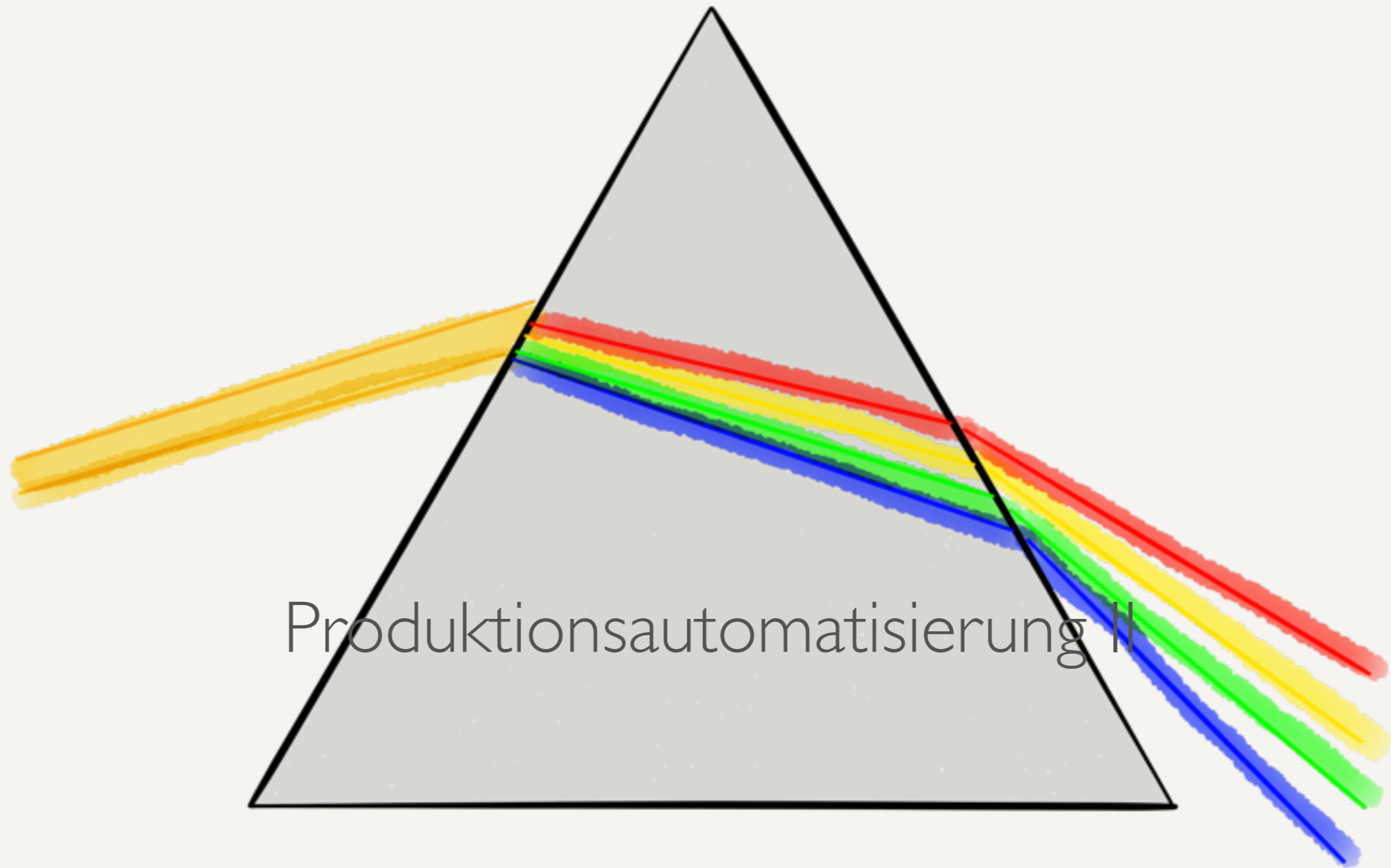


Photonik

Technische Nutzung von Licht

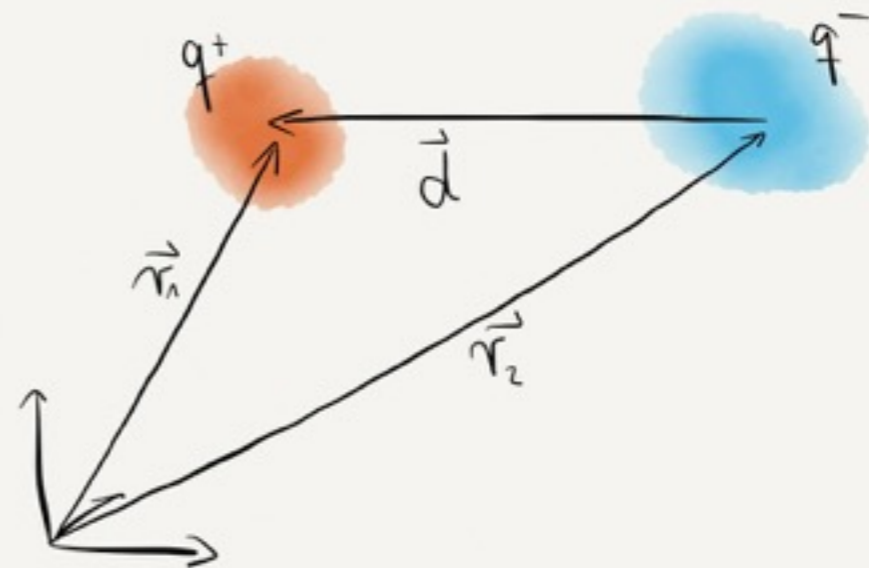


IR-Spektroskopie

Dipolmoment

- Räumlich getrennte positive und elektrische Ladungen haben zusammen ein Dipolmoment.
- Eine Molekül hat ein Dipolmoment, wenn die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen nicht zusammen fallen.

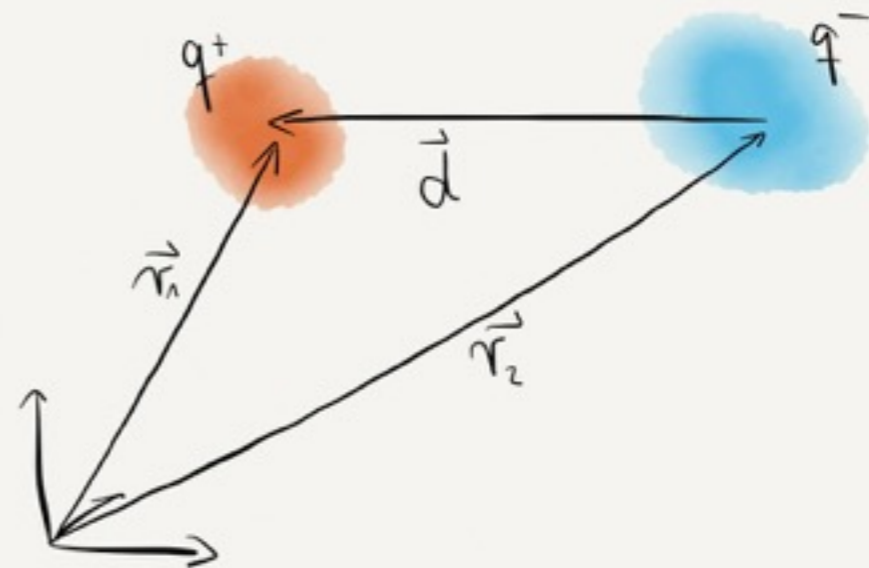
$$\mathbf{p} = q \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$$
$$= q \cdot \mathbf{d}$$



Dipolmoment

$$\mathbf{p} = q \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$$
$$= q \cdot \mathbf{d}$$

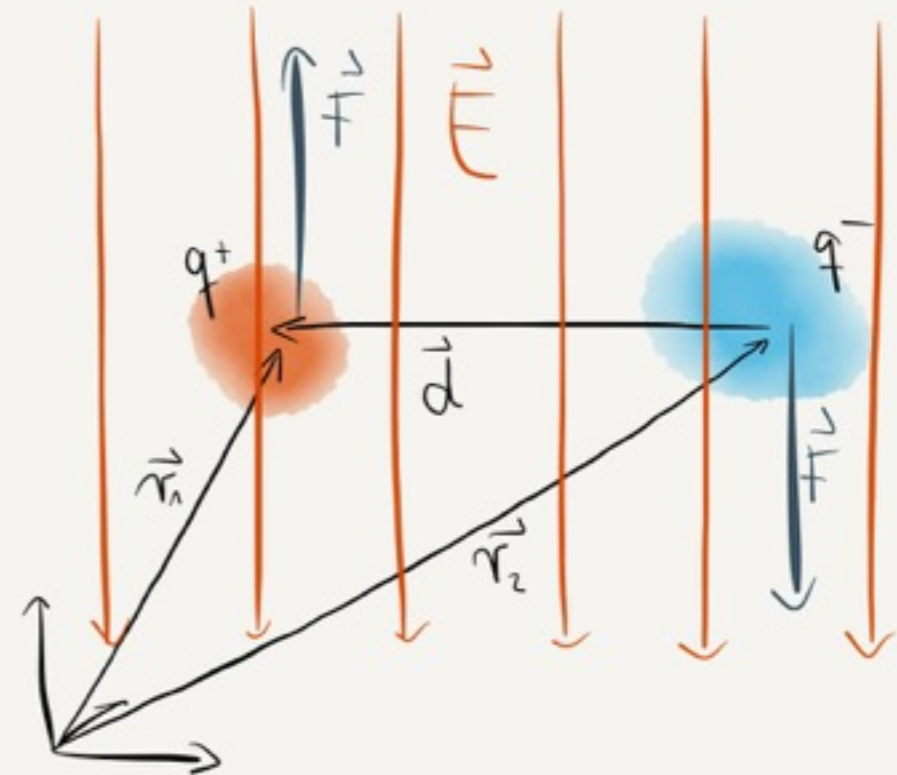
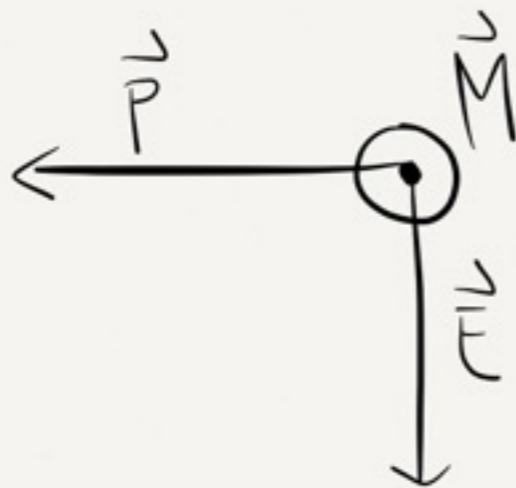
- Berechnen Sie das Dipolmoment zweier Elementarladungen im Abstand von 0.1nm.



