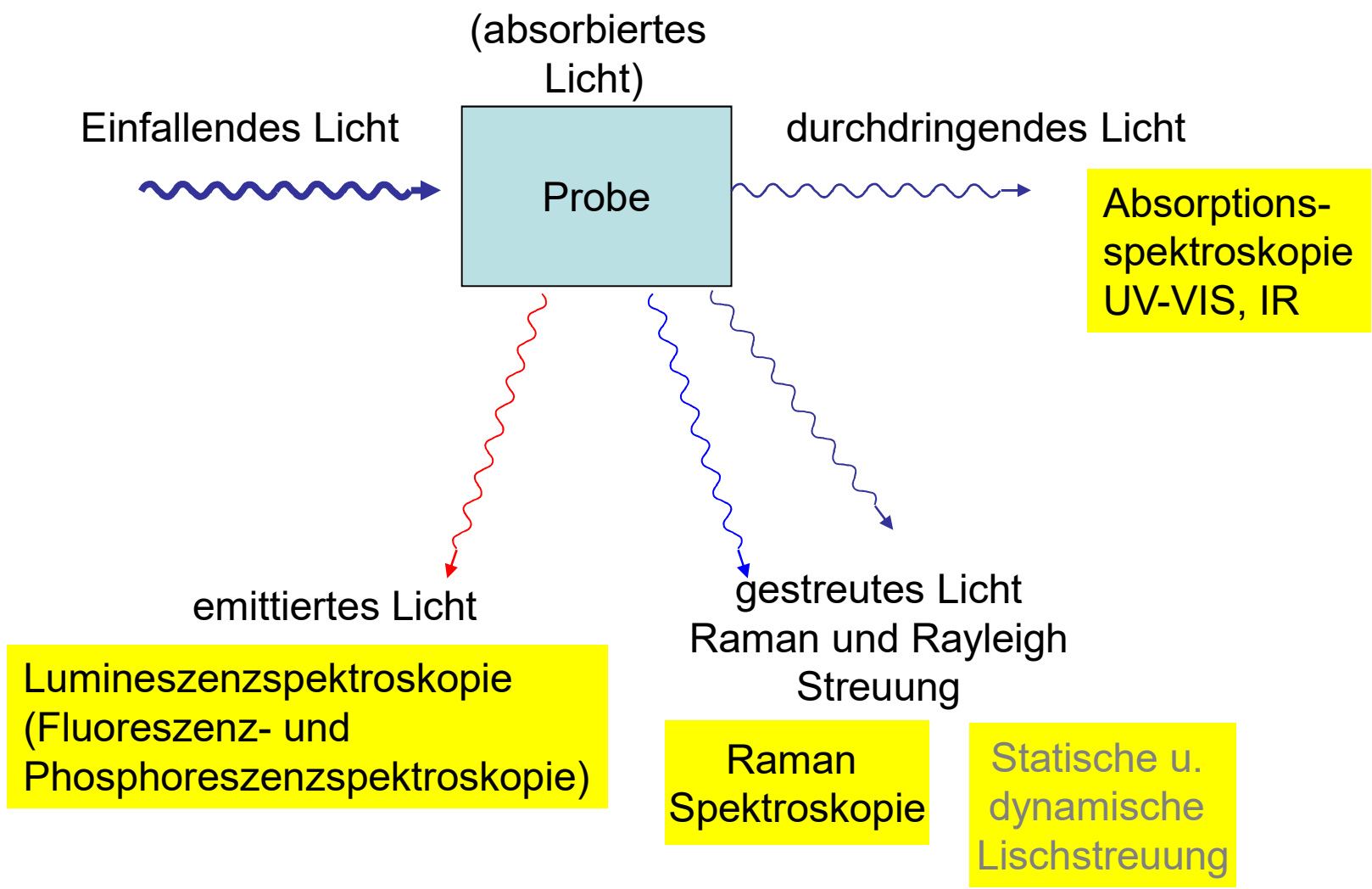


Methoden der Strukturanalyse: Optische Vibrationsspektroskopie

László Smeller

22.05.2026

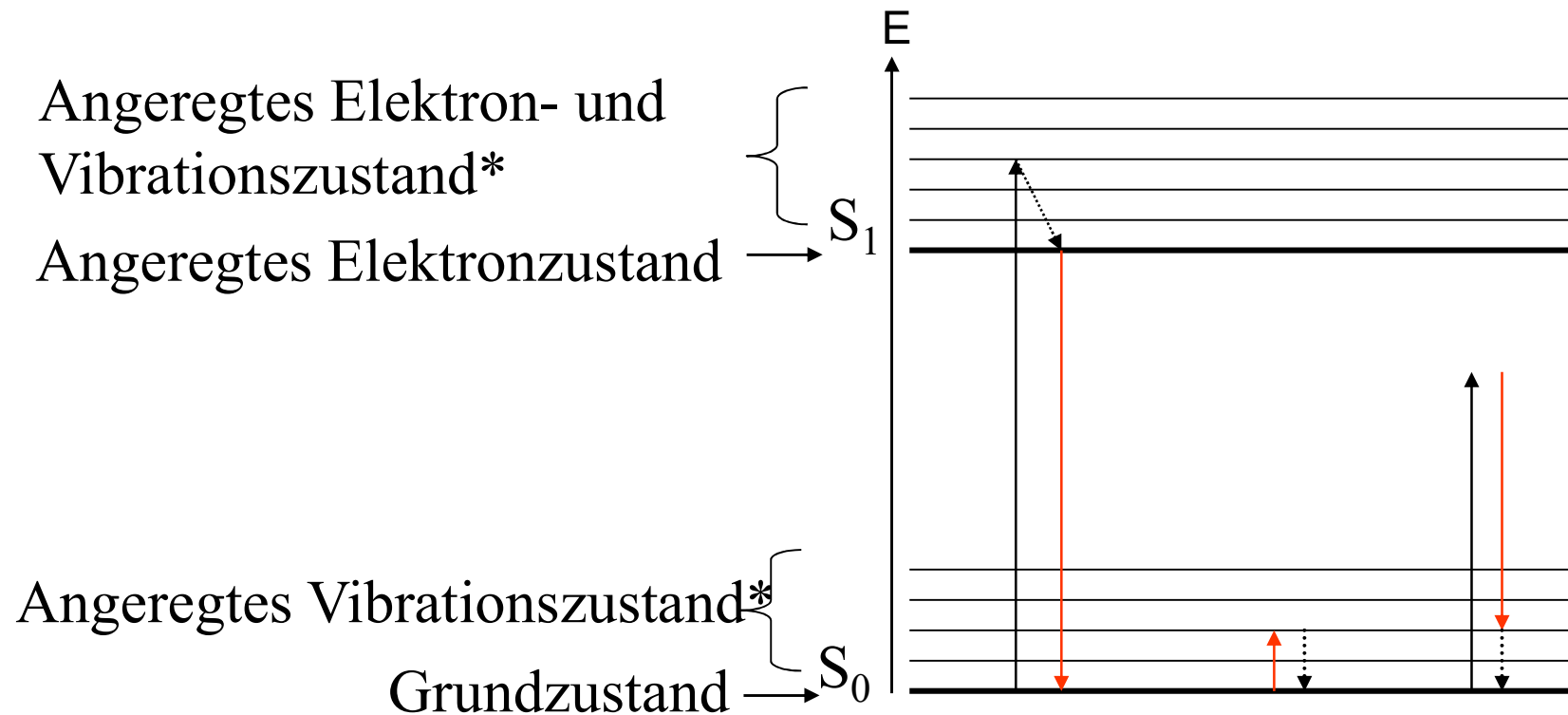


Absorption und Emissionsspektroskopie

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

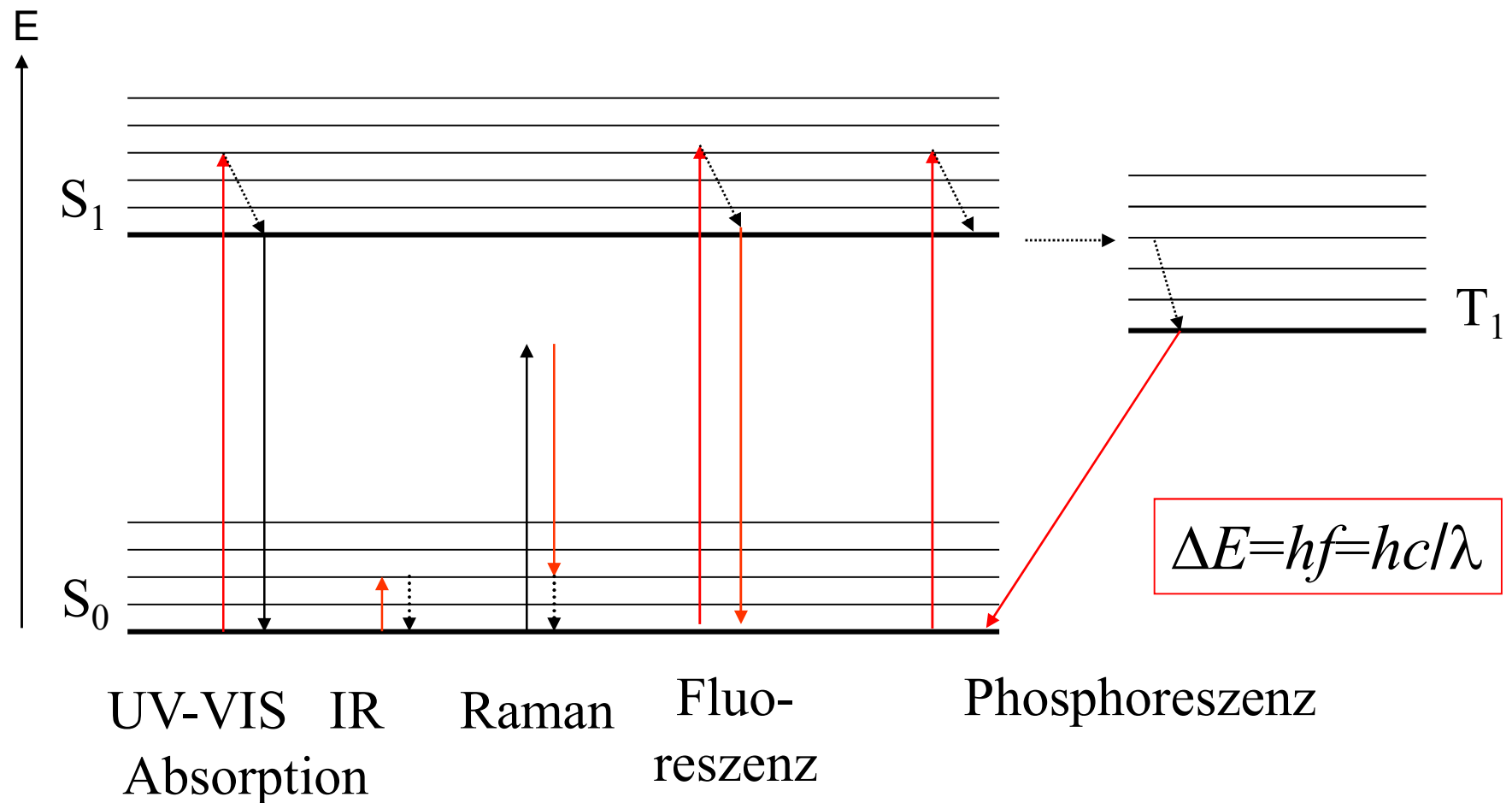
Was passiert in einem Atom oder Molekül, bei der Absorption eines Lichtquants?

Energieübergänge: Jablonski diagram



*nur bei Molekülen!

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



Absorptionsspektroskopie

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.

