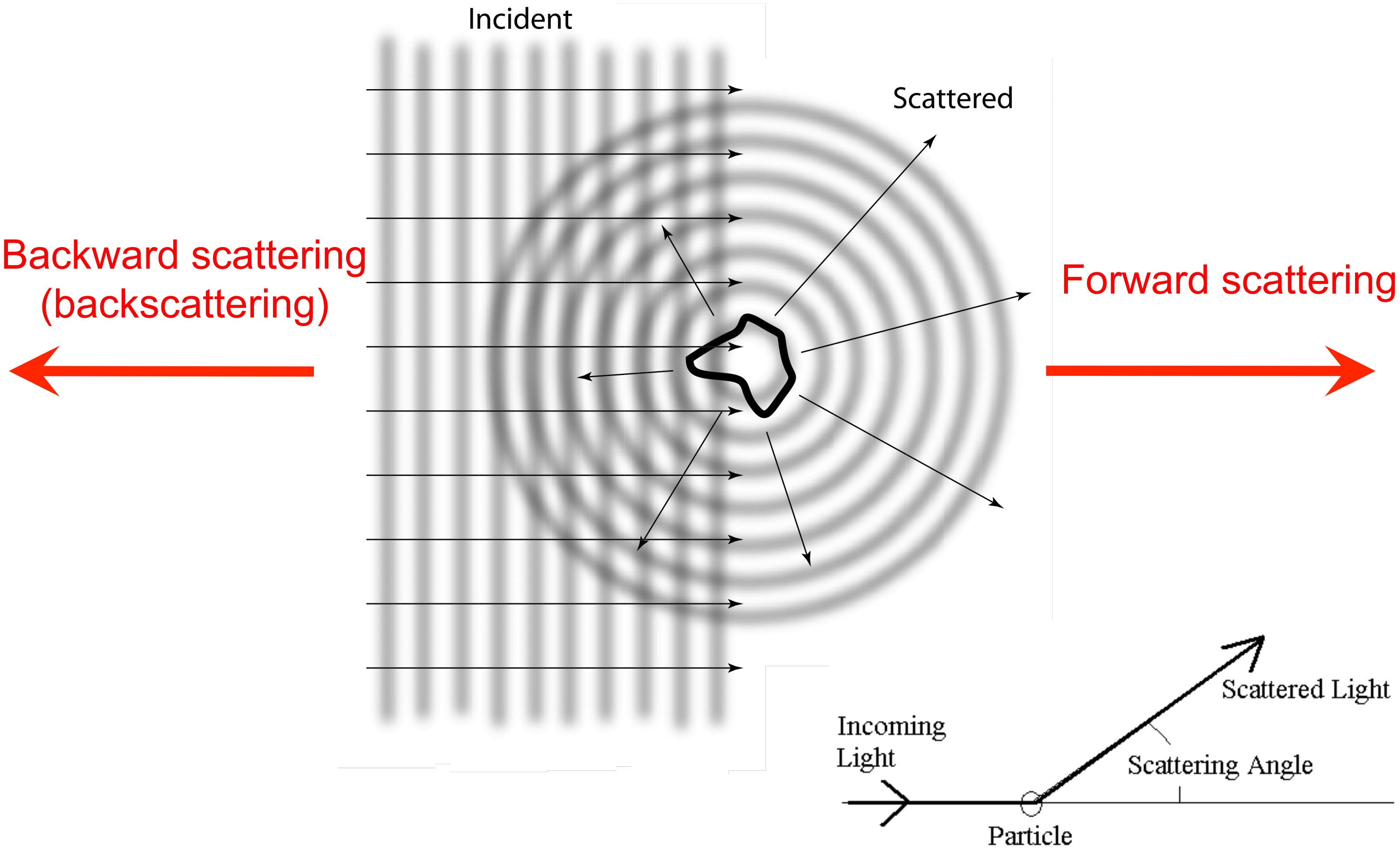
- Auch wenn in der Strahlungstransport-(RT-)Theorie gerne von „Photonen“ bzw. „Streuung von Photonen“ gesprochen wird...

- Geht es dabei um elektromagnetische (EM-) Wellen bzw. die Streuung von EM-Wellen.

- Tipp am Rande: Nehmen Sie den Begriff „Photon“ im Allgemeinen in der RT-Theorie nicht zu genau, weil je mehr Sie über den Begriff nachdenken, um so verwirrender wird es.

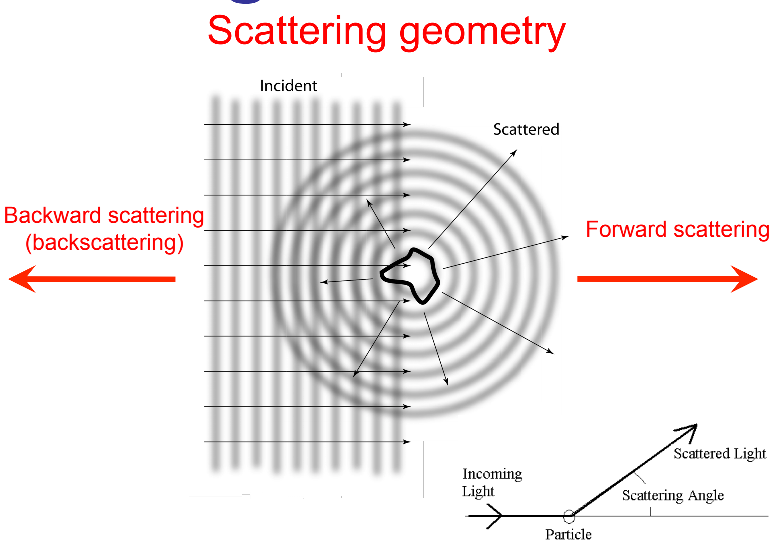
Streuung von EM-Wellen

Scattering geometry



Quelle: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf

Streuung von EM-Wellen



Quelle (Bild):
http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf

- Elektromagnetische Streuung ist die Veränderung der Ausbreitungsrichtung der EM-Welle bzw. die Veränderung des EM-Wellenfeldes bei der Wechselwirkung mit einem lokalen Objekt.

- **Vereinfacht: Ebene Welle rein, Kugelwelle raus!**

(huygensches Prinzip)

Notwendige Bedingung

- Damit EM-Wellen vom Objekt gestreut werden, muss sich das Objekt vom Hintergrundmedium in seinen EM-Eigenschaften unterscheiden.

- D. h., die Brechungsindizes müssen sich unterscheiden.

Notwendige Bedingung

- Brechungsindex $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$

Relative Permeabilität $\mu_r = \dfrac{\mu}{\mu_0}$

Relative Permittivität $\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

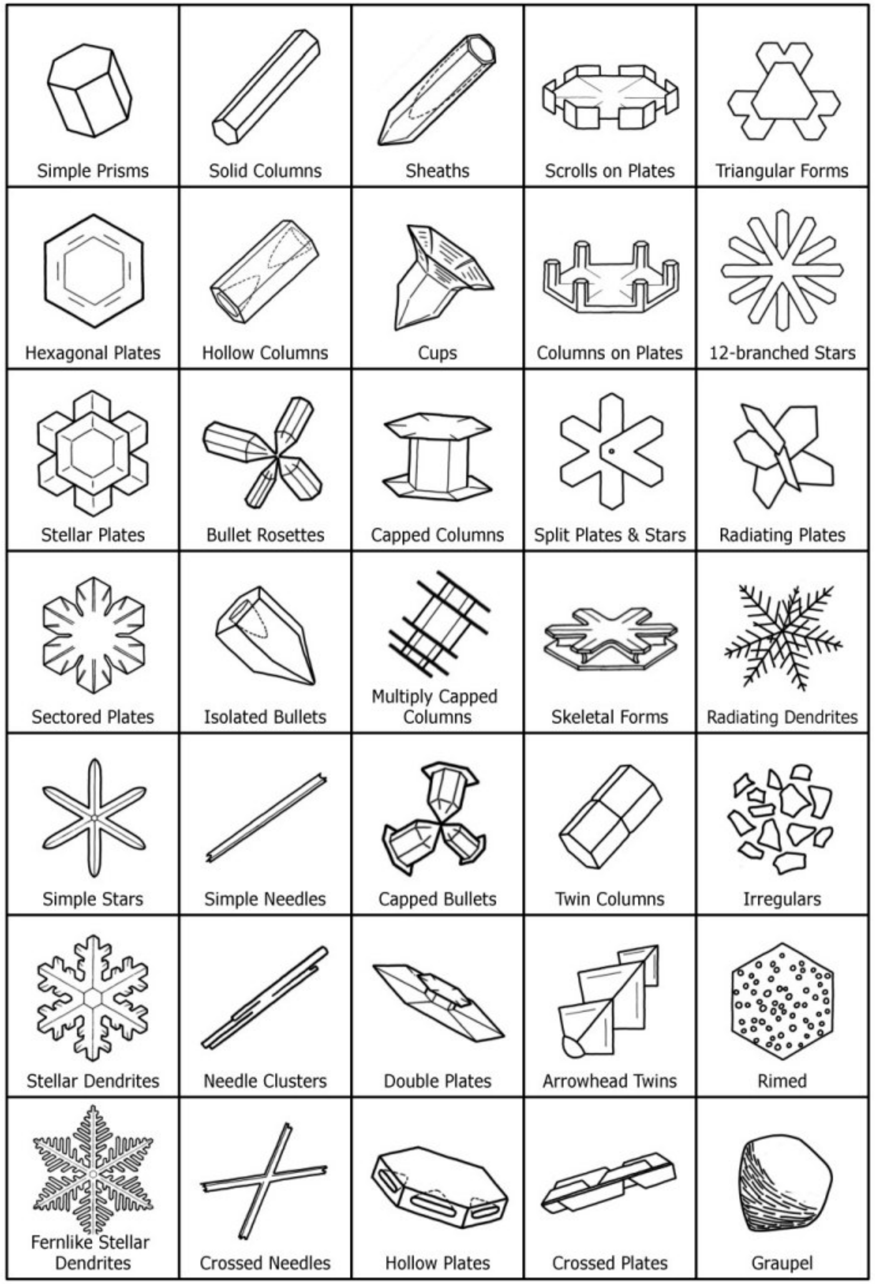
- Für die meisten Medien gilt $\mu_r = 1$, so dass sich die Permeabilität von Streuobjekt und Hintergrund nicht unterscheidet.
- Das Streuobjekt unterscheidet sich daher in der Regel in seiner Permittivität vom Hintergrundmedium.

