Karlsruher Institut für Technologie

Diese Veranstaltung wir aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

## Vorlesung:

