

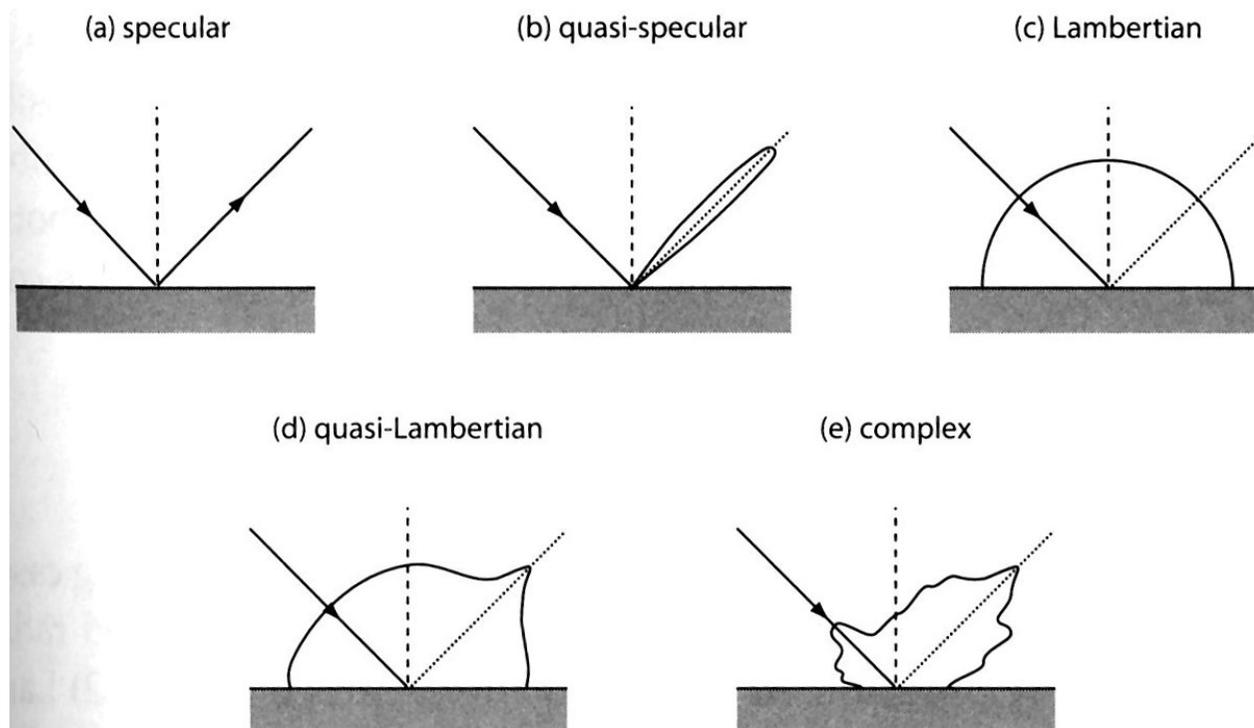
Natürliche Oberflächen

Optik, Strahlung, Fernerkundung
Sommersemester 2018

Stefan Bühler

Meteorologisches Institut

Universität Hamburg



Übersicht – alle Kapitel

Einleitung

1. Orbits und Satelliten
2. Elektromagnetische Wellen
3. Grundgesetze 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

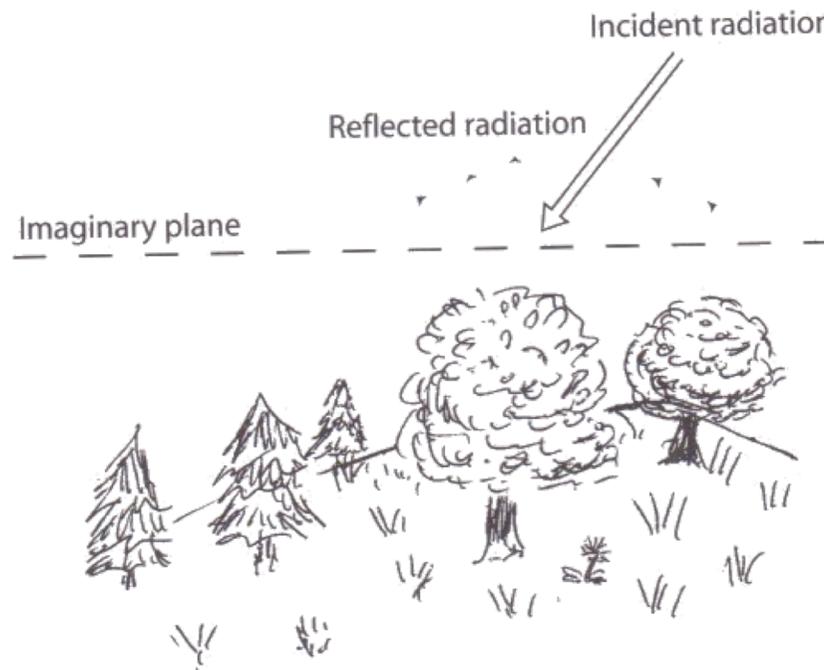


Fig. 5.1: Example of how one treats an irregular surface as an equivalent plane surface.