Streuung von EM-Wellen

- Zwei Fälle sind zu unterscheiden:
  - Unelastische Streuung, wenn sich durch die Streuung die Frequenz der gestreuten Welle ändert, z. B. Fluoreszenz, Raman-Streuung.
  - Elastische Streuung, (nahezu) keine Veränderung der Frequenz. Abgesehen von wenigen Spezialanwendungen (Raman-Lidar) der "Standardfall" der Fernerkundung.

Ein bisschen Ordnung…

- Die Form der Streuobjekte kann ein wenig kompliziert sein.



Types of Snowflakes ... SnowCrystals.com

Quelle: http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/class/snowtypes4.jpg

Ein bisschen Ordnung…

- Um das ganze handhabbar zu machen, nimmt man in der Fernerkundung häufig an, dass die Streuobjekte kugelförmig sind.
- Dem wollen wir uns anschließen und definieren für den Rest der Vorlesung Streuobjekte als homogene Kugeln.
- Frage: Warum könnte das trotzdem eine sinnvolle Näherung sein?

Ein bisschen Ordnung…

- Für die Streuung ist weniger die Wellenlänge die entscheidende Größe, sondern das Verhältnis von der Größe der Streuobjektes und der Wellenlänge.

- Skalenparameter $x = \dfrac{2\pi a}{\lambda} = ka$

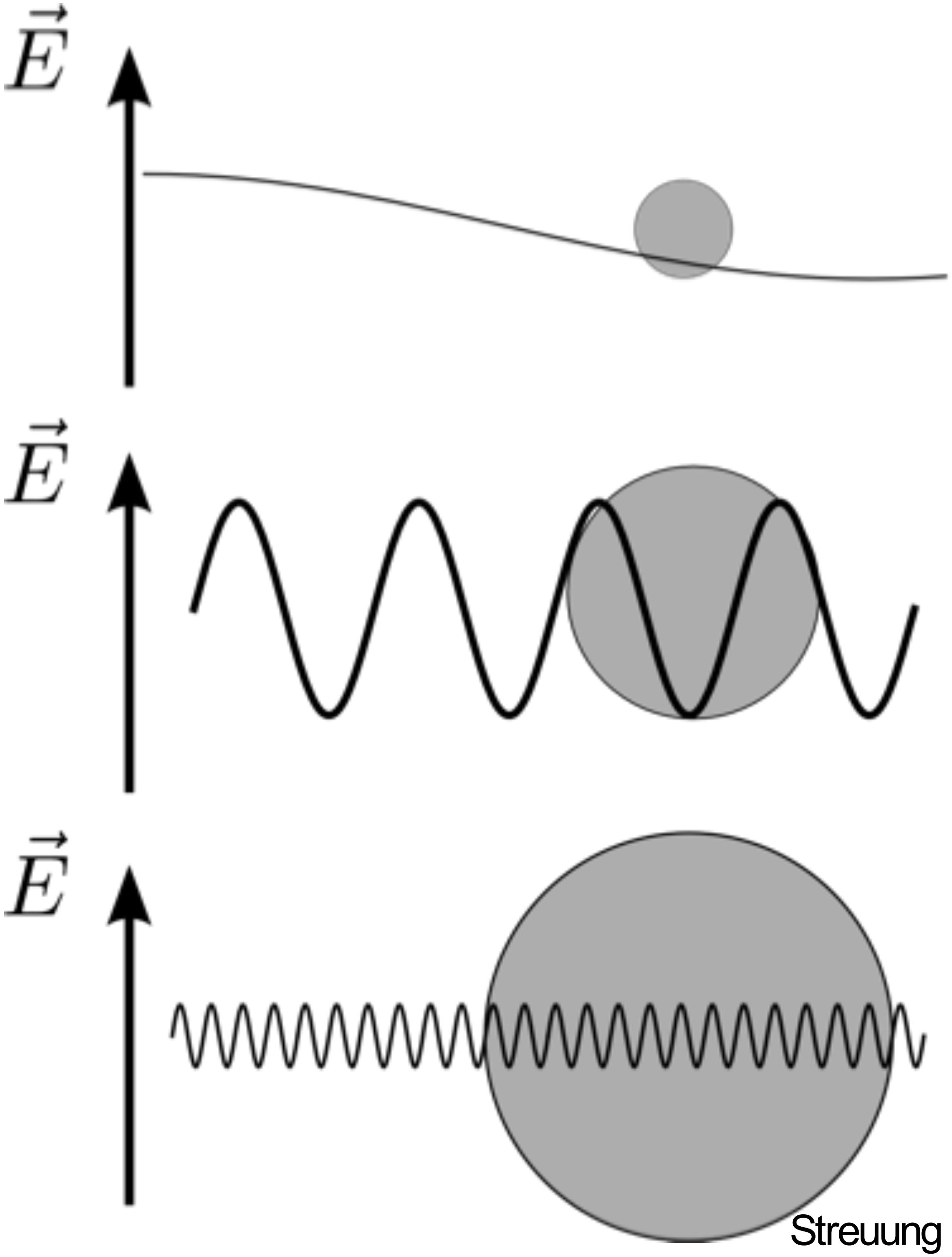
(Kreis-)Wellenzahl

Radius

Wellenlänge

- Bei unterschiedlicher Größe aber gleichem Skalenparameter gilt, solange die Brechungsindizes gleich sind, dass das Streuverhalten gleich ist.

Ein bisschen Ordnung…



Rayleigh-Streuung:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} = ka < 0,2$$

Mie-Streuung:

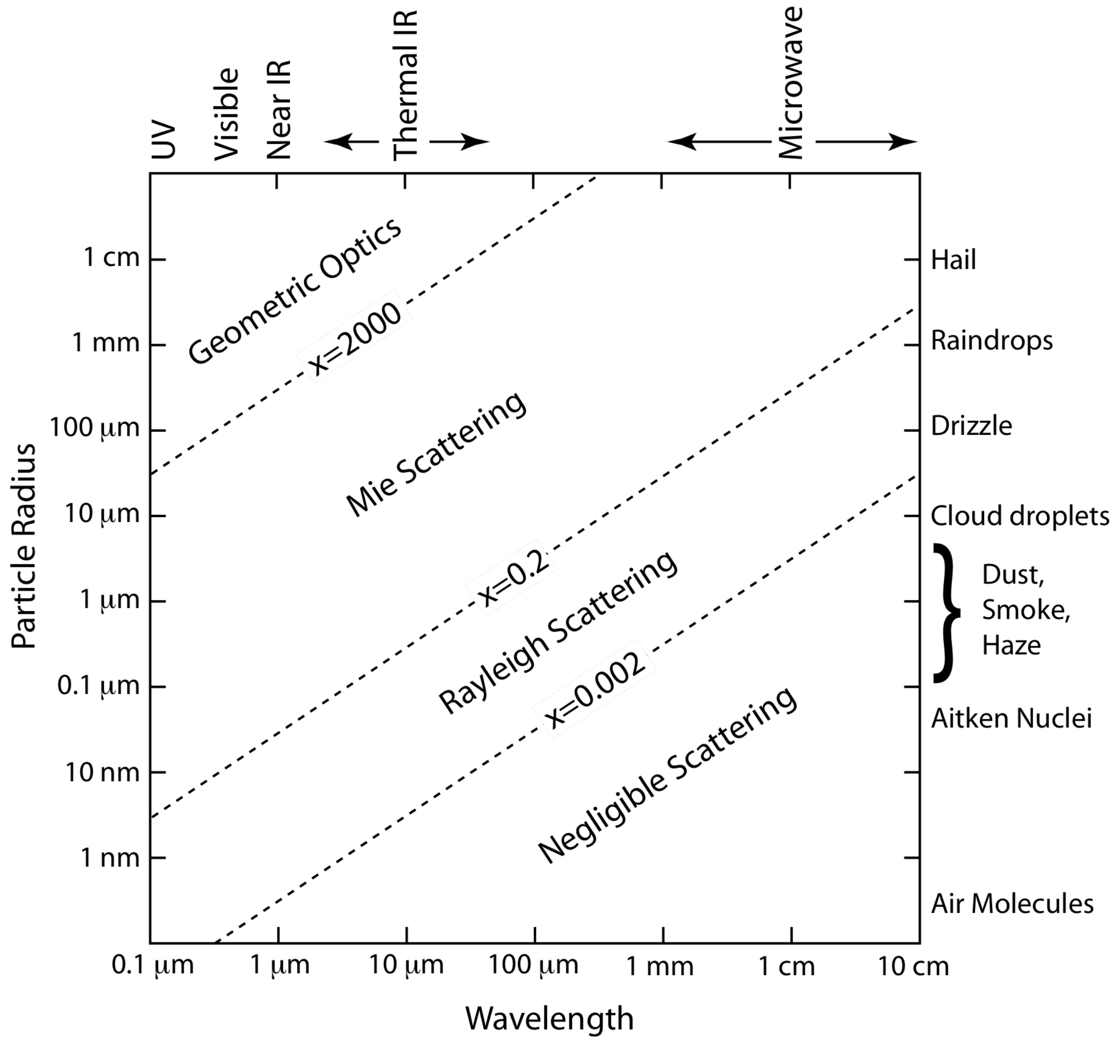
$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} = ka > 0,2$$

