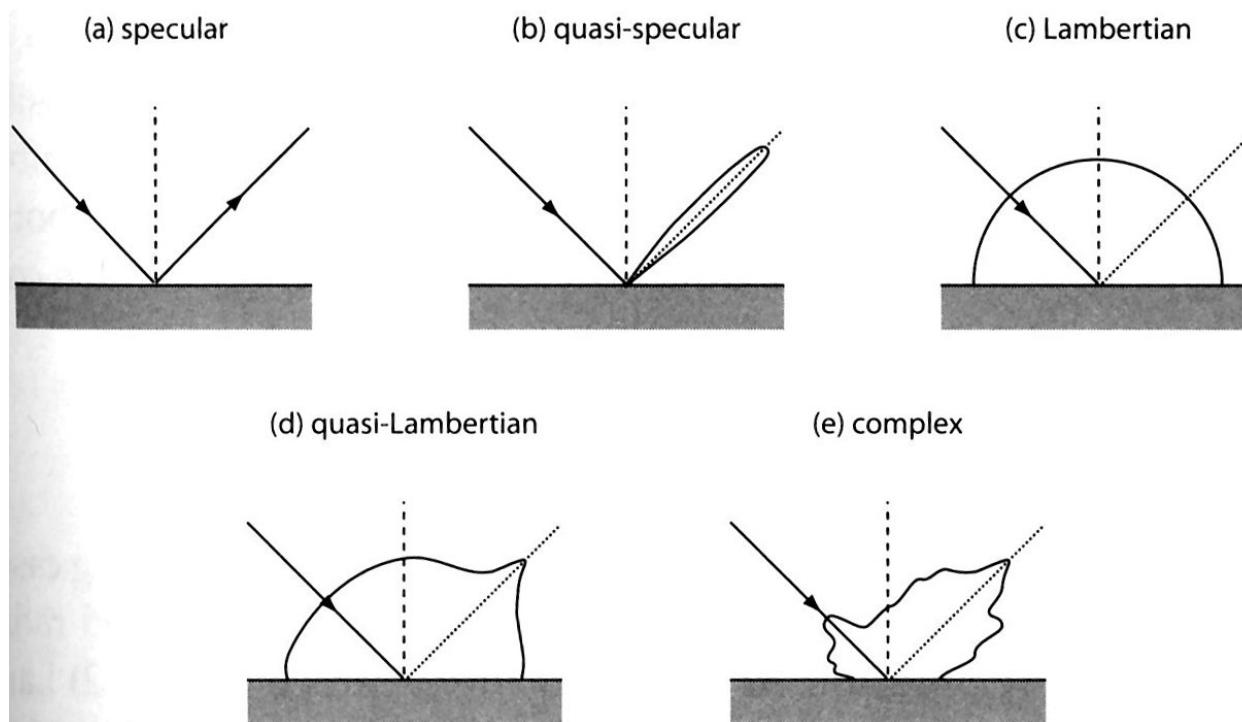


Natürliche Oberflächen

Optik, Strahlung, Fernerkundung
Sommersemester 2019

Stefan Bühler

Meteorologisches Institut
Universität Hamburg



Übersicht – alle Kapitel

Einleitung

1. Orbits und Satelliten
2. Elektromagnetische Wellen
3. Grundaesetze der Optik
4. Natürliche Oberflächen
5. Thermische Strahlung
6. Strahlungstransfergleichung
7. Streuung

Prüfungsvorbereitung

Prüfung

Quellen

- ▶ Petty (A first Course in Atmospheric Radiation)
- ▶ Rees (Physical Principles of Remote Sensing)

Zunächst eine Umfrage / Vorgriff auf das nächste Kapitel

- ▶ Es gibt eine klassische Aufgabe, die Temperatur der Erde (ohne Atmosphäre) aus der Strahlungsbalance zu berechnen (mit Planck-Funktion der Sonne und der Erde).
- ▶ Wer hat das schon mal gemacht (z.B. in Klimaphysik)?

Übersicht

- ▶ Natürliche Oberflächen
- ▶ Absorptivität und Reflektivität
- ▶ Winkelabhängigkeit der Reflektion
- ▶ Anwendungsbeispiele und Zusammenfassung

NATÜRLICHE OBERFLÄCHEN

Natürliche Oberflächen

- ▶ Die meisten natürlichen Oberflächen sind nicht so einfach, dass sie sich als glatte Grenze zwischen zwei homogenen Medien beschreiben ließen.
 - ▶ Erde
 - ▶ Sand
 - ▶ Vegetation
 - ▶ Stein
 - ▶ Schnee
- ▶ Wasserflächen (was unterscheidet sie von den anderen Oberflächen?)
 - Rauigkeit Abhängig vom Wind



Idealisierte natürliche Oberflächen

- ▶ Die Gesetze der spekularen Reflektion (inklusive Fresnel Formeln, etc.) gelten allenfalls noch auf der Mikroskala (z.B. für Wasser), aber nicht wenn man über eine endliche Oberfläche mittelt.
- ▶ Wir brauchen eine mehr empirische Beschreibung der Streueigenschaften
- ▶ Für raue Oberflächen betrachten wir eine gedachte Ebene, und ignorieren die Details darunter

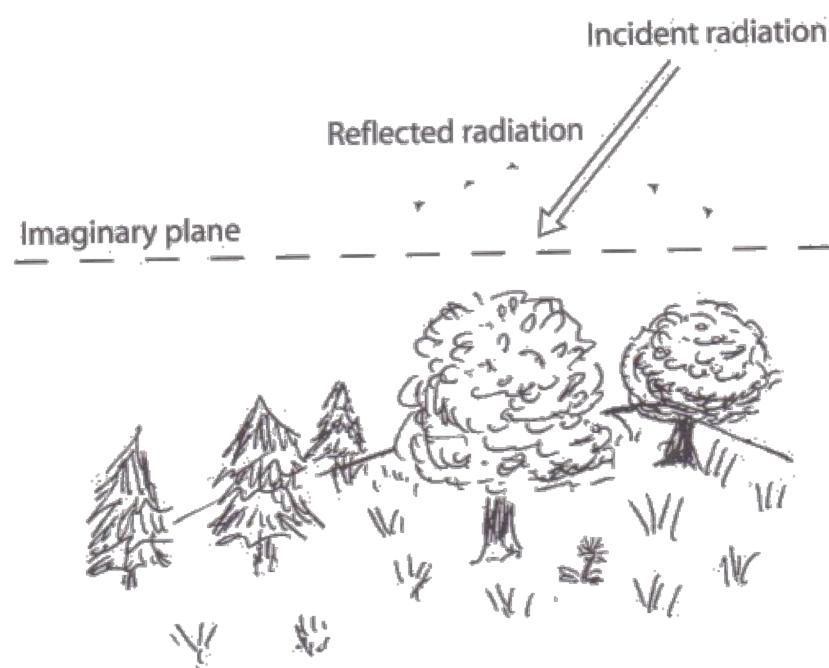


Fig. 5.1: Example of how one treats an irregular surface as an equivalent plane surface.

Quelle: Petty

Wolken

- ▶ In diesem vereinfachten Bild kann ich sogar Wolken als (Pseudo-)Oberfläche betrachten.
- ▶ Macht Sinn für reflektierte Sonnenstrahlung.