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

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

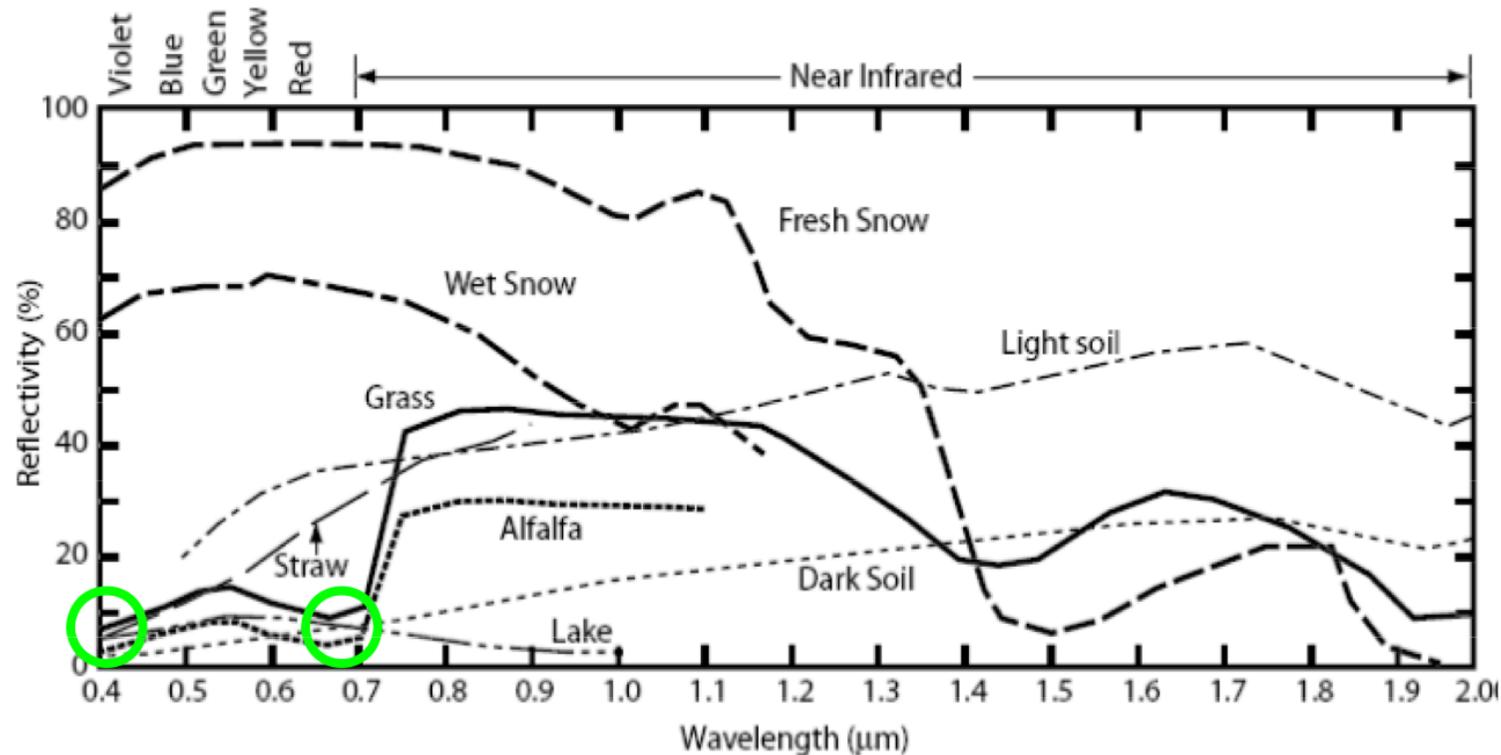
(Das heißt, wir nehmen an, dass es keine Transmission gibt.)

Oft azimuthal 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

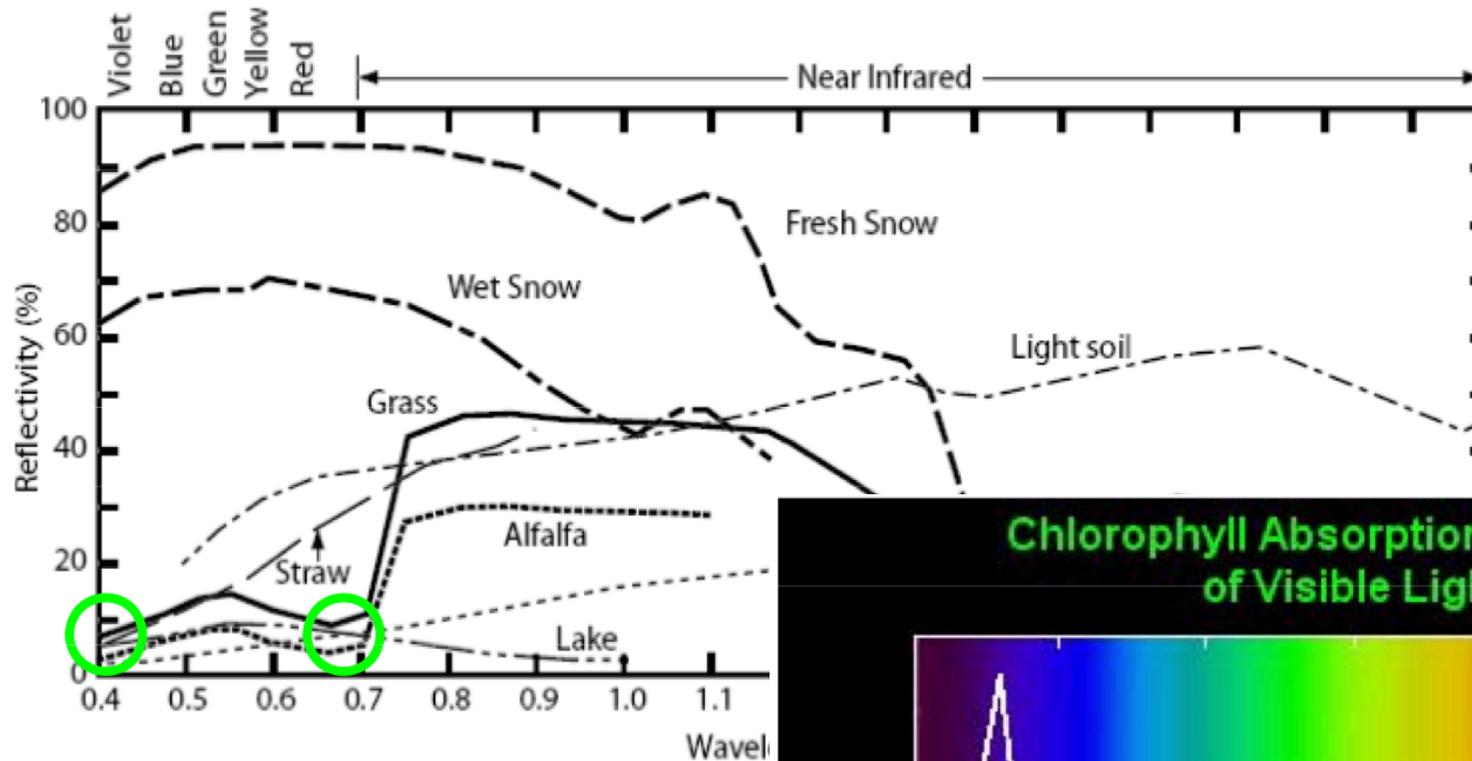
Im Nah-Infrarot sind die Reflektivitäten allgemein niedriger, im Infrarotbereich noch niedriger (dort typisch <5%)

Warum die Minima bei Gras und Alfalfa (Luzerne, eine Art Klee)?