Geometrische Optik:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} = ka > 2000$$

Quelle: Manfred Brath

Light scattering regimes



There are many regimes of particle scattering, depending on the particle size, the light wave-length, and the refractive index.

This plot considers only single scattering by spheres. Multiple scattering and scattering by non-spherical objects can get really complex!

Quelle: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf

Streuung von EM-Wellen

- Streuung ist die Veränderung des EM-Wellenfeldes aufgrund der WW mit einem lokalen Objekt.
- Streuung ist Abhängig von der Einfallsrichtung und der Beobachterposition relativ zum Streuobjekt.
- Streuung ist vom Größenverhältnis zwischen Objektgröße und Wellenlänge abhängig.
- Streuung ist von der Permittivität und Permeabilität des Objekts relativ zur Umgebung abhängig.

Einfaches Beispiel

Rayleigh-Streuung

Rayleigh-Streuung

Typische Phänomene mit Rayleigh-Streuung:

- Wetterradar, Radarrückstreuung von Regen
- Blauer Himmel, Streuung von sichtbaren Licht an den Luftmolekülen

Annahmen

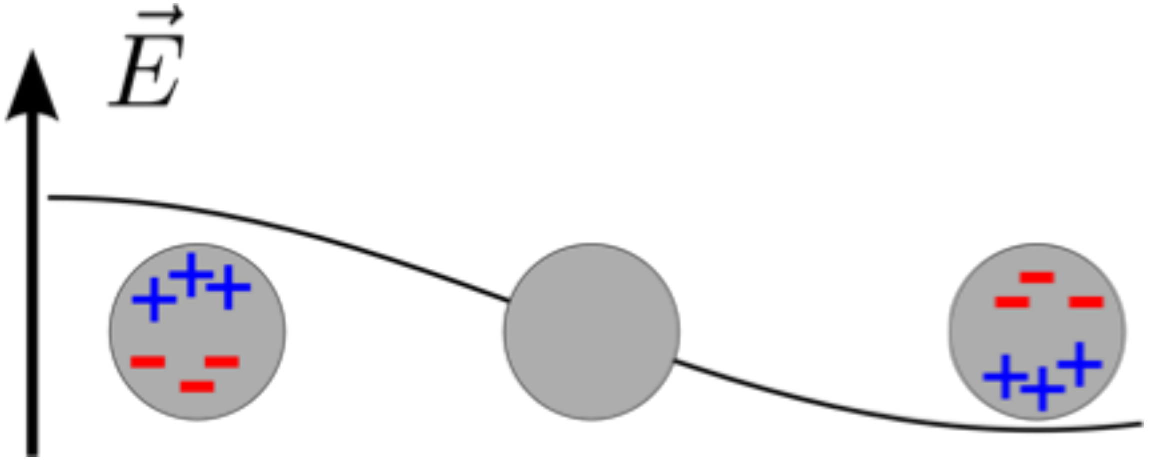
- Größenparameter $x = \frac{2\pi a}{\lambda} = ka < 0,2$
- Homogene Kugel
- Die Entfernung R zwischen Streuobjekt und Beobachtungsposition sei groß.
- $\vec{E}(\vec{r},t) = \exp(-i\omega t)\vec{E}(\vec{r})$
  - Reduzierung auf statische Streuung bzw. Phasor-Notation:

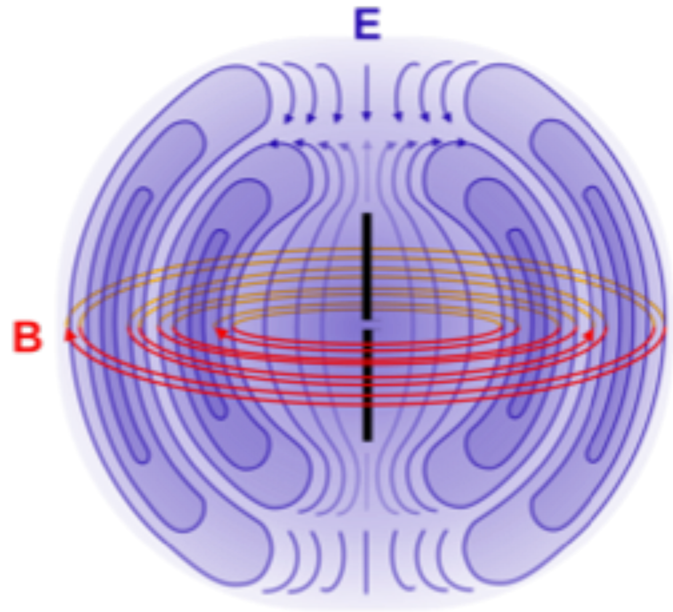
$$\vec{E}(\vec{r}) = \underbrace{\vec{E}_0}_{\text{Amplitude}} \exp\left(i\vec{k}\vec{r}\right)$$

Ortsvektor: $\vec{r}$

Wellenvektor: $\vec{k} = k\vec{e}_k$

Dipol-Näherung





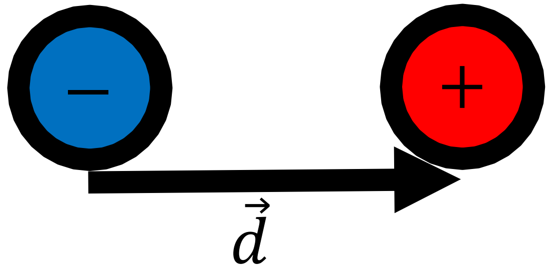
- Das gestreute EM-Feld:

$$\vec{E}_s = -\frac{k^2 \exp(ikr)}{4\pi\varepsilon r}\vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \underbrace{\vec{p}}_{\substack{\text{Dipolmoment}\\ \text{(allgemein)}}}\right]$$

Quellen: (links) Manfred Brath; (rechts) Wikipedia

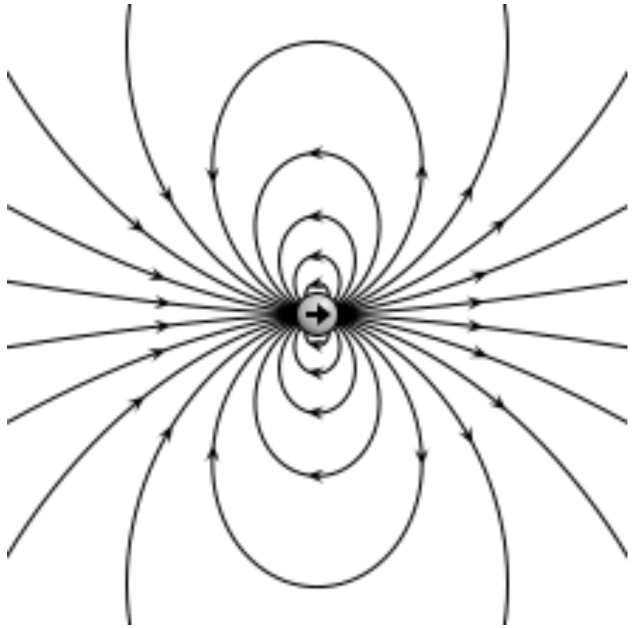
Einschub: Dipol(moment) allgemein

$$\vec{p} = \lim_{\substack{q\to\infty \\ |d|\to 0}} q \cdot \vec{d}$$



q: Ladung

$\vec{d}$: Abstandsvektor



Quelle: Wikipedia

Dipolmoment einer Kugel

- $$\vec{p} = V_p \underbrace{\left(\varepsilon_p - \varepsilon\right)\vec{E}_{\text{int}}}_{\text{Polarisation}} = \frac{4\pi}{3} a^3 \left(\varepsilon_p - \varepsilon\right)\vec{E}_{\text{int}}$$