Infrarotspektroskopie

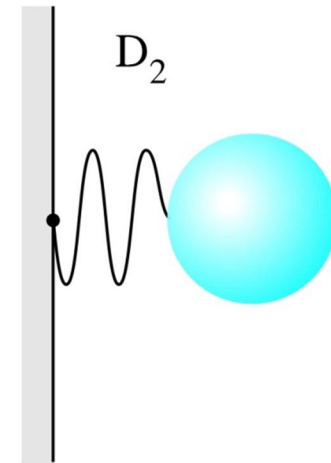
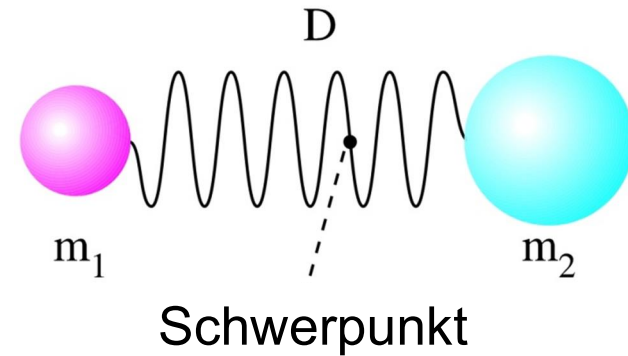
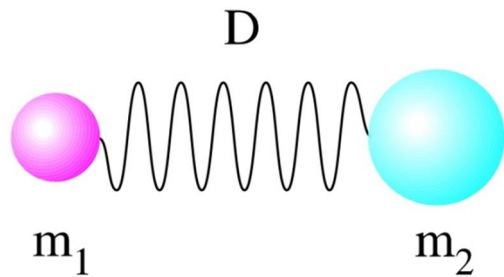
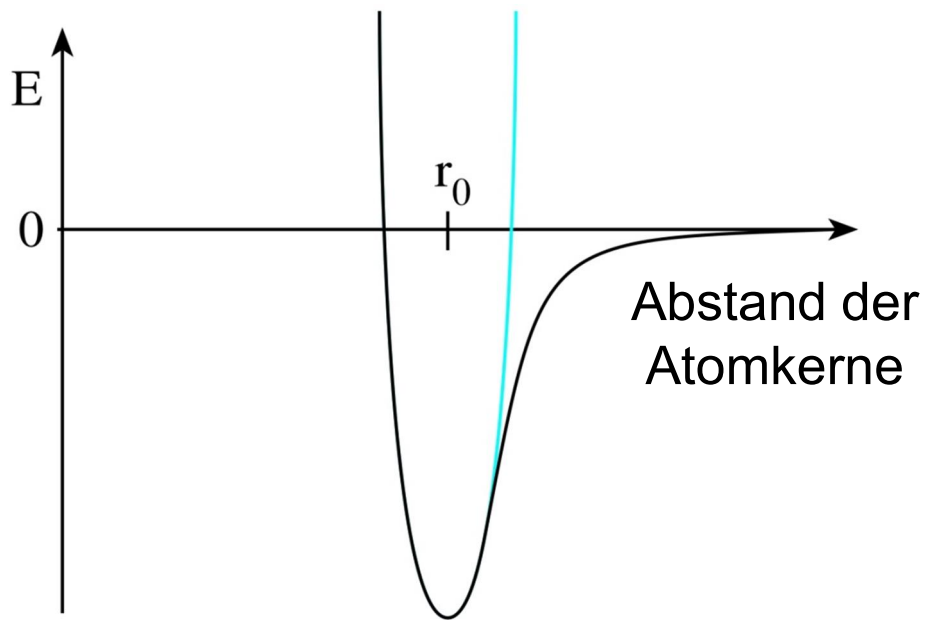
- Infrarotes Licht: $\lambda=800$ nm - 1 mm
Mittleres Infrarot: 2,5-50 μm
- Absorptionsspektroskopie
- Das absorbierte Licht induziert Molekülschwingungen
- Das Spektrum ist besonders empfindlich für die Molekülstruktur
- spezielle Detektierungstechnik: Fourier Transform-Spektrometer

Molekülschwingungen

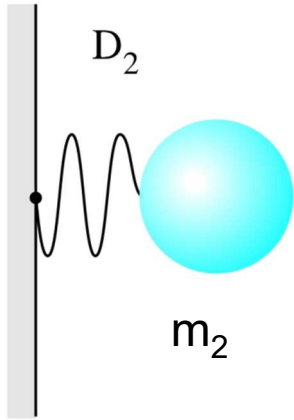
Die Bewegungen von Elektronen und von Atomkerne können getrennt behandelt werden. (Born-Oppenheimer Annäherung.)

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

Molekülschwingungen: Einfachstes Beispiel: Zweiatomiges Molekül

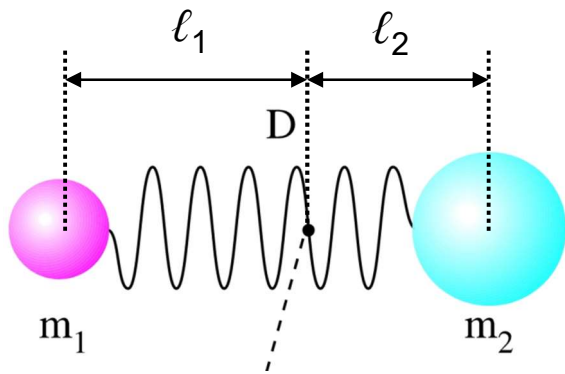


Aus der früheren Physikstudien:



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

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



$$\frac{D_2}{D} = \frac{F/D}{F/D_2} =$$

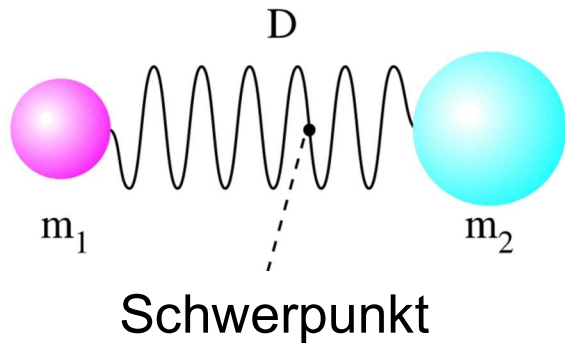
Schwerpunkt

$$F = D\Delta l$$

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

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

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

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

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

$$\Rightarrow \lambda = 4,67 \mu\text{m} \Rightarrow f = 6,43 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$$

$$m_{\text{C}} = 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}, \quad m_{\text{O}} = 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

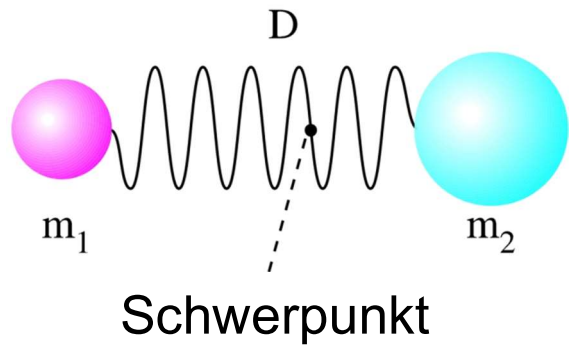
$$\left. \begin{array}{l} \Rightarrow \lambda = 4,67 \mu\text{m} \Rightarrow f = 6,43 \cdot 10^{13} \text{ Hz} \\ m_{\text{C}} = 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}, \quad m_{\text{O}} = 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \end{array} \right\} \Rightarrow D = 1875 \text{ N/m}$$

D kann man berechnen, wenn ν ist bekannt,

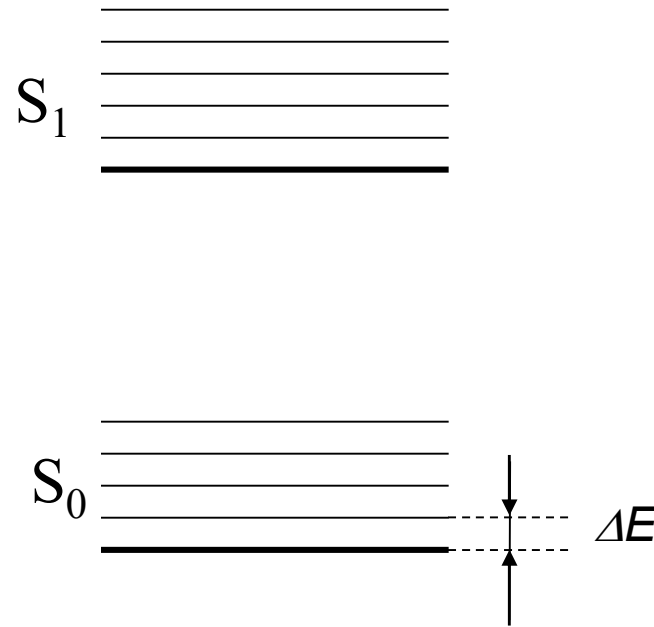
ν kann man berechnen, wenn D ist bekannt

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!!!

Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz von der Masse und Bindungsstärke

Masse:

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 \Rightarrow D₂O: 2600 cm^{-1}

Bindungsstärke:

C-N: 1100 cm^{-1} ,

C=N: 1660 cm^{-1} ,

C \equiv N: 2220 cm^{-1} .

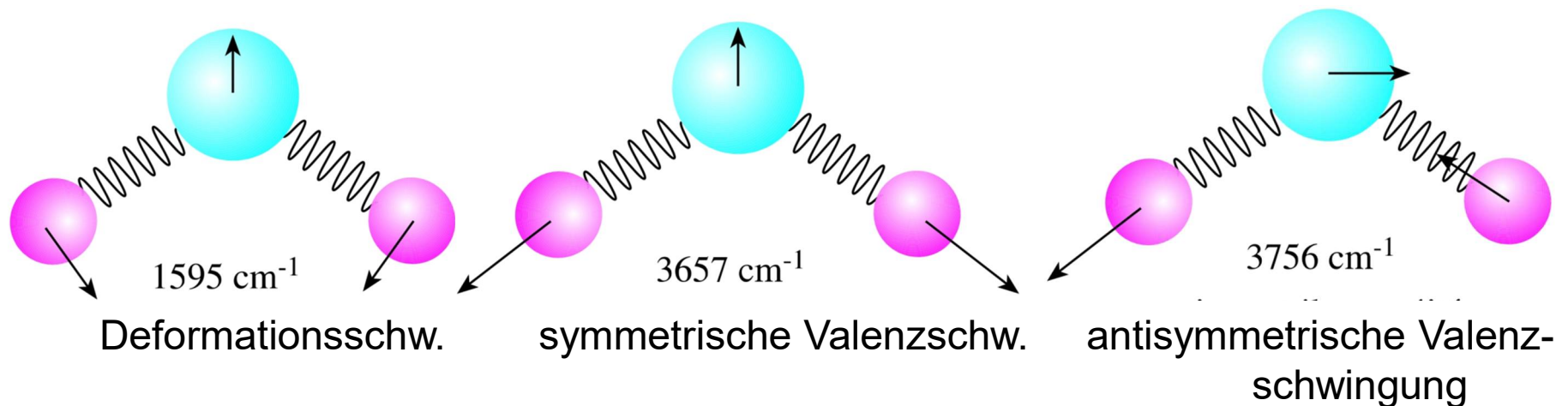
Schwingungen der vielatomigen Molekülen

Molekül mit N Atome:

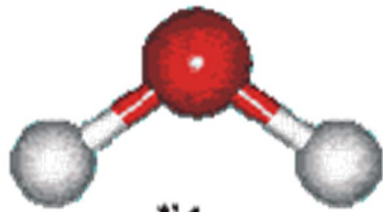
- $3N$ Freiheitsgrad, woraus 3 die translation
3 die Rotation des Moleküles
- $3N-6$ Schwingungsfreiheitsgrad
(bei linearen Molekülen nur $3N-5$)
- Normalschwingungen