ABSORPTIVITÄT UND REFLEKTIVITÄT

Absorptivität und Reflektivität

- ▶ Absorptivität a = Bruchteil der absorbierten Strahlungsintensität
- ▶ Reflektivität r = Bruchteil der reflektierten Strahlungsintensität
- ▶ Hängen von **Wellenlänge** (oder Frequenz) ab
 - ▶ Beispiel: Gras sieht grün aus, weil es grün, gelb und blau stärker reflektiert als rot und orange.
- ▶ Hängen von der **Richtung** (der einfallenden Strahlung) ab
 - ▶ Das war ja auch bei glatten Oberflächen so → Fresnel Gleichungen
- ▶ Können wir etwas über die Summe von a und r sagen?

Verhältnis zwischen Absorptivität und Reflektivität

$$a_\lambda(\vartheta, \varphi) + r_\lambda(\vartheta, \varphi) = 1$$

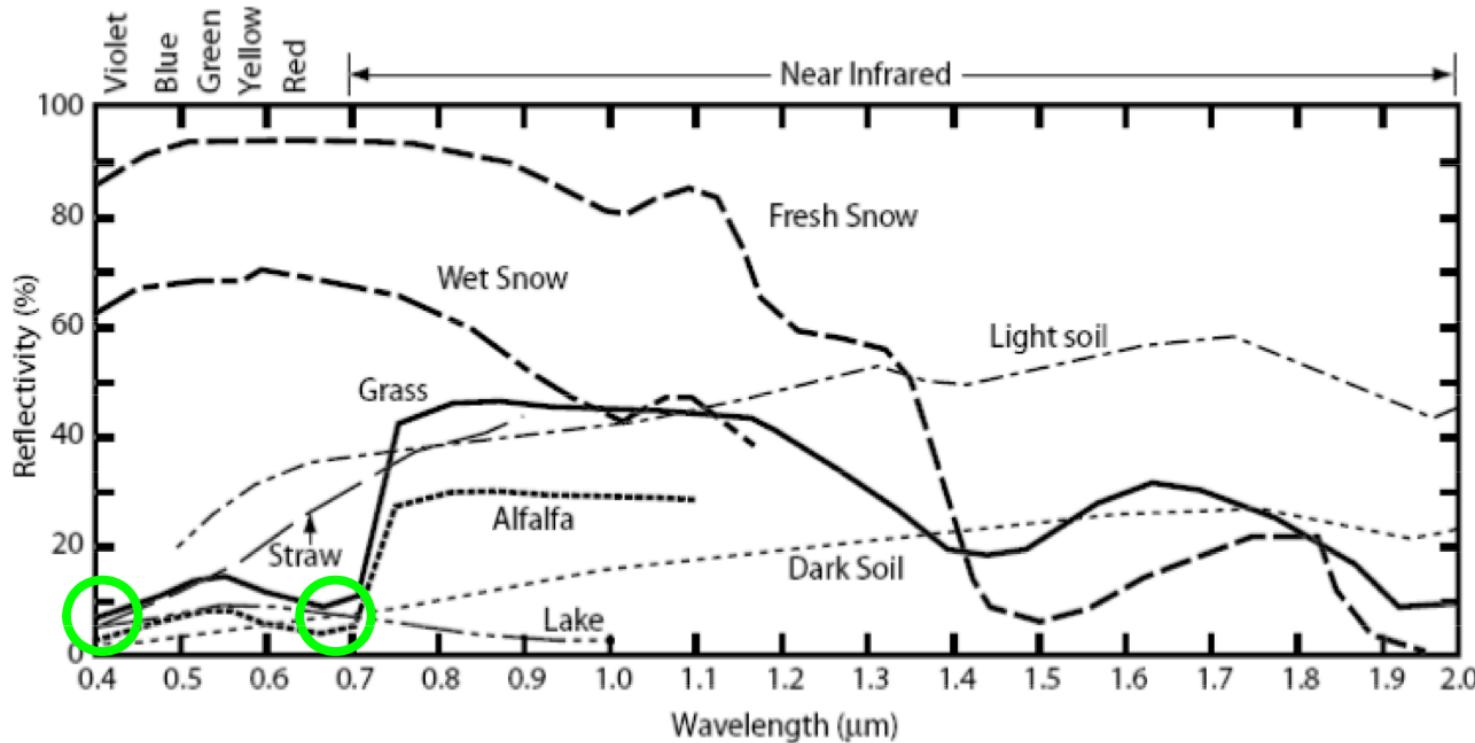
(Das heißt, wir nehmen an, dass es keine Transmission gibt.)

Oft azimutal isotrop:

$$a_\lambda(\vartheta, \cancel{\varphi}) + r_\lambda(\vartheta, \cancel{\varphi}) = 1$$

Für hinreichend raue Oberflächen ist auch die Theta-Abhängigkeit klein.