- Das elektr. Feld innerhalb einer nichtleitenden Kugel ist bis auf einen Faktor gleich dem äußeren Feld.

$$\vec{E}_{\text{int}} = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}\vec{E}_i$$

- Das Dipolmoment:

$$\vec{p} = \frac{4\pi}{3} a^3 \left(\varepsilon_p - \varepsilon\right)\frac{3\varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}\vec{E}_i = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon\left(\varepsilon_p - \varepsilon\right)}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}\vec{E}_i$$

Gestreutes EM-Feld

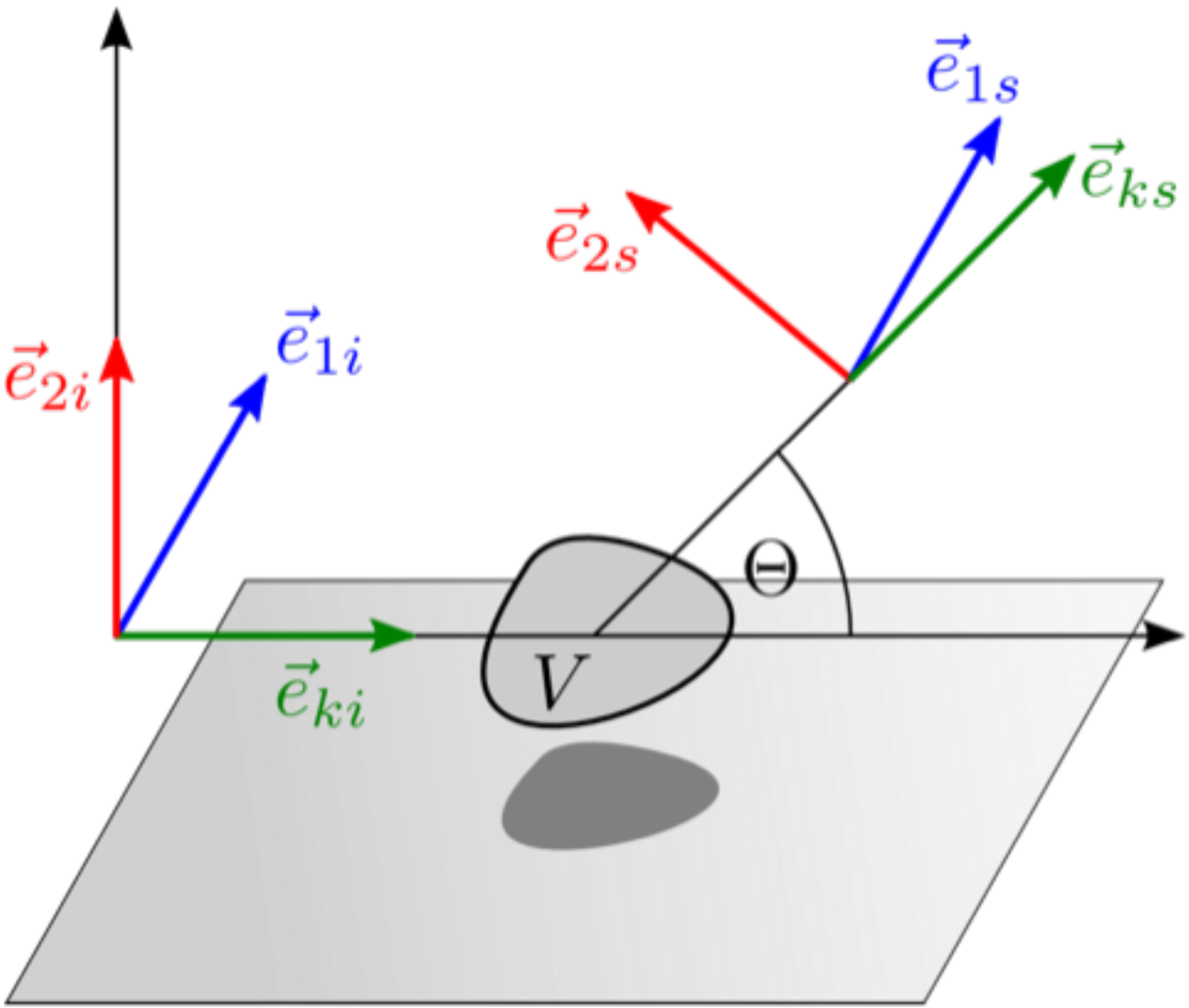
$$\vec{E}_s = -\frac{k^2 \exp(ikr)}{4\pi\varepsilon r}\vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{p}\right] \qquad \vec{p} = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon(\varepsilon_p - \varepsilon)}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}\vec{E}_i$$

- Dipolmoment in gestreutes EM-Feld eingesetzt:

$$\vec{E}_s = -\frac{\exp(ikr)}{r}\underbrace{k^2 a^3 \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}}_{= f_0}\vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{E}_i\right]$$

$$\vec{E}_s = -\frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{E}_i\right]$$

Streuebene



Polarisation:

$\vec{e}_{1j}$: senkrecht

$\vec{e}_{2j}$: parallel

i: eingehend

s: gestreut

$$\vec{e}_{1i} = \vec{e}_{1s} = \frac{\vec{e}_{ks} \times \vec{e}_{ki}}{\left|\vec{e}_{ks} \times \vec{e}_{ki}\right|}$$

$$\vec{e}_{2i} = \vec{e}_{ki} \times \vec{e}_{1i}$$

$$\vec{e}_{2s} = \vec{e}_{ks} \times \vec{e}_{1s}$$

$$\vec{e}_{ks} \cdot \vec{e}_{ki} = \cos\Theta$$

$$\vec{e}_{2s} \cdot \vec{e}_{2i} = \cos\Theta$$

Das gestreute Feld in Rayleighnäherung

$$\vec{E}_s = -\frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{E}_i\right]$$

$$= \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[\vec{e}_{2s}\left(\vec{e}_{2s} \cdot \vec{E}_i\right) + \vec{e}_{1s}\left(\vec{e}_{1s} \cdot \vec{E}_i\right)\right]$$

$$f_0 = k^2 a^3 \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}$$

$$\vec{E}_i = E_{2i}\vec{e}_{2i} + E_{1i}\vec{e}_{1i}$$

Gestreutes EM-Feld: eingehende Welle senkrecht polarisiert

$$\vec{E}_i = E_{1i}\vec{e}_{1i}$$

$$\vec{E}_s = -\frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{E}_i\right]$$

$$= \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[\vec{e}_{2s}\left(\vec{e}_{2s} \cdot \vec{E}_i\right) + \vec{e}_{1s}\left(\vec{e}_{1s} \cdot \vec{E}_i\right)\right]$$

$$= \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[\vec{e}_{2s}\left(\underbrace{\vec{e}_{2s} \cdot \vec{e}_{1i}}_{=0} E_{1i}\right) + \vec{e}_{1s}\left(\underbrace{\vec{e}_{1s} \cdot \vec{e}_{1i}}_{=1} E_{1i}\right)\right]$$

$$\vec{E}_{1s} = \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 E_{1i} \vec{e}_{1s}$$

Gestreutes EM-Feld: eingehende Welle parallel polarisiert

$$\vec{E}_i = E_{2i}\vec{e}_{2i}$$

$$\vec{E}_s = -\frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{E}_i\right]$$

$$= \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[\vec{e}_{2s}\left(\vec{e}_{2s} \cdot \vec{E}_i\right) + \vec{e}_{1s}\left(\vec{e}_{1s} \cdot \vec{E}_i\right)\right]$$

$$= \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[\vec{e}_{2s}\left(\underbrace{\vec{e}_{2s} \cdot \vec{e}_{2i}}_{=\cos\Theta} E_{2i}\right) + \vec{e}_{1s}\left(\underbrace{\vec{e}_{1s} \cdot \vec{e}_{2i}}_{=0} E_{2i}\right)\right]$$

$$\vec{E}_{2s} = \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \cos\Theta E_{2i}\vec{e}_{1s}$$

Das gestreute Feld in Rayleighnäherung

$$\vec{E}_s = -\frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \vec{e}_{ks} \times \left[\vec{e}_{ks} \times \vec{E}_i \right]$$

$$= \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[\vec{e}_{2s} \left(\vec{e}_{2s} \cdot \vec{E}_i \right) + \vec{e}_{1s} \left(\vec{e}_{1s} \cdot \vec{E}_i \right) \right]$$

$$\vec{E}_s = \frac{\exp(ikr)}{r} f_0 \left[E_{1i} \vec{e}_{1s} + E_{2i} \vec{e}_{1s} \cos\Theta \right]$$

$$f_0 = k^2 a^3 \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}$$

Strahlungstransportgleichung

$$\frac{dI}{ds} = -(\alpha + \sigma)I \; + \; \alpha B(T) \; + \; \sigma \int_{\Omega} P I \frac{d\Omega}{4\pi}$$

Extinktion *therm. Emission* *Streu-Emission*

Extinktion: $\alpha + \sigma$ (Absorption+Streuung)

Thermische Emission: Nur α

Streu-Emission: Nur σ

Folie übernommen von
Stefan Bühler

Strahlungstransportgleichung

- Die RTE ist in Intensitäten definiert.
- Frage: Wie kommt man von den Amplituden zu Intensitäten?