Normalschwingungen

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

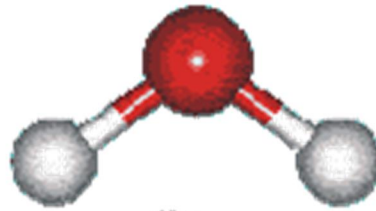


Die Normalschwingungen des Wassers



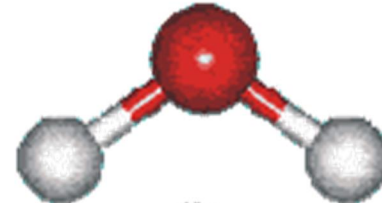
ν_1

symmetric stretch



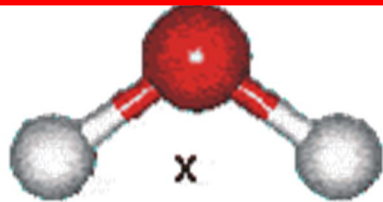
ν_3

asymmetric stretch

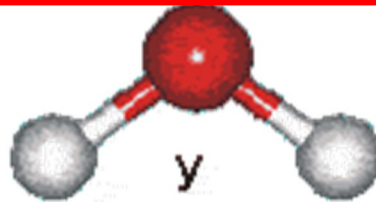


ν_2

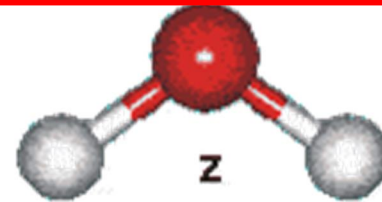
bend



x



y

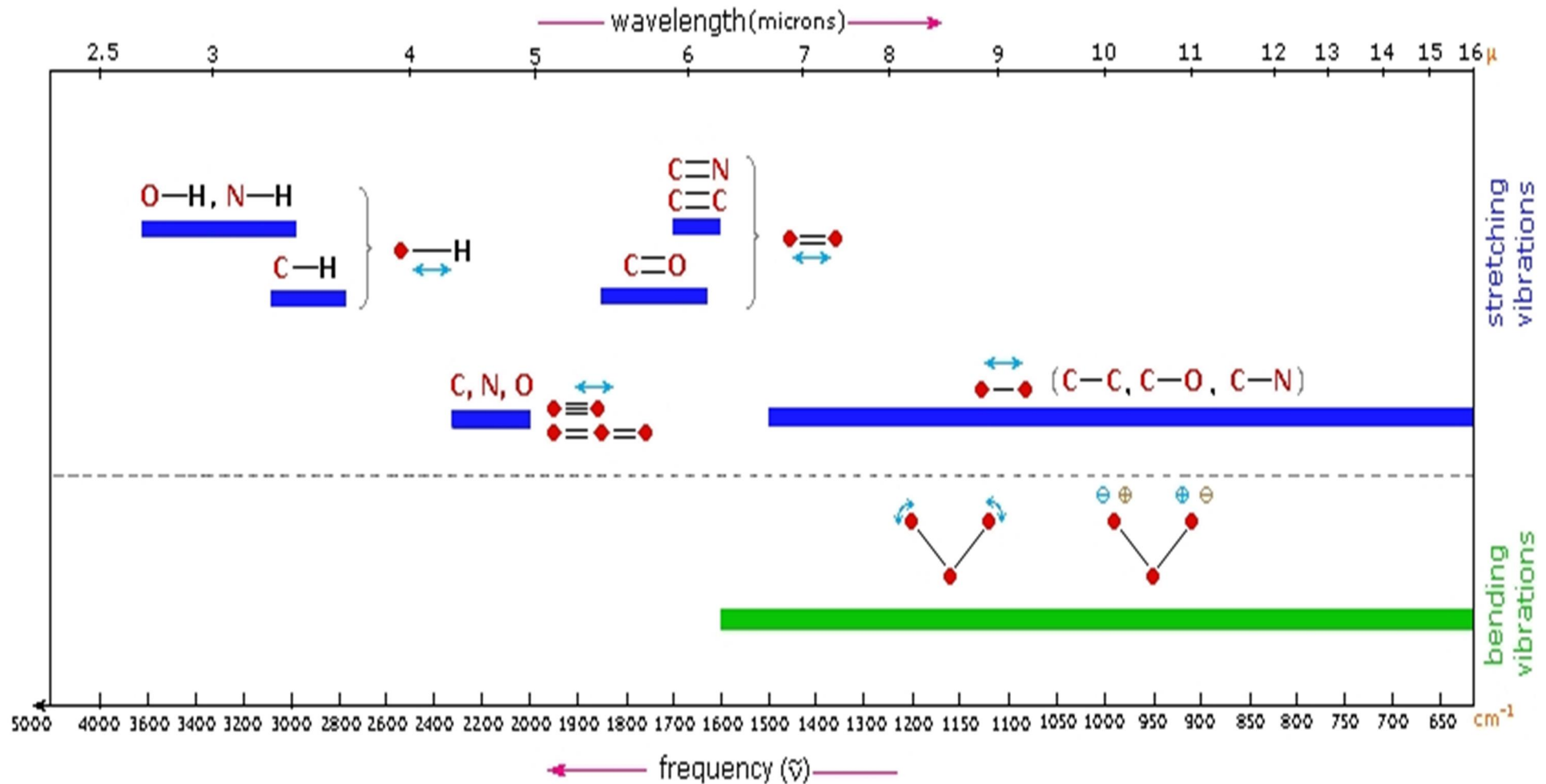


z

librations

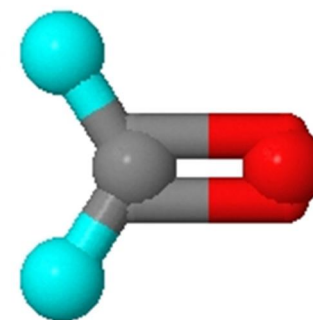
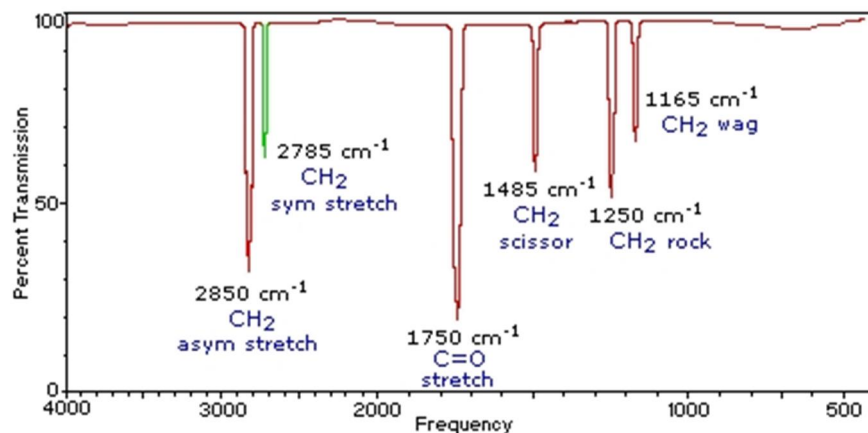
Diese sind Rotationen, keine Vibrationen!

Einige typische Schwingungsfrequenzen



Beispiel: Formaldehyd

Gas Phase Infrared Spectrum of Formaldehyde, $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$



- View CH₂ Asymmetric Stretch
- View CH₂ Symmetric Stretch
- View C=O Stretch
- View CH₂ Scissoring
- View CH₂ Rocking
- View CH₂ Wagging

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

Einige Animationen der molekularen Vibrationen:

- Wasser:

<https://www.youtube.com/watch?v=1uE2lvVkKW0>

- CO₂:

<https://www.youtube.com/watch?v=W5gimZIFY6I>

- Ammoniak:

<https://www.youtube.com/watch?v=aSiJ2bt1jwQ>

- Ethanol:

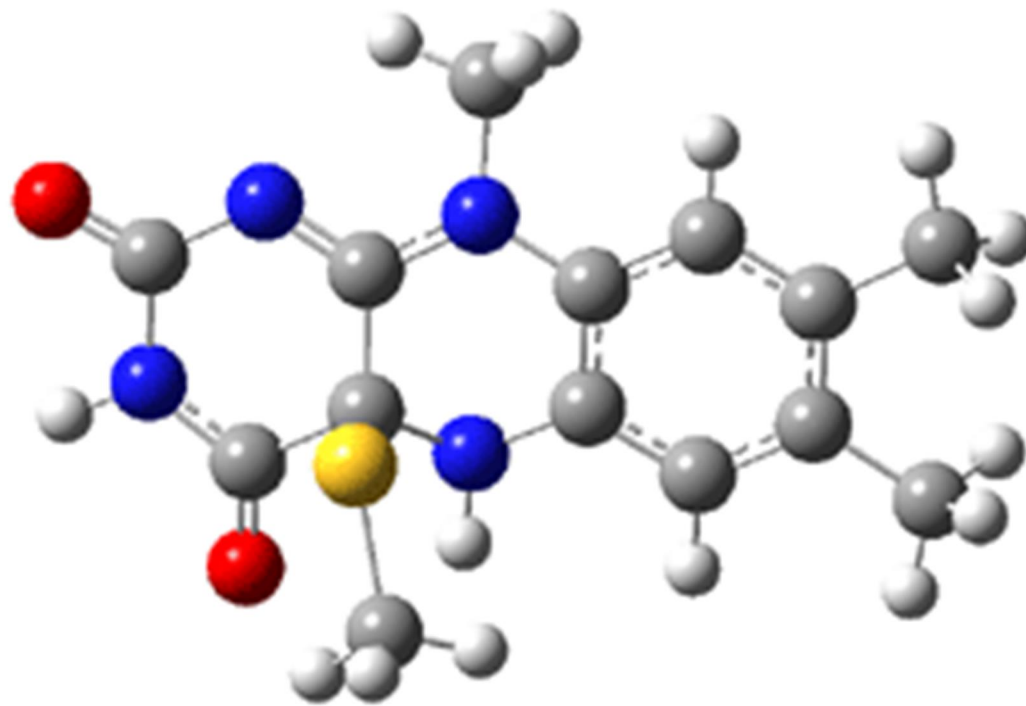
<https://www.youtube.com/watch?v=O5dulWd-OnQ>

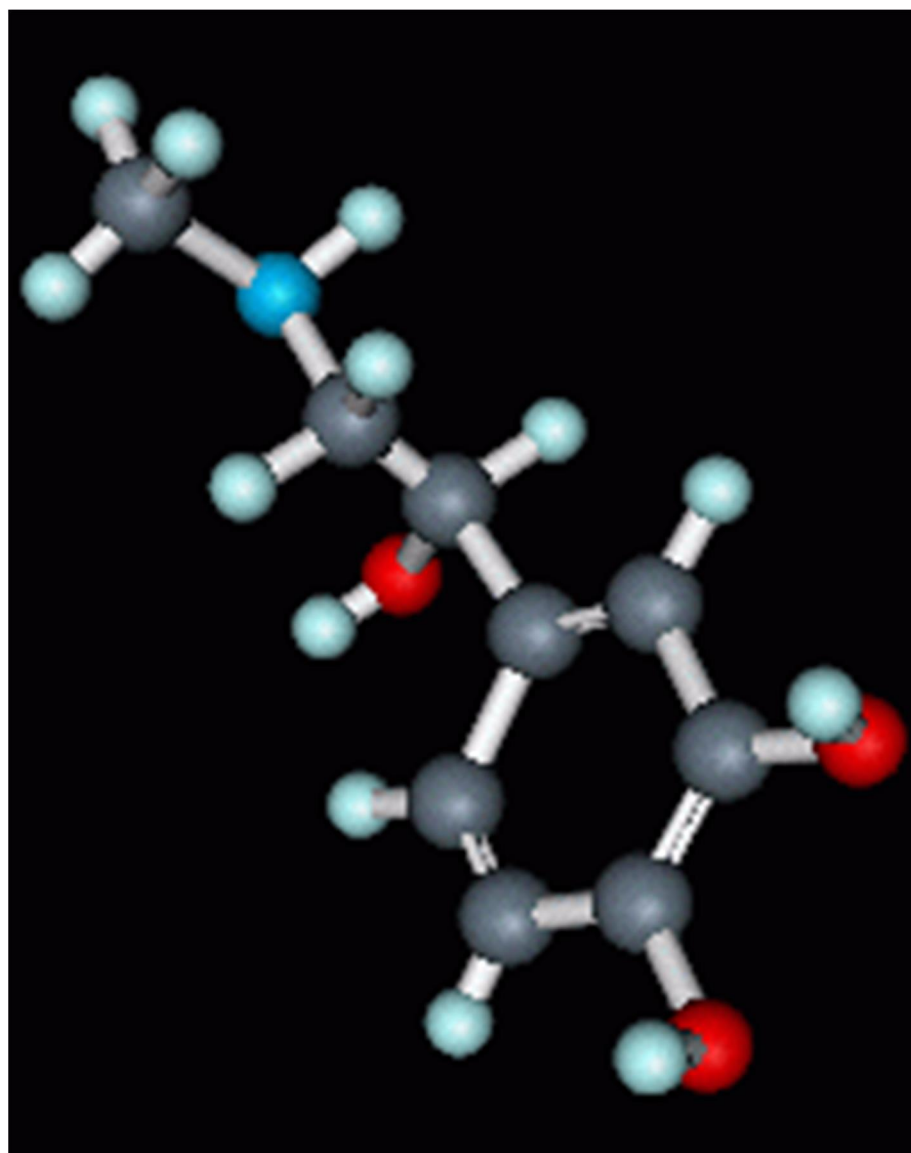
- Benzol:

<https://www.youtube.com/watch?v=NA9etutSt7A>

- ...

Flavin



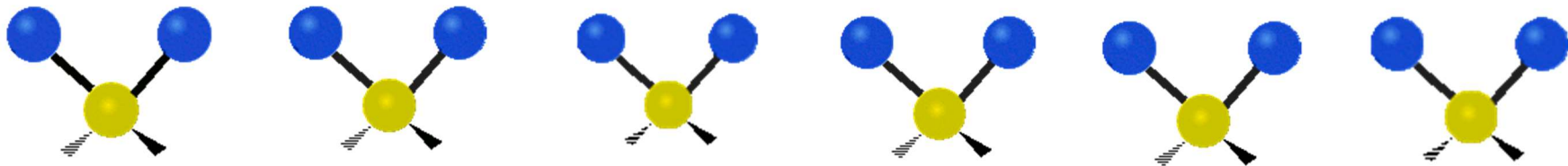
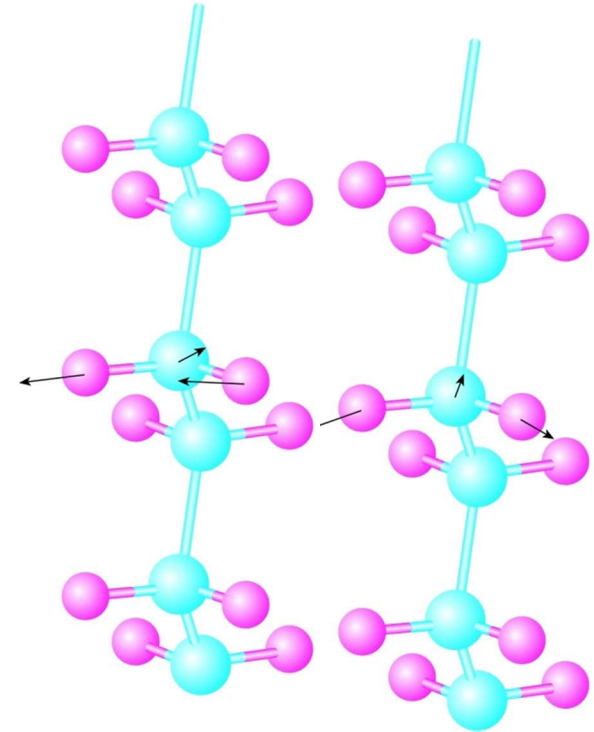


Schwingungen der Makromoleküle

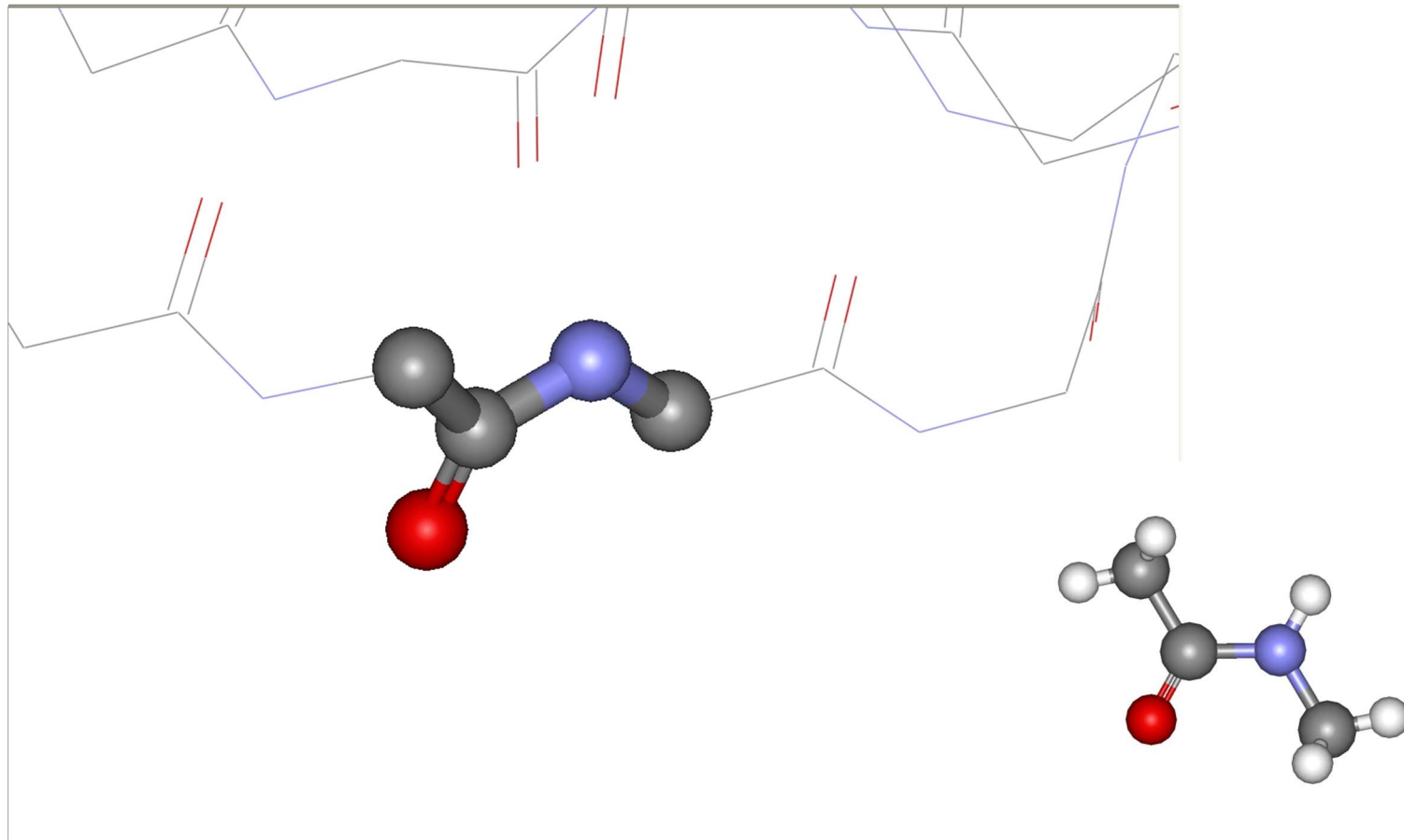
Globale Schwingungen
(sind zu kompliziert!)

Lokalisierte Schwingungen:

z.B.: Schwingungen der CH_2
Gruppen in Lipidmoleküle



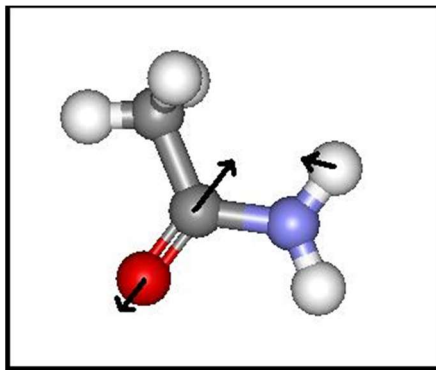
Infrarotspektroskopie der Proteinen



Schwingungen der Proteinen

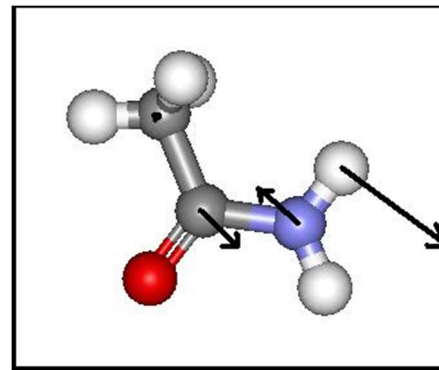
Amidschwingungen

Konformationsempfindliche Schwingungen



Amid I

Sekundäre

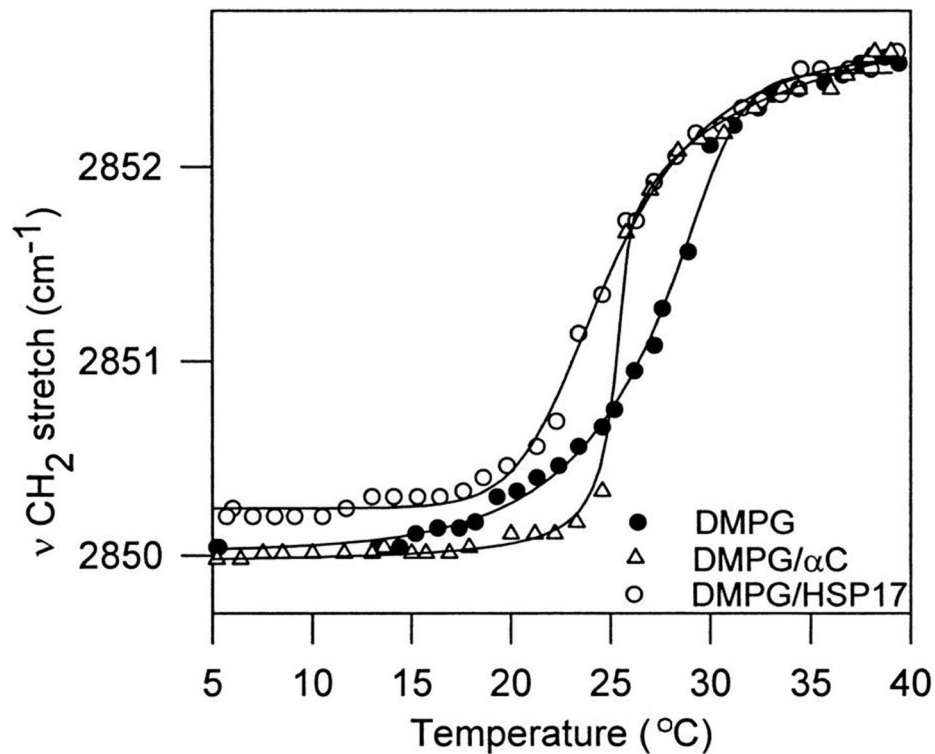


Amid II

Tertiäre struktur

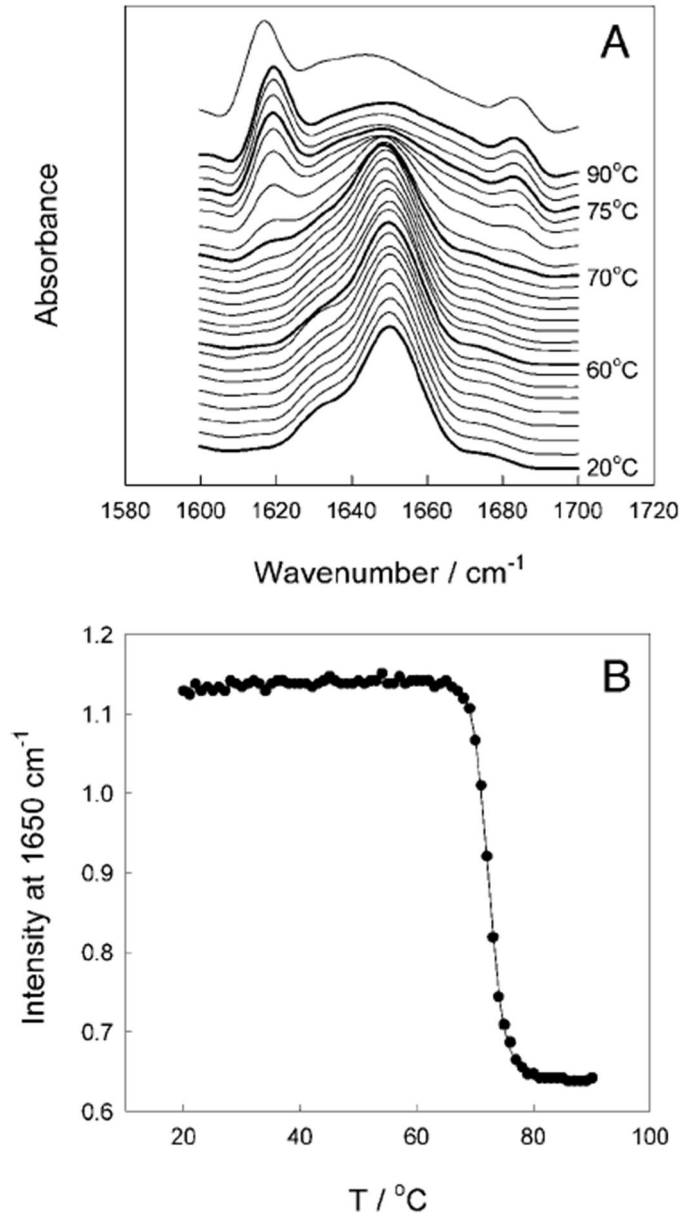
Beispiele für Anwendungen:

Phasenübergang in Lipid-Doppelschicht



Tsvetkova és mtsai PNAS 2002 | vol. 99 | no. 21 | 13504-13509

Eiweissdenaturation



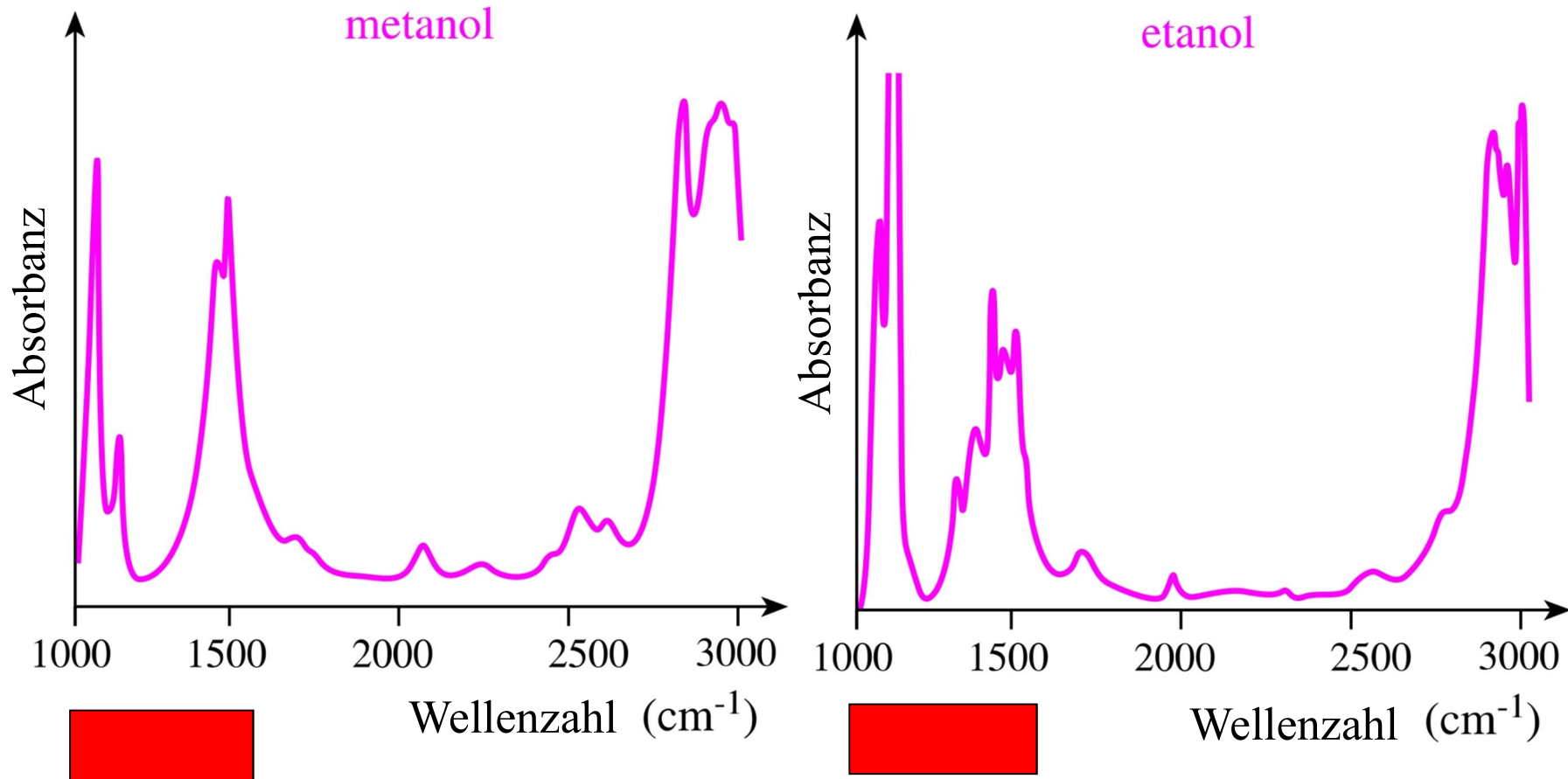
Meersman et. al. Biophys J.

Pharmazeutische Anwendungen

- Beim Synthese: Kontrolle der Synthese:
Identifizierung der Zwischen- und Endprodukte
- Beweisung des Molekülstrukturs
- Identifizierung der Metabolyten
- Kontrolle der Medizinen
(Reinheitsuntersuchung)

- Bemerkung: Lambert-Beersches Gesetz ist
gültig auch in IR Bereich, d.h.
Konzentrationsbestimmung ist möglich , aber es
ist nicht die Hauptanwendung.

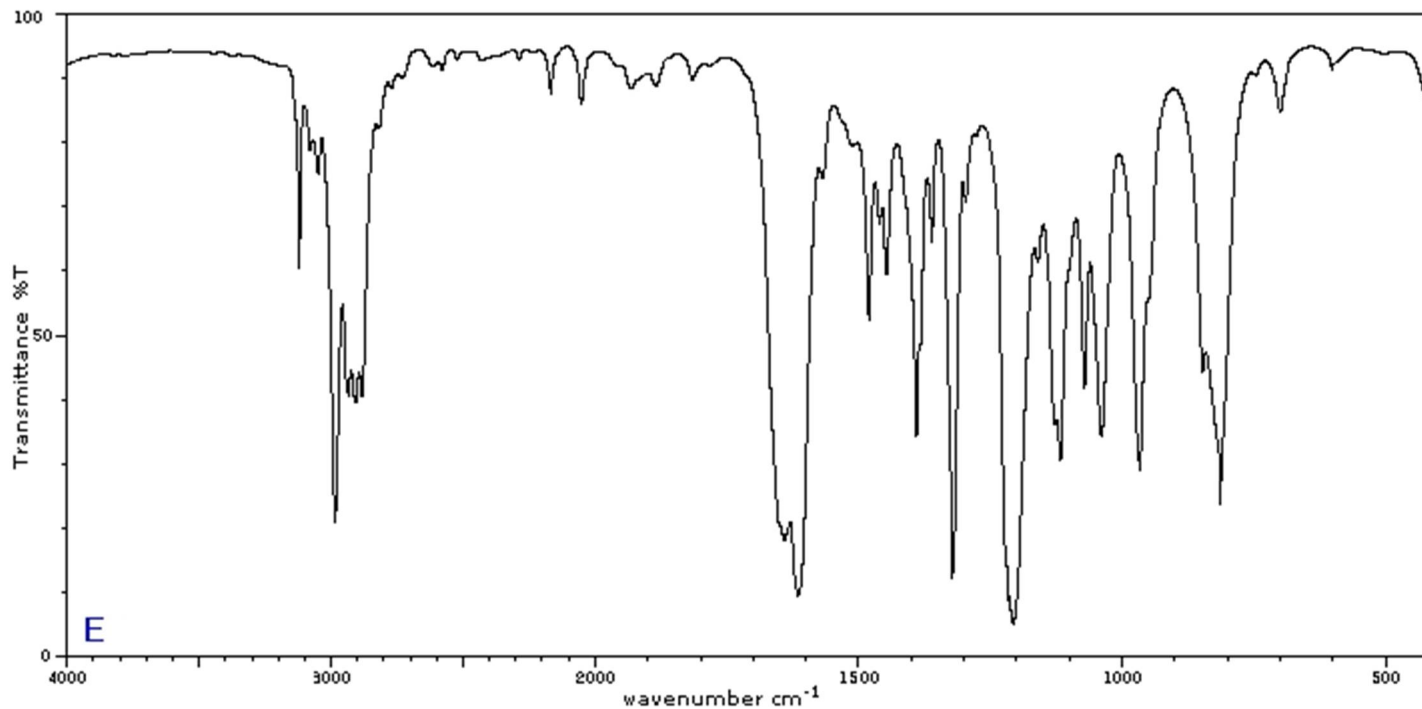
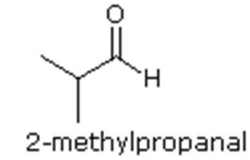
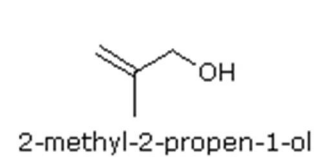
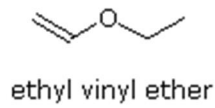
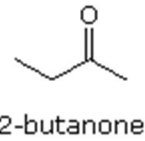
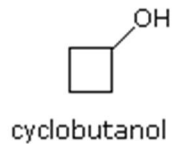
Identifizierung der Moleküle



Fingerprint Region (Fingerprintgebiet)

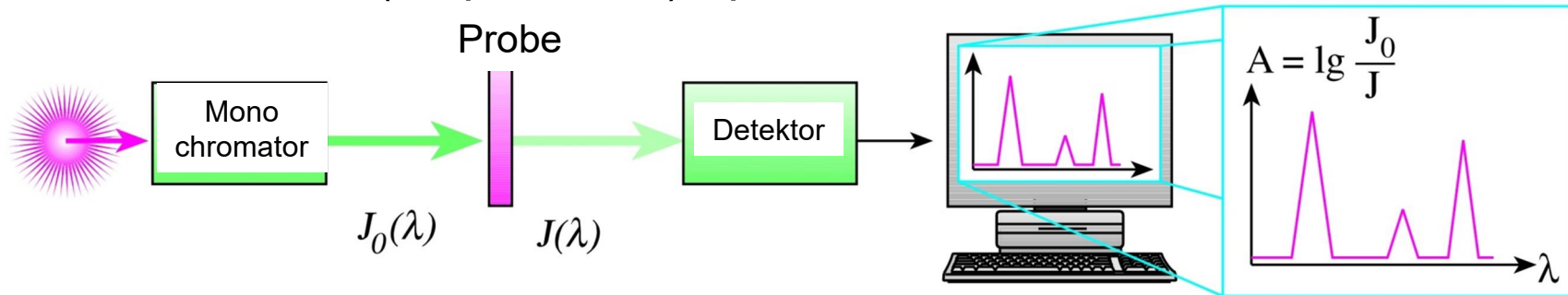
Pharmazeutische Anwendung: Identifizierung der Moleküle, Beweisung des Raumstruktures