Beispiele für Reflektivitätsspektren

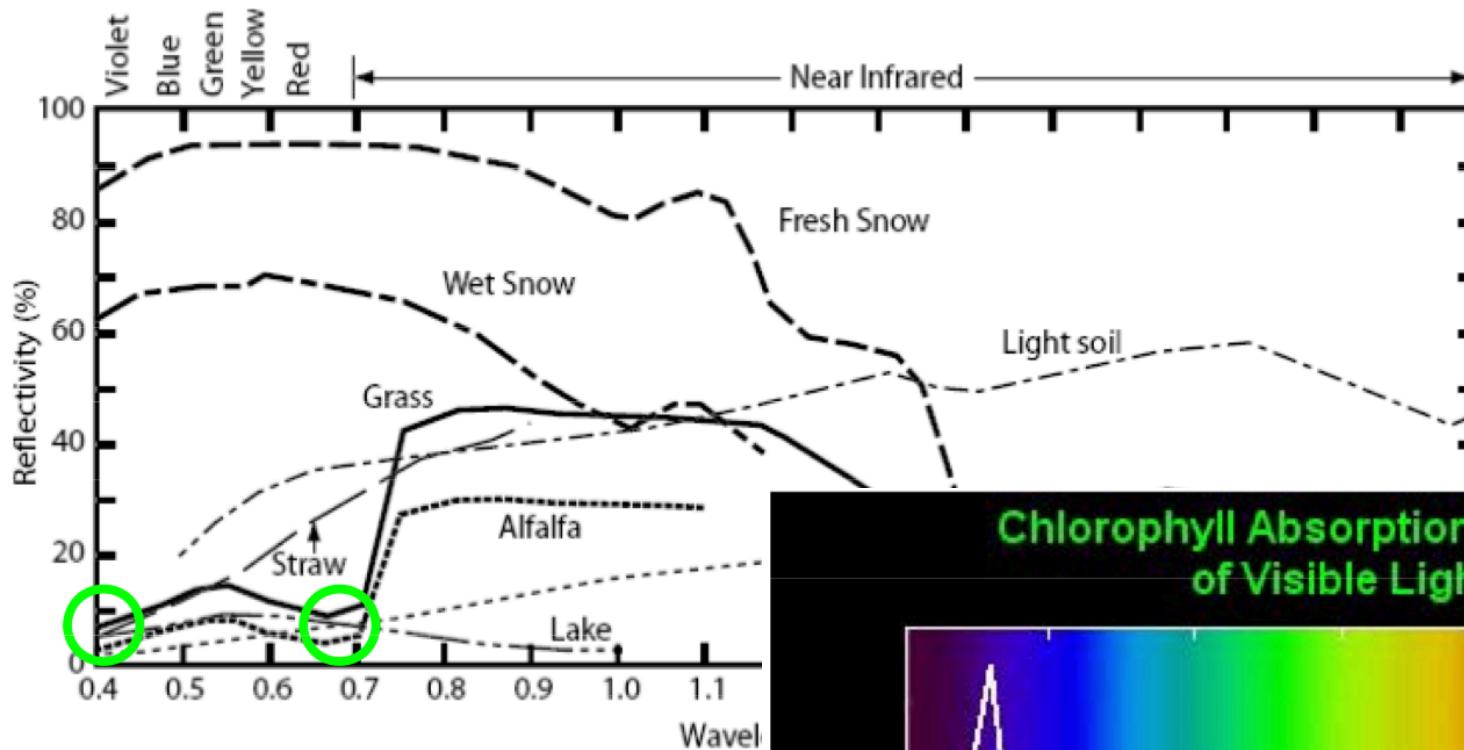


Petty Abb. 5.2

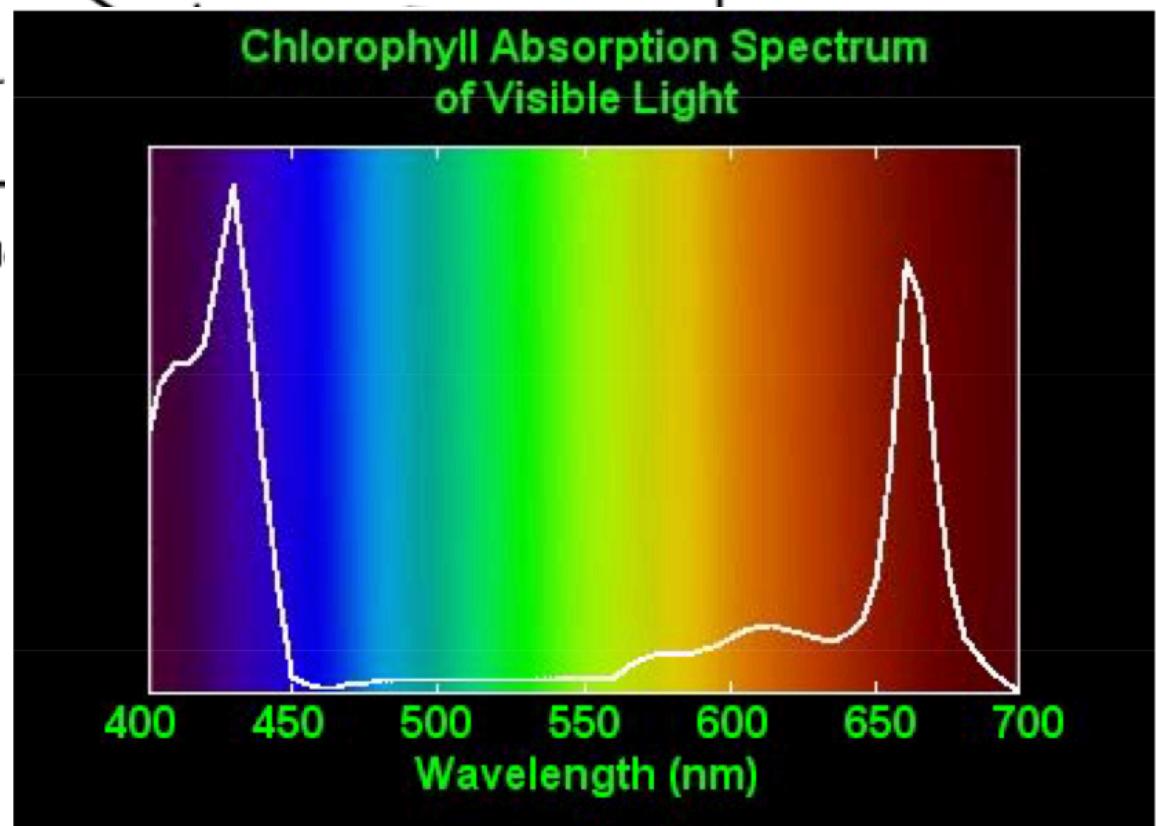
- ▶ Besonders hohe Reflektivität: Frischer Schnee
- ▶ Besonders niedrige Reflektivität: Wasser, Erde, frische Vegetation
- ▶ Im Nah-Infrarot sind die Reflektivitäten allgemein niedriger, im Infrarotbereich noch niedriger (dort typisch <5%)
- ▶ Warum die Minima bei Gras und Alfalfa (Luzerne, eine Art Klee)?
 - ▶ Absorption des Chlorophylls



Beispiele für Reflektivitätsspektren

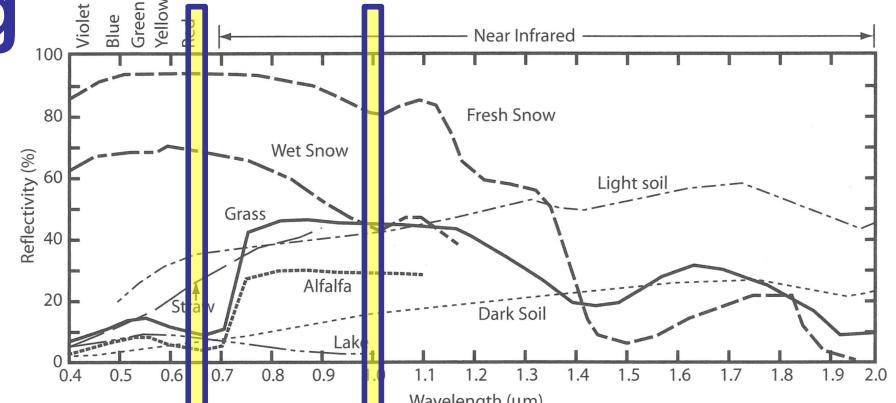
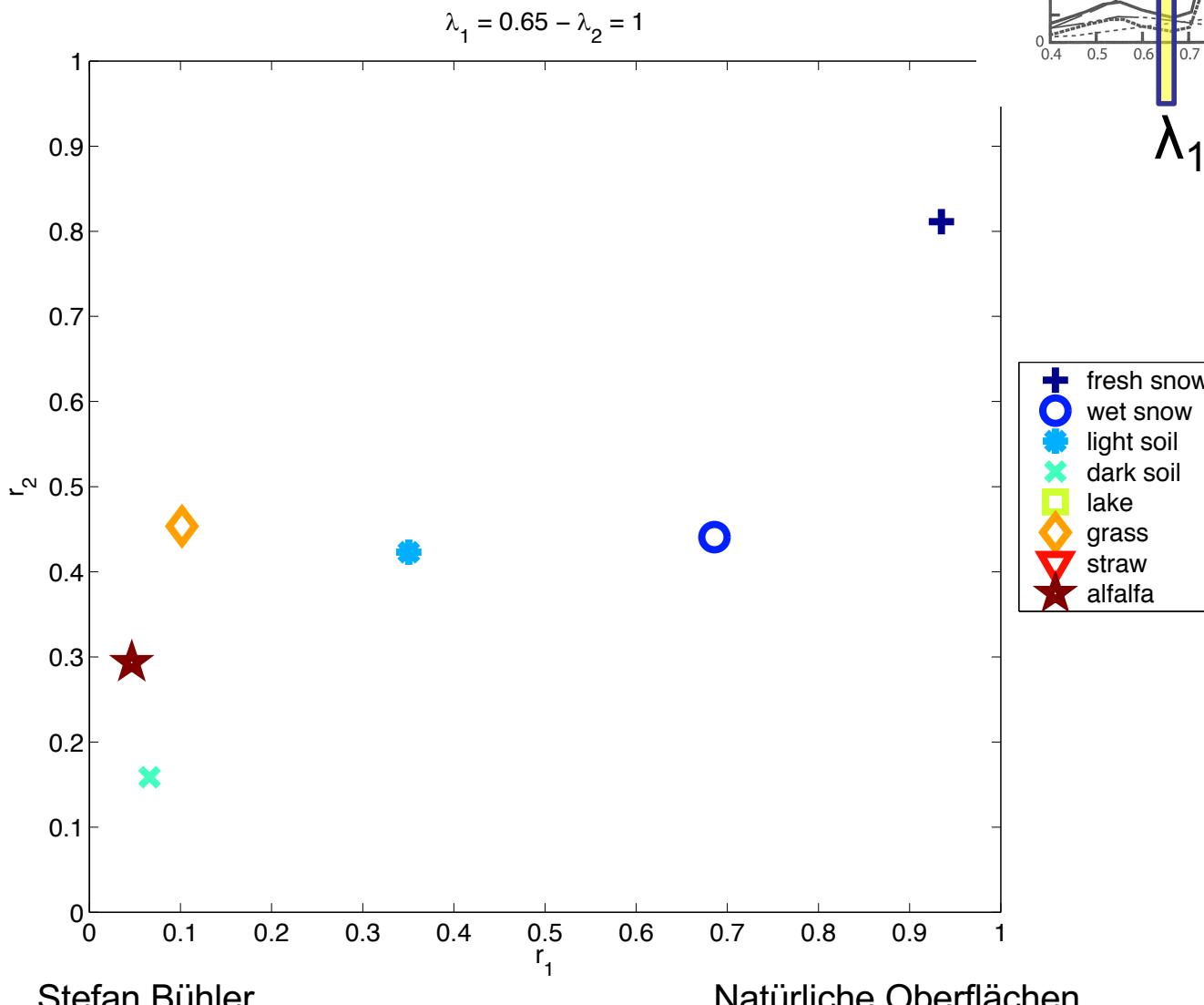