Die gestreute Intensität

$$I_s = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(E_{2s}E^*_{2s} + E_{1s}E^*_{1s}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(\left|f_0\right|^2 \cos^2\Theta \left|E_{2i}\right|^2 + \left|f_0\right|^2 \left|E_{1i}\right|^2\right)$$

Bei unpolarisierter Strahlung gilt $\left|E_{2i}\right|^2 = \left|E_{1i}\right|^2 = \frac{1}{2}\left|E_i\right|^2$

$$I_s = \underbrace{\frac{\left|f_0\right|^2}{2}\left(1+\cos^2\Theta\right)}_{=P^*}\underbrace{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\frac{\left|E_i\right|^2}{2}}_{=I_i}$$

Eine Phasenfunktion

- Rayleigh-Streuung

$$P^* = \frac{|f_0|^2}{2}\left(1 + \cos^2 \Theta\right)$$

…eigentlich schon fast fertig!

Die Phasenfunktion

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}s} = -(\alpha + \sigma) I + \alpha B(T) + \sigma \int_\Omega \frac{\mathrm{d}\Omega}{4\pi} P I$$

- In der RTE ist die Phasenfunktion analog zu einer Wahrscheinlichkeitsdichte definiert.

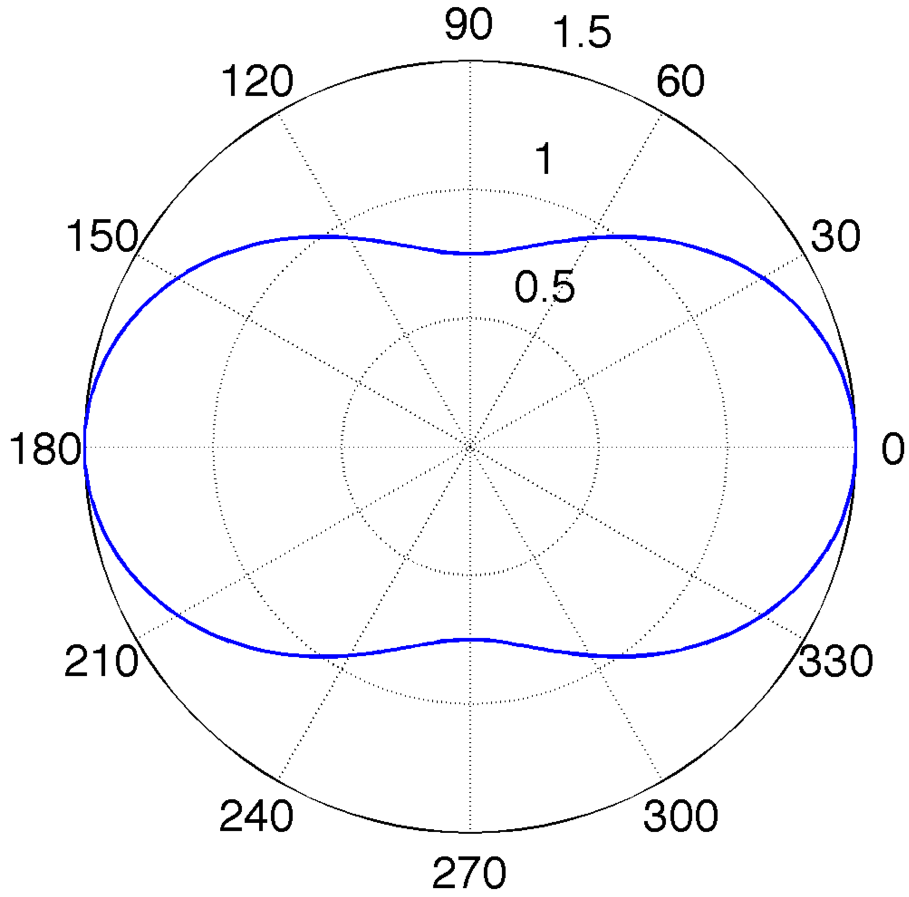
$$\frac{1}{4\pi} \int_\Omega P \,\mathrm{d}\Omega = 1$$

- Normieren:

$$P = \frac{P^*}{\frac{1}{4\pi} \underbrace{\int_\Omega P^* \,\mathrm{d}\Omega}_{\text{Streuquerschnitt}}} = 4\pi \frac{P^*}{C_{sca}}$$

Die Phasenfunktion

- Rayleigh-Streuung: $$P = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \Theta)$$



Streuung

Quelle: Manfred Brath

Strahlungstransportgleichung

$$\frac{dI}{ds} = -(\alpha + \sigma)I \;+\; \alpha B(T) \;+\; \sigma \int_{\Omega} P I \frac{d\Omega}{4\pi}$$

Extinktion *therm. Emission* *Streu-Emission*

Extinktion: $\alpha + \sigma$ (Absorption+Streuung)

Thermische Emission: Nur α

Streu-Emission: Nur σ

Folie übernommen von Stefan Bühler

Streukoeffizient

- Die RTE ist aber nicht für ein Teilchen alleine definiert, sondern für eine Anzahl von Teilchen pro Volumen.

- Wenn die einzelnen Streuobjekte weit genug voneinander entfernt sind, so dass die einzelnen Streufelder nicht miteinander korreliert sind, gilt die Annahme der unabhängigen Streuung. In der Regel für die Atmosphäre erfüllt.

Streukoeffizient

- Streukoeffizient:

$$\sigma = \frac{N}{V} C_{sca} = \underbrace{n_0}_{\text{Anzahldichte}} \overbrace{C_{sca}}^{\text{Streuquerschnitt}}$$

- Streukoeffizient für Rayleigh-Streuung

$$\sigma = n_0 \frac{|f_0|^2}{2} \frac{16\pi}{3} = n_0 \frac{8\pi}{3} k^4 a^6 \left| \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon} \right|^2$$

Herleitung an der Tafel

Fertig?

- Frage: Gibt es noch weitere Wechselwirkungen, die wie beachten müssen?

Fertig? Noch nicht…

- Das Streuobjekt wechselwirkt mit der eingehenden Strahlung nicht nur über Streuung, sondern es absorbiert auch Strahlung.

Absorptionskoeffizient

- Die RTE ist nicht für ein Teilchen alleine definiert, sondern für eine Anzahl von Teilchen pro Volumen.
- Dementsprechend gilt für den Absorptionskoeffizient:

$$\alpha_s = \frac{N}{V} C_{abs} = n_0 \underbrace{C_{abs}}_{\text{Absorptionsquerschnitt}}$$

Absorptionskoeffizient

- Der Absorptionsquerschnitt ist das Verhältnis zwischen absorbierten Intensität und der eingehenden Intensität.

$$C_{abs} = \frac{I_a}{I_i} = \frac{k}{\varepsilon} \frac{\int_{V_p} dV \, \mathrm{Im}\left(\varepsilon_p(\vec{r})\right) \left|E_{\mathrm{int}}(\vec{r})\right|^2}{\left|E_i\right|^2}$$

- Absorptionskoeffizient für Rayleigh-Streuung:

$$\alpha_s = n_0 4k\pi a^3 \frac{\mathrm{Im}\left(\varepsilon_p\right)}{3\varepsilon} \left|\frac{3\varepsilon}{\varepsilon_p + 2\varepsilon}\right|^2$$

Herleitung an der Tafel

Strahlungstransportgleichung

$$\frac{dI}{ds} = -(\alpha + \sigma)I \;+\; \alpha B(T) \;+\; \sigma \int_{\Omega} PI \frac{d\Omega}{4\pi}$$