C_4H_8O



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

Konventionelles (Dispersions-) Spektrometer



Fourier- Transform-Spektrometer

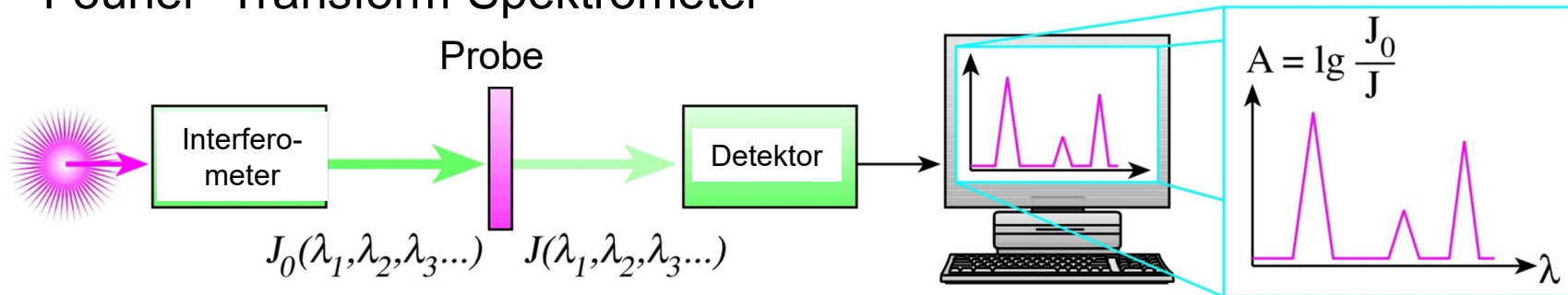


Abb. 6.17

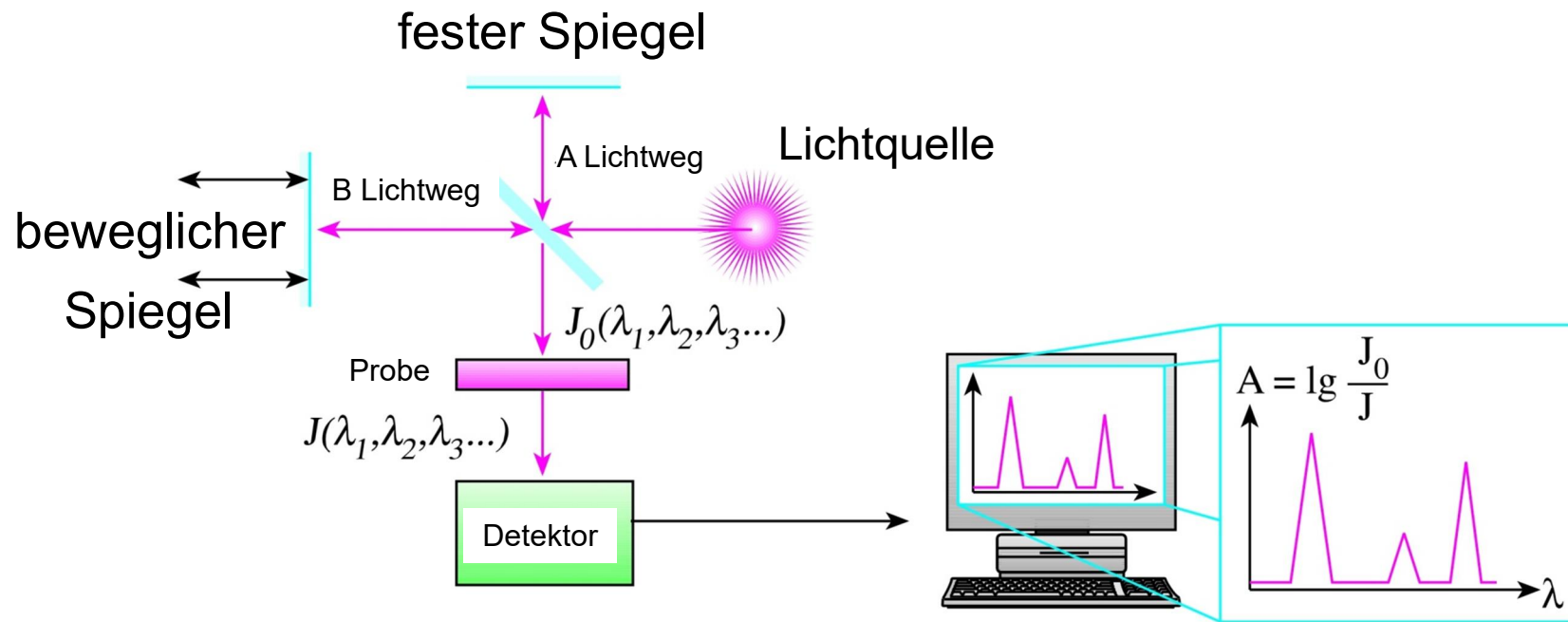


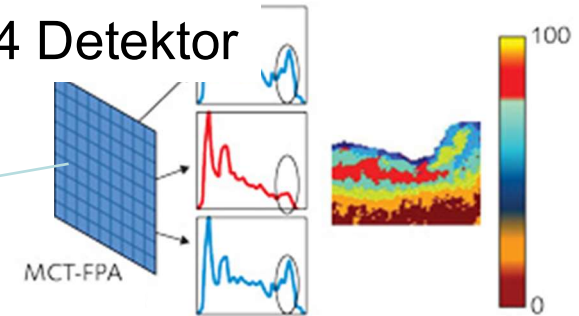
Abb .6.18

Spezielle IR Methoden

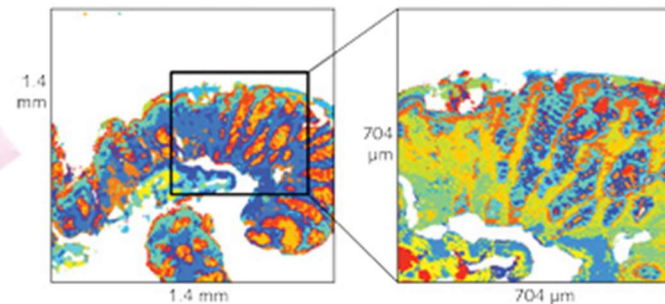
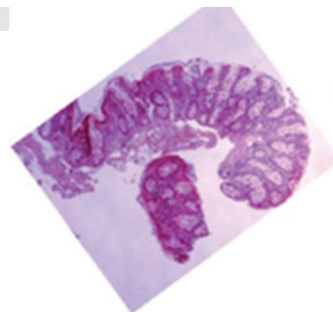
IR Mikroskopie



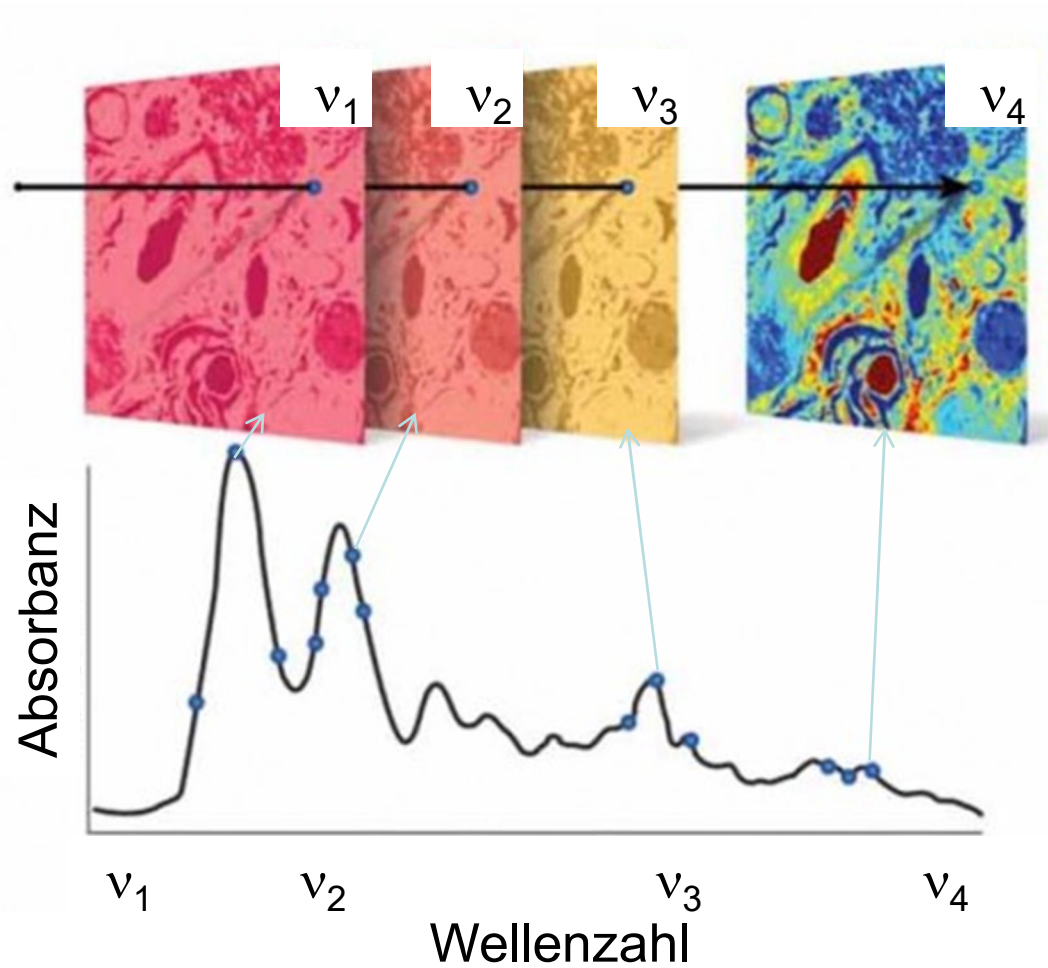
64x64 Detektor

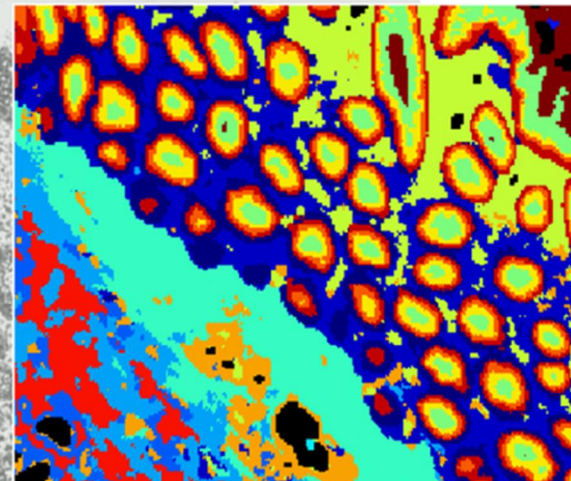
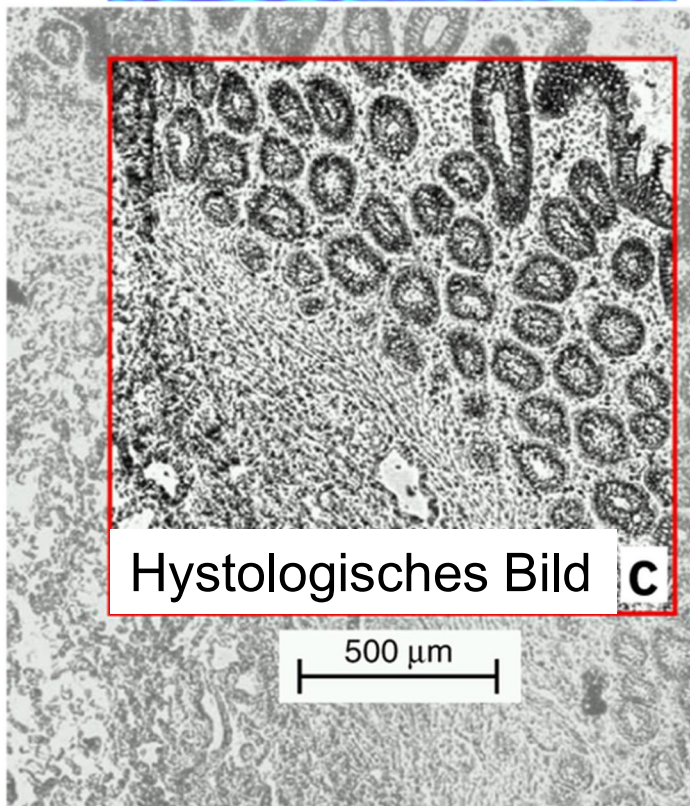
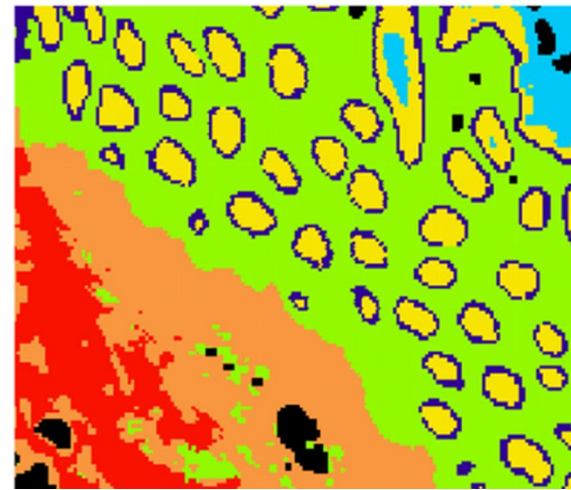
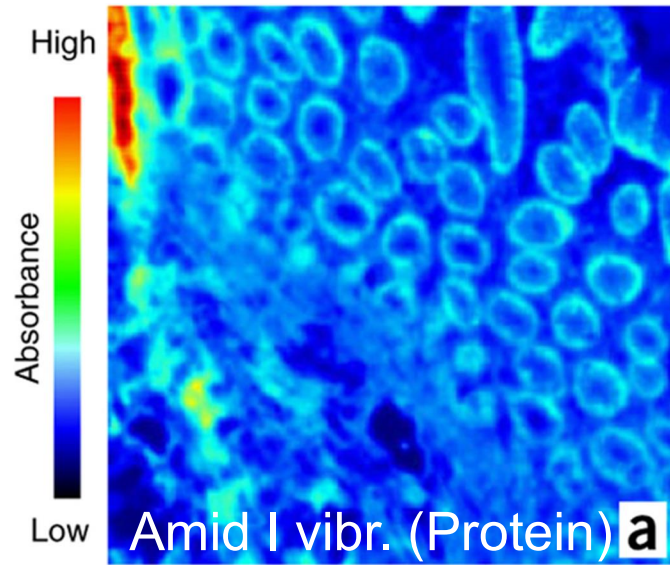


