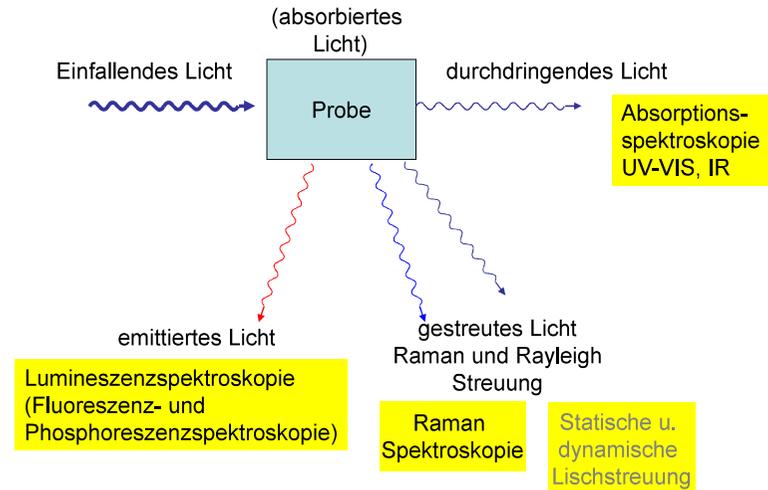


Methoden der Strukturanalyse: Optische Vibrationsspektroskopie

László Smeller

2020

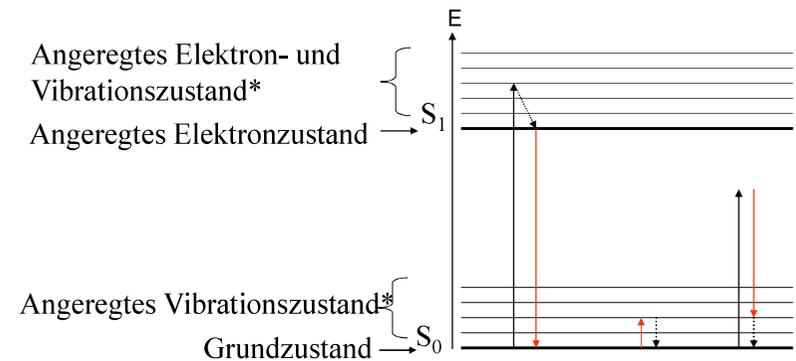


Absorption und Emissionsspektroskopie

- Analyse des durchdringenden bzw. emittierten Lichtes als Funktion der Wellenlänge
- Information:
 - Identifizierung der Atome und Moleküle,
 - Detektierung der Konformationsänderungen der Moleküle
 - Konzentrationsbestimmung

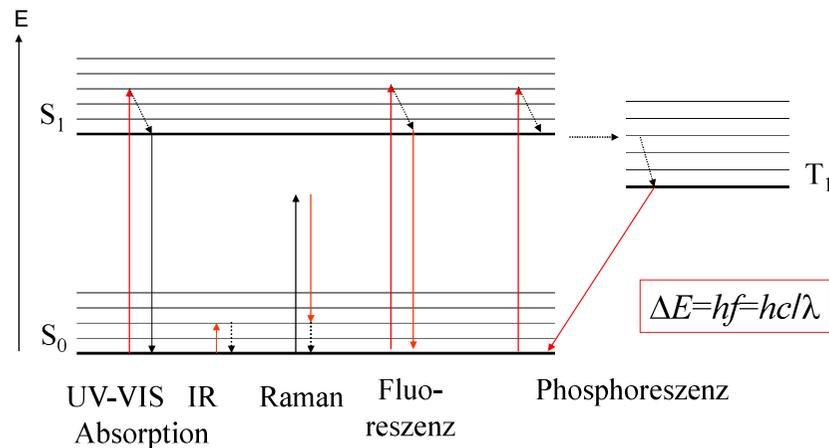
Was passiert in einem Atom oder Molekül, bei der Absorption eines Lichtquants?

Energieübergänge: Jablonski diagram



*nur bei Molekülen!

Was passiert in einem Atom oder Molekül, bei der Absorption eines Lichtquants?