Petty Abb. 5.2



Gefunden in:
Cora Randall,
Introduction to Radiative
Transfer and Remote
Sensing,
<http://lasp.colorado.edu/~randall/5235>

Anwendung: Klassifizierung

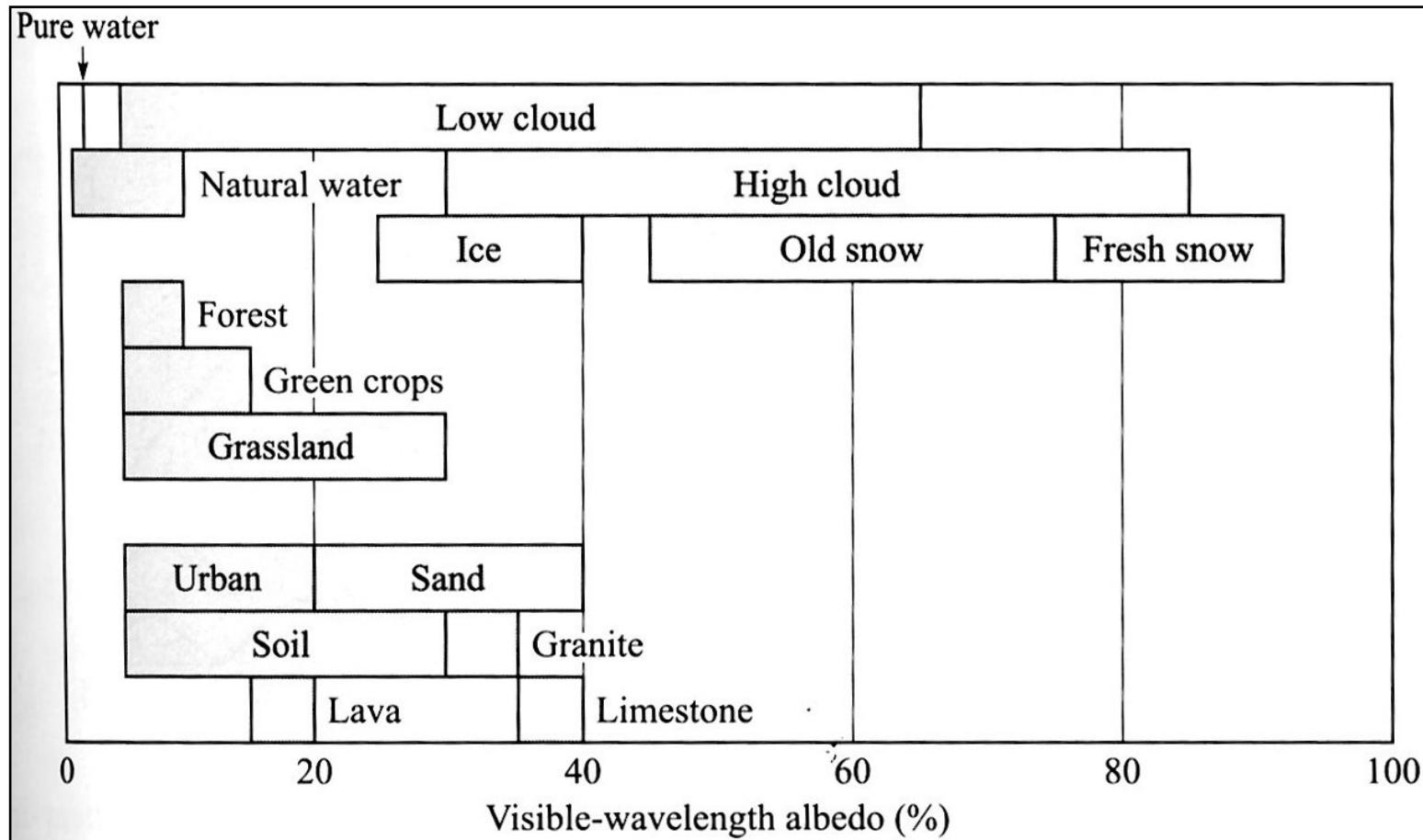


Wenn mehrere Frequenzen zur Verfügung stehen, kann man das zur Klassifizierung nutzen.