Das ganze Spektrum wird in alle Bildpunkte registriert.



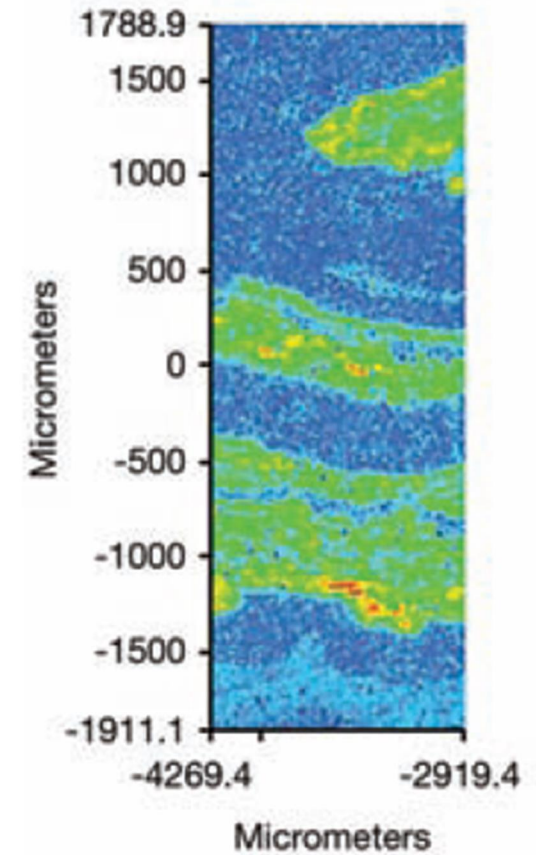
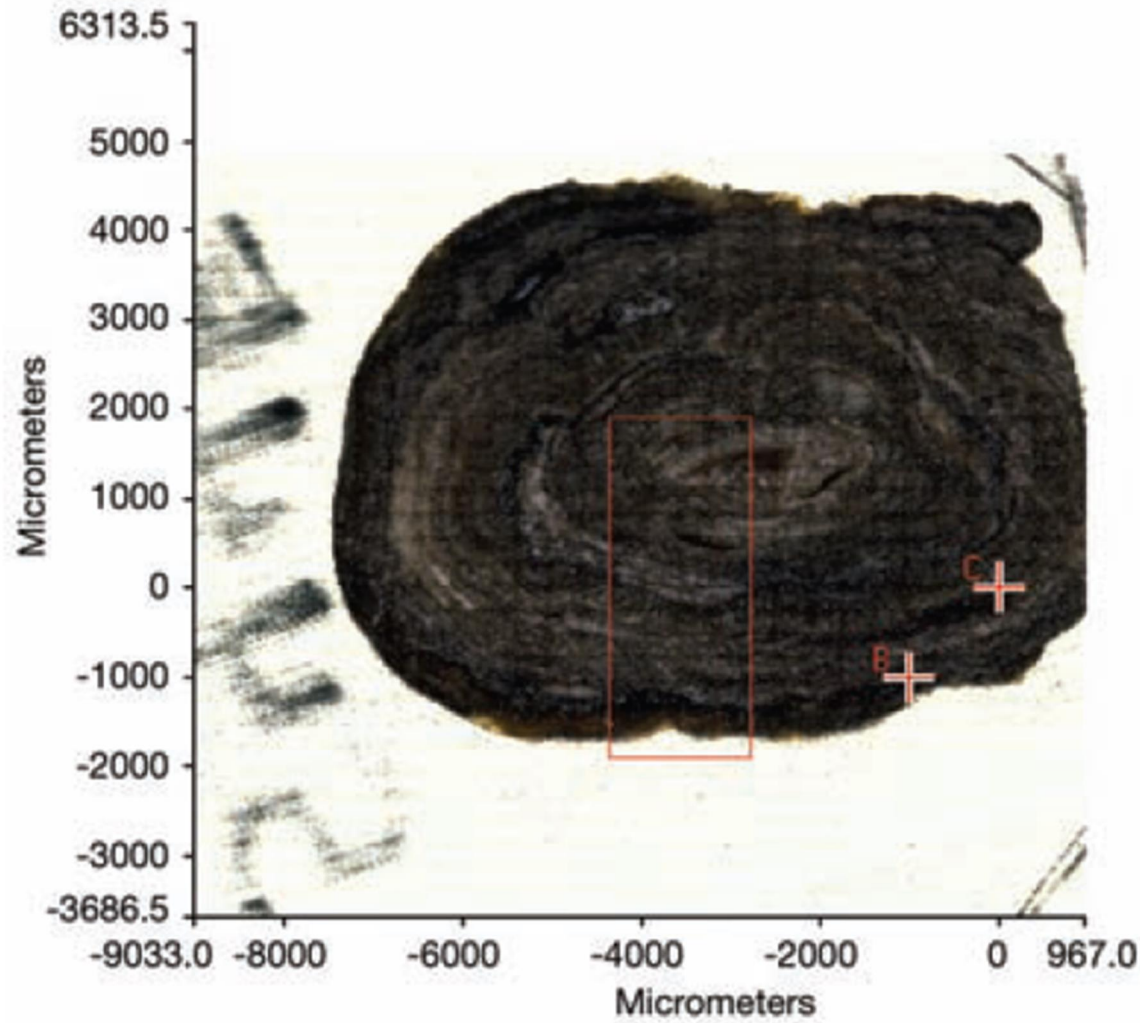
Infrarotmikroskopie





colonic mucosa

Klassifizierung der Nierensteine mit Hilfe der Infrarotspektroskopie



Spektrale Abbildung: Räumliche Verteilung der Komponenten

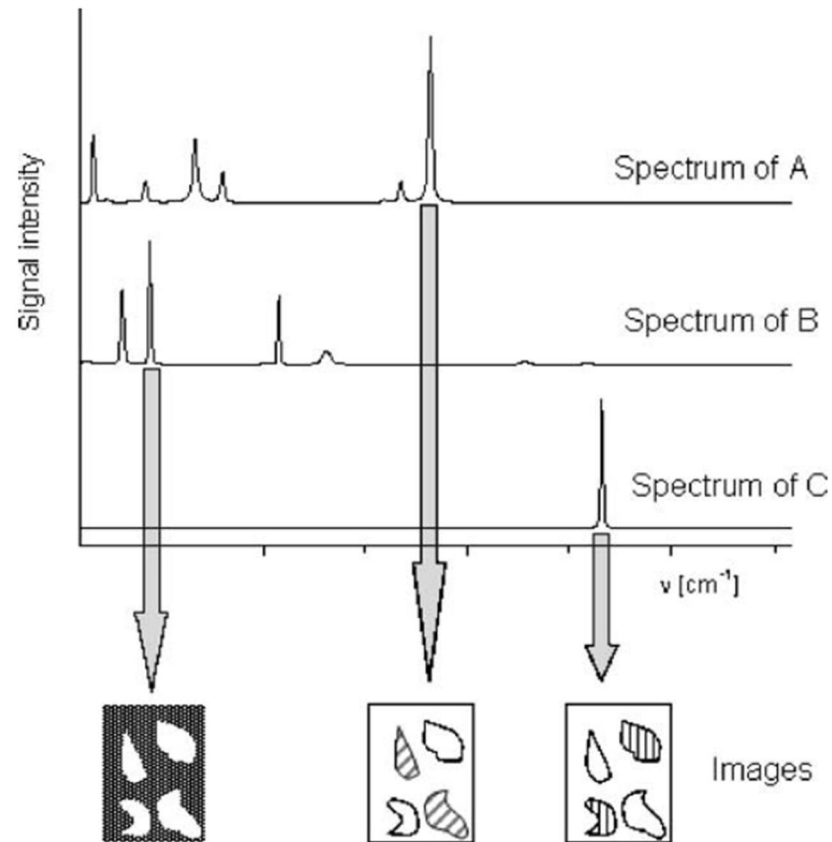
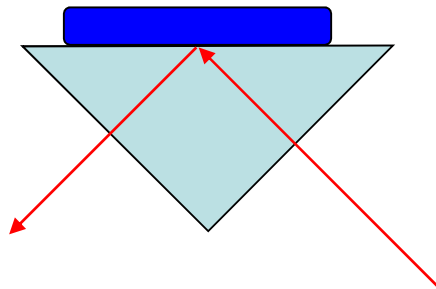
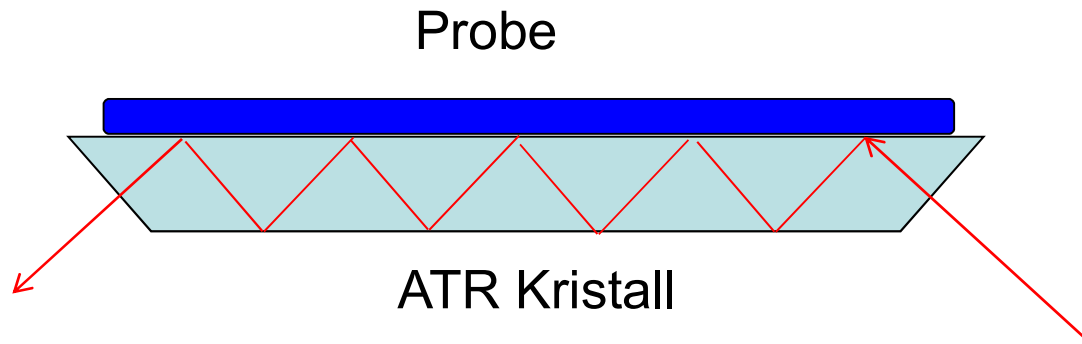


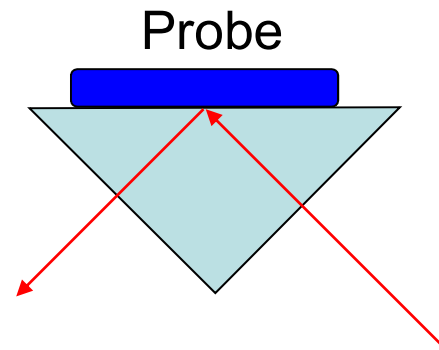
Fig. 6. The principle of vibrational spectroscopic imaging.