Infrarotspektroskopie

- Infrarotes Licht: $\lambda = 800 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$
Mittleres Infrarot: $2,5 - 50 \mu\text{m}$
- Absorptionsspektroskopie
- Das absorbierte Licht induziert Molekülschwingungen
- Das Spektrum ist besonders empfindlich für die Molekülstruktur
- spezielle Detektierungstechnik: Fourier Transform-Spektrometer

Absorptionsspektroskopie (UV-VIS)

Zur Erinnerung:

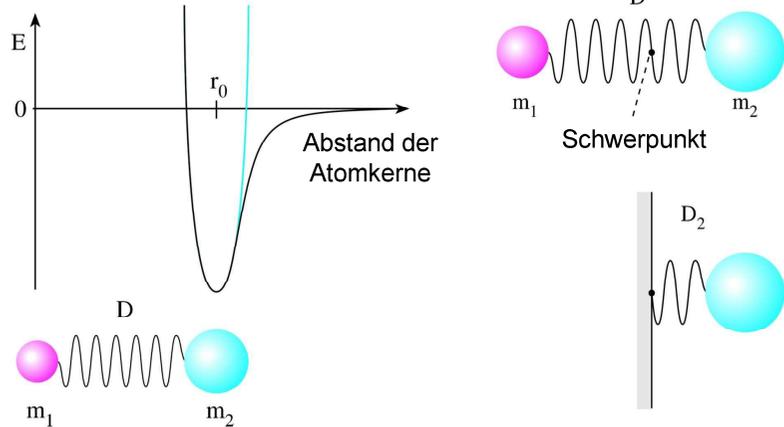
- Absorptionsgesetz: $J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$ wo: $\mu(\text{Stoff}, c, \lambda)$
- Lambert-Beer Gesetz:
$$A = \lg \frac{J_0}{J} = \varepsilon(\lambda) cx$$
- Spektrum: $A(\lambda)$
- Messung mit einem Spektrophotometer (Aufbau: siehe Praktikum)
Referenzlösung (J_0)
- Information: - Identifizierung,
- Konzentrationsbestimmung.

Molekülschwingungen

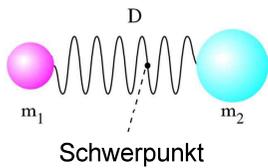
Die Bewegungen von Elektronen und von Atomkerne können getrennt behandelt werden. (Born-Oppenheimer Annäherung.)

In der klassischen Physik wird die Wechselwirkung zwischen der Atomkerne mit einer Feder beschrieben.

Molekülschwingungen: Einfachstes Beispiel: Zweiatomiges Molekül



$\Rightarrow \frac{m_1 + m_2}{m_1} = \frac{D_2}{D}$, eingesetzt in $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2}{m_2}}$



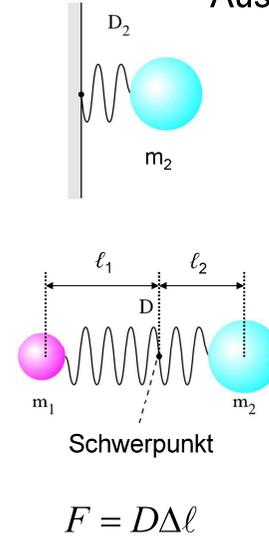
die Schwingungsfrequenz:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}}$$

$m_{\text{red}} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ ist als reduzierte Masse genannt

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_{\text{red}}}}$$

Aus der früheren Physikstudien:



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2}{m_2}}$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{\Delta l_1}{\Delta l_2}$$

$$\begin{aligned} \frac{D_2}{D} &= \frac{F/D}{F/D_2} \\ &= \frac{\Delta l}{\Delta l_2} = \frac{l}{l_2} = \frac{l_1 + l_2}{l_2} = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \end{aligned}$$

$$F = D\Delta l$$

Die Wellenlänge des Lichtes mit dieser Frequenz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 2\pi c \sqrt{\frac{m_{\text{red}}}{D}}$$

Statt Wellenlänge verwendet man in IR Spektroskopie die Wellenzahl ν . Die Wellenzahl ist der Kehrwert der Wellenlänge.

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{D}{m_{\text{red}}}}$$

$$\nu: [\text{m}^{-1}, \text{cm}^{-1}]$$

Beispiel: CO

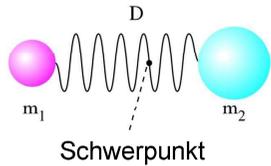
gemessene Wellenzahl: $\nu = 2143 \text{ cm}^{-1}$

$$\left. \begin{aligned} \Rightarrow \lambda &= 4,67 \mu\text{m} \Rightarrow f = 6,43 \cdot 10^{13} \text{ Hz} \\ m_C &= 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}, m_O = 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \end{aligned} \right\} \Rightarrow D = 1875 \text{ N/m}$$

D kann man berechnen, wenn ν ist bekannt,
 ν kann man berechnen, wenn D ist bekannt

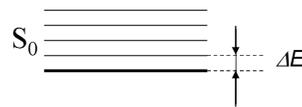
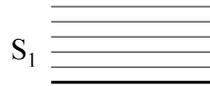
Zusammenhang zwischen den Schwingungen der klassischen Physik und den Energieniveaus der Quantenmechanik

- Klassische Physik Quantenmechanik



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_{red}}}$$

Resonanz mit dem Licht von Frequenz f



$$\Delta E = hf$$

sind gleich!!!