Näherung grauer Körper

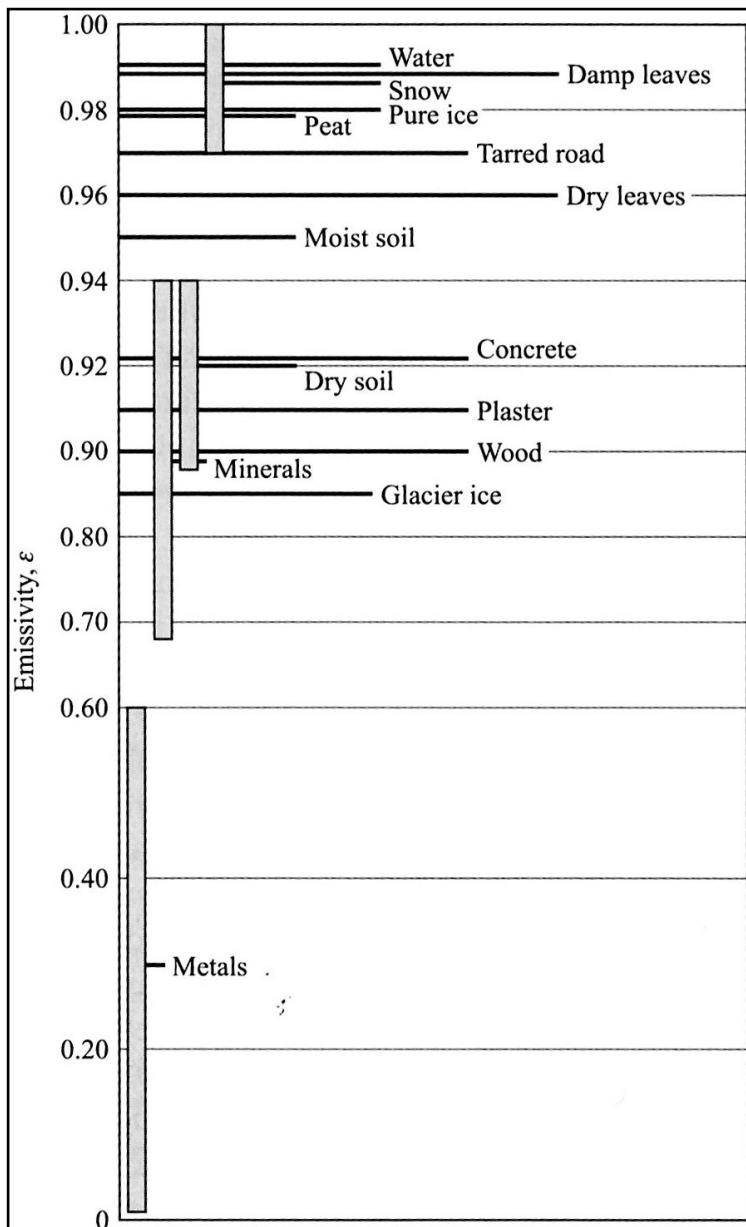
- ▶ Was ist ein schwarzer Körper?
- ①
 - ▶ Reflektivität = 0 bei allen Wellenlängen / Frequenzen
- ①
 - ▶ Was ist ein grauer Körper?
- ①
 - ▶ Reflektivität konstant (aber nicht null)
 - ▶ Typischerweise über ein bestimmtes Wellenlängenintervall, zum Beispiel
 - Kurzwellig, z.B. Wellenlänge kleiner als 4 Mikrometer
 - Langwellig, z.B. Wellenlänge größer als 4 Mikrometer
- ▶ Reale Oberfläche lässt sich (stark vereinfacht) als grauer Körper beschreiben (mit effektiver Reflektivität)
- ①
 - ▶ Das macht man, **obwohl** die Reflektivität von der Wellenlänge abhängt
 - ▶ Die Näherung macht Sinn, wenn das Spektrum der einfallenden Strahlung ziemlich konstant ist
 - ▶ Kurzwellige effektive Reflektivität heißt auch kurzwellige **Albedo**

Real Surfaces: Visible Radiation



Rees 3.23: Typical values of albedo integrated over the visible waveband for normally incident radiation. (Mostly after Schanda, 1986.)

Real Surfaces: Thermal Infrared Radiation



Emissivität = Absorptivität
(Kirchhoff's Gesetz, kommt später)

Absorptivität = 1-Reflektivität

Rees 3.25:

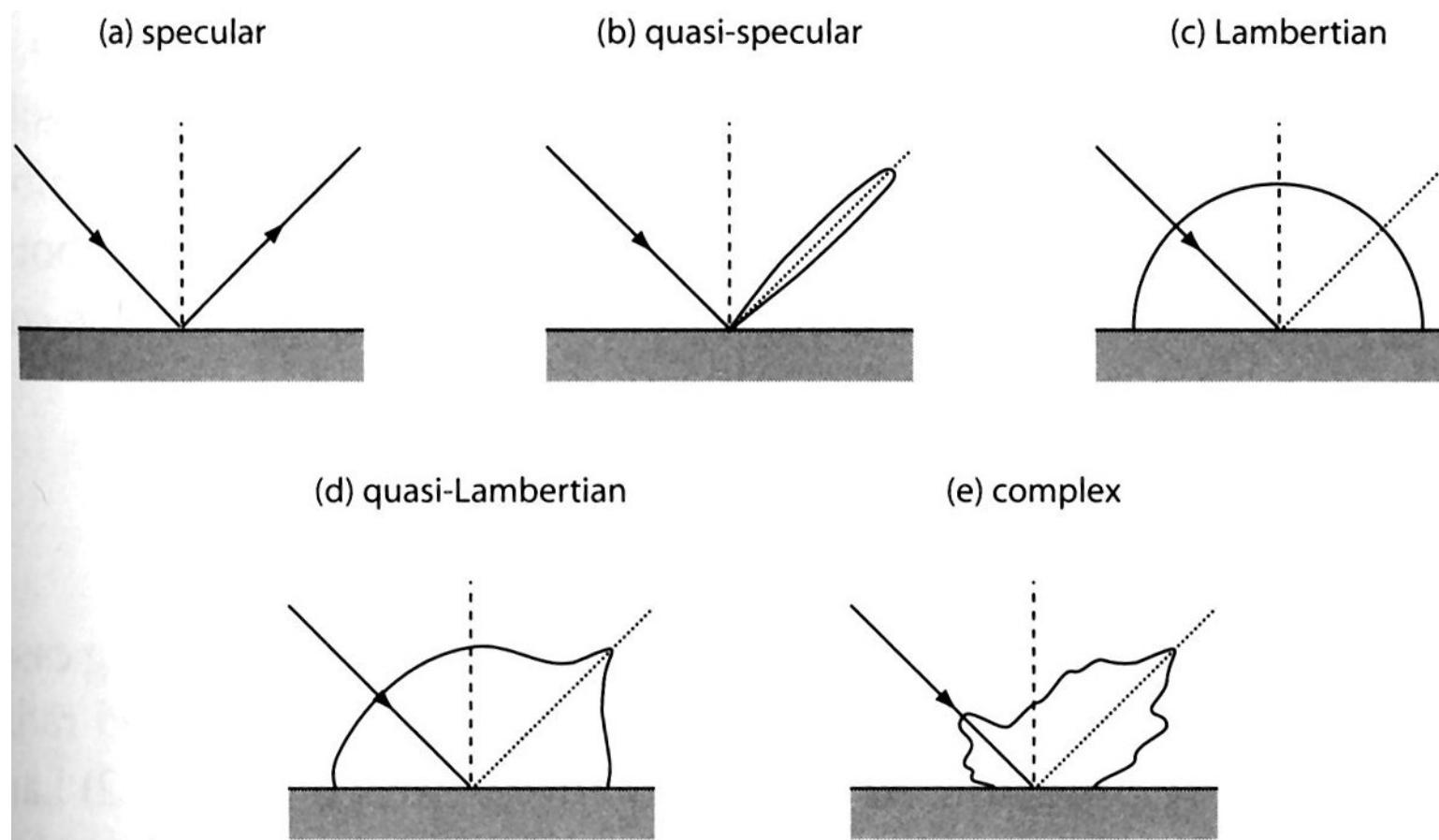
Typical emissivities of various materials at normal incidence in the range 8-12 μm .

Note change of scale at $\epsilon = 0.90$.

Viel geringere Variabilität als im Sichtbaren!