ATR Technik (Abgeschwächte Totalreflexion)



ATR Technik

Vorbereitung der Probe ist einfach



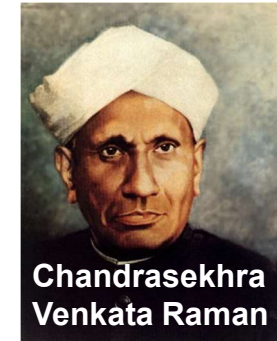
Lichtstreuung

Rayleigh

$$\lambda_{\text{gestreut}} = \lambda_{\text{beleuchtung}}$$

Raman

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



Raman-Streuung:

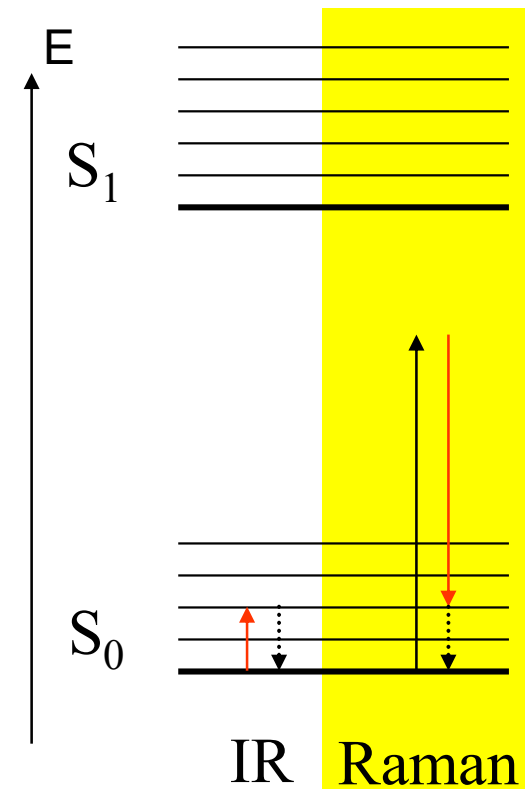
$$\lambda_{\text{gestreut}} \neq \lambda_{\text{beleuchtung}} \\ \Rightarrow f_{\text{gestreut}} \neq f_{\text{beleuchtung}}$$

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

Was passierte mit der Energie?

Molekülschwingungen (s. IR)

Sehr schwach



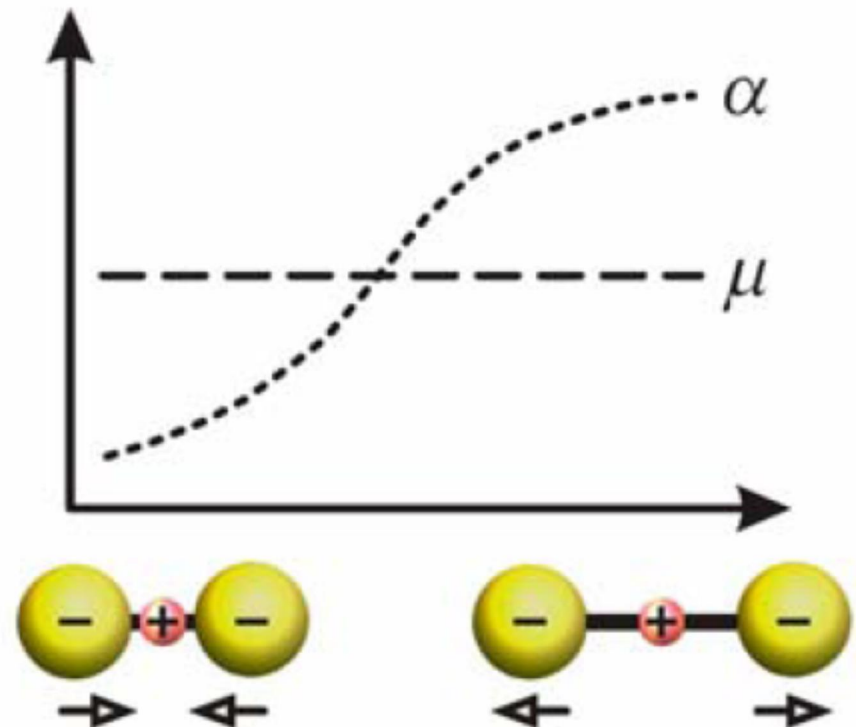
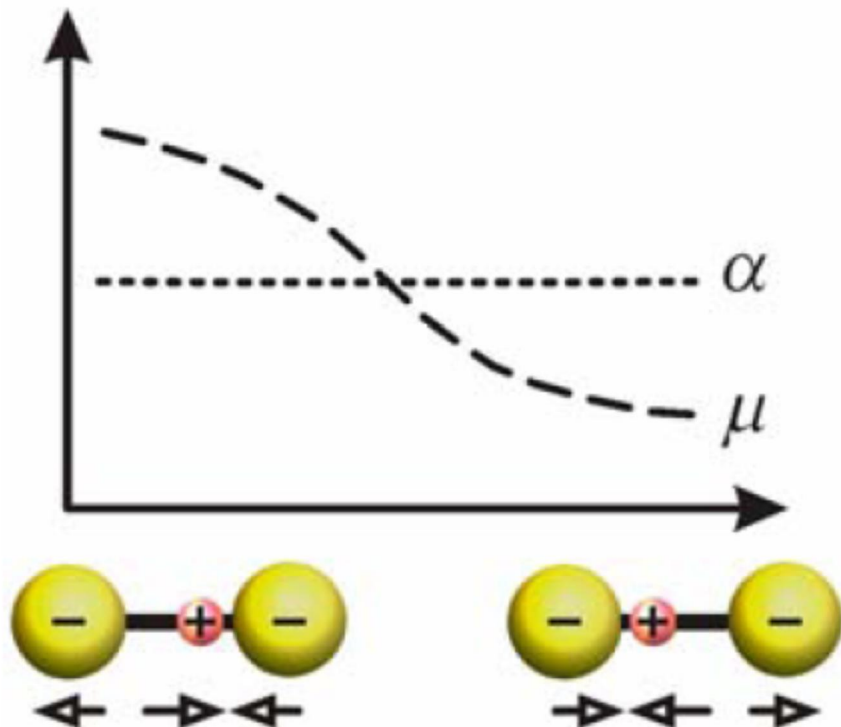
IR und Raman

- Dipolmoment (μ)

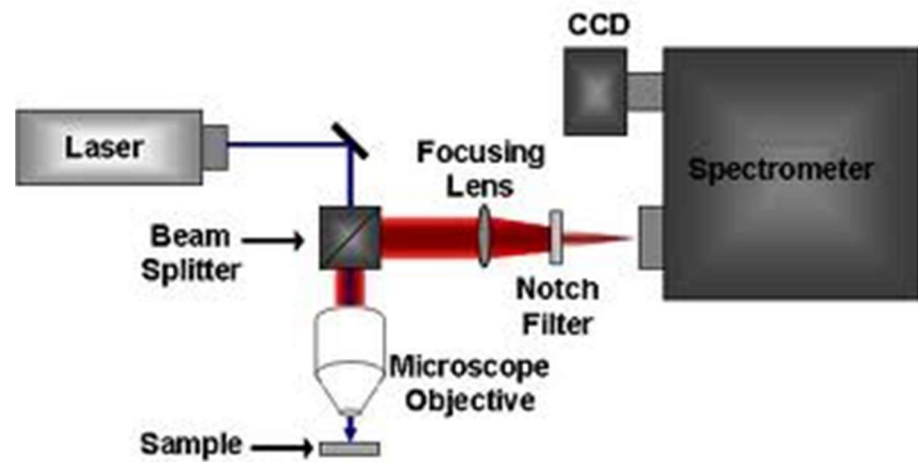
- Polarisierbarkeit (α)

antisymmetrische Valenzschwingung

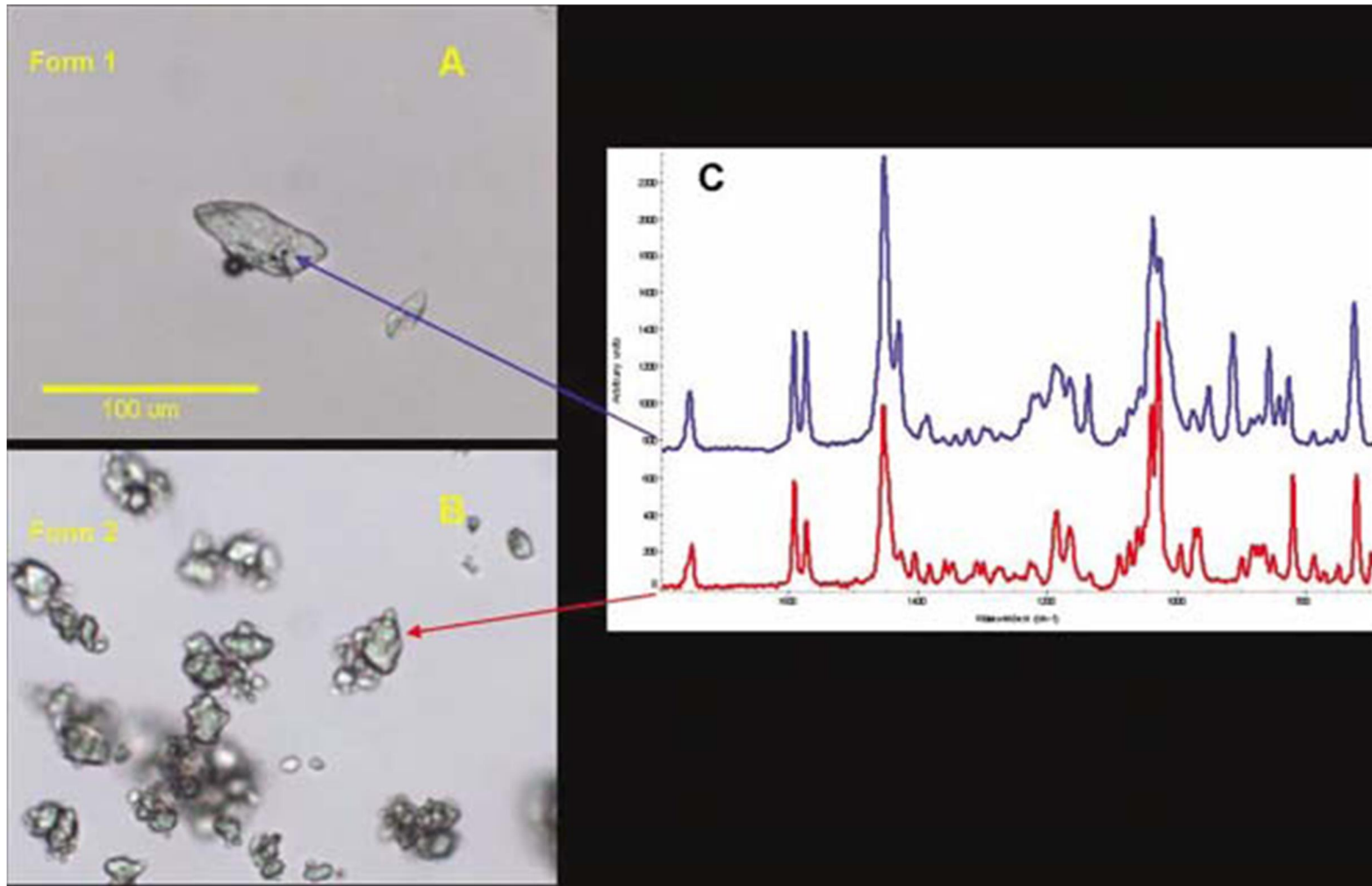
symmetrische Valenzschwingung



Raman-Spektroskop



Pharmazeutische Anwendung



Tragbares Raman Spektrometer für Stoffidentifizierung