Schwingungen der vielatomigen Molekülen

Molekül mit N Atome:

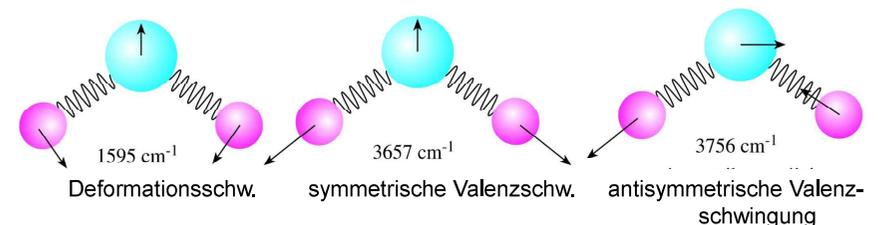
- 3N Freiheitsgrad, woraus 3 die translation
3 die Rotation des Moleküles
- 3N-6 Schwingungsfreiheitsgrad
(bei linearen Molekülen nur 3N-5)
- Normalschwingungen

Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz von der Masse und Bindungsstärke

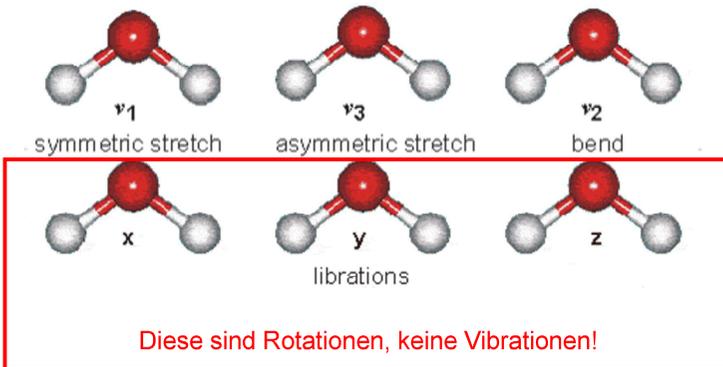
Masse:					Bindungsstärke: C-N: 1100 cm ⁻¹ , C=N: 1660 cm ⁻¹ , C≡N: 2220 cm ⁻¹ .
Frequenz [Wellenzahl (cm ⁻¹)]					
B-H 2400	C-H 3000	N-H 3400	O-H 3600	F-H 4000	
Al-H 1750	Si-H 2150	P-H 2350	S-H 2570	Cl-H 2890	
	Ge-H 2070	As-H 2150	Se-H 2300	Br-H 2650	
Wasser (O-H): 3600 => D ₂ O: 2600 cm ⁻¹					14

Normalschwingungen

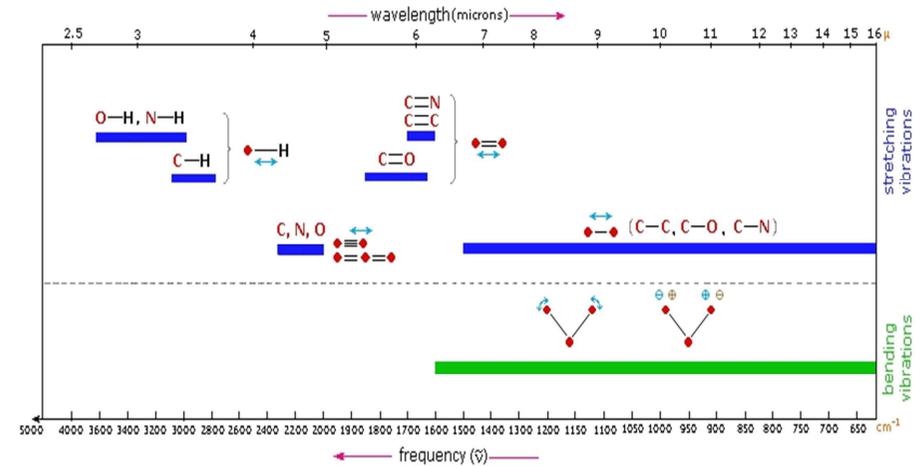
- Alle Atome schwingen mit derselben Frequenz aber mit unterschiedlichen Amplitude und Richtung.
- zB. Wasser:



Die Normalschwingungen des Wassers

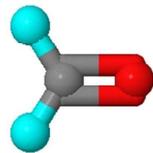
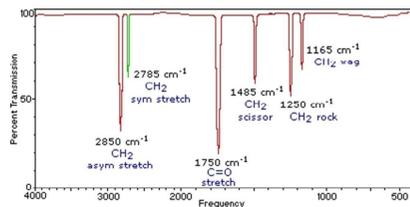


Einige typische Schwingungsfrequenzen



Beispiel: Formaldehyd

Gas Phase Infrared Spectrum of Formaldehyde, $H_2C=O$



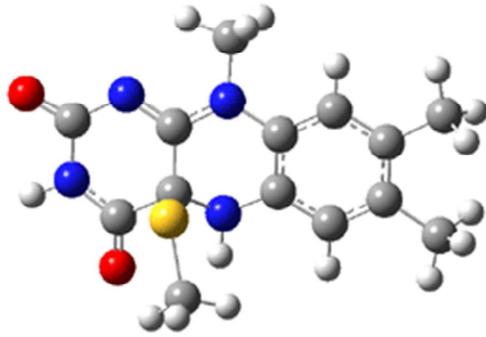
- View CH_2 Asymmetric Stretch
- View CH_2 Symmetric Stretch
- View $C=O$ Stretch
- View CH_2 Scissoring
- View CH_2 Rocking
- View CH_2 Wagging

- Ball&Stick Model
- Spacefill Model
- Stick Model
- Motion Off

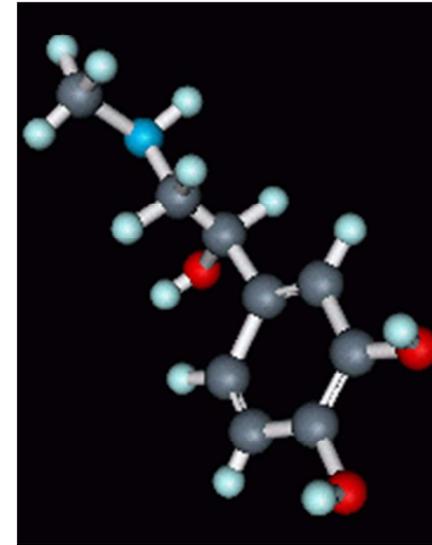
Einige Animationen der molekularen Vibrationen:

- Wasser:
<https://www.youtube.com/watch?v=1uE2lvVkkW0>
- CO_2 :
<https://www.youtube.com/watch?v=W5gimZIFY6I>
- Ammoniak:
<https://www.youtube.com/watch?v=aSiJ2bt1jwQ>
- Ethanol:
<https://www.youtube.com/watch?v=O5dulWd-OnQ>
- Benzol:
<https://www.youtube.com/watch?v=NA9etutSt7A>
- ...

Flavin



21



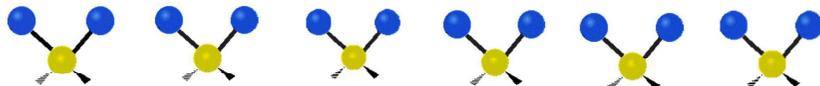
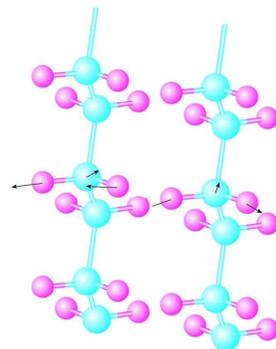
22

Schwingungen der Makromoleküle

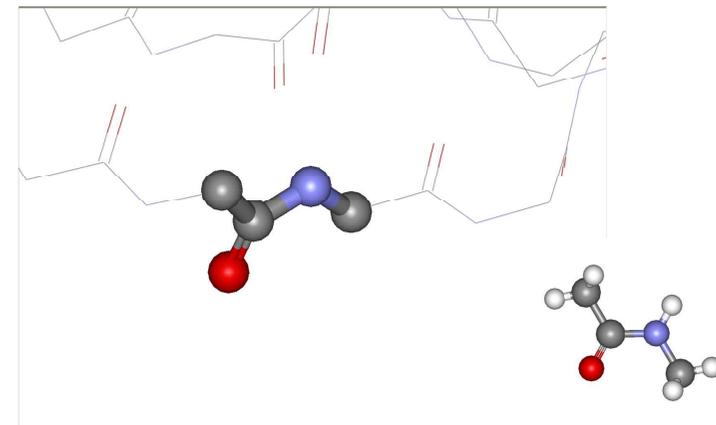
Globale Schwingungen
(sind zu kompliziert!)