WINKELABHÄNGIGKEIT DER REFLEKTION

Verschiedene Oberflächenmodelle

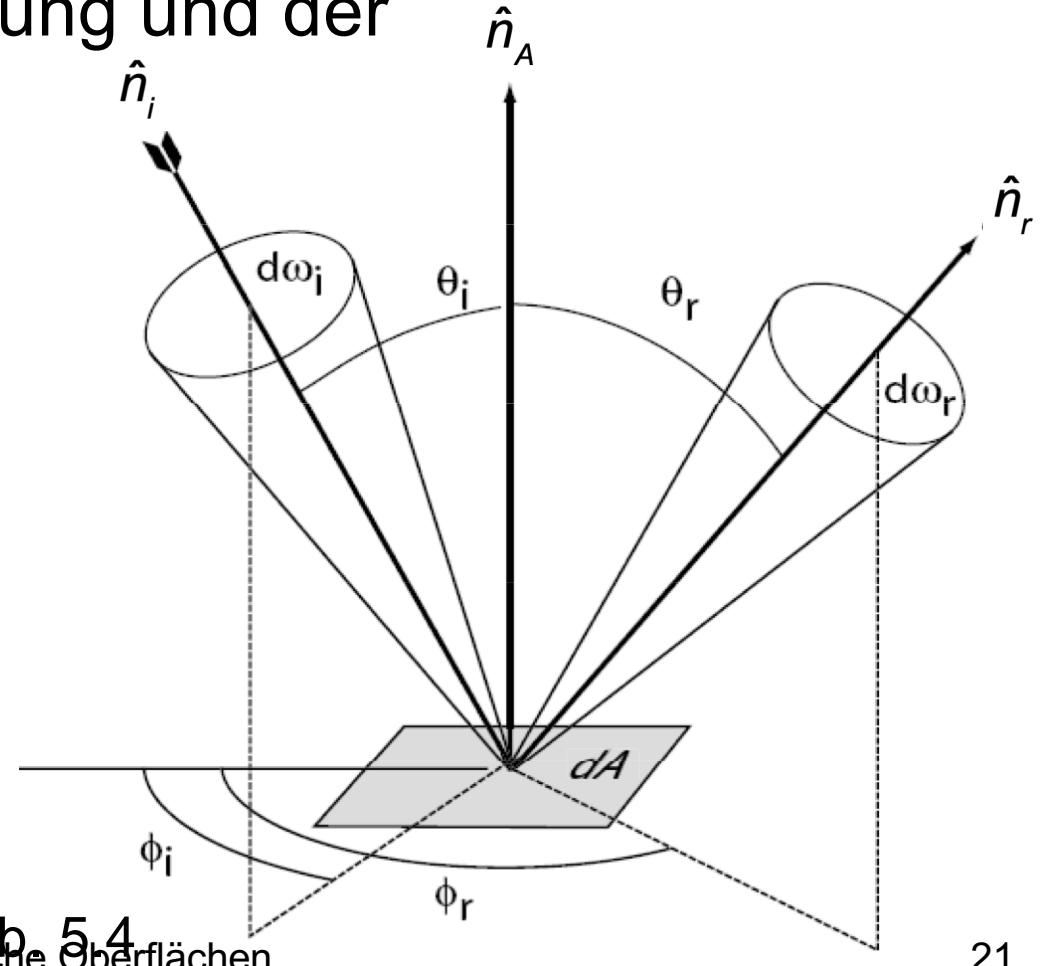


Petty 5.3: Various types of surface reflection. Polar plots, distance from origin represents relative intensity of radiation reflected in that direction.

(Grant W. Petty, A First Course in Atmospheric Radiation, Sundog Publishing, 2004)

Bidirectional Reflection Function (BDRF oder BRDF)

- ▶ Spekulare-Reflektion (Spiegel) und Lambert-Reflektion (isotrop) sind zwei wichtige Grenzfälle.
- ▶ Allgemein hängt die Reflektivität von der Richtung der Einfallenden Strahlung und der Reflektionsrichtung ab.



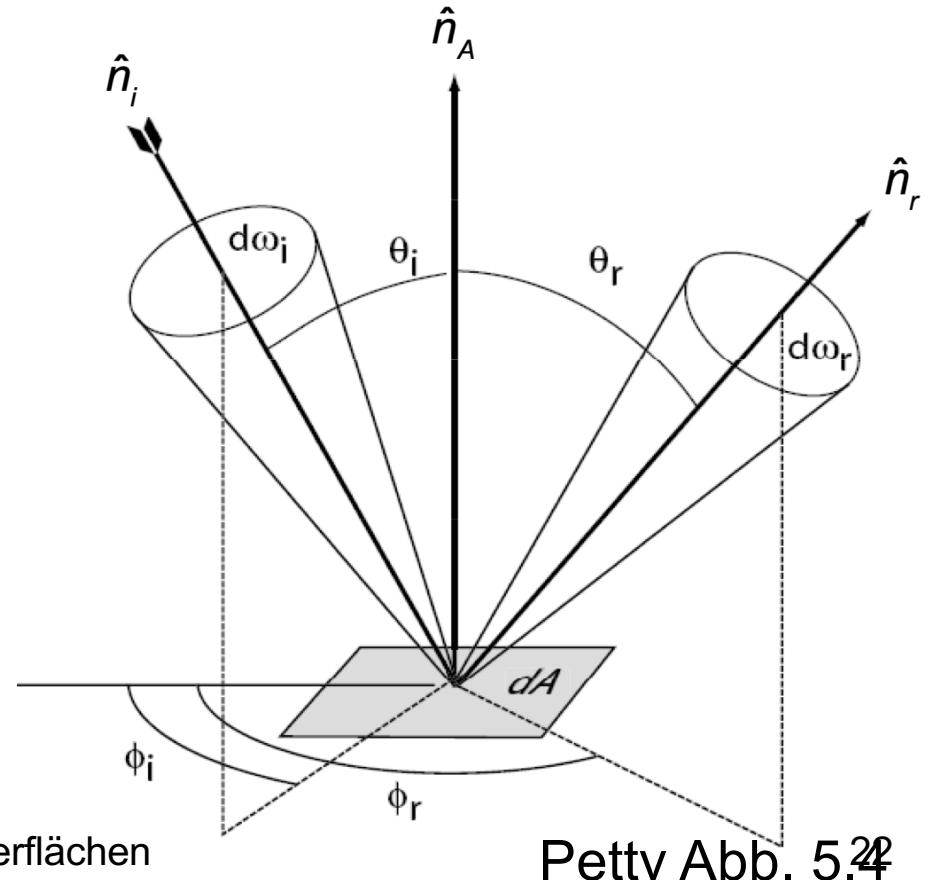
Petty Abb. 5.4
Naturliche Oberflächen

Nomenklatur

- ▶ Eine **Richtung** bezeichne ich mit dem Richtungsvektor \hat{n} . Dach wegen Einheitsvektor. Kann ich durch zwei Winkel angeben. Subskript i, r, A für Incident (einfallend), Reflected und Flächennormale zu dA .
- ▶ Der **Raumwinkel** Ω kann definiert werden als Teilfläche A einer Kugel, dividiert durch das Quadrat des Radius r der Kugel:

$$\Omega = A / r^2$$

- ▶ Bei Betrachtung der Einheitskugel ($r = 1$) ist A also gleich dem zugehörigen Raumwinkel. So ist der volle Raumwinkel gleich der Oberfläche der Einheitskugel, nämlich 4π .



Exkurs: Irradianz, Radianz, spektrale Radianz

- ▶ Irradianz (hier F) = Strahlungsfluss [W/m^2]
(Strahlung durch eine Fläche aus allen Richtungen und bei allen Frequenzen)
- ▶ Radianz (hier L) [$\text{W/m}^2/\text{sr}$]

Polarcoordinaten

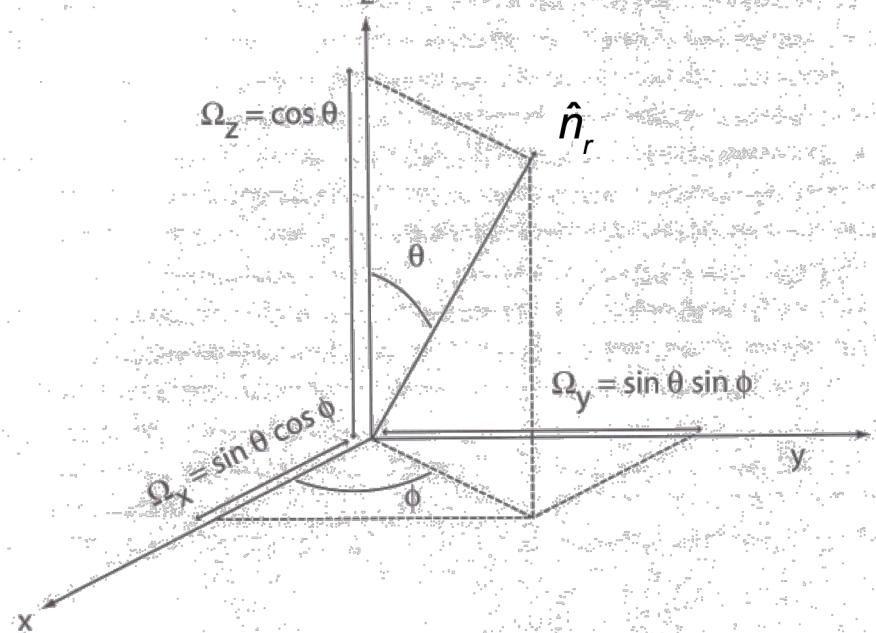


Fig. 2.3: The relationship between Cartesian and spherical coordinates.