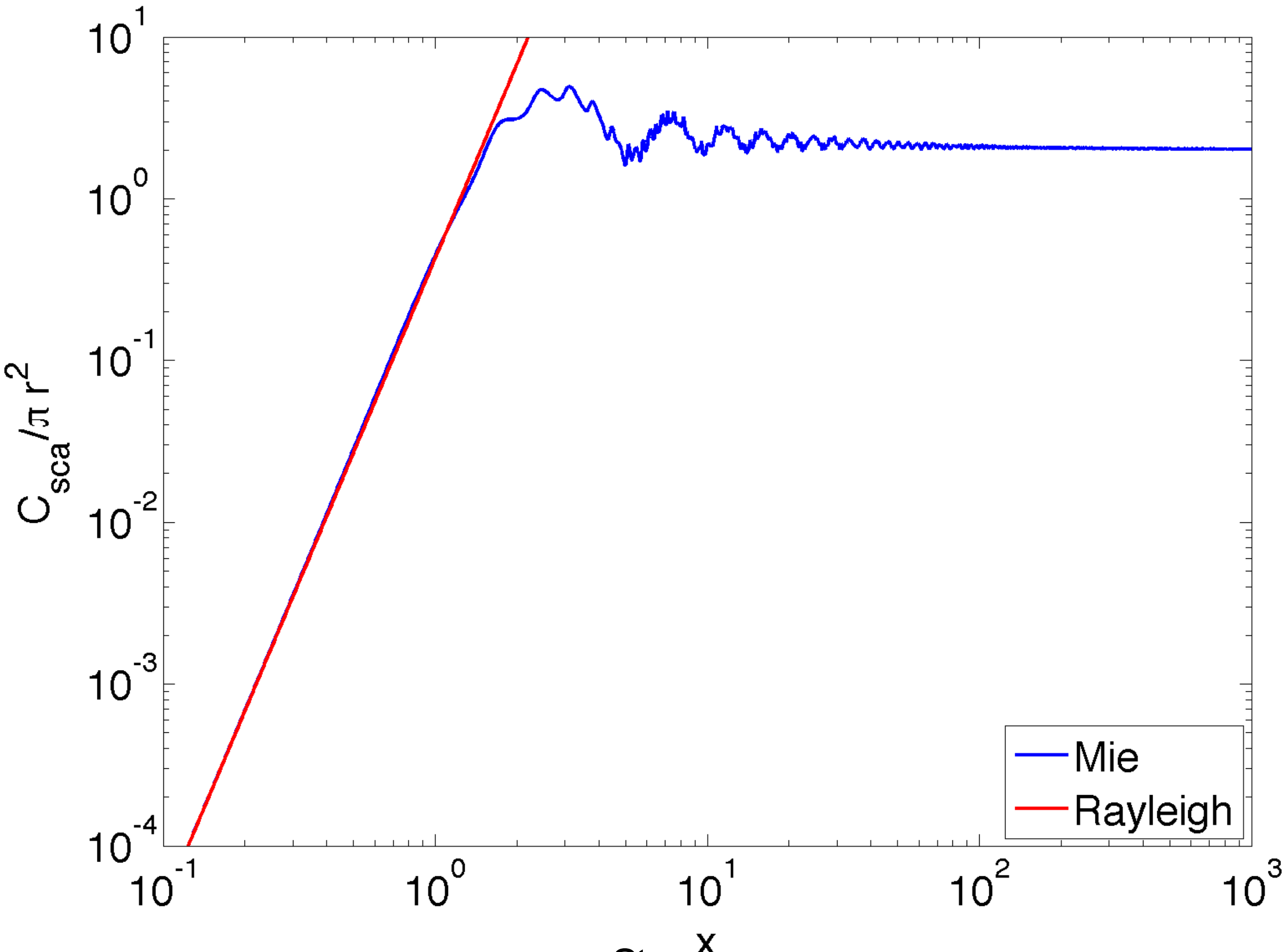
Extinktion *therm. Emission* *Streu-Emission*

Extinktion:	$\alpha + \sigma$	(Absorption+Streuung)
Thermische Emission:	Nur α	
Streu-Emission:	Nur σ	

Folie übernommen von
Stefan Bühler

Rayleigh: Wie groß ist der Gültigkeitsbereich?

- Abhängig vom Skalenparameter:



Streuung

Quelle: Manfred Brath

Rayleigh-Streuung: Zusammenfassung

- Gültig für $x = \dfrac{2\pi a}{\lambda} < 0,2$
- Streukoeffizient: $\sigma \sim \lambda^{-4} a^6$

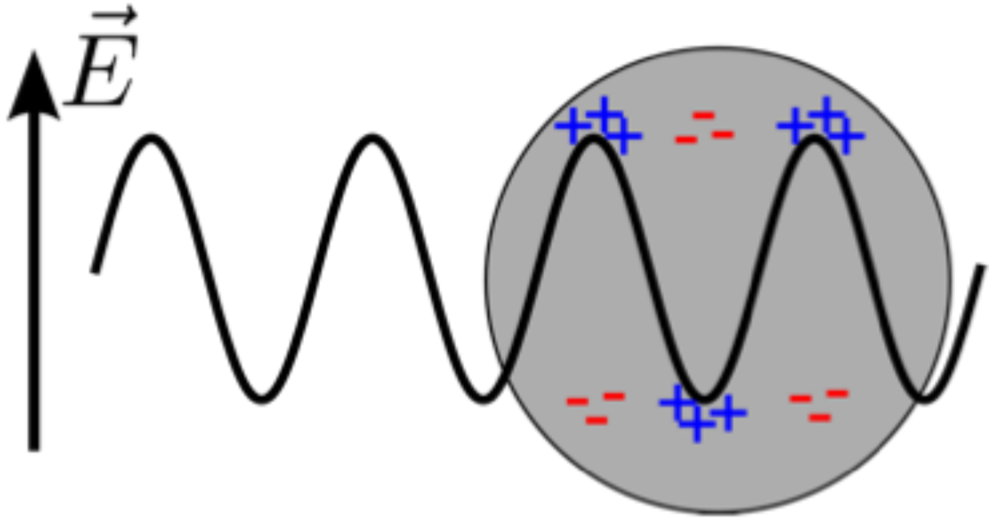
  $\sigma \sim k^4 a^6$
- Absorptionskoeffizient: $\alpha_s \sim \lambda^{-1} a^3$

  $\alpha_s \sim k a^3$
- Phasenfunktion: $P \sim (1 + \cos^2 \Theta)$

Ein definitiv nicht mehr einfaches Beispiel

Mie-Streuung

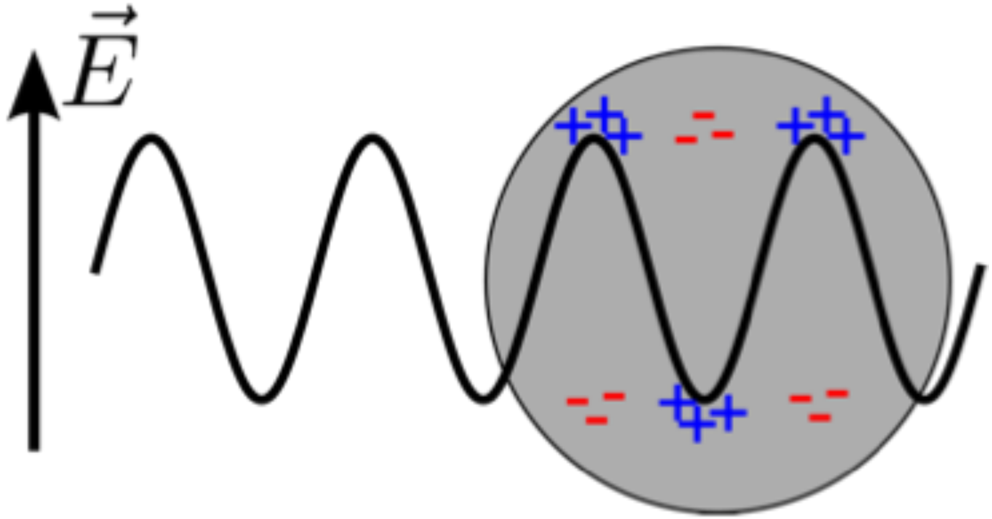
Mie-Streuung



- Größenparameter: $x = \dfrac{2\pi a}{\lambda} > 0,2$

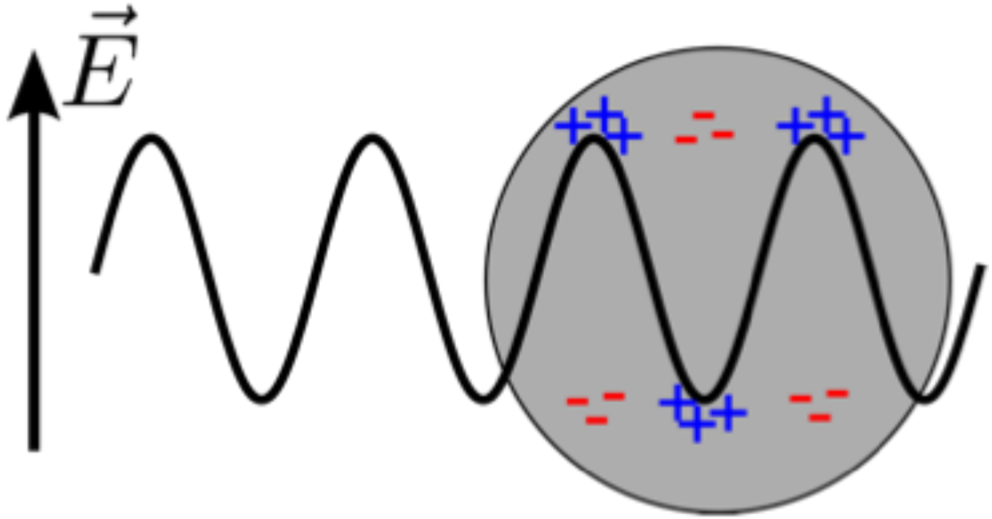
- Die Anregung ist nicht mehr gleichphasig.
  - Interferenzen, Resonanzen