Lokalisierte Schwingungen:

z.B.: Schwingungen der CH₂
Gruppen in Lipidmoleküle



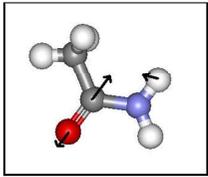
Infrarotspektroskopie der Proteinen



Schwingungen der Proteinen

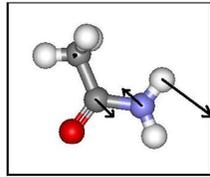
Amidschwingungen

Konformationempfindliche Schwingungen



Amid I

Sekundäre



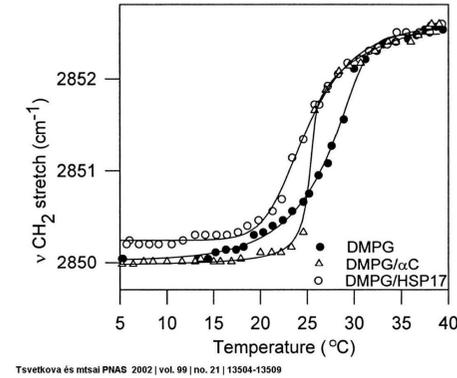
Amid II

Tertiäre struktur

25

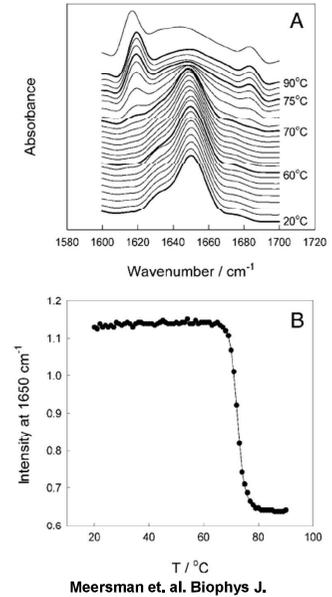
Beispiele für Anwendungen:

Phasenübergang in Lipid-Doppelschicht



Tsvetkova et al. PNAS 2002 | vol. 99 | no. 21 | 13504-13509

Eiweißdenaturierung

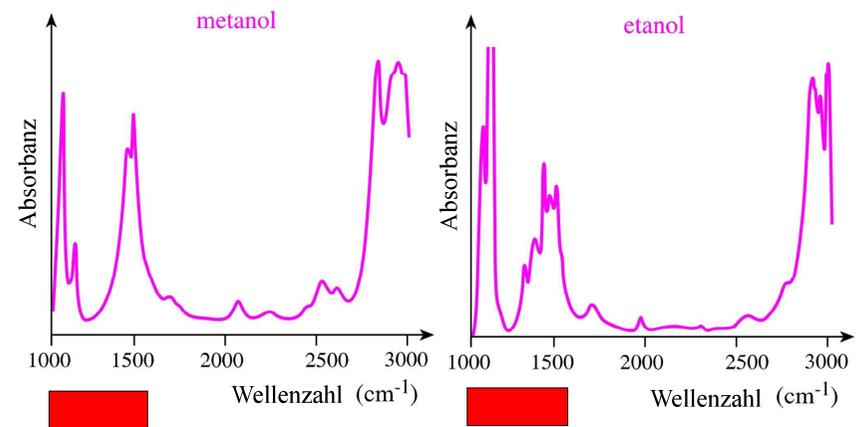


Meersman et. al. Biophys J.

Pharmazeutische Anwendungen

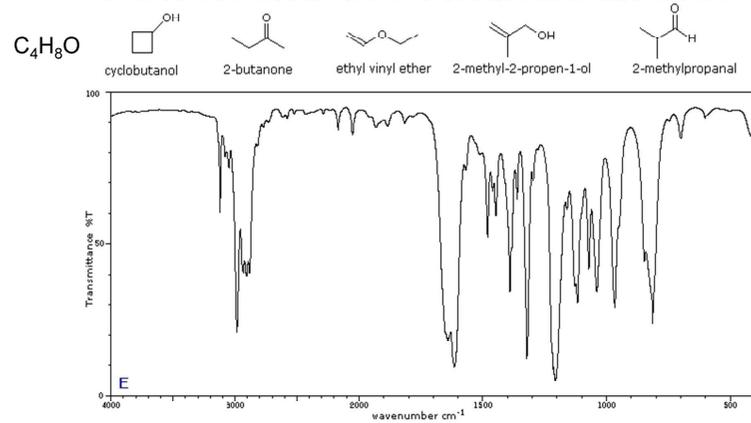
- Beim Synthese: Kontrolle der Synthese: Identifizierung der Zwischen- und Endprodukte
- Beweisung des Molekülstrukturs
- Identifizierung der Metabolyten
- Kontrolle der Medizinien (Reinheitsuntersuchung)
- Bemerkung: Lambert-Beersches Gesetz ist gültig auch in IR Bereich, d.h. Konzentrationsbestimmung ist möglich, aber es ist nicht die Hauptanwendung.

Identifizierung der Moleküle



Fingerprint Region (Fingerprintgebiet)

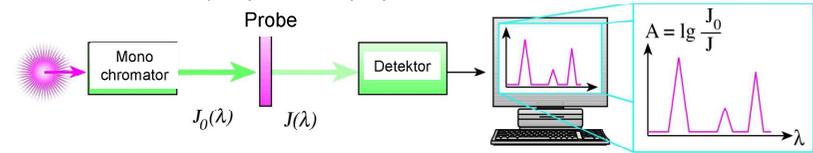
Pharmazeutische Anwendung: Identifizierung der Moleküle, Beweisung des Raumstruktures



<http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Spectry/InfraRed/infrared.htm>

Messung der Spektrum: Fourier- Transform-Spektrometer (FTIR)

Konventionelles (Dispersions-) Spektrometer



Fourier- Transform-Spektrometer

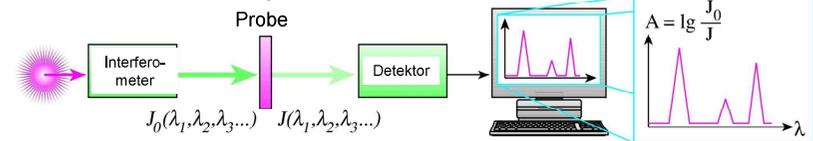


Abb. 6.17

Spezielle IR Methoden IR Mikroskopie

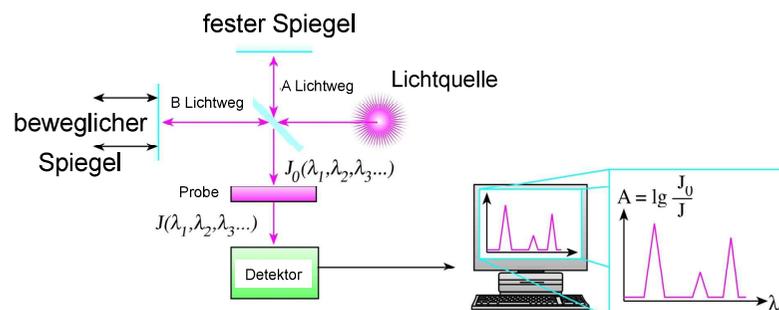
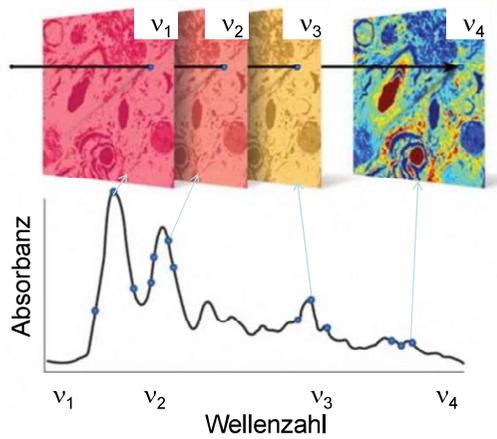