Raumwinkel

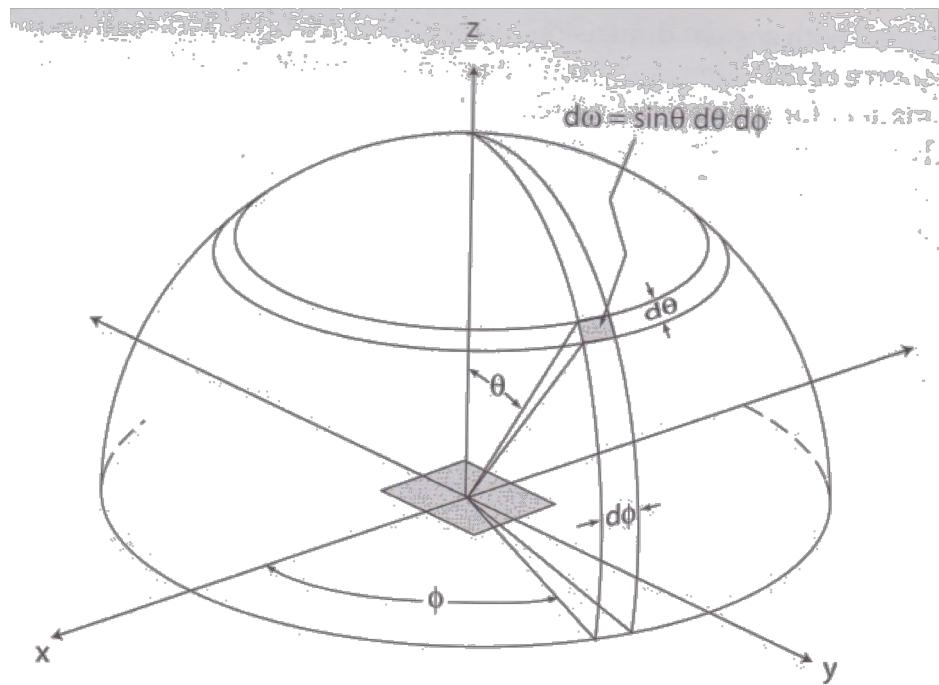


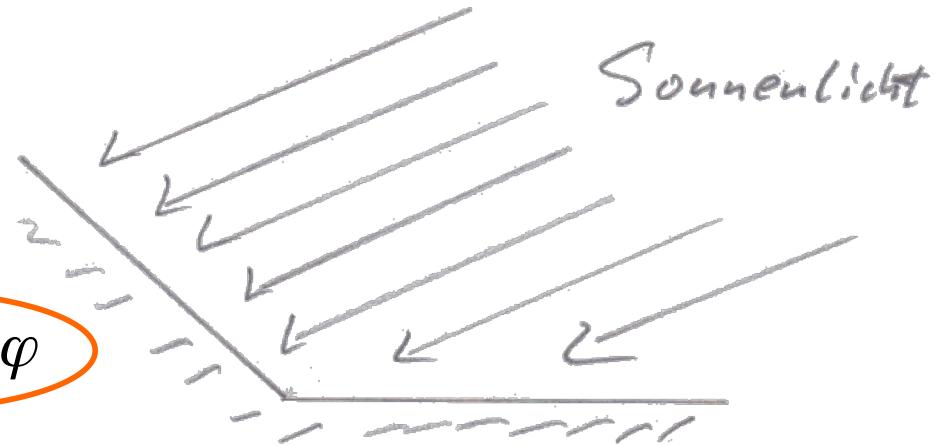
Fig. 2.4: The relationship between solid angle and polar coordinates.

Mathematisch

$$F = \int_{2\pi} L(\Omega) \hat{n}_A \cdot \hat{n}_\Omega d\Omega$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\vartheta, \varphi) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$$

$$(d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi)$$

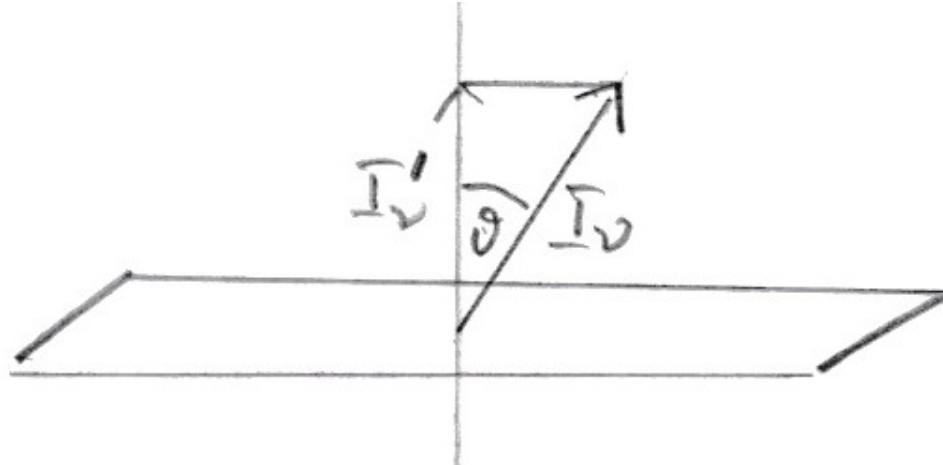


Die schräge Fläche erhält mehr W/m², obwohl die Radianz gleich ist.

Rezept:

- ▶ Beitrag der Strahlung aus einer bestimmten Richtung zum Fluss wird mit $\cos \theta$ gewichtet
(Beispiel: Flach stehende Sonne wärmt nicht, oder vergleiche Nordhang-Südhang)
- ▶ Der $\sin \theta$ Term kommt aus der Definition des Raumwinkelelements
- ▶ Integriere über eine Hemisphäre

Bedeutung des $\cos \vartheta$ Terms



Projektion der Intensität I_v
auf die Flächennormale:

$$I'_v = I_v \cdot \cos \vartheta$$

\Rightarrow Intensität bei großen Winkeln ϑ
trägt wenig zum Energiedurchfluss bei.

Beispiel isotrope Strahlung

- Für L konstant (unabhängig von der Richtung) gilt:

$$F = \pi L$$

(Lässt sich einfach durch Berechnung des Integrals zeigen.)

Anmerkung: Die Projektion von L auf die Fläche, durch die der Fluss geht, ist wichtig (der $\cos \theta$ Term)! Sonst wäre die Lösung ja L mal die Oberfläche einer Halbkugel, also $2\pi L$.

Die Strahlungsgröße ohne die $\cos \theta$ Wichtung gibt es auch: **Actinic Flux**. Wofür könnte der interessant sein?