Mie-Streuung-Lösung



- Entwicklung nach vektoriellen Kugelflächenfunktionen unter Berücksichtigung des Grenzflächenverhaltens
  - Z. B. Tangentialkomponente des E-Feld ist stetig und Normalkomponente des B-Feld ist stetig.
- Hier nur ganz grobe Lösungsidee

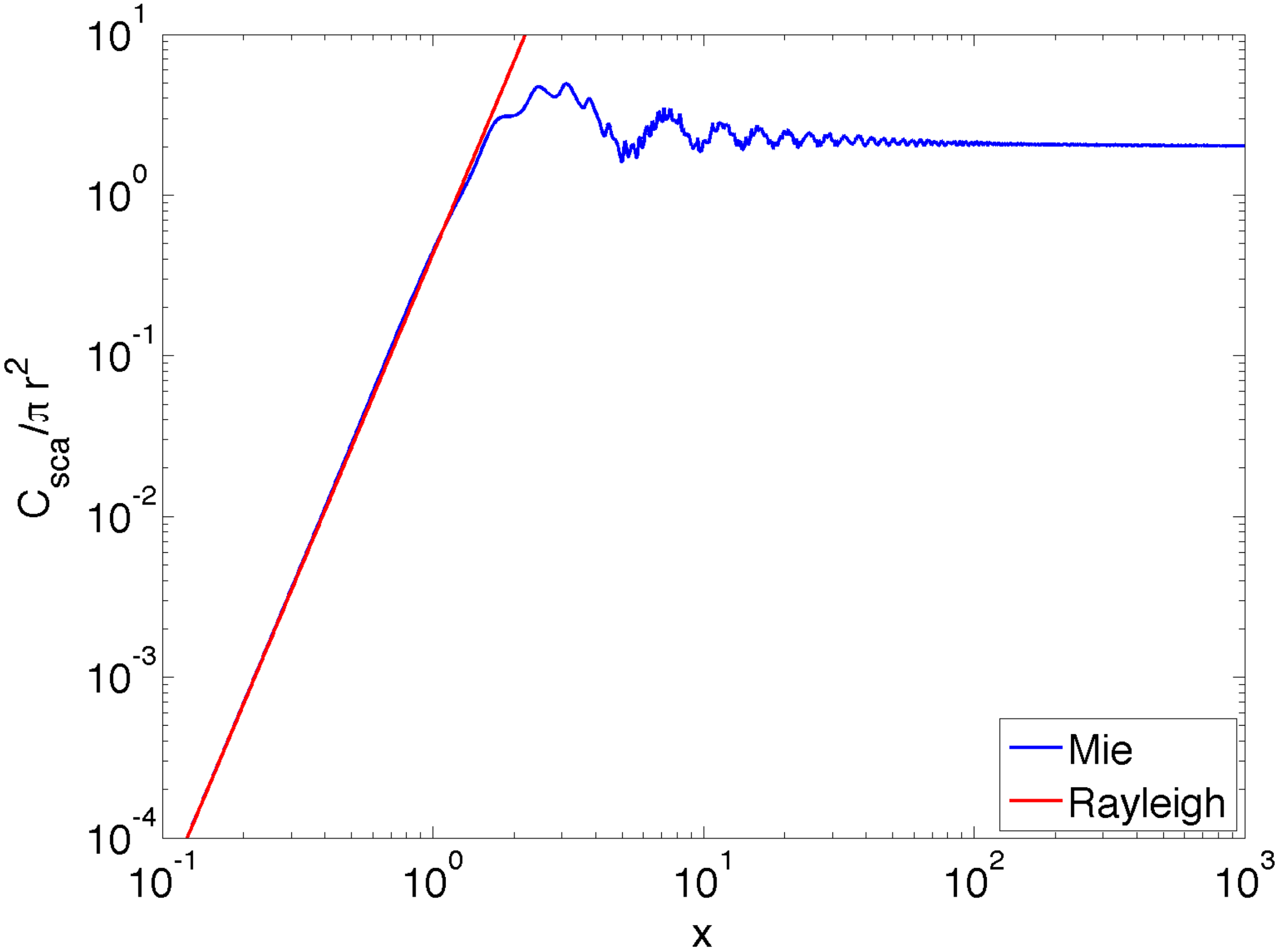
Mie-Streuung-Lösung



- Für genaue Herleitung siehe
  - Tsang et al., Scattering of Electromagnetic Waves, Theories and Applications, Wiley, 2000
  - Stratton, J. A., Electromagnetic Theory, McGraw Hill, 1941
  - ...oder die RT-Klassiker

Quelle: Manfred Brath

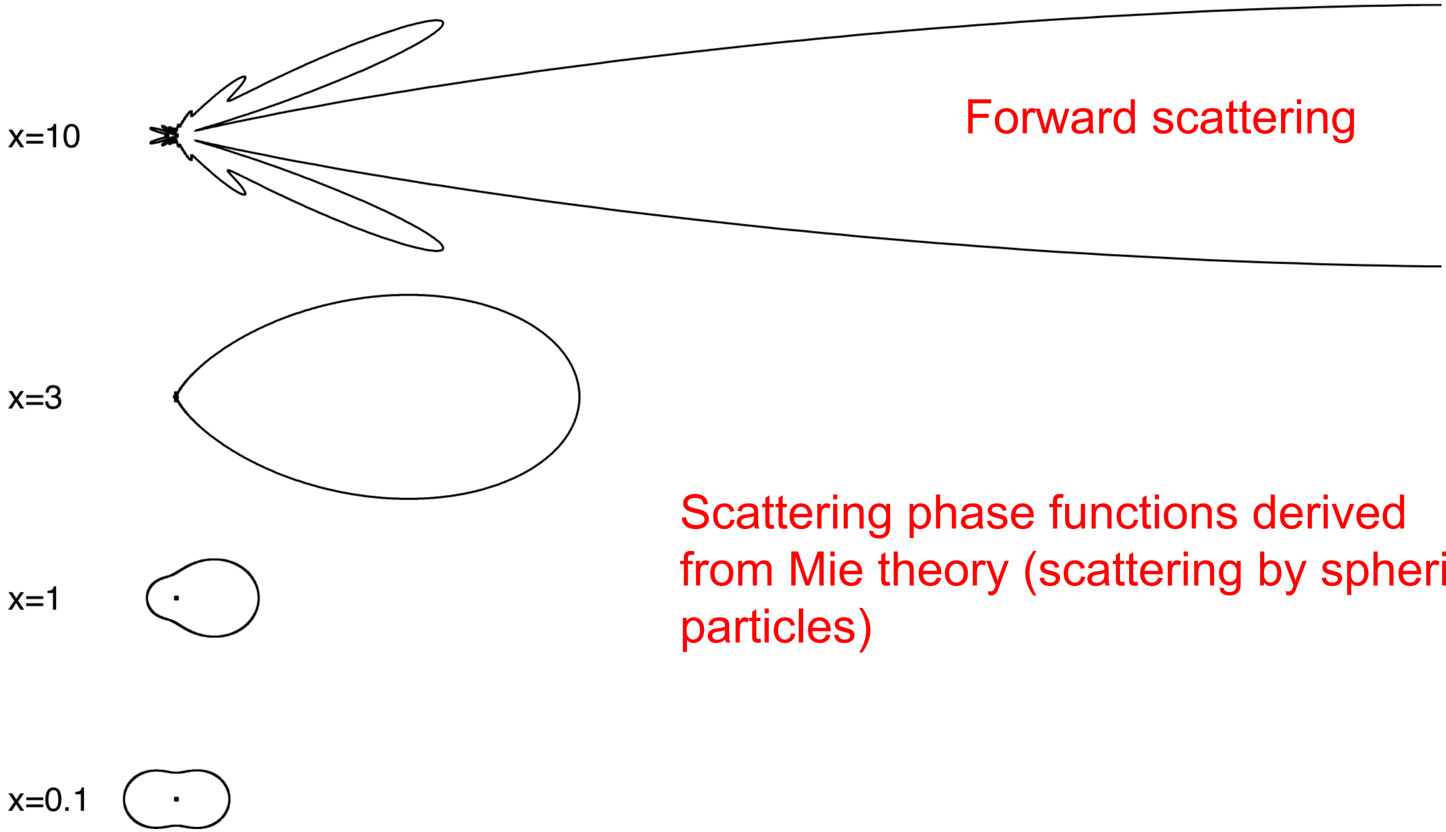
Mie-Streuung: Streuquerschnitt/-koeffizient