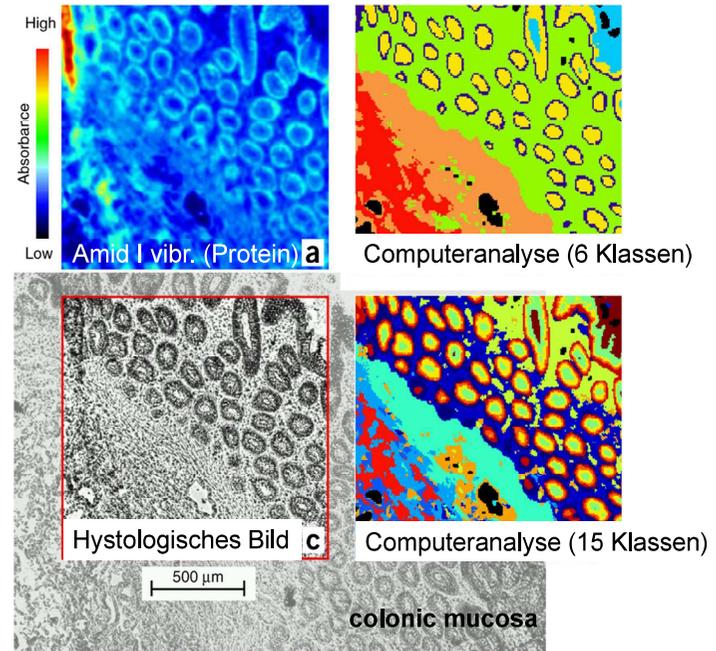
Abb .6.18



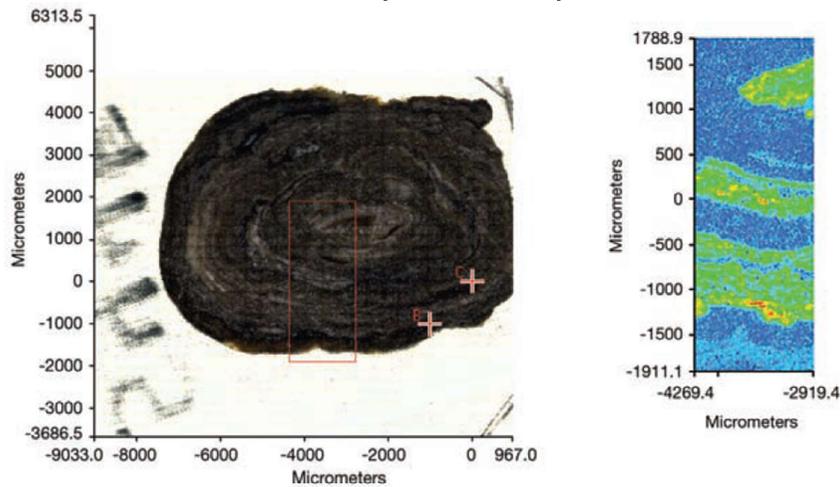
Infrarotmikroskopie



33



Klassifizierung der Nierensteine mit Hilfe der Infrarotspektroskopie



35

Spektrale Abbildung: Räumliche Verteilung der Komponenten

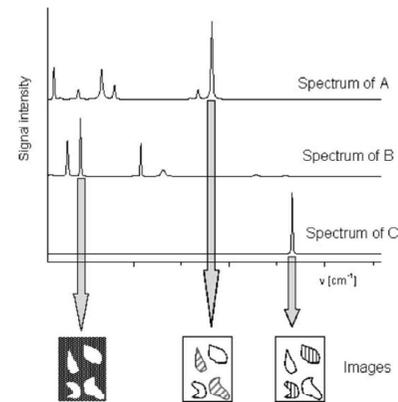
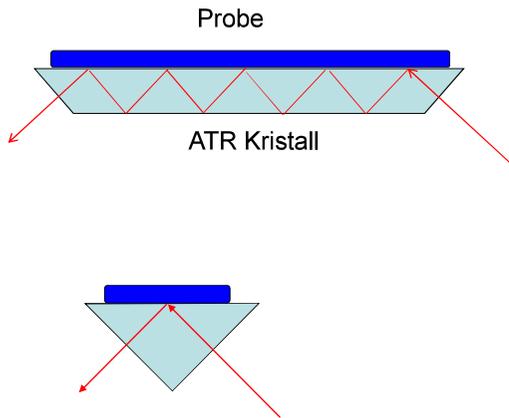
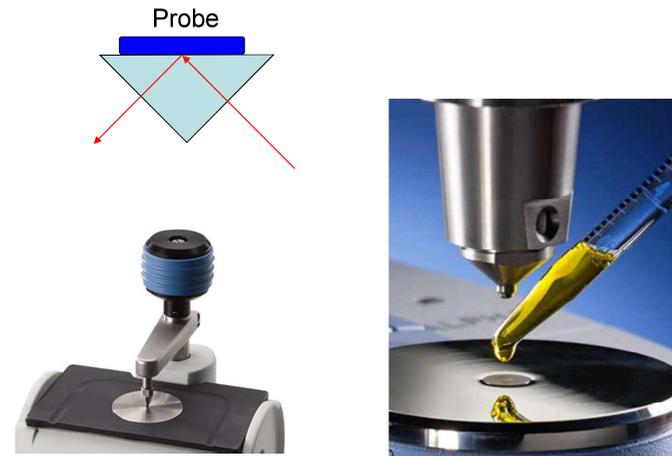


Fig. 6. The principle of vibrational spectroscopic imaging.