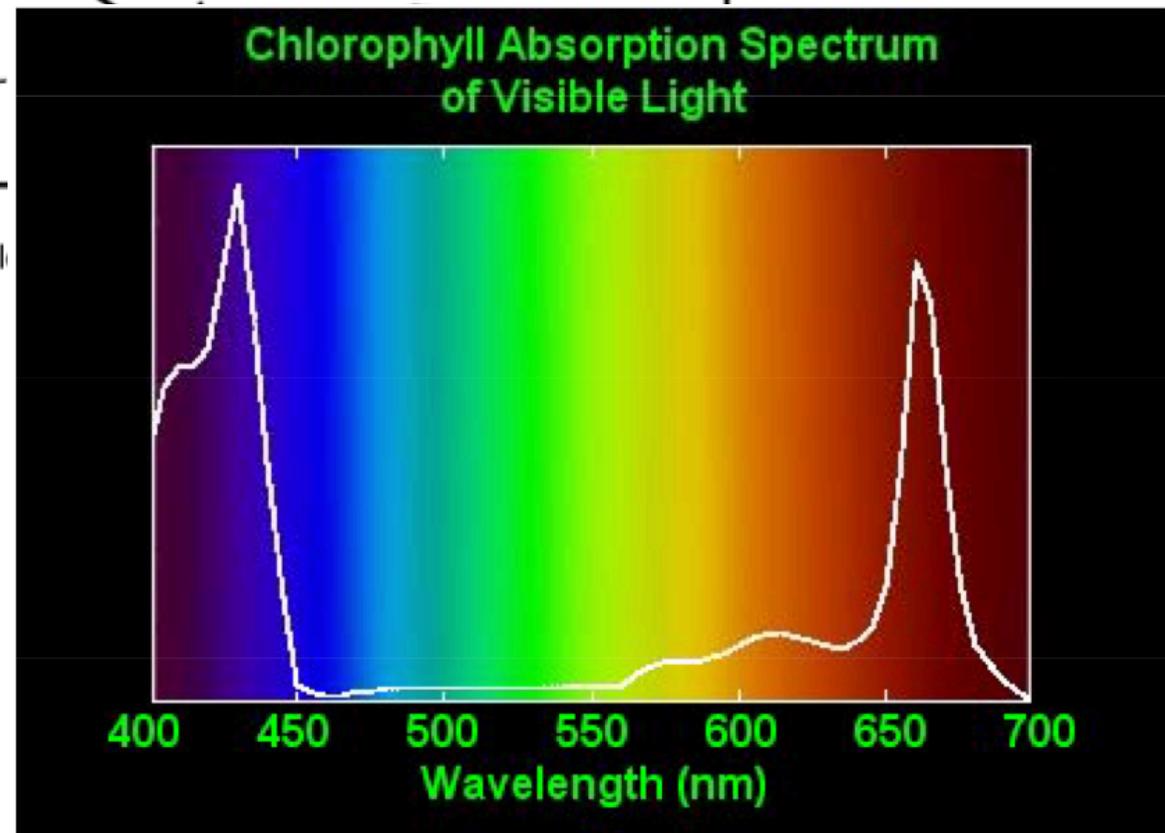
Absorption des Chlorophylls

Beispiele für Reflektivitätsspektren

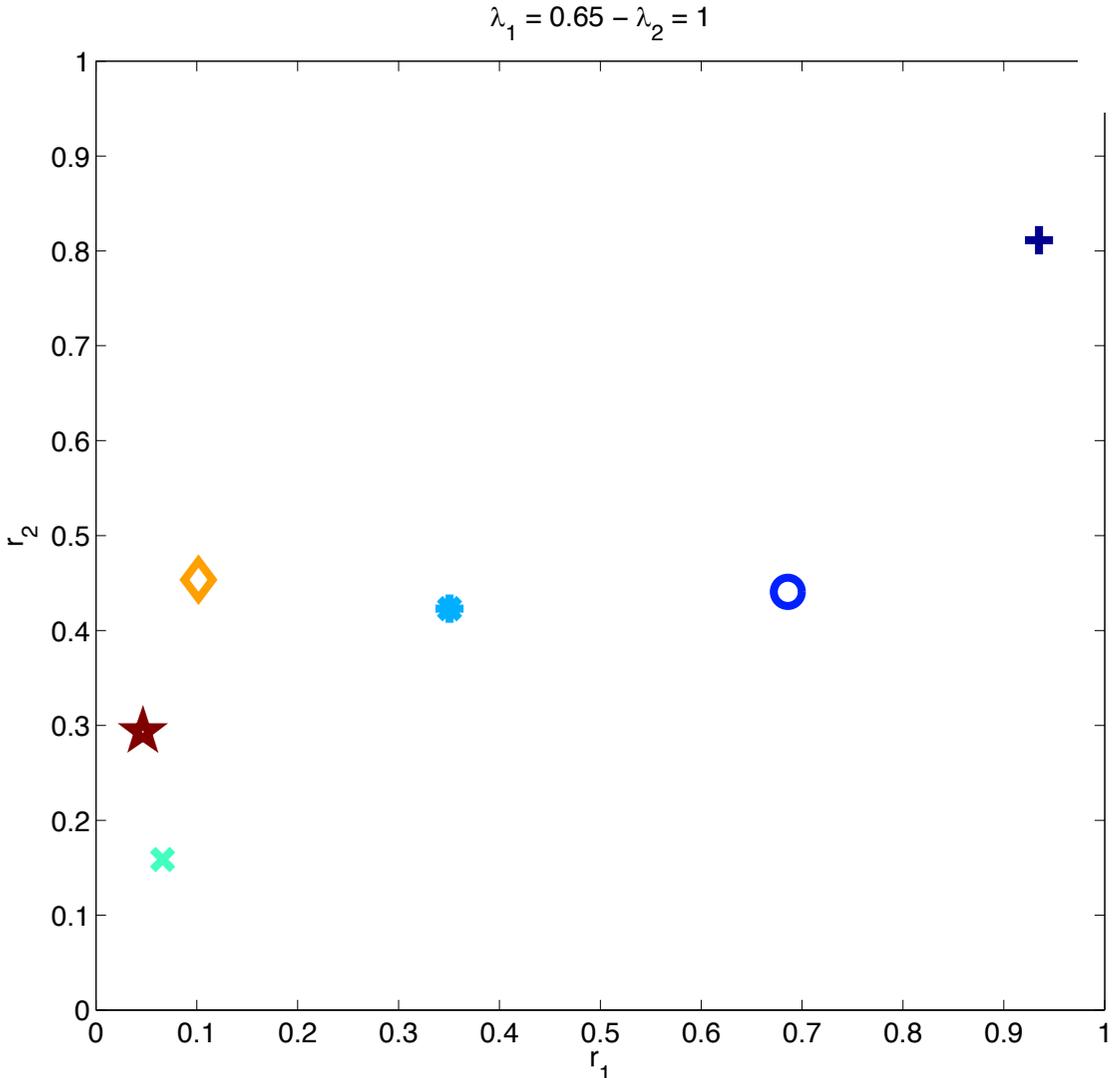
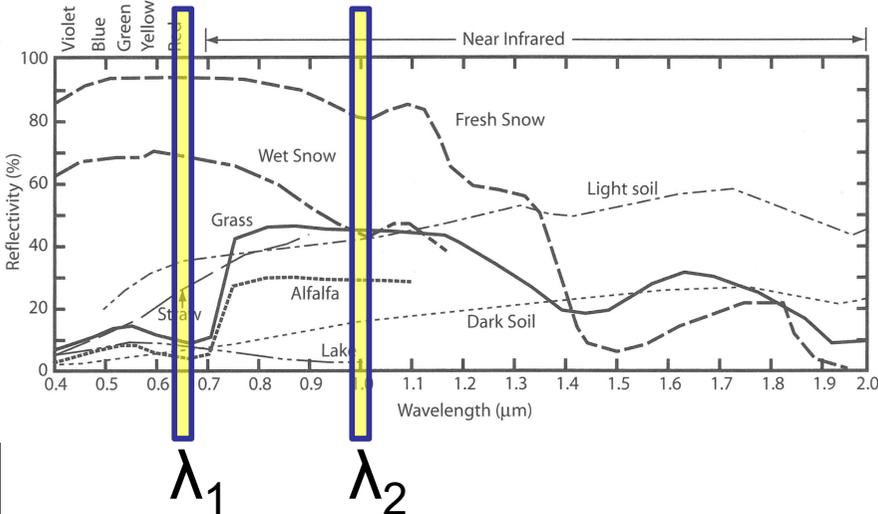


Petty Abb. 5.2

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