Dipolmoment

- Ein elektrisches Feld übt ein (Dreh)moment auf den Dipol aus.

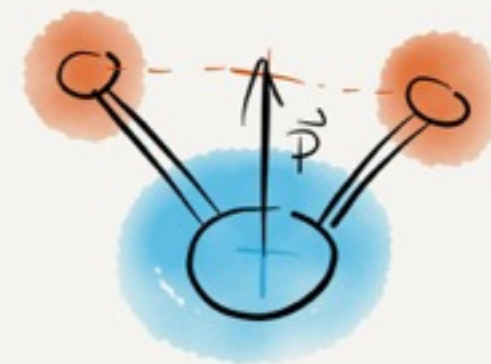
$$\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$
$$= q \cdot \mathbf{d} \times \mathbf{E}$$



Dipolmoment

- Atome mit höherer Elektronegativität ziehen die Elektronenpaare polarer Bindungen zu sich heran.
- Die Atome sind mit Partialladungen versehen.
- Der Ladungsschwerpunkt verschiebt sich.
- Bei asymmetrischen Molekülen kann ein permanenter Dipol übrig bleiben.

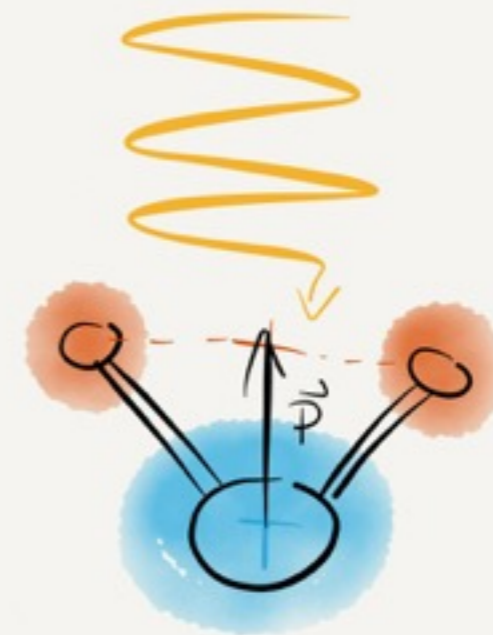
Wasser (H_2O) mit permanentem elektrischen Dipol



Dipolmoment

- Bei einem zeitlich periodischen elektrischen Feld wird also das Molekül durch die Kraft des Moments hin- und hergeschüttelt.
- So kommt es zur Wechselwirkung zwischen den Rotations- und Schwingungsfreiheitsgraden des Moleküls und der elektromagnetischen Welle.
- Schwingungen und Rotationen des Moleküls können an- und abgeregt werden. Es wird Energie zwischen Feld und Schwingung ausgetauscht.

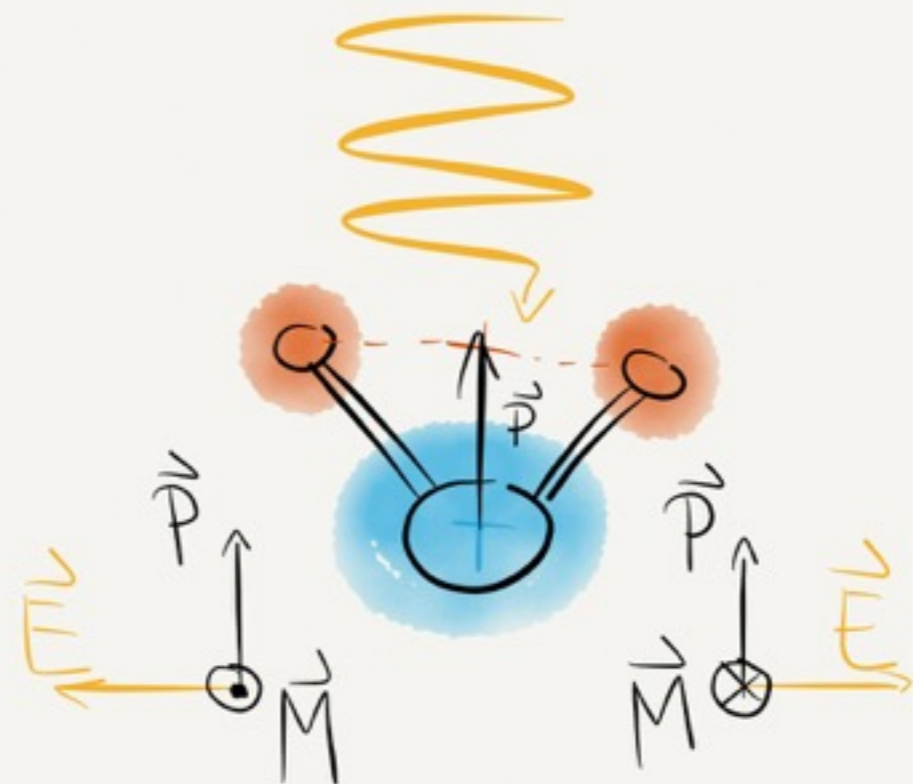
Wasser (H_2O) mit permanentem elektrischen Dipol



Dipolmoment

- Bei einem zeitlich periodischen elektrischen Feld wird also das Molekül durch die Kraft des Moments hin- und hergeschüttelt.
- So kommt es zur Wechselwirkung zwischen den Rotations- und Schwingungsfreiheitsgraden des Moleküls und der elektromagnetischen Welle.
- Schwingungen und Rotationen des Moleküls können an- und abgeregt werden. Es wird Energie zwischen Feld und Schwingung ausgetauscht.

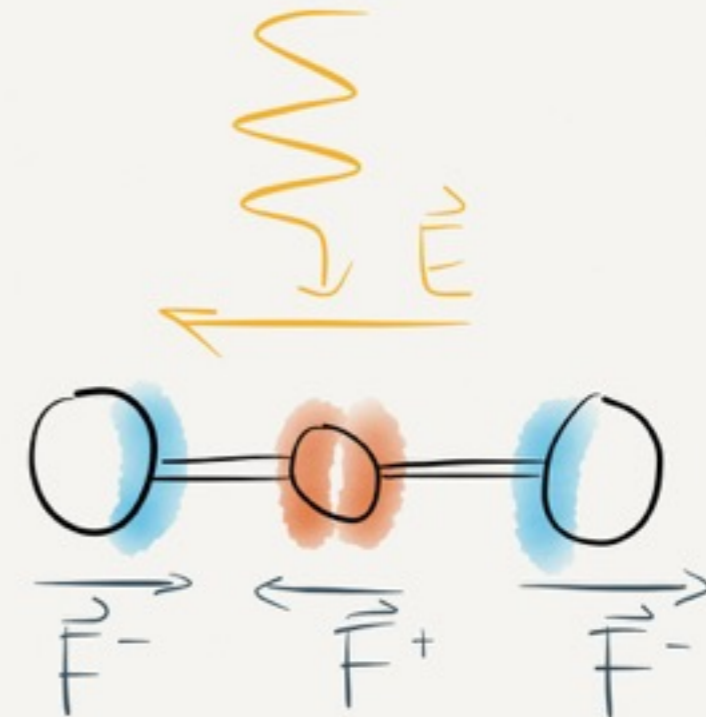
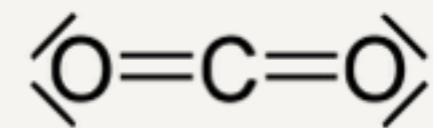
Wasser (H_2O) mit permanentem elektrischen Dipol



Dynamisches Dipolmoment

- Bei Molekülen ohne Dipolmoment kann eine elektromagnetische Welle ein dynamisches Dipolmoment induzieren.
- Auch hier kommt es zur Wechselwirkung zwischen der Welle und den Schwingungen.
- Energie kann ausgetauscht werden.

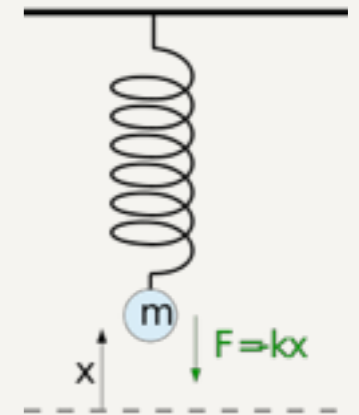
Kohlendioxid



Molekülschwingungen und -rotation

Harmonischer Oszillator:

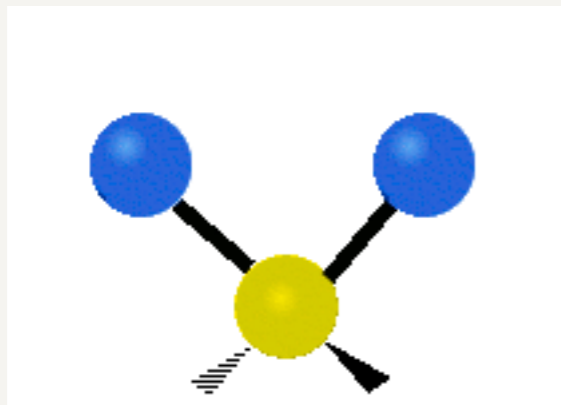
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



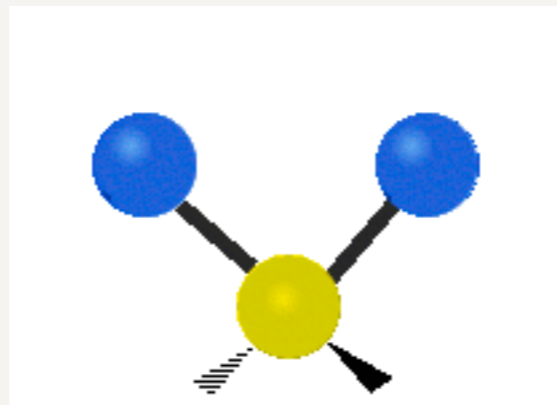
- Die Schwingungsfrequenzen hängen von der Stärke der Bindung und den Massen der schwingenden Atome ab.
- Die Rotationsenergie hängt auch von der Masse des Moleküls ab.
- Bei größeren Molekülen können Molekülgruppen gegen den Rest schwingen

- **Masse:** Bindungen mit Wasserstoff-Atomen haben höhere Frequenzen als Bindungen mit schweren Atomen (C, N, O).
- **Federkonstante:** Dreifach-Bindungen haben höhere Frequenzen als zweifach-Bindungen als einfach-Bindungen.