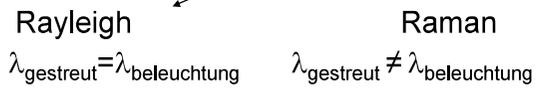
ATR Technik (Abgeschwächte Totalreflexion)



ATR Technik Vorbereitung der Probe ist einfach



Lichtstreuung

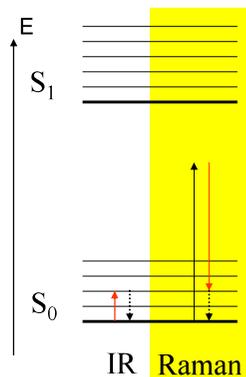


Raman-Streuung:

$$\lambda_{\text{gestreut}} \neq \lambda_{\text{beleuchtung}} \Rightarrow f_{\text{gestreut}} \neq f_{\text{beleuchtung}}$$

$$E_{\text{gestreut}} \neq E_{\text{beleuchtung}}$$

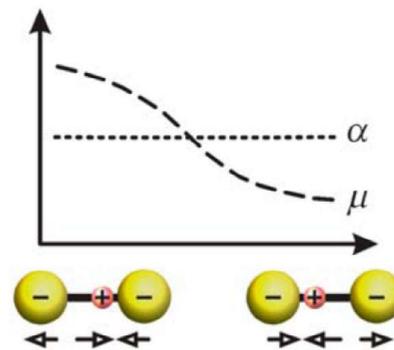
Was passierte mit der Energie?
Molekülschwingungen (s. IR)
Sehr schwach



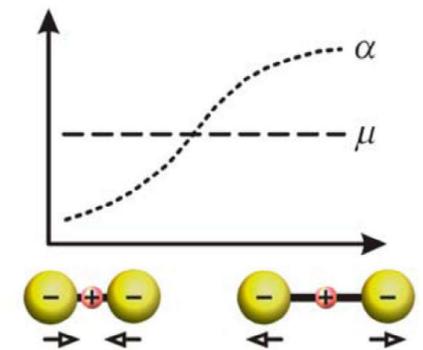
IR und Raman

- Dipolmoment (μ)
- Polarisierbarkeit (α)

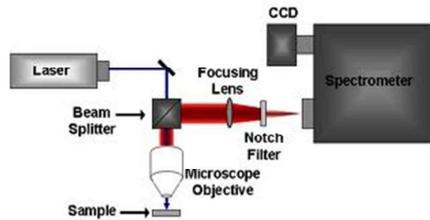
antisymmetrische Valenzschwingung



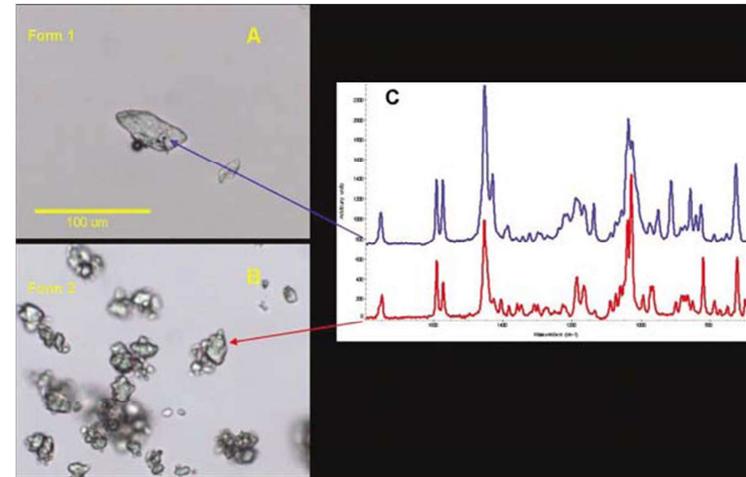
symmetrische Valenzschwingung



Raman-Spektroskop



Pharmazeutische Anwendung



Tragbares Raman Spektrometer für Stoffidentifizierung



Ende