Anwendung: Klassifizierung



- +
 -
 - *
 - ×
 -
 - ◇
 - ▽
 - ★
- fresh snow
wet snow
light soil
dark soil
lake
grass
straw
alfalfa

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

Näherung grauer Körper

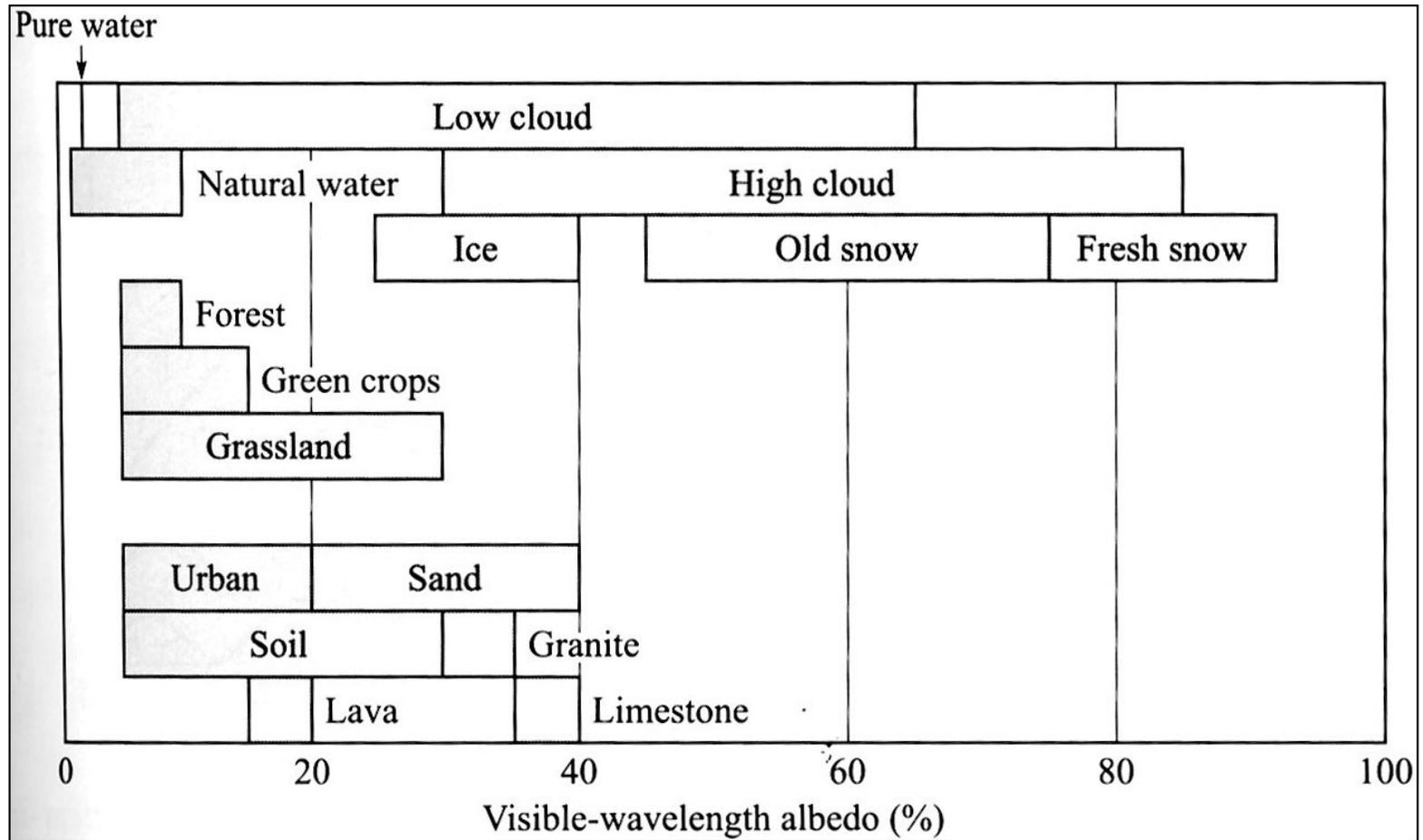
▶ Was ist ein schwarzer Körper?

- ① ▶ Reflektivität = 0 bei allen Wellenlängen / Frequenzen

▶ Was ist ein grauer Körper?

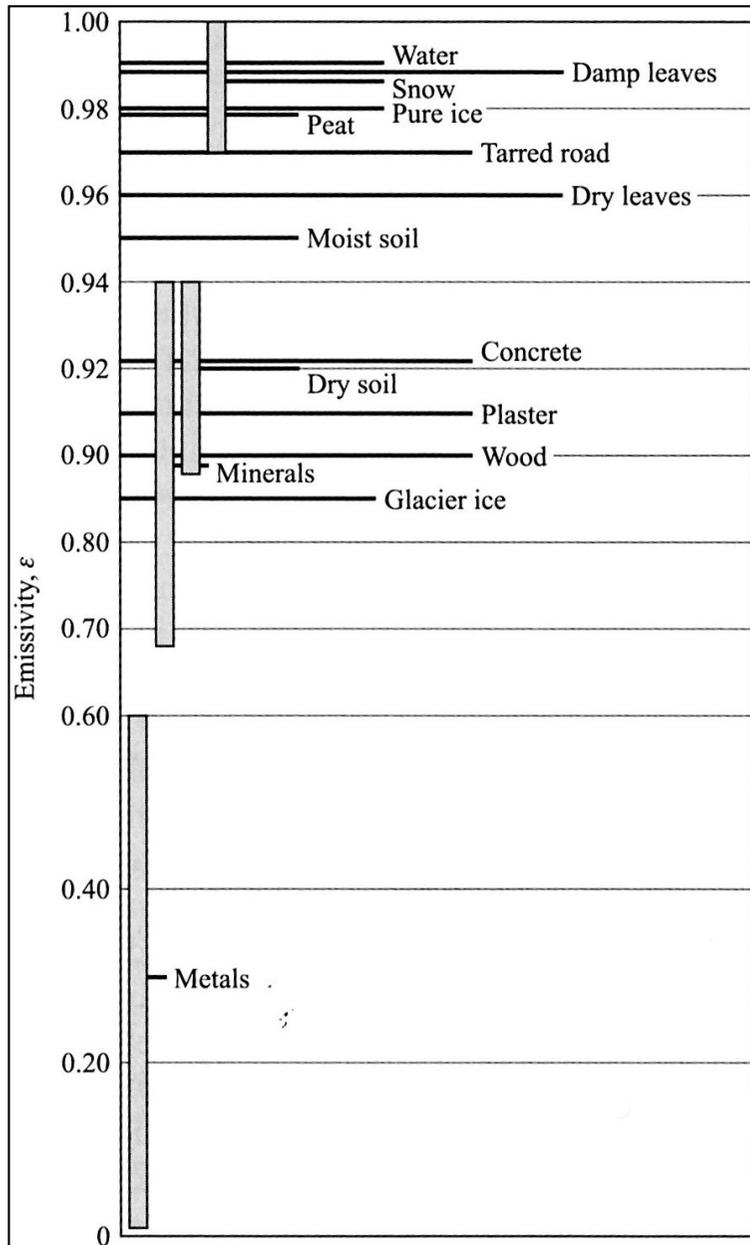
- ① ▶ Reflektivität konstant (aber nicht null)
- ▶ Typischerweise über ein bestimmtes Wellenlängenintervall, zum Beispiel
 - Kurzwellig, z.B. Wellenlänge kleiner als 4 Mikrometer
 - Langwellig, z.B. Wellenlänge größer als 4 Mikrometer
- ▶ Reale Oberfläche lässt sich (stark vereinfacht) als grauer Körper 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:

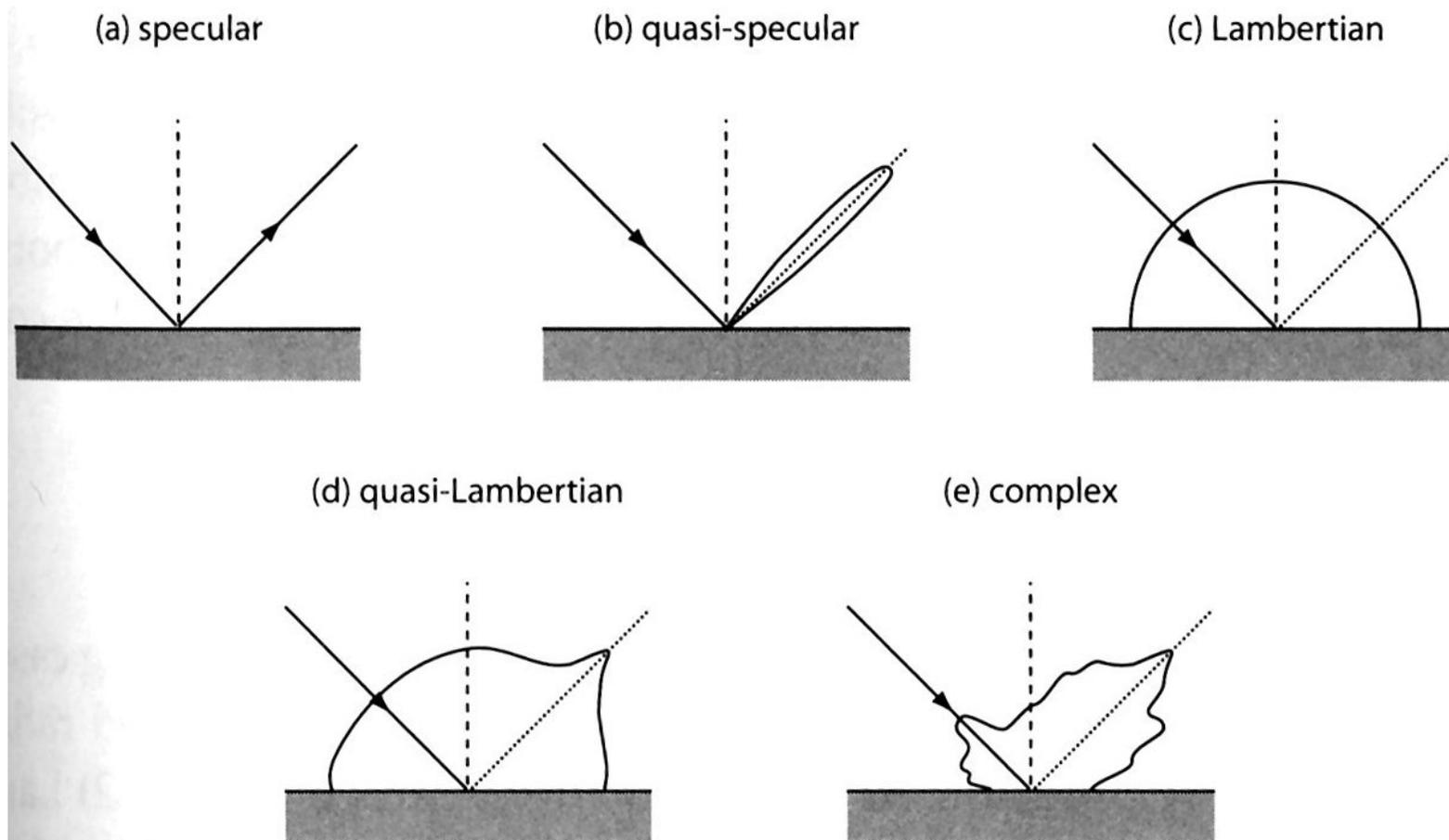
Typical emissivities of various materials at normal incidence in the range 8-12 μm .

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

Viel geringere Variabilität als im Sichtbaren!

WINKELABHÄNGIGKEIT DER REFLEKTION

Verschiedene Oberflächenmodelle



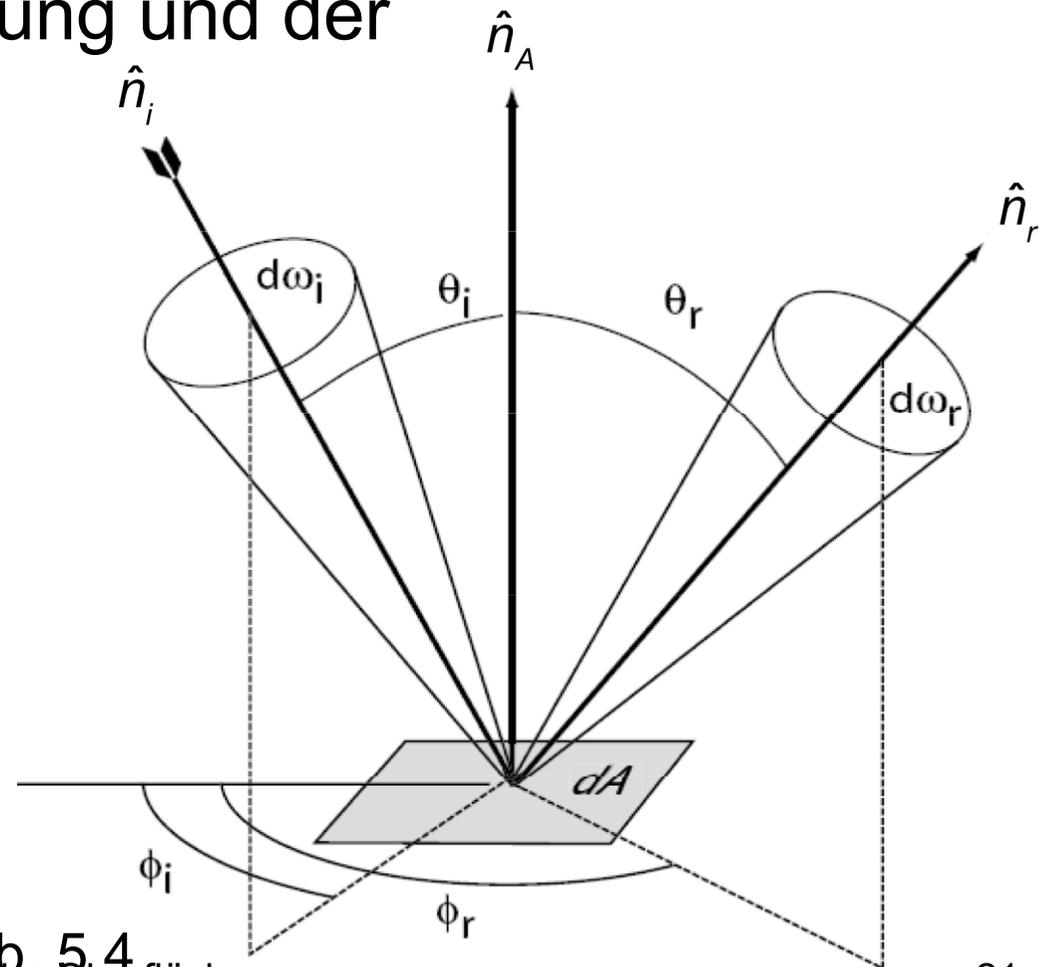
Petty 5.3: Various types of surface reflection. Polar plots, distance from origin represents relative intensity of radiation reflected in that direction.

(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
Natürliche Oberflächen

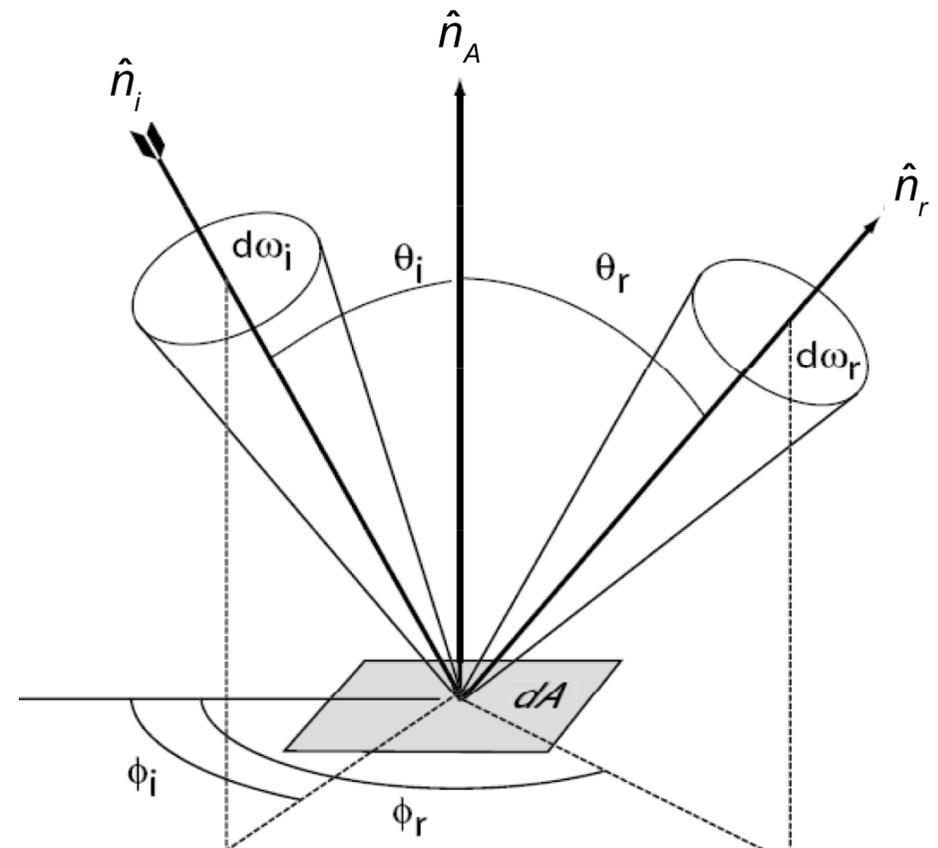
Nomenklatur

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) [$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$]

Polarkoordinaten

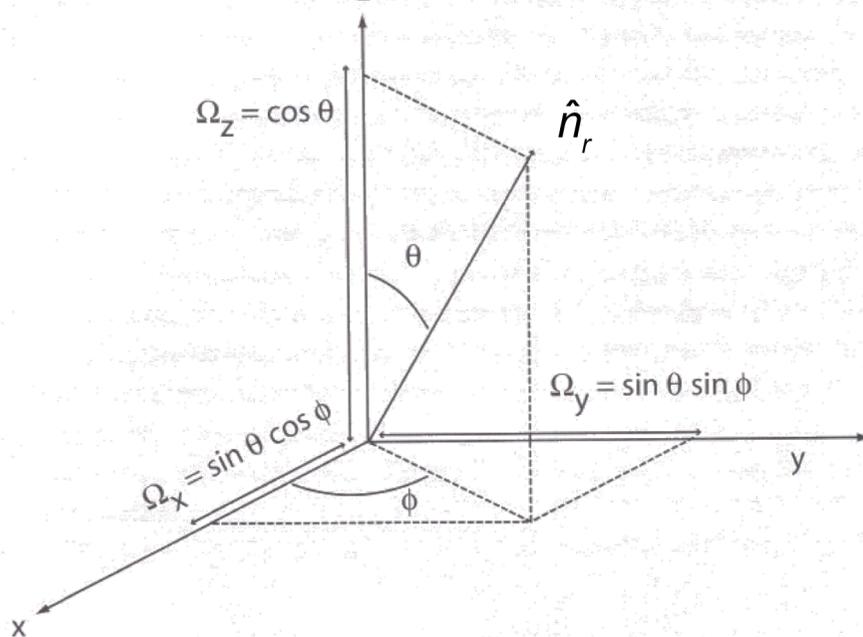


Fig. 2.3: The relationship between Cartesian and spherical coordinates.

Raumwinkel

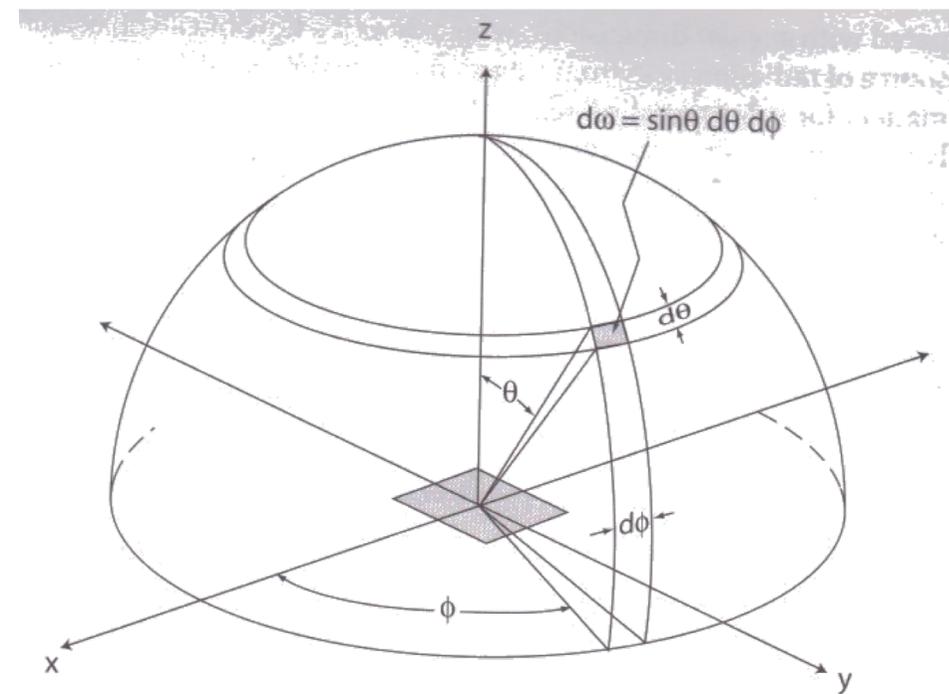


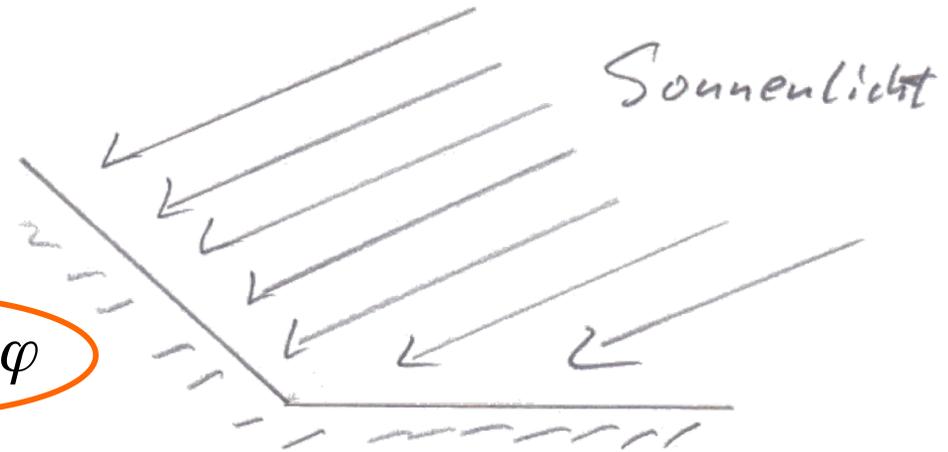
Fig. 2.4: The relationship between solid angle and polar coordinates.

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.

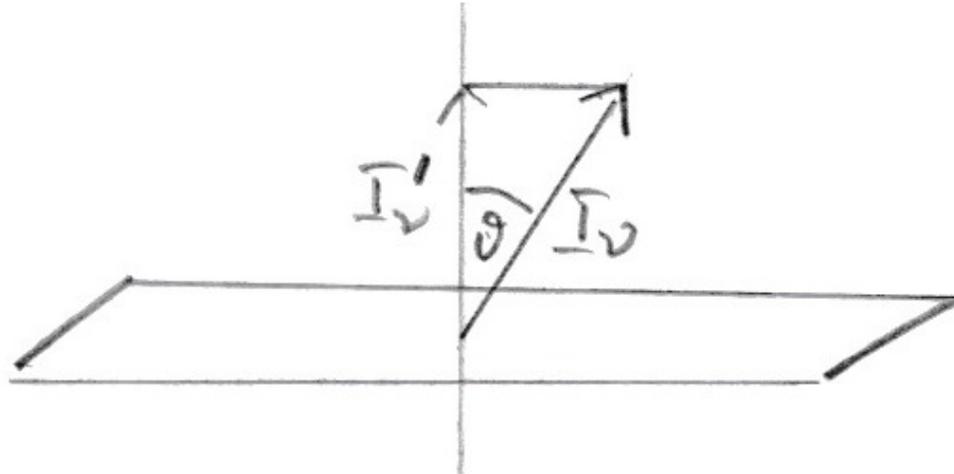
Rezept:

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 Energiefluss 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.)

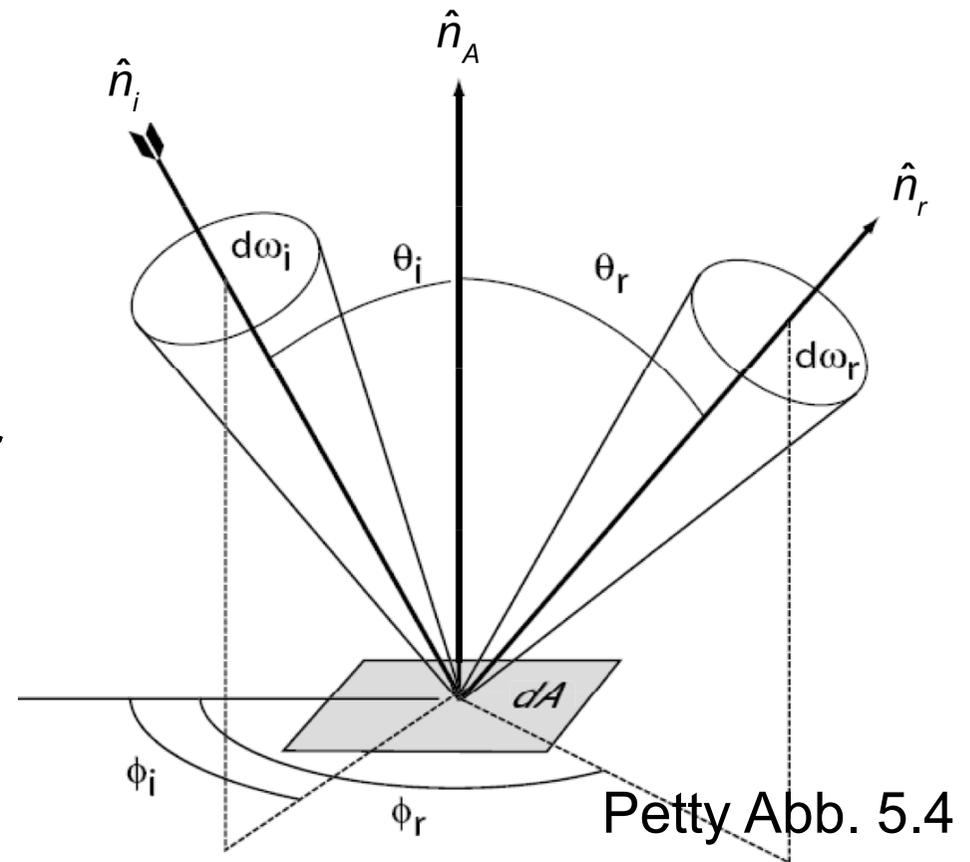
Warum?

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:



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

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

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

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 4x4 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 kurzweiliger 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.

Schneesmelze 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 Kapillarwellen, 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.