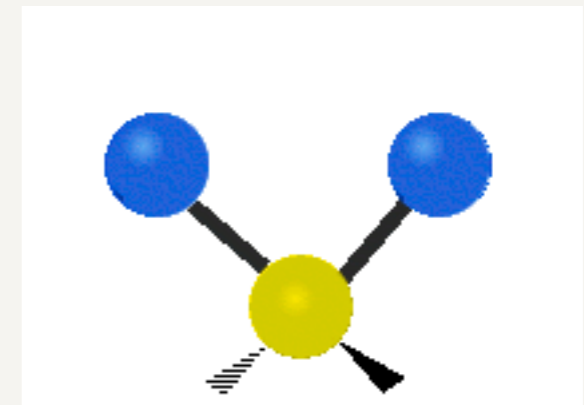
Molekülschwingungen und -rotation



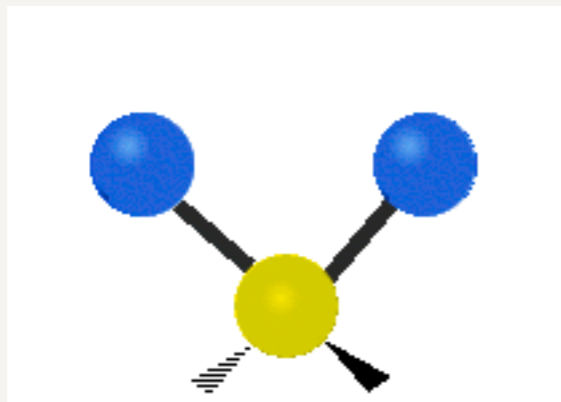
Symmetrische
Streckschwingung



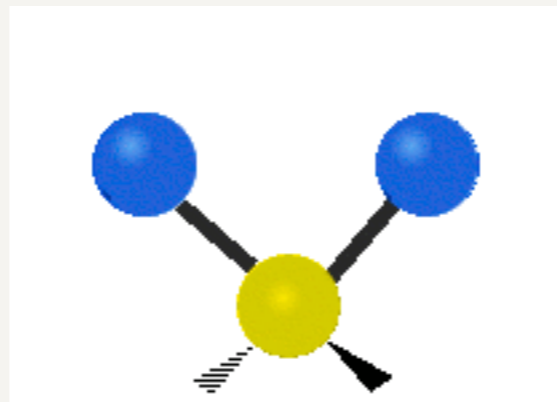
Asymmetrische
Streckschwingung



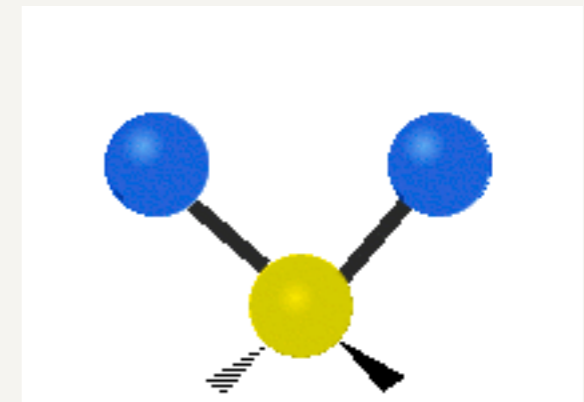
Schaukel-
schwingung



Scher-
schwingung

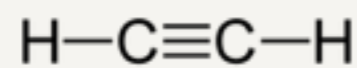


Dreh-
schwingung

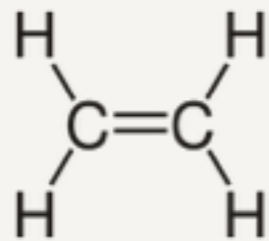


Wipp-
schwingung

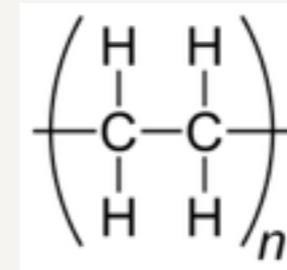
Molekülschwingungen und -rotation



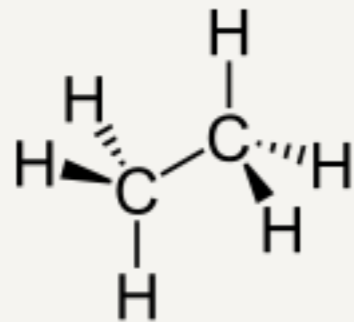
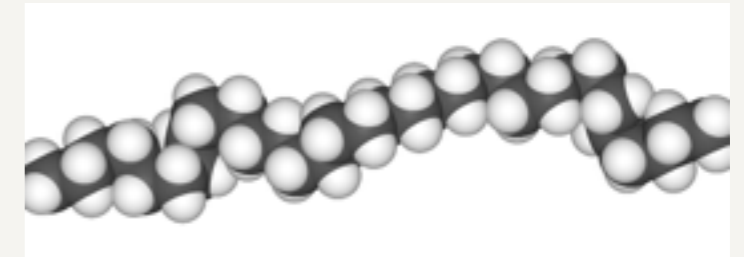
Ethin



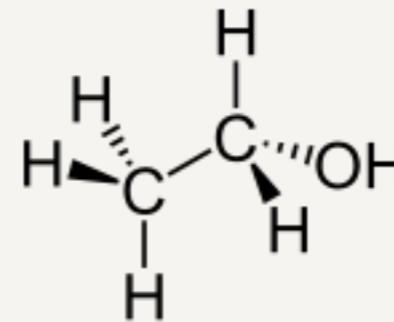
Ethen (Ethylen)



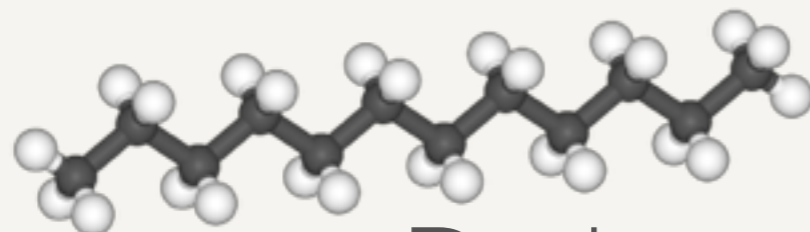
Polyethylen



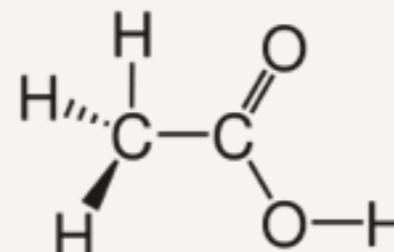
Ethan



Ethanol



n-Dodecan



Essigsäure

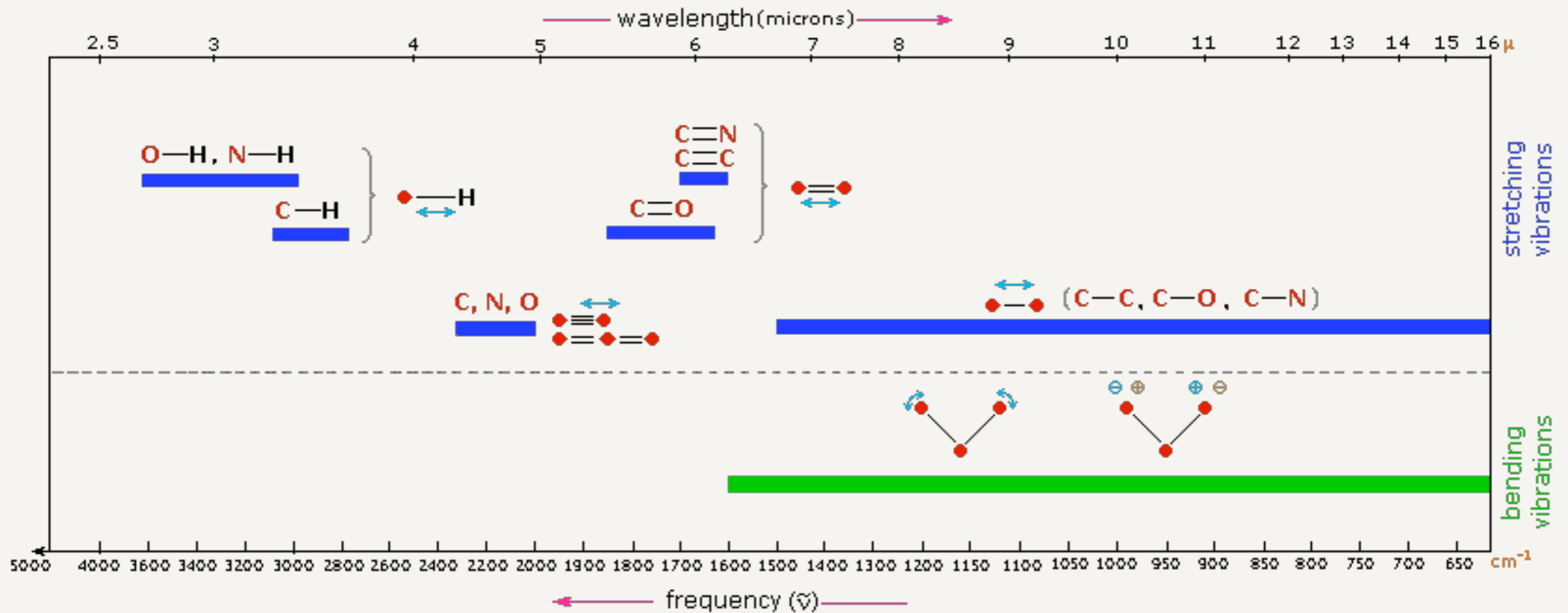
Einheit Wellenzahl

Formel	Einheit
$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$	cm^{-1}

- Reziproke Zentimeter oder Wellenzahl ist der Kehrwert der Wellenlänge und eine praktische Einheit für Schwingungen.
- Proportional zur Frequenz und damit Energie.
- In der IR-Spektroskopie gebräuchliche Einheit.
- Bedeutung: Wie viele Schwingungen werden pro Zentimeter ausgeführt.

Wellenzahl cm^{-1}	Wellenlänge μm	Frequenz THz
10000	1	300
1000	10	30
100	100	3
10	1000	0.3

Spektrum der Schwingungen



<http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Spectrpy/InfraRed/infrared.htm#ir1>

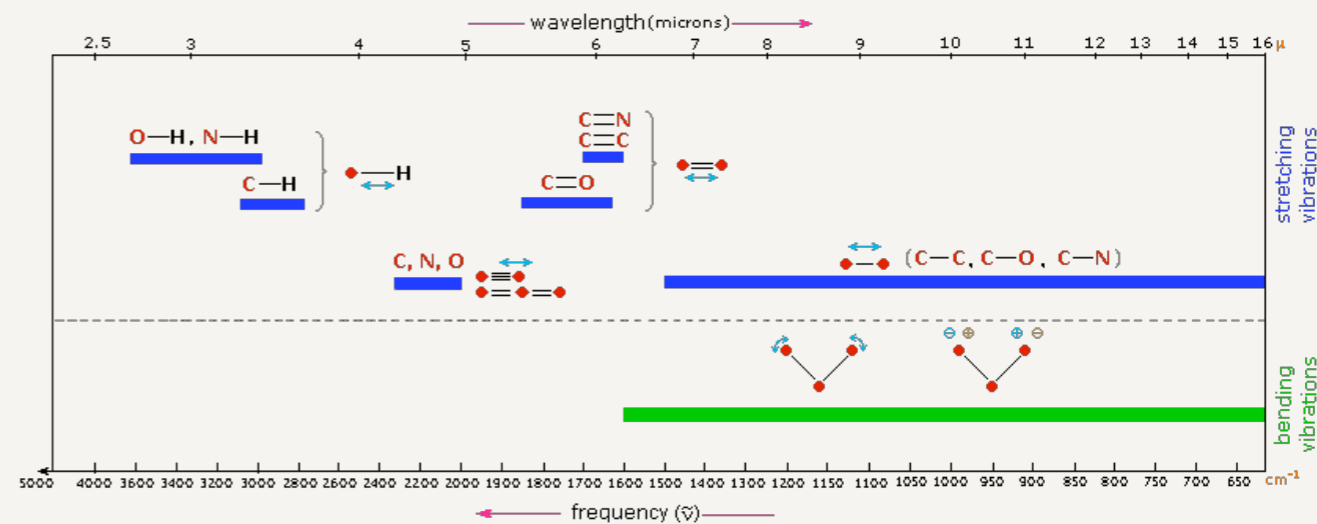
Frequenzbereiche*

Nahes Infrarot NIR	Mittleres Infrarot MIR	Fernes Infrarot FIR
0.8 - 2.5 μm	2.5 - 25 μm	25 - 1000 μm
12500 - 4000 cm^{-1}	4000 - 400 cm^{-1}	400 - 10 cm^{-1}
Obertöne von Molekülschwingungen	Molekülschwingungen Gitterschwingungen	Molekülrotation

* Es gibt keine offizielle Einteilung der IR-Bereiche. Diverse Quellen legen die Grenzen leicht anders.

Aufgabe

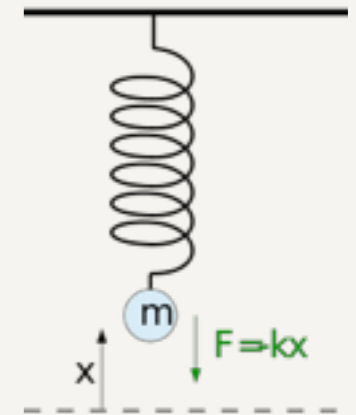
- Mikrowellen arbeiten typischerweise bei 2.45 GHz. Wieviele inverse Zentimeter sind das? Können damit die Streckerschwingungen, die Biegeschwingungen oder die Rotationen von Wasser angeregt werden? Welchen Nachteil hat das gefrorene Gargut?



Molekülschwingungen und -rotation

Harmonischer Oszillator:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



- Berechnen Sie die Federkonstante der Doppelbindung von Kohlenstoff.
- Wie ändert sich das bei einer Dreifach-Bindung?
- **Masse:** Bindungen mit Wasserstoff-Atomen haben höhere Frequenzen als Bindungen mit schweren Atomen (C, N, O).
- **Federkonstante:** Dreifach-Bindungen haben höhere Frequenzen als zweifach-Bindungen als einfach-Bindungen.

Transmissionsmessung

- Referenzmessung ohne Probe gibt Spektrum der Lichtquelle:

$$I_0(\lambda)$$

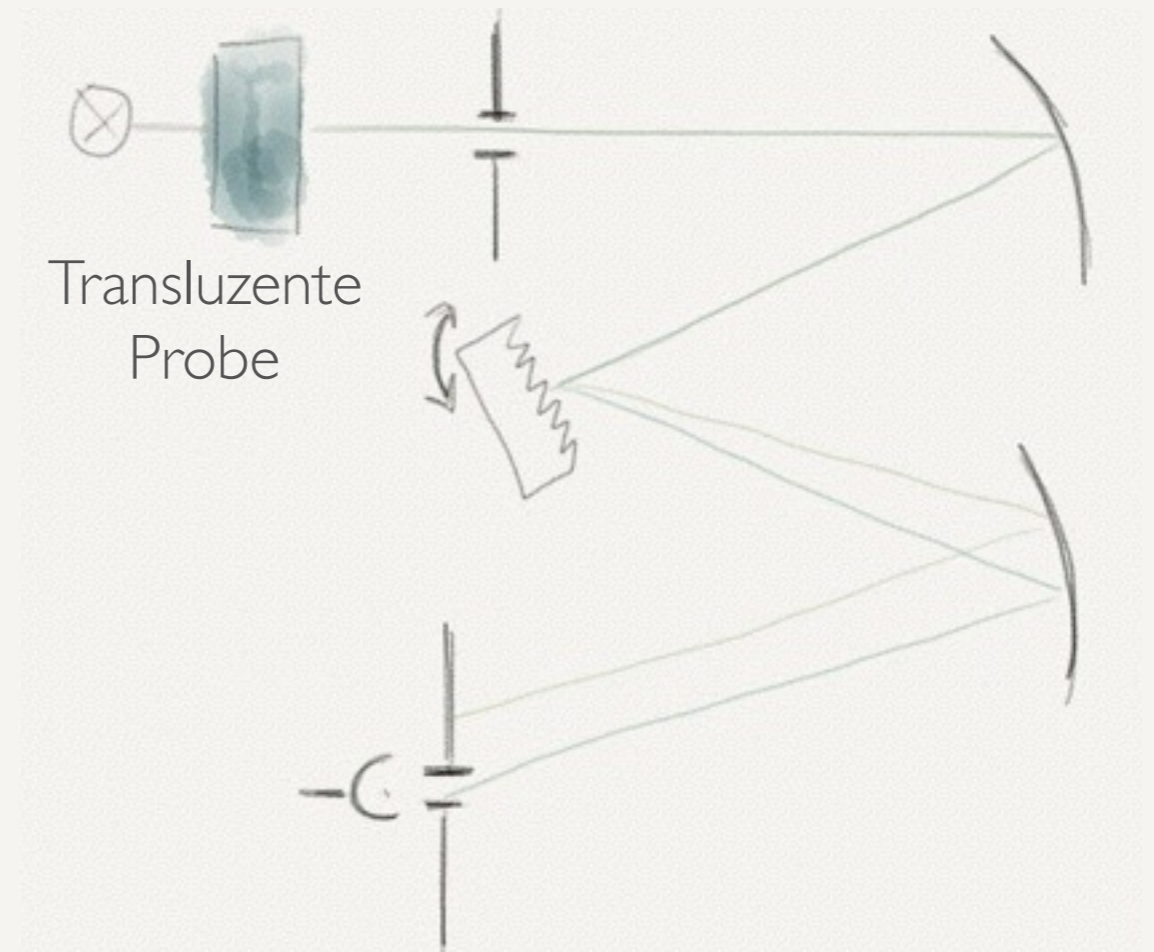
- Transmissionsmessung durch die Probe hindurch:

$$I(\lambda)$$

- Ergebnis: **Transmission**

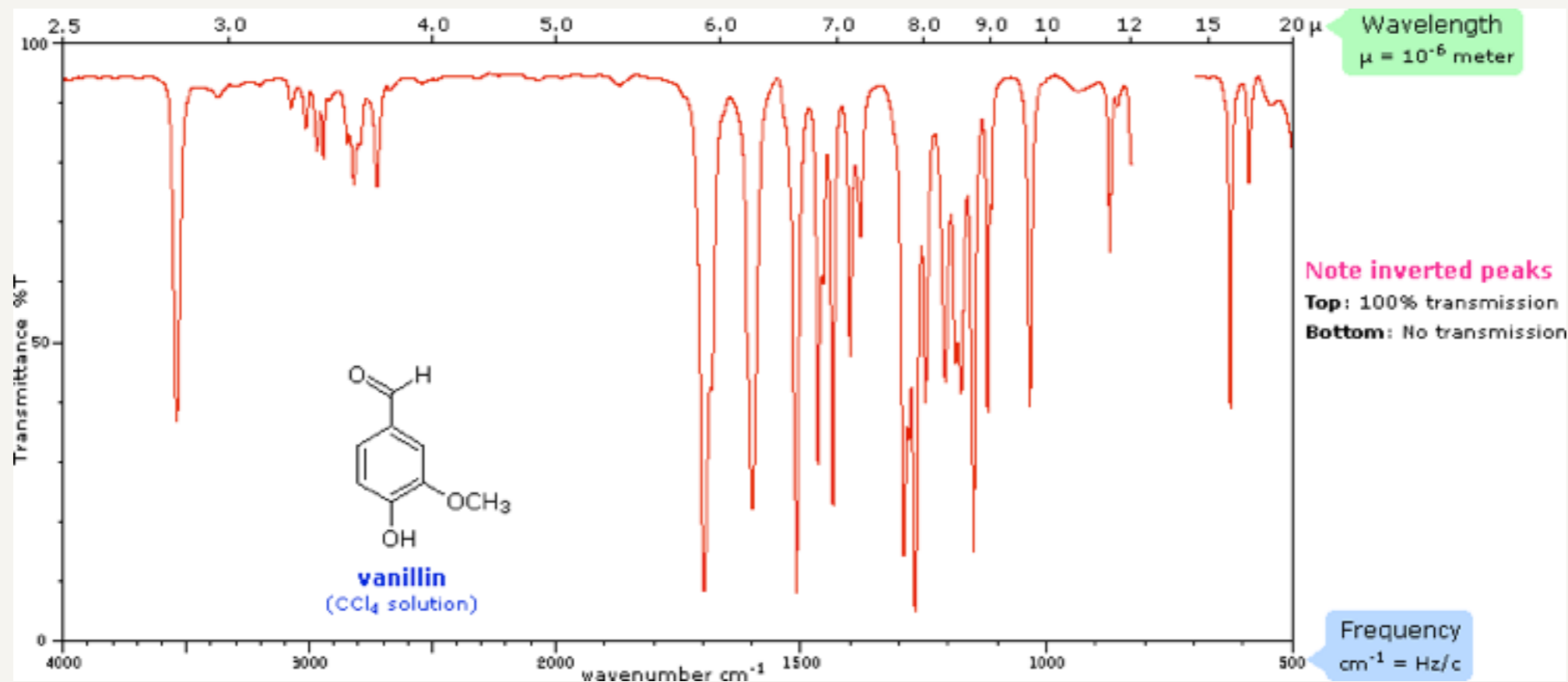
$$T = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

- Später Berücksichtigung der Grenzflächen: Reintransmission



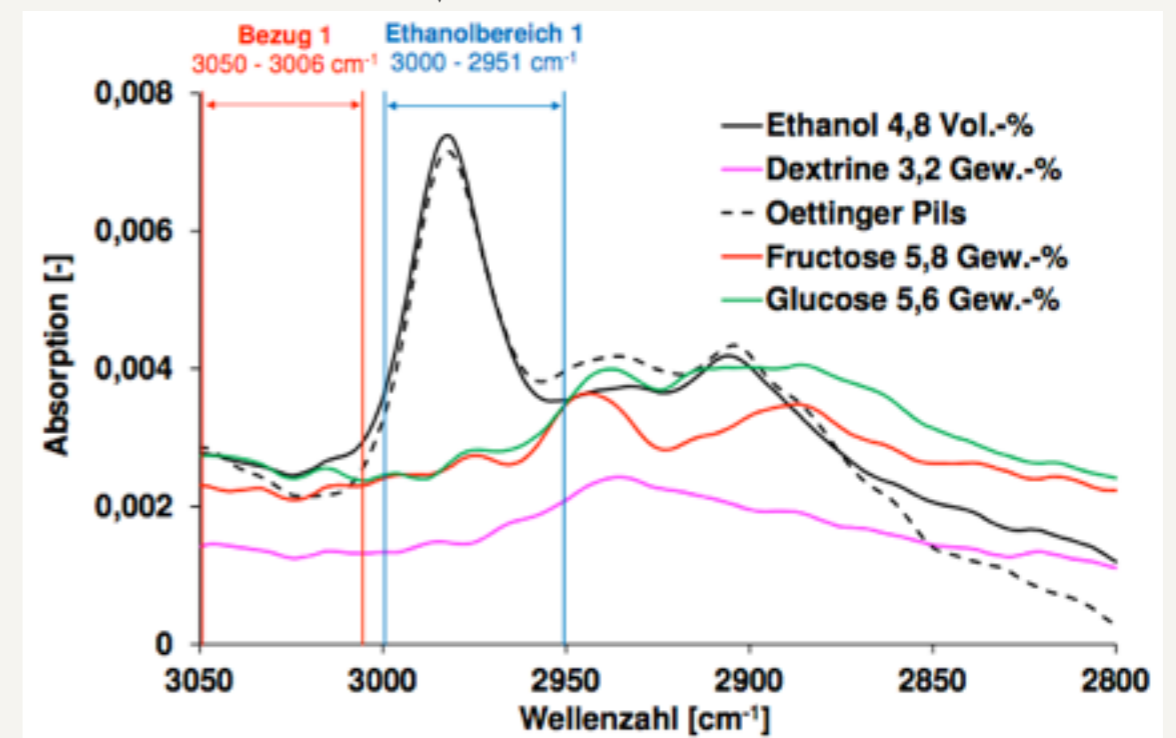
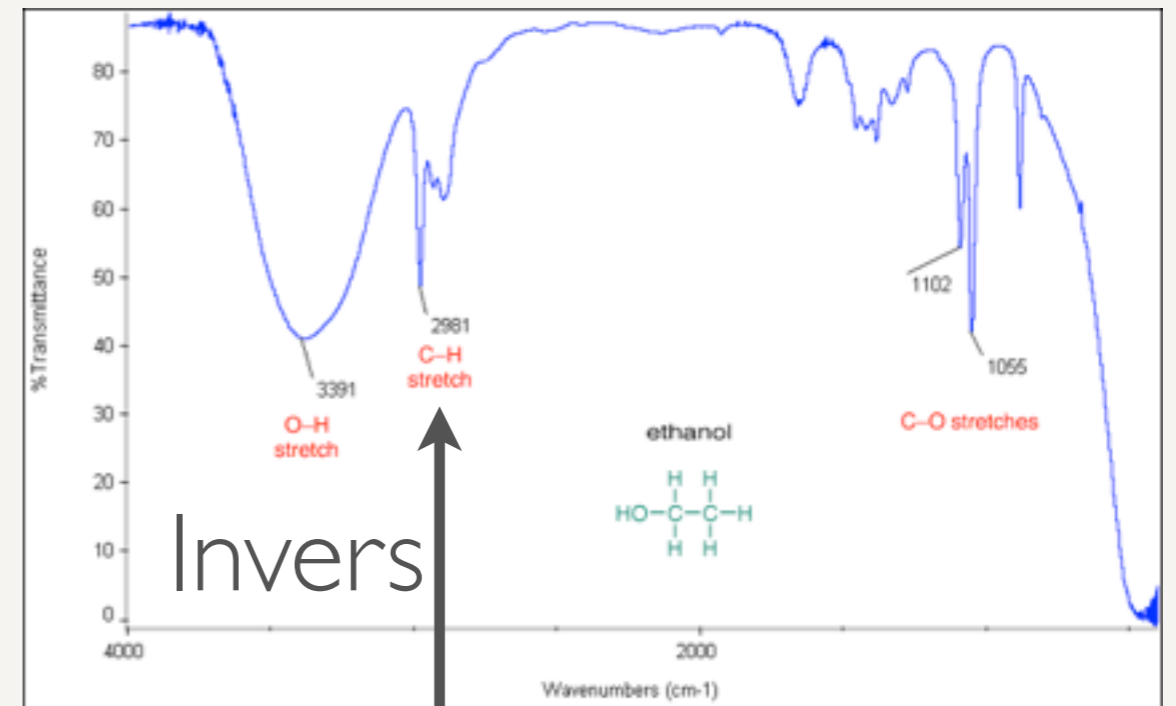
IR-Spektroskopie

- Wenn eine elektromagnetische Welle eine Schwingung anregt geht Energie von der Welle in das Molekül, d.h. IR-Licht wird absorbiert.
- In einem Absorptionsspektrum zeigen sich dann die verschiedenen Schwingungen als Absorptions-Banden.



Analyse der IR-Spektren

- Vergleich der gemessenen Spektren mit tabellierten Daten (Spektren-Datenbank).
- In definierten Situationen: Vergleich verschiedener Spektralbereiche (Banden) miteinander.
- Beim Bier: In-line-Messung des Alkoholgehalts während des Gärungsprozesses.



Laser-Doppler-Messsysteme

Laser-Doppler-System

- Laserstrahl wird auf ein sich bewegendes Objekt gerichtet.
- Durch den Doppler-Effekt kommt es zur Frequenzverschiebung des reflektierten Lichts.
- Wegen der geringen Frequenzänderung wird Interferenz genutzt, und das



Dopplereffekt

$$f(\mathbf{v}) = f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_L}{c} \right)$$

Quelle ruht, Beobachter bewegt.

$$f(\mathbf{v}) = \frac{f_0}{\left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_L}{c} \right)}$$

Beobachter ruht, Quelle bewegt.

Laser-Doppler-System

- Berechnen Sie den Doppler-Effekt bei einem Krankenwagen, der mit 60 km/h an Ihnen vorbeifährt. Wie verschiebt sich die Frequenz des Blaulichts?



Einfallendes Licht

Reflektiertes Licht

Dopplereffekt

$$f(\mathbf{v}) = f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_L}{c} \right)$$

Quelle ruht, Beobachter bewegt.

$$f(\mathbf{v}) = \frac{f_0}{\left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_L}{c} \right)}$$

Beobachter ruht, Quelle bewegt.

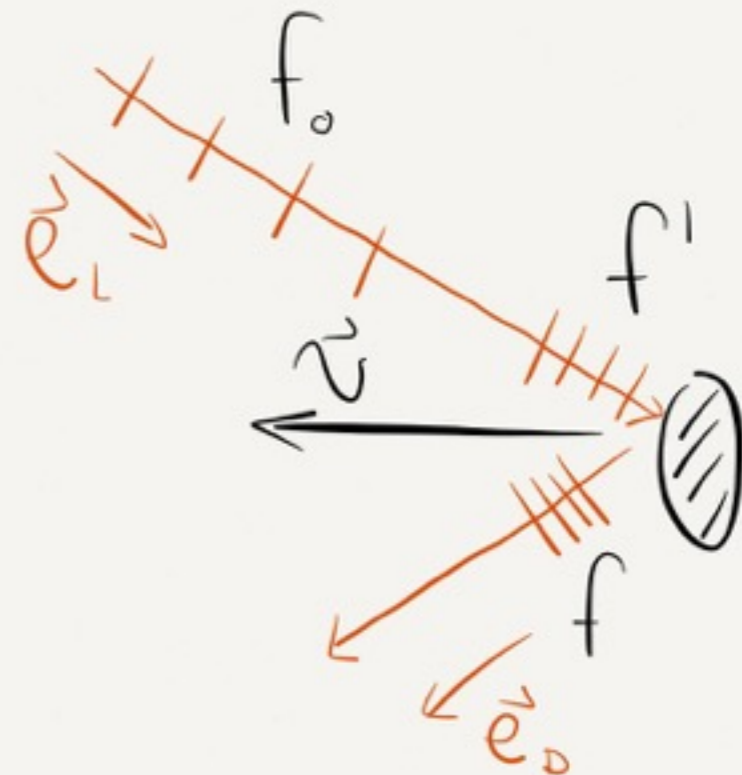
Laser-Doppler-System

- Doppler-Effekt wird zweimal angewandt: Quelle - Objekt und Objekt - Detektor.
- Wegen der geringen Frequenzänderung wird Interferenz genutzt, und das Schwebungssignal

$$\Delta f = f - f_0$$

wird gemessen.

- Es wird zwischen Ein-Strahl- und Zwei-Strahl-Systemen unterschieden.



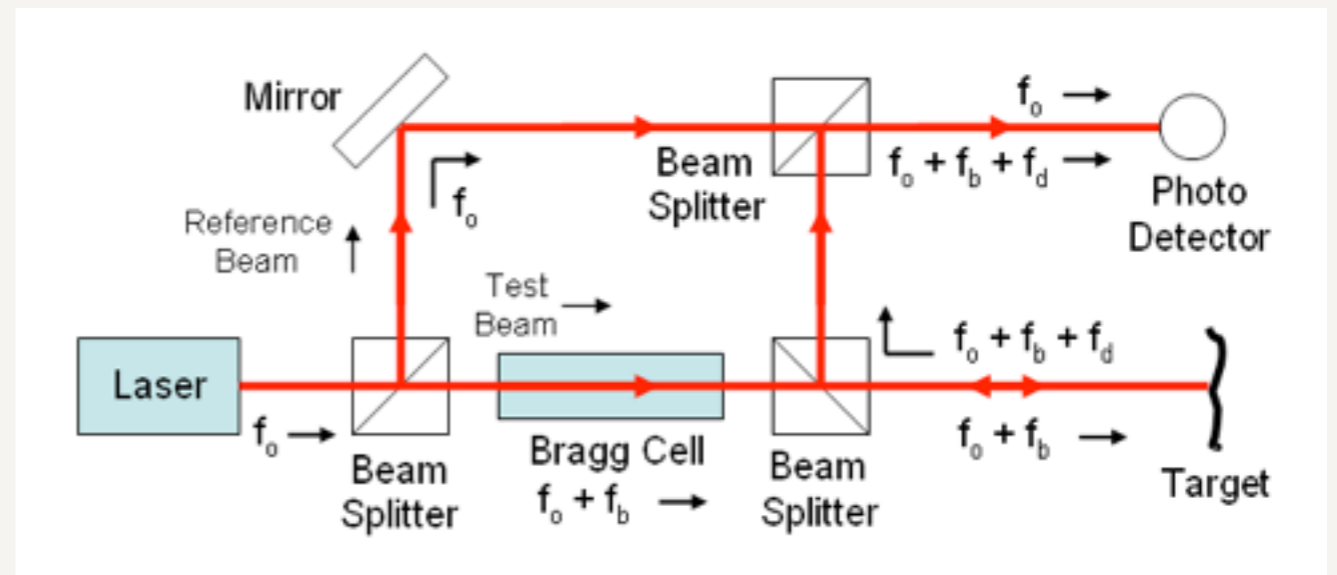
$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{v}) &= f_0 \frac{\left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_L}{c}\right)}{\left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_D}{c}\right)} \\
 &\approx f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_L}{c} + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_D}{c}\right) \\
 &= f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot (\mathbf{e}_L - \mathbf{e}_D)\right)
 \end{aligned}$$

Laser-Doppler-System Ein-Strahl-System

- Der reflektierte Laserstrahl wird mit sich selber interferiert, so dass

$$\mathbf{e}_L = -\mathbf{e}_D$$

- Die Schwebungsfrequenz hängt nur von der Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Laserstrahls ab.
- Ohne Bewegung kein Signal!



$$f(\mathbf{v}) = f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot (\mathbf{e}_L - \mathbf{e}_D) \right)$$

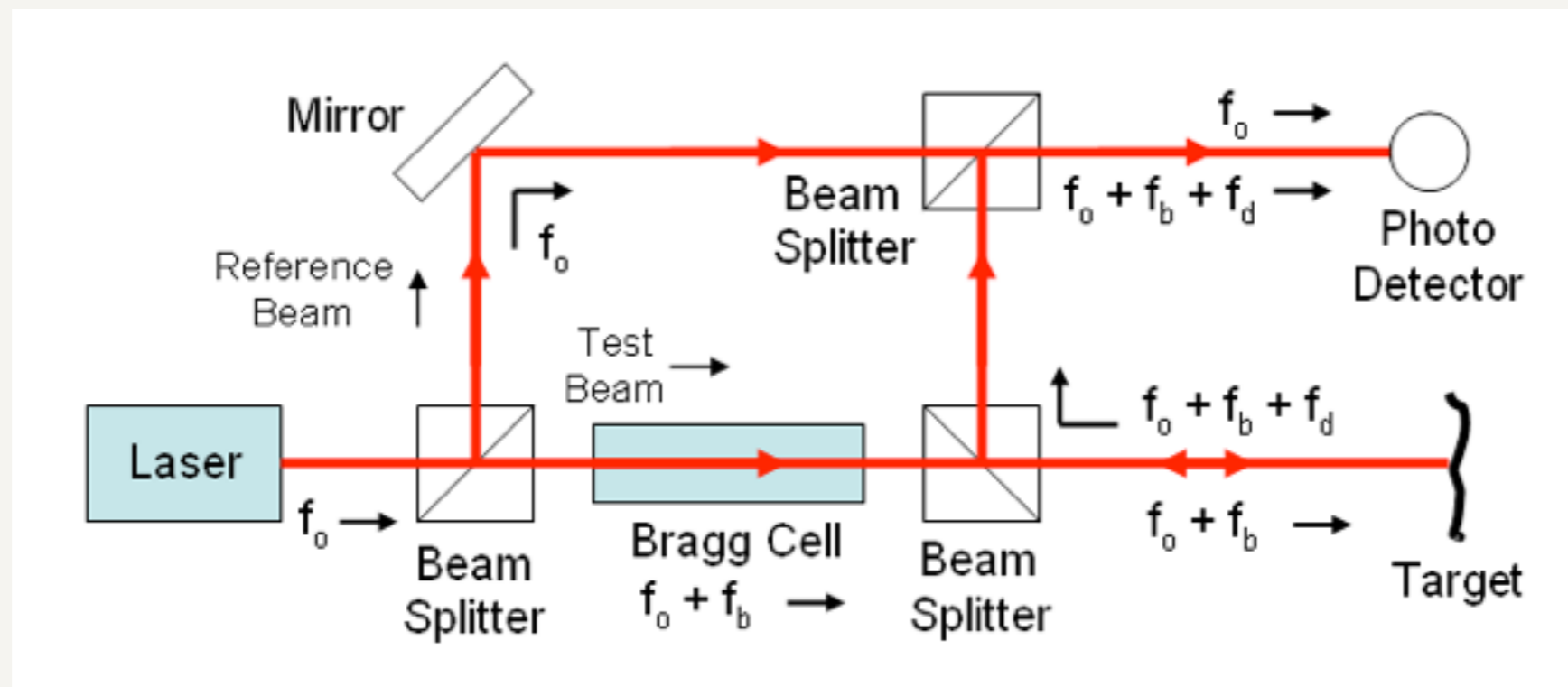
$$= f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot 2\mathbf{e}_L \right)$$

$$= f_0 - \frac{2v_z}{\lambda_0}$$

$$\Rightarrow \Delta f = -\frac{2v_z}{\lambda_0}$$

Laser-Doppler-System Ein-Strahl-System

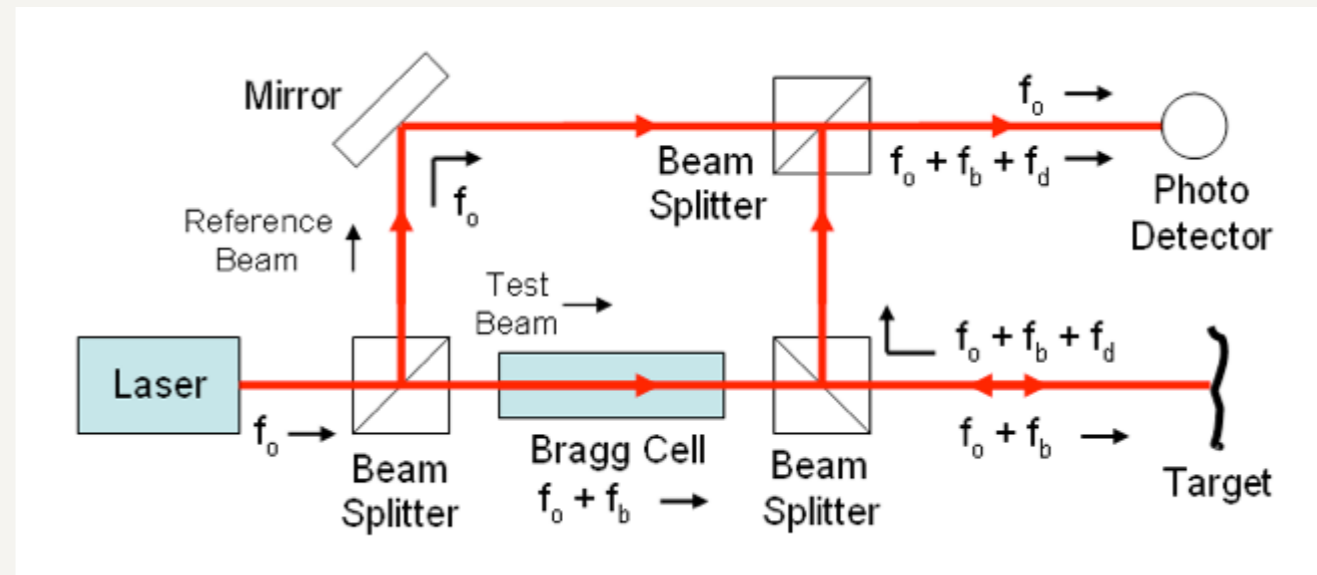
- Die Bragg-Zelle ist ein Akusto-Optischer-Modulator (AOM), der die Frequenz des Lichtes moduliert (Seitenband = $f_0 + \text{typ. } 40\text{MHz}$)
- Damit lässt sich die Richtung des Doppler-Effekts bestimmen, weil die Schwebungsfrequenz dann $f_b \pm f_d$ ist statt nur f_d .



Laser-Doppler-Vibrometer

- Automobilindustrie: in Entwicklung und Fertigung, zur Lokalisierung oder Charakterisierung von Geräusche, Analyse des Schwingungsverhaltens an Komponenten und Fahrzeug
- Akustik: Lautsprecher- und Mikrofon-Design, Schwingungsanalyse von Instrumenten, Ultraschall-Geräte
- Materialprüfung: Schwankung von Hochhäusern oder Brücken, Schwingungsanalyse von Rotorblättern
-
- Geschwindigkeiten bis ± 20 m/s
- Wegauflösung von pm bis m.
- Geschwindigkeitsauflösung bis zu 2,5 nm/s
- obere Grenzfrequenz 20 MHz
- Untere Grenzfrequenz DC

Laser-Doppler-System Ein-Strahl-System



- Beim Vibrometer eines kommerziellen Anbieters ist eine Messauflösung von 2.5 nm/s angegeben. Welcher Doppler-Frequenz entspricht dies?

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{v}) &= f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot (\mathbf{e}_L - \mathbf{e}_D) \right) \\
 &= f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot 2\mathbf{e}_L \right) \\
 &= f_0 - \frac{2v_z}{\lambda_0} \\
 \Rightarrow \Delta f &= -\frac{2v_z}{\lambda_0}
 \end{aligned}$$

Scanning Vibrometer

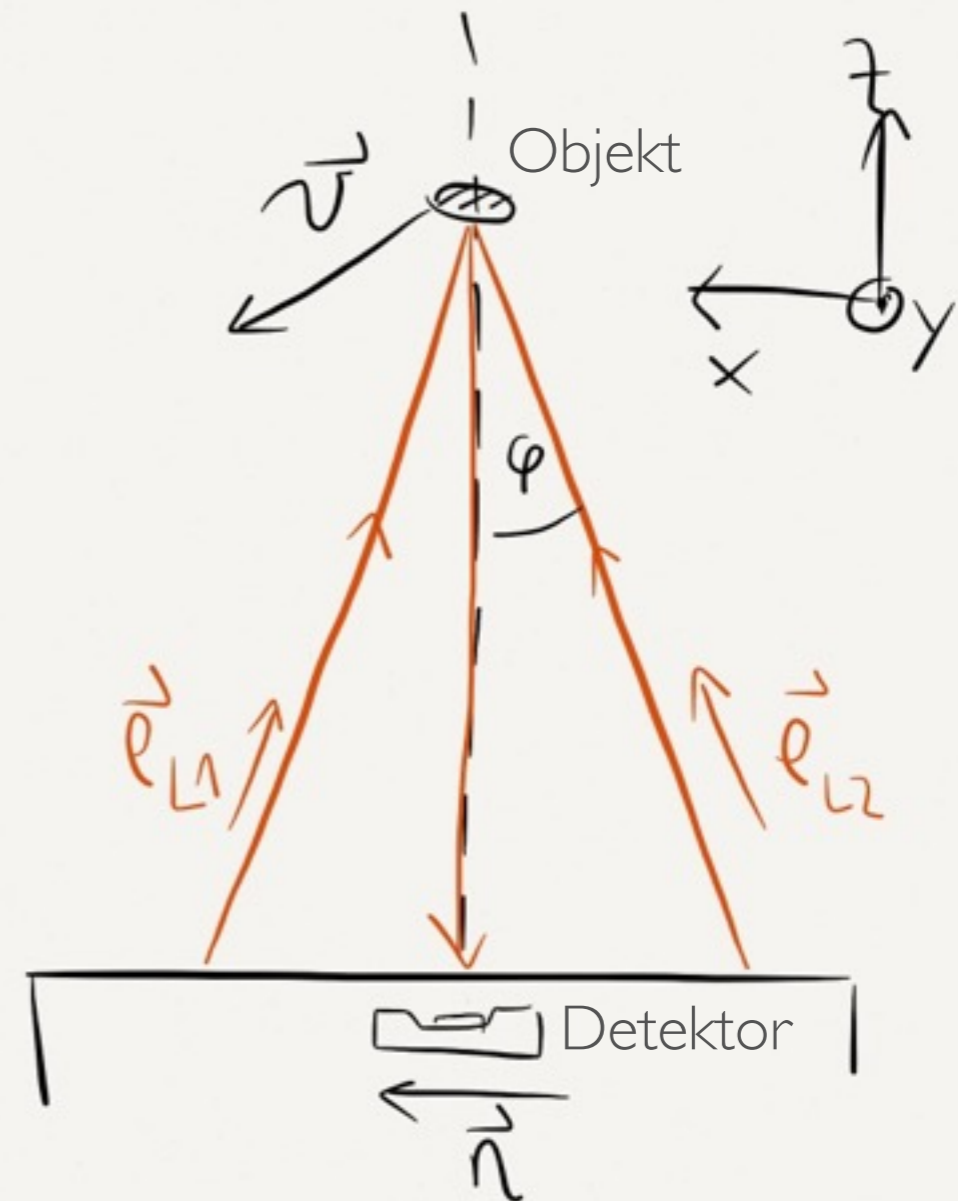
- Der austretende Laserstrahl wird über einen Spiegel ausgekoppelt, der in zwei Raumrichtungen verkippt werden kann.
- Die Verkipfung wird elektronisch und schnell angesteuert.
- Damit kann eine Fläche abgescannt werden.



<http://www.polytec.com/de/loesungen/schwingungen-messen/grundlagen-der-vibrometrie/>

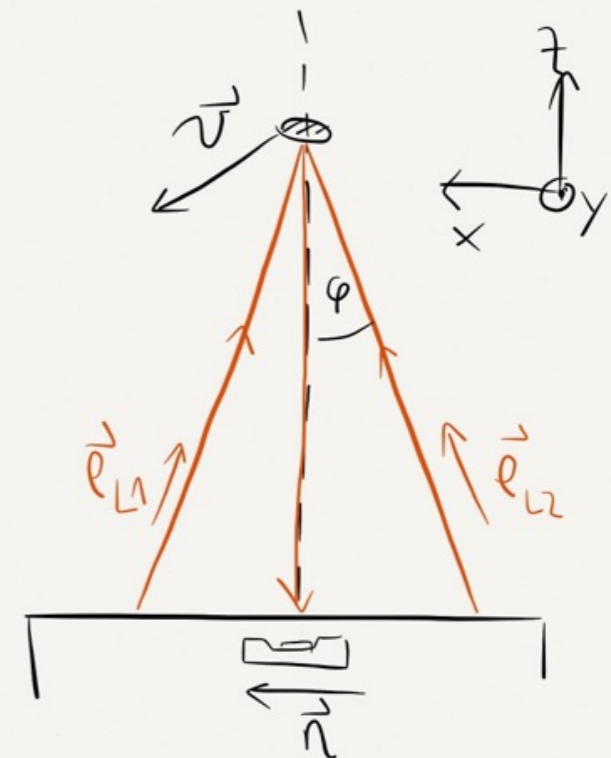
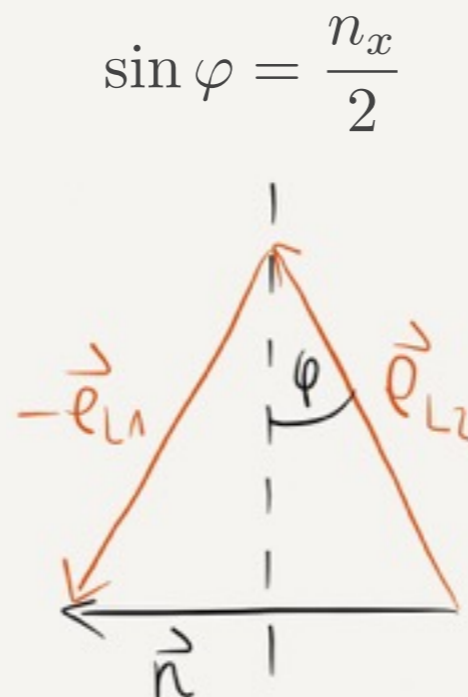
Laser-Doppler-System Zwei-Strahl-System

- Ein Laserstrahl wird in zwei Teile aufgespalten, die unter festem Winkel überlagert werden.
- Wenn sich ein Objekt durch den Schnittpunkt bewegt erfahren die beiden Laserstrahlen zwei unterschiedliche Doppler-Effekte.
- Der Detektor schaut auf den Schnittpunkt und sieht die Schwebungsfrequenz der beiden auf dem Objekt überlagerten Laser.
- Anschaulich: im Schnittpunkt interferieren die Laser, und durch das Streifenmuster wird das Objekt abwechselnd hell und dunkel beleuchtet.

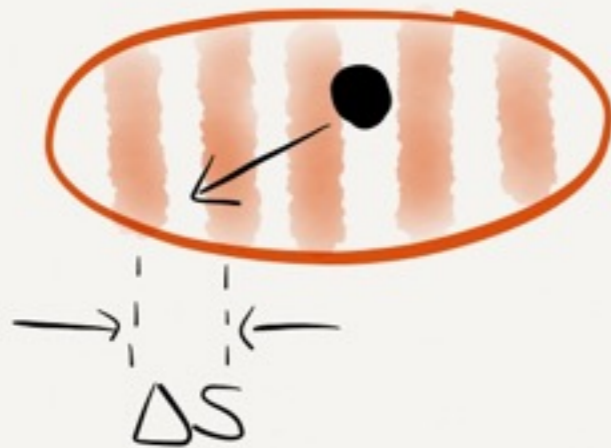


Laser-Doppler-System Zwei-Strahl-System

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{v}) &= f_{L1} - f_{L2} \\
 &= f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot (\mathbf{e}_{L1} - \mathbf{e}_D) \right) - f_0 \left(1 - \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot (\mathbf{e}_{L2} - \mathbf{e}_D) \right) \\
 &= f_0 \frac{\mathbf{v}}{c} (\mathbf{e}_{L2} - \mathbf{e}_{L1}) \\
 &= f_0 \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}{c} \\
 &= v_x \frac{2 \sin \varphi}{\lambda_0}
 \end{aligned}$$



Laser-Doppler-System Zwei-Strahl-System



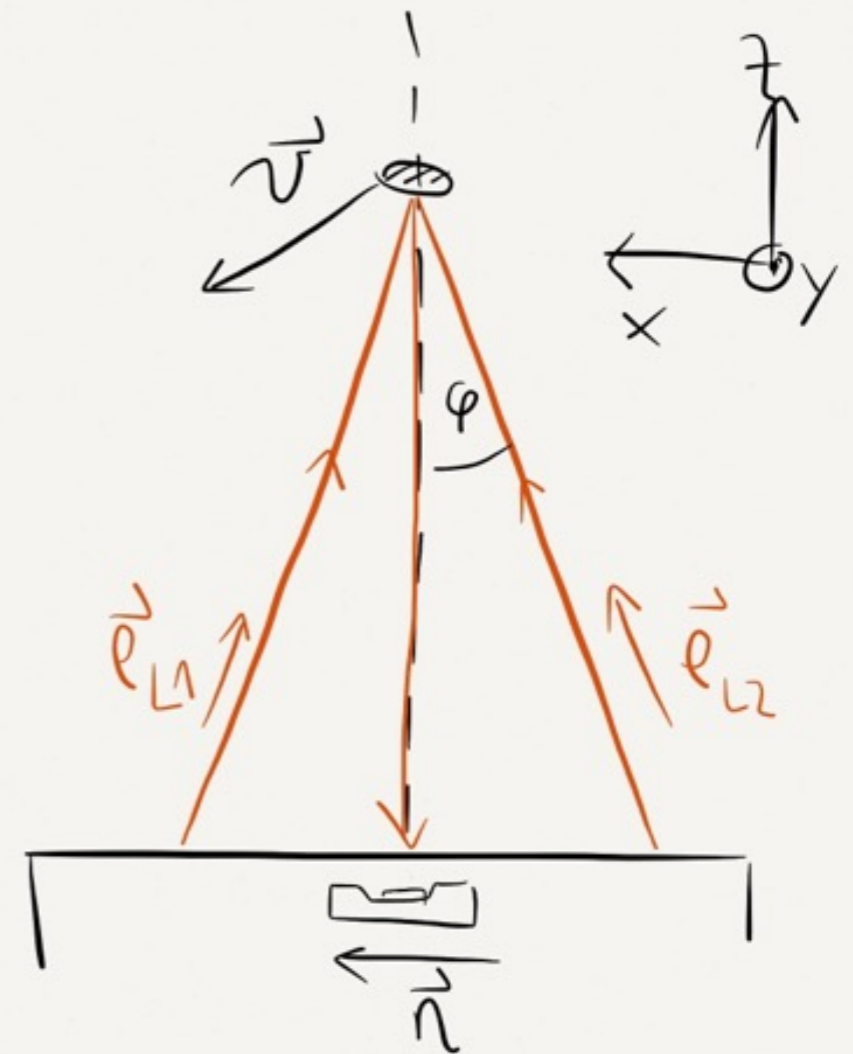
Abstand
Interferenzstreifen

$$\Delta s = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi}$$

Flugzeit pro Streifen

$$\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{\Delta s}{v_x}$$

$$f(\mathbf{v}) = v_x \frac{2 \sin \varphi}{\lambda_0} = \frac{\lambda}{2v_x \sin \varphi}$$



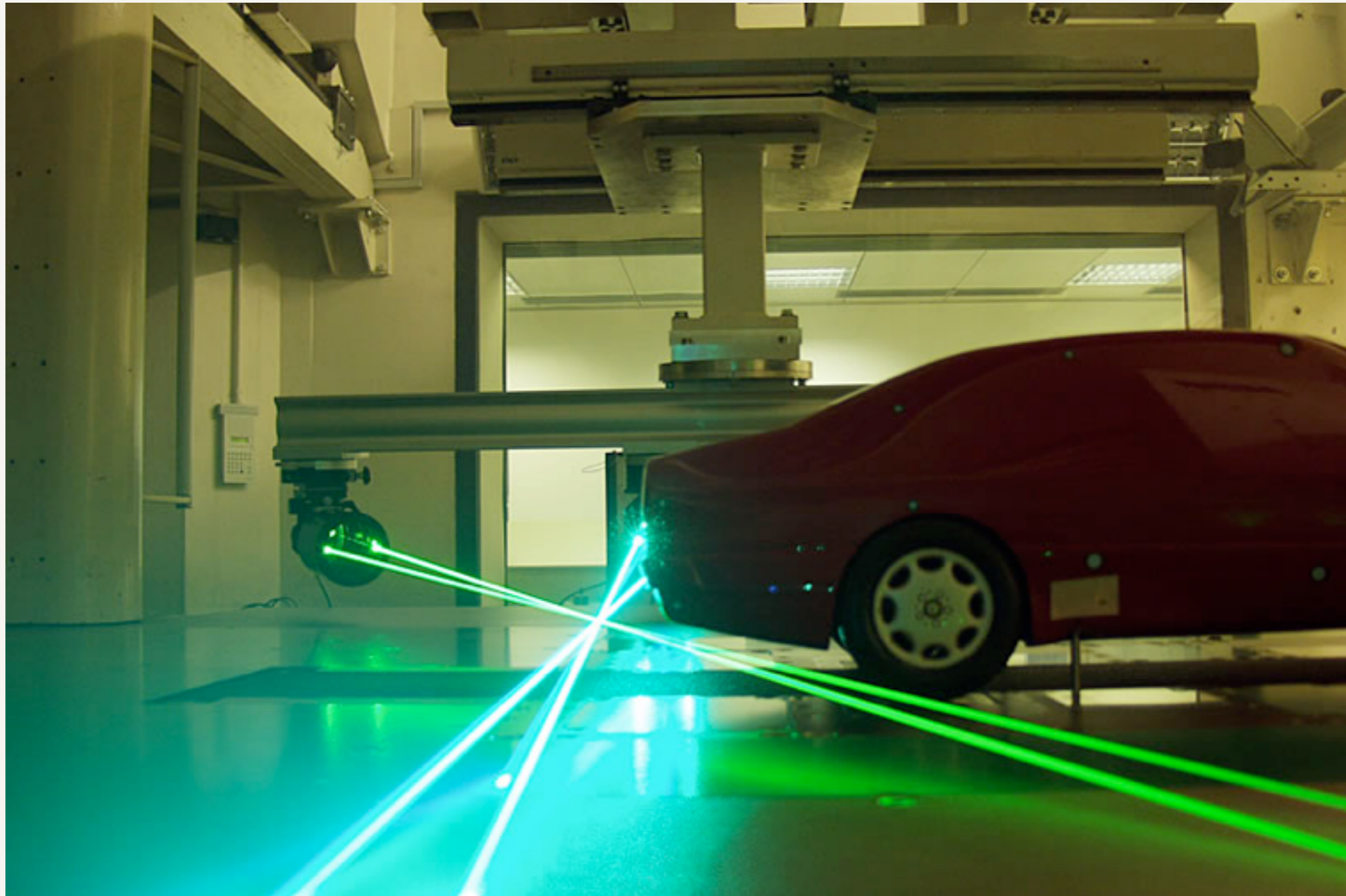
HSD Produktionsautomatisierung -und Steuerung mit LDA

- Kontrolle der Dickentoleranzen von gewalzten Stahl- und Alubändern durch Messung der Geschwindigkeit (Massenfluss)
- Synchronisation der Abrollgeschwindigkeiten in der Papierindustrie verringert Spannungsschwankungen und Risse der Papierbahnen.
- Längen- und Geschwindigkeitsmessung von Stahlrohren in der Produktion
- Als Fahrerassistenzsystem zur präzisen Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit.



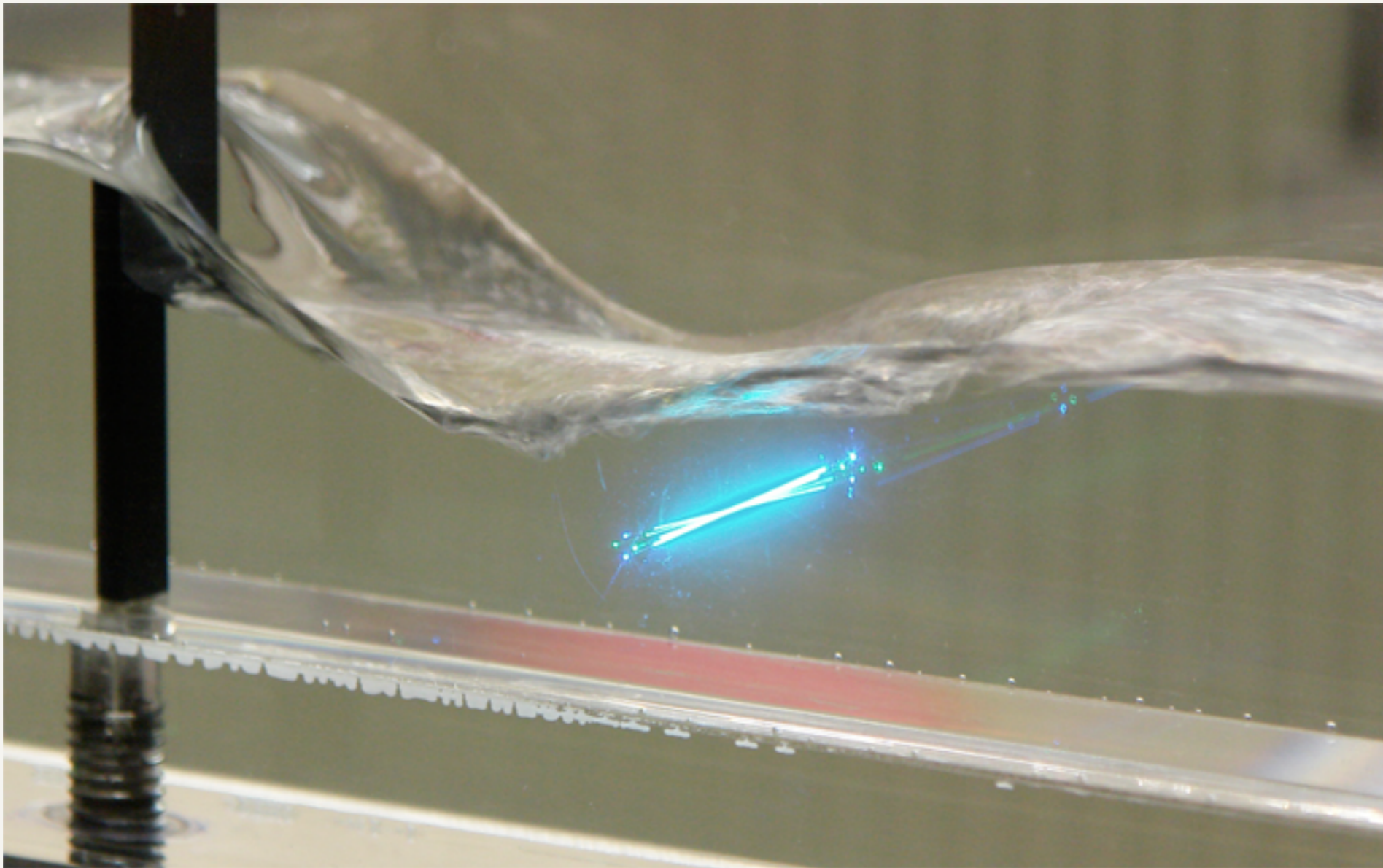
<http://www.polytec.com/de/loesungen/laenge-und-geschwindigkeit-messen/geschwindigkeitsmessung-und-steuerung/>

Strömungsmessung Luft



<http://www.fkfs.de/kraftfahrwesen/leistungen/mess-und-analysetechnik/aerodynamische-messtechnik/>

Strömungsmessung Wasser



http://www.hsu-hh.de/pfs/index_9FWnzmiHfOootOR2.html