Photochemie, es ist die Energie, die für Photodissoziation zur Verfügung steht

Spektrale Radianz (Intensität)

- ▶ Spektrale Radianz (hier I) = Intensität
 I_λ [W/m²/sr/m]
 I_ν [W/m²/sr/Hz]
- ▶ Muss auch noch über Wellenlänge (oder Frequenz) integriert werden, um Flüsse zu berechnen
- ▶ Achtung I_λ und I_ν sind verschieden!
- ▶ Analog kann man auch eine spektrale Irradianz definieren

Generell: Namen im Bereich Strahlung sind sehr uneinheitlich.

(Vor allem Intensität kann eigentlich alles heißen.)

Verlässlicher: Die Einheiten.

(Petty zum Beispiel nennt Radianz Intensität und nimmt Buchstaben I , Rees benutzt meine Nomenklatur.)

Warum?

Diese Definitionen sind sehr wichtig,
 I_λ und I_ν sind zentrale Größen in der Theorie
des Strahlungstransfers.

Ende des Exkurses, zurück zu den Oberflächen...

Bidirectional Reflection Function (BDRF oder BRDF)

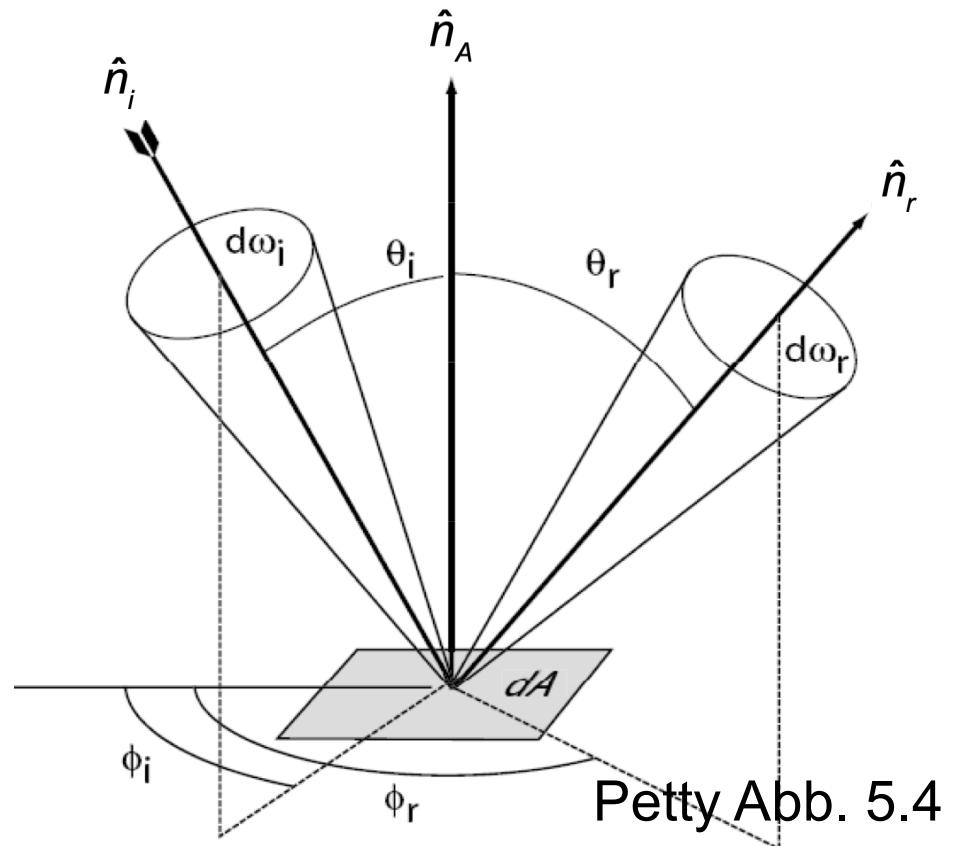
- ▶ Bezieht sich auf die Richtung der Strahlung, gilt also für Radianz (oder spektrale Radianz)
- ▶ Reflektierte Radianz in einer Richtung ist Integral der einfallenden Radianz aus allen Richtungen:

$$L_r(\hat{n}_r) = \int_{2\pi} \rho(\hat{n}_i, \hat{n}_r) L_i(\hat{n}_i) \hat{n}_A \cdot \hat{n}_i d\Omega_i$$

BDRF

$$L_r(\vartheta_r, \varphi_r) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho(\vartheta_i, \varphi_i, \vartheta_r, \varphi_r) L_i(\vartheta_i, \varphi_i) \cos \vartheta_i \sin \vartheta_i d\vartheta_i d\varphi_i$$

$(d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi)$



Einheit der BDRF?

- Die Einheit von $\rho(\hat{n}_i, \hat{n}_r)$ ist 1/sr.

Lambertsche Oberfläche

- ▶ Was war das nochmal?

$$\rho(\vartheta_i, \varphi_i, \vartheta_r, \varphi_r) = \text{Konst.} = \rho_L$$

- ▶ Konsequenz?

Integral wird:

$$L_r(\vartheta_r, \varphi_r) = L_L = \rho_L \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\vartheta_i, \varphi_i) \cos \vartheta_i \sin \vartheta_i d\vartheta_i d\varphi_i$$

- ▶ Verschiedene Einfallswinkel tragen unterschiedlich stark zur reflektierten Radianz bei.
- ▶ Die reflektierte Radianz ist in allen Richtungen gleich.

Mehr zur BDRF

- ▶ Im völlig allgemeinen Fall nicht skalar, sondern 4×4 Matrix (Müller Matrix), und L ist dann ein 4-Element Vektor (Stokes Vektor).
- ▶ Warum ist die BRDF wichtig?
 - ▶ Wichtig für quantitativen Strahlungstransfer.
 - ▶ Grundidee (ausgehende Strahlung als Integral über alle einfallenden Richtungen) taucht beim Kapitel Streuung wieder auf.

ANWENDUNGSBEISPIELE UND ZUSAMMENFASSUNG

Anwendungsbeispiele

- ▶ Unterschiede in kurzwelliger Albedo führen zu unterschiedlicher Erwärmung (schwarzes Auto wird heißer als weißes). Aber Achtung: Wärmekapazität ist auch wichtig! Land-See Wind entsteht, weil sich Land, trotz höherer Albedo, stärker aufheizt als See.
- ▶ Schneeschmelze durch solare Einstrahlung → Hausaufgabe
- ▶ Fernerkundung im Sichtbaren
 - ▶ Unterschiedliche Reflektivitäten verschiedener Oberflächen für sichtbares Licht (inkl. Wolken als Pseudo-Oberfläche) können zur Klassifizierung ausgenutzt werden (so wie es auch unser Auge macht)

Zusammenfassung 1/2

- ▶ Diesmal ein sehr kurzes Kapitel
- ▶ Ganz grob:
 - ▶ **Sichtbar**: Reflektivität sehr variabel, groß für manche Oberflächen
 - ▶ **Infrarot**: Reflektivität klein für alle natürlichen Oberflächen
 - ▶ **Mikrowelle**: Reflektivität klein für Land, größer für Wasser, dort Windabhängig (Streuung an Kapilarwellen, habe ich nicht in der Vorlesung gezeigt)

Zusammenfassung 2/2

- ▶ Nebenbei wurden sehr wichtige Strahlungsgrößen eingeführt:
 - ▶ Irradianz
 F [W/m²]
 - ▶ Radianz
 L [W/m²/sr]
 - ▶ Intensität = spektrale Radianz
 I_λ [W/m²/sr/m]
 I_ν [W/m²/sr/Hz]

Die sollten Sie im Schlaf können! ☺

Leseempfehlung

- ▶ Petty, Kapitel 5.