- Grenzfall Rayleigh-Streuung: $\sigma / \pi a^2 = n_0 C_{sca} / \pi a^2 \sim x^4$
- Grenzfall geometrische Optik: $\sigma / \pi a^2 = n_0 C_{sca} / \pi a^2 \sim 2$

Quelle: Manfred Brath

Mie-Streuung: Scattering phase functions

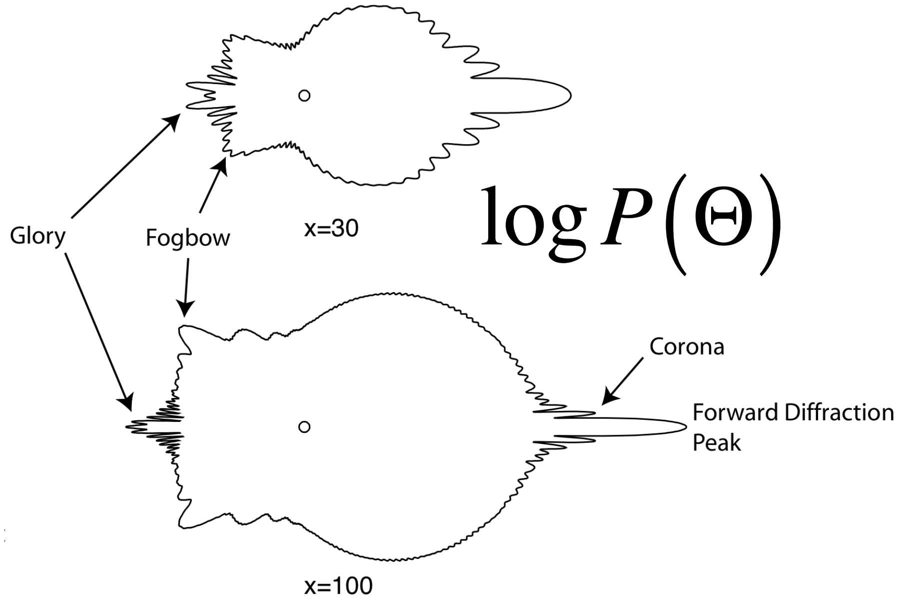


Scattering phase functions derived from Mie theory (scattering by spherical particles)

The scattering phase function, or phase function, gives the angular distribution of light intensity scattered by a particle at a given wavelength

Quelle: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf bzw. Petty, G. W., 2006

Mie-Streuung:
Optical phenomena

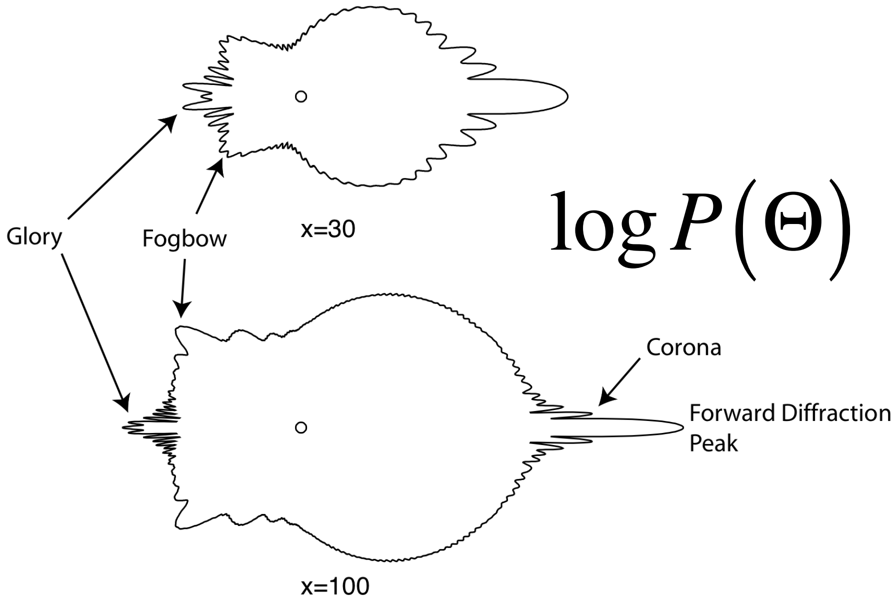


- Fogbow: spikes in scattering phase function present but not sharp as for rainbows. Hence the separation of colors (due to varying refractive index) is not as vivid as a normal rainbow. A whitish ring centered on one's shadow (i.e. opposite the sun) is seen.
- Arises when water droplets have a size characteristic of fog and clouds rather than rain

Quelle: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf bzw. Petty, G. W., 2006

Mie-Streuung:

Optical phenomena



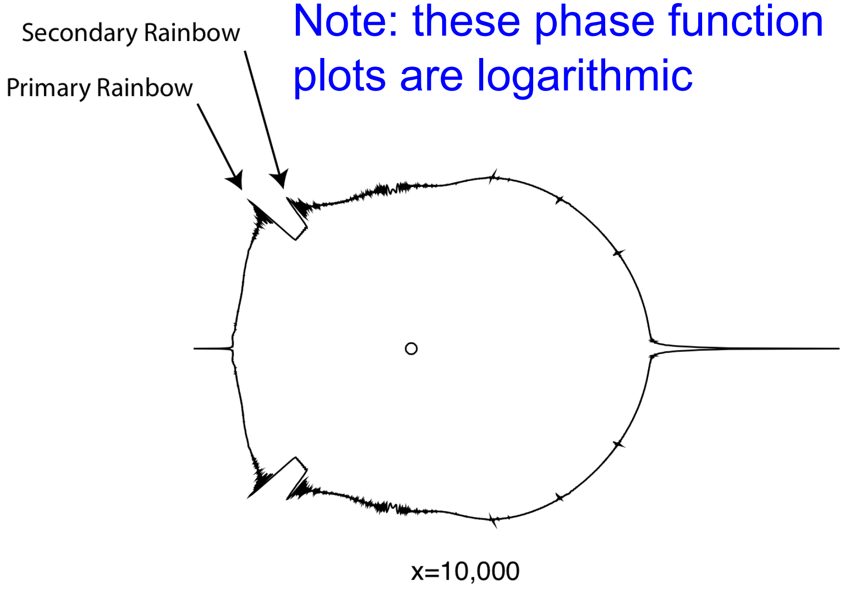
$$\log P(\Theta)$$

- Korona

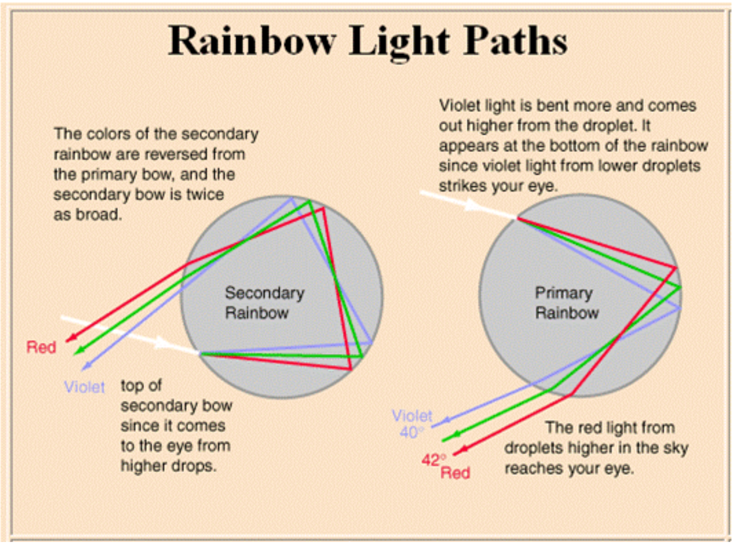
Quelle: Wikipedia

Quelle: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf bzw. Petty, G. W., 2006

Mie-Streuung: Optical phenomena



Note: these phase function plots are logarithmic



- Rainbow: for large particles (x = 10,000), the forward and backward peaks in the scattering phase function become very narrow (almost non-existent). Light paths are best predicted using geometric optics and ray tracing
- Primary rainbow: single internal reflection
- Secondary rainbow: double internal reflection

Quelle: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture_slides.pdf bzw. Petty, G. W., 2006

Mie-Streuung: Zusammenfassung

- (Exakt) Gültig für alle x

- Streukoeffizient
  - Grenzfall Rayleigh-Streuung: $\sigma / \pi a^2 = n_0 C_{sca} / \pi a^2 \sim x^4$
  - Grenzfall geomtrische Optik: $\sigma / \pi a^2 = n_0 C_{sca} / \pi a^2 \sim 2$

- Phasenfunktion:

  $x \rightarrow \infty$: Vorwärtsstreuung nimmt zu

  Phasenfunktion wird asymmetrischer und geht über in geometrische Optik