



## 2 Physikalische Grundlagen

### Einleitung

In der Fernerkundung werden Informationen über Objekte durch elektromagnetische Strahlung vermittelt. Objekte werden erst "sichtbar", indem sie Strahlung reflektieren oder selbst aussenden. Im Folgenden werden die elektromagnetische Strahlung und die Strahlungsgesetze erläutert. Absorption, Streuung und Reflexion werden besprochen, die in der Fernerkundung eine große Rolle spielen, da sie je nach materialspezifischen Eigenschaften der bestrahlten Körper unterschiedliche Größen haben. Danach werden sehr häufig Objekte erkannt, also auf indirektem Wege.

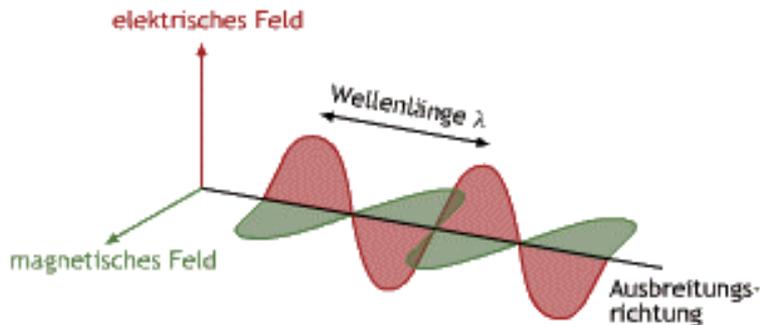
### Inhalt

#### 2. Physikalische Eigenschaften

2.1 Elektromagnetische Strahlung.....	2
2.2 Atmosphärische Einflüsse .....	8
2.2.1 Absorption .....	8
2.2.2 Streuung .....	9
2.3 Reflexion .....	10
2.4 Was bedeutet das für die Fernerkundung?.....	11
2.5 Literatur .....	11

## 2.1 Elektromagnetische Strahlung

Unter elektromagnetischer Strahlung oder elektromagnetischen Wellen versteht man die sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  ausbreitenden Schwingungen elektrischer und magnetischer Felder. Die Vektoren der elektrischen und magnetischen Felder stehen jeweils senkrecht zueinander.



Gekennzeichnet wird die elektromagnetische Strahlung durch die Frequenz  $\nu$  oder die Wellenlänge  $\lambda$ . Im Vakuum gilt der Zusammenhang:  $\lambda = c/\nu$ . Je höher die Frequenz, also je kürzer die Wellenlänge, desto mehr Energie kann transportiert werden.

In der Fernerkundung ist es üblich die elektromagnetische Strahlung durch die Wellenlänge zu charakterisieren. Folgende Einheiten sind üblich:

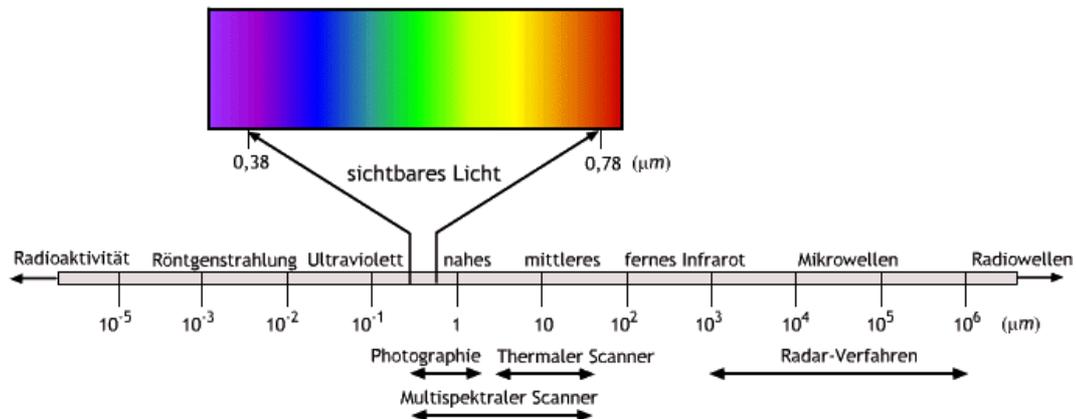
1 nm (Nanometer) =  $1 \cdot 10^{-9}$  m

1  $\mu$ m (Mikrometer) =  $1 \cdot 10^{-6}$  m

1 mm (Millimeter) =  $1 \cdot 10^{-3}$  m

Das elektromagnetische Spektrum enthält sämtliche Wellenlängen, die elektromagnetische Strahlung annehmen können. Das sichtbare Licht stellt nur einen kleinen Teil des Spektrums dar.

In der Fernerkundung können allerdings nur bestimmte Bereiche verwendet werden, nämlich die Bereiche, die von der Atmosphäre nicht absorbiert werden. Die für die Fernerkundung wichtigsten Bereiche sind in folgender Abbildung dargestellt.



Wellenlängenbereiche	Wellenlänge
Ultraviolett / Ultraviolet (UV)	0.01 - 0.38 $\mu\text{m}$
Sichtbares Licht / Visible Light (VIS)	0.38 - 0.78 $\mu\text{m}$
Nahes („photogrammetrisches“) Infrarot / Near Infrared (NIR)	0.78 - 1.0 $\mu\text{m}$
Kurzwelliges Infrarot / Short Wave Infrared (SWIR)	1.0 - 3.5 $\mu\text{m}$
Thermales (=Mittleres) Infrarot / Thermal Infrared (TIR)	3.5 - 50 $\mu\text{m}$
Mikrowellen / Microwaves (MW)	1 mm - 1 m
Mikrowellenbereiche - Bänder	
Ka, K, Ku	<2.4 cm
X	2.4 - 3.8 cm
C	3.8 - 7.5 cm
S	7.5 - 15 cm
L	15 - 30 cm
P	30 - 100 cm

#### In der Anwendung:

Konventionelle Photographie	0.4 - 0.7 $\mu\text{m}$
Infrarot- Photographie	0.6 - 1.0 $\mu\text{m}$
LIDAR (Light Detection and Ranging) - aktiv (Laser) - Laserscanning	0.4 - 1.5 $\mu\text{m}$
Mikrowellen-Radiometer - aktiv (Radar) und passiv	1 mm - 0.8 m

Elektromagnetische Strahlung entsteht durch Emission. Jeder Körper, der eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt  $T = 0$  Kelvin (-273.16 Grad C) besitzt, sendet elektromagnetische Strahlung aus. Die spektrale Signatur und die Intensität sind temperaturabhängig. Je höher die Temperatur, desto größer ist die Intensität der ausgesandten Strahlung.

### Licht und Strahlung:

Strahlung („elektromagnetische“) ist ein allgemeines Konzept und wird in Watt angegeben. Licht = Strahlung zwischen 0.380 und 0.780  $\mu\text{m}$  gemessen in candela (cd), früher „Kerze“.

Größe		Strahlung allgemein		Lichtstrahlung	
Lichtstrom	$\phi$	Watt („Leistung“)	[W]	lumen (683 lm = 1W)	[lm]
Lichtstärke	I	Watt per steradian	[W / sr]	candela lm / sr	[cd]
Beleuchtungs- stärke	E	Watt per $\text{m}^2$	W / $\text{m}^2$	lux lm / $\text{m}^2$	[lx]
Leuchtdichte	L	Watt per steradian $\cdot \text{m}^2$	W / sr $\cdot\text{m}^2$	candela per $\text{m}^2$	cd / $\text{m}^2$

Die Strahlung  $\Phi$ , die auf einen Körper trifft, wird zum Teil **absorbiert**, **reflektiert** und **transmittiert**. Der jeweiligen Grad wird durch die Verhältnisse der reflektierten, absorbierten und transmittierten Strahlung zur auftreffenden Strahlung dargestellt:

Reflexionsgrad:  $\rho = \Phi_r / \Phi_0$

Absorptionsgrad:  $\alpha = \Phi_a / \Phi_0$

Transmissionsgrad:  $\tau = \Phi_t / \Phi_0$

Die Summe der Anteile der Reflexion  $\Phi_r$ , der Absorption  $\Phi_a$  und der Transmission  $\Phi_t$  muss gleich der ankommenden Gesamtstrahlung (Energie)  $\Phi$  sein. Es gilt also:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Die Zusammenhänge zwischen Temperatur, Intensität und Spektralzusammensetzung werden im Wesentlichen durch vier physikalische Gesetze beschrieben:

### 1. Kirchhoff'sches Gesetz

Das Absorptionsvermögen  $\alpha$  eines Körpers ist stets gleich seinem Emissionsvermögen  $\varepsilon$ . Ein Körper, der stark absorbiert ist demnach auch ein guter Strahler. Ebenso gilt, dass ein Körper, der eine einfallende Strahlung einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  nicht absorbiert, sie auch nicht ausstrahlen kann.

Ein Körper, der die maximal mögliche Strahlung in allen Spektralbereichen absorbiert und emittiert nennt man **schwarzer Körper**. Für ihn gilt:

$$\tau = \rho = 0$$

$$\alpha = \varepsilon = 1$$

Nach E. Hecht ist ein **schwarzer Körper** folgendermaßen definiert:

---

Man bezeichnet einen perfekten Absorber, der die gesamte auf ihn treffende Strahlungsenergie - unabhängig von der Wellenlänge - absorbiert, als Schwarzkörper.

Sowohl die Verteilung der Strahlungsintensität auf die verschiedenen Wellenlängen wie auch die Intensität der gesamten ausgesandten Strahlung wird **nur** von der Temperatur der Körperoberfläche bestimmt.

---

### 2. Plancksches Strahlungsgesetz

Dieses Gesetz beschreibt vollständig die Temperaturstrahlung T eines schwarzen Körpers. Es wird der Strahlungsfluss in Abhängigkeit zur Wellenlänge dargestellt.

$$E_{\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\frac{c_2}{e^{\lambda T}} - 1}$$

wobei  $c_1$  und  $c_2$  Konstanten mit folgenden Werten sind:

$$c_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$$

### 3. Stefan-Boltzmann Gesetz

Das Gesetz lässt sich aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ableiten.

Die von einem schwarzen Körper mit der Oberfläche von  $1 \text{ m}^2$  abgestrahlte Energie wird nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz

$$E = \sigma \cdot T^4$$

berechnet, wobei

$$\sigma = \text{Stefan-Boltzmannsche Konstante} = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

T = Oberflächentemperatur des Körpers in Grad Kelvin (K)

Die Gleichung zeigt, dass bei steigender Temperatur die Strahlungsenergie sehr schnell ansteigt.

#### 4. Wiensches Verschiebungsgesetz

Das Strahlungsmaximum verschiebt sich bei steigender Temperatur proportional gegen kürzere Wellenlängen.

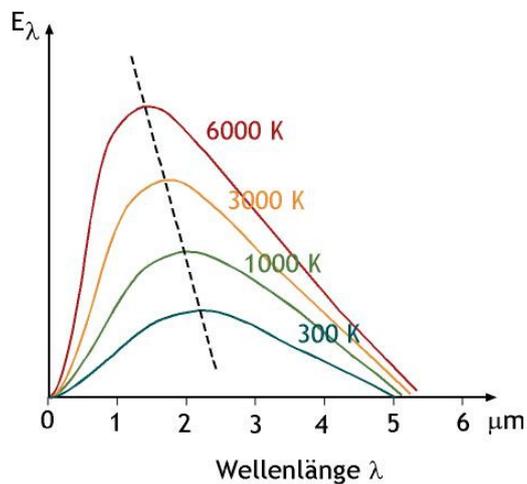
$$\lambda_{\max} = \frac{\alpha}{T}$$

mit

$\lambda_{\max}$  = Wellenlänge des Maximums in der Spektralkurve

T = Oberflächentemperatur des Körpers in K

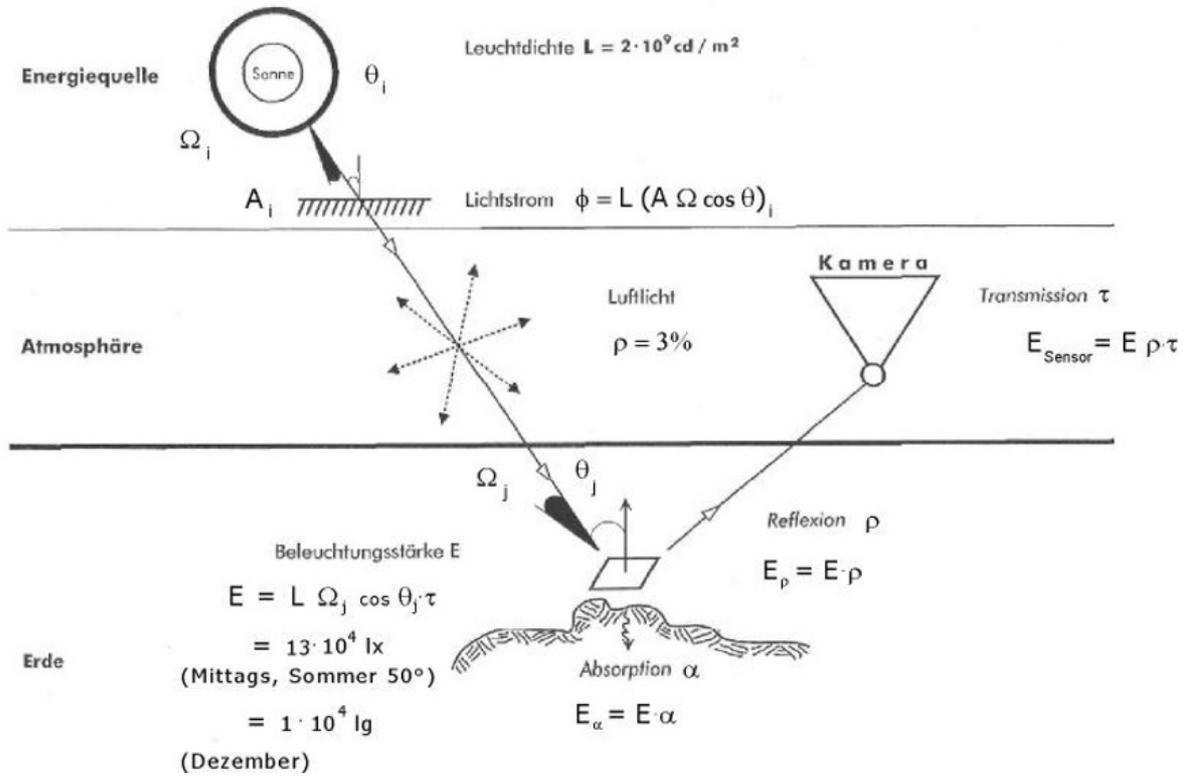
$\alpha$  = eine Konstante. 2900  $\mu\text{m}$ , wenn  $\lambda_{\max}$  in  $\mu\text{m}$  angegeben wird.



Die Kurven zeigen die spektrale Verteilung der Strahlung bei verschiedenen Temperaturen. Das Strahlungsmaximum verschiebt sich bei steigender Temperatur gegen kürzere Wellenlängen (Wiensches Verschiebungsgesetz).

Diese Eigenschaft kann man leicht an einem glühenden Metallstück beobachten. Es fängt dunkelrot an zu glühen, bei zunehmender Temperatur verfärbt es sich orange und gelb.

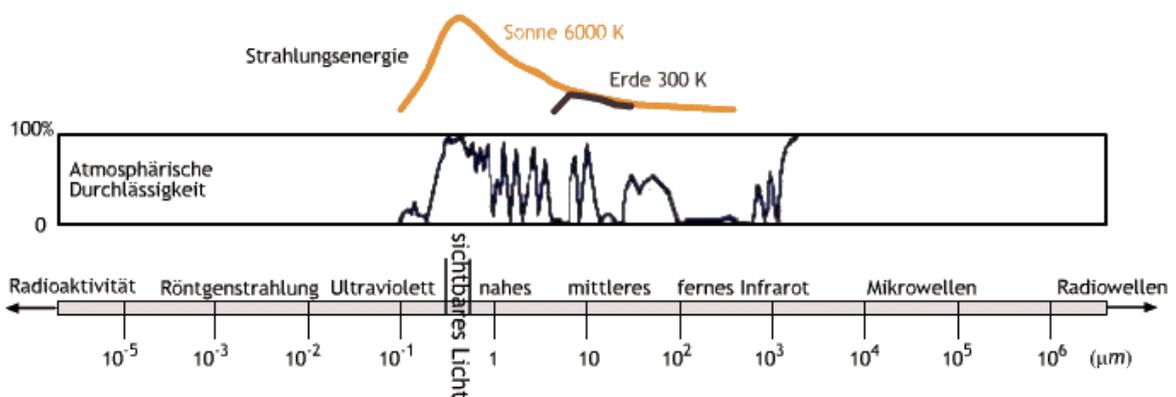
Dieses Gesetz lässt sich ebenfalls aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ableiten.



## 2.2 Atmosphärische Einflüsse

### 2.2.1 Absorption

Beim Weg durch die Atmosphäre wird die Strahlung durch Gase, wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon zum Teil absorbiert, d.h. Sonnenstrahlung wird in Wärme umgewandelt. Der Grad der Absorption ist wellenlängenabhängig. Die Spektralbereiche, die ungehindert die Atmosphäre durchdringen, werden atmosphärische Fenster genannt. Satellitengestützte Sensoren werden so gebaut, dass sie in Spektralbereichen dieser Fenster liegen.



Es ist zu sehen, dass ein sehr großes Fenster im Bereich des sichtbaren Lichts liegt, wo auch die Strahlungsenergie der Sonne ihr Maximum besitzt. Kurzwellige Strahlung wird von der Atmosphäre fast vollständig absorbiert und spielt in der Fernerkundung keine Rolle.

Im infraroten Bereich gibt es ebenfalls atmosphärische Fenster. In diesem Bereich liegt die elektromagnetische Strahlung (Emission) der Erde, allerdings in viel geringerer Intensität als bei der Sonne.

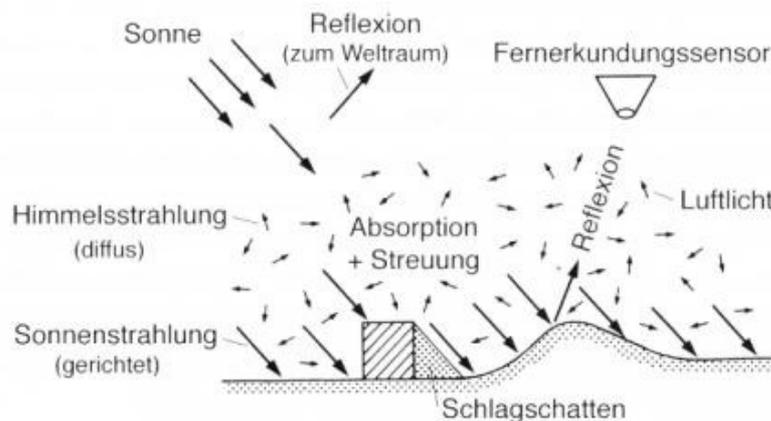
Im Mikrowellenbereich ist die Atmosphäre fast vollständig durchlässig. Außerdem können Mikrowellen Wolken und Schnee durchdringen. Allerdings ist die Strahlungsenergie der Sonne und der Erde in diesem Bereich sehr schwach, weshalb passive Radarsysteme nur sehr bedingt in Frage kommen. In der Fernerkundung werden hauptsächlich aktive Radarsysteme verwendet, wobei vom Radarsystem Strahlung ausgesandt und die reflektierte Strahlung gemessen wird.

## 2.2.2 Streuung

Streuung hat einen starken Einfluss auf die Strahlung in der Atmosphäre. Die Streuung der Sonnenstrahlung wird von Luftmolekülen und von Partikeln, die in der Luft schweben verursacht. Wenn sie von der Strahlung getroffen werden wirken sie wie schwingende Dipole und senden daher elektromagnetische Strahlung aus, wobei die gleiche Strahlung ausgesandt wird, um die die Sonnenstrahlung geschwächt wird.

Es kommen also zwei Arten von Strahlung am Boden an: die direkte Sonnenstrahlung und die indirekte Himmelsstrahlung, die durch die Streuung entstanden ist. Die Summe beider Strahlungsarten wird Globalstrahlung genannt.

Ebenso wie auf dem Weg zur Erde, wird die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung gestreut. Die Strahlungsverhältnisse bei der Aufnahme aus dem Weltraum sind in folgender Abbildung veranschaulicht:



Streuungsverhältnisse bei der Aufnahme [Albertz, 2001]

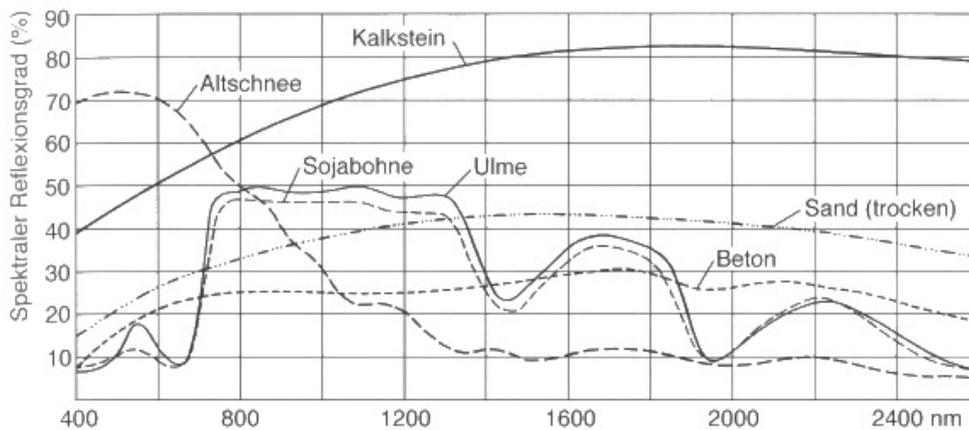
Streuung vermindert den Kontrast im Bild. Für sehr kleine atmosphärische Partikel, im wesentlichen Luftmoleküle gilt, dass kurzwellige Strahlung stärker gestreut wird als langwellige. Blaues Licht wird ungefähr achtmal so stark gestreut wie rotes. Deswegen erscheint der Himmel blau. Da gleichzeitig das blaue Licht auch stärker geschwächt wird als rotes, erscheint am Abend, wenn die Strahlung einen langen Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss, die Sonne oft rot. Diese Streuungsart wird **Rayleigh-Streuung** genannt. Die Strahlung interagiert mit atmosphärischen Molekülen, die einen kleineren Durchmesser haben als die Wellenlänge der Strahlung.

Eine andere Art von Streuung ist die **Mie-Streuung**, die auftritt, wenn atmosphärische Partikel ungefähr denselben Durchmesser haben wie die Wellenlänge. Die Größe der Partikel liegt zwischen 0.1 und 10  $\mu\text{m}$  (Staubpartikel und Wasserdampf...).

**Nichtselektive Streuung** ist wellenlängenunabhängig und wird von Partikeln (z. B. große Wassertropfen, Eisfragmente) mit größerem Durchmesser als die Wellenlänge hervorgerufen. Licht aller Wellenlängen wird in diesen Fällen gleich stark gestreut. Dabei bleibt weißes Licht weiß; sonnenbeleuchtete Wolken erscheinen deshalb weiß [Lillesand, Kiefer 1994].

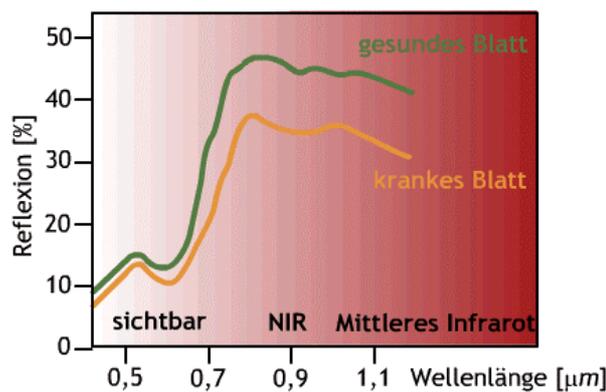
### 2.3 Reflexion

Materialien reagieren unterschiedlich auf die Einstrahlung der Sonne. Sie reflektieren, absorbieren, oder lassen die Strahlung hindurch. Die von den Objekten reflektierte Strahlung ist von der Oberflächenrauigkeit, den physikalischen Eigenschaften (z.B. Feuchtigkeit) und den geometrischen Verhältnissen (z.B. Einfallswinkel) abhängig. In der Fernerkundung ist der spektrale Reflexionsgrad von zentraler Bedeutung. Er lässt sich graphisch auftragen, wobei je nach Material eine spezifische Kurve entsteht. Man spricht hier von der **spektralen Signatur**.



Spektrale Signaturen verschiedener Oberflächen [Albertz, 2001]

Durch die Reflexionseigenschaften ist es möglich gesunde Vegetation von kranker Vegetation zu unterscheiden. Während es sein kann, dass man im sichtbaren Bereich keinen Unterschied feststellt, sieht man im nahen Infrarotbereich bei einem kranken Blatt eine deutlich geringe Reflexion.



Reflexion eines kranken und eines gesunden Blattes

Ein hoher Reflexionswert in diesem Bereich deutet auf einen hohen Anteil an intakter, d.h. lebender Biomasse hin.

## 2.4 Was bedeutet das für die Fernerkundung?

Bei der Wahl der Aufnahmesysteme müssen die physikalischen Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung berücksichtigt werden. Folgende Fragen stellen sich:

- Welche Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums werden für die Aufgabenstellung benötigt? Lassen sich phänologisch bedingte Änderungen der Reflexion berücksichtigen?
- Wie stark ist die Intensität der Strahlung in der gewünschten Wellenlänge? Ist mein Aufnahmesystem empfindlich genug für diese Intensität?
- Liegt die Wellenlänge innerhalb eines atmosphärischen Fensters? Kann ich also mit meinem Aufnahmesystem bis zur Erdoberfläche schauen?

## 2.5. Literatur

J. Albertz, 2001: **Einführung in die Fernerkundung**. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

J.B. Campbell, 1996: **Introduction to Remote Sensing**, 2. Auflage, Taylor & Francis, New York.

E. Hecht, 1992: **Optik**, 2. Auflage, Addison-Wesley, Bonn

M. Kappas, 1994: **Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler**. Dümmler Verlag, Bonn.

T.M. Lillesand, R.W. Kiefer, 1994: **Remote Sensing and Image Interpretation**, 3. Auflage, John Wiley & Sons, New York.

H.C. Zorn, 1985: **Photometry for photography**. In: ITC Journal 1985-3, pp. 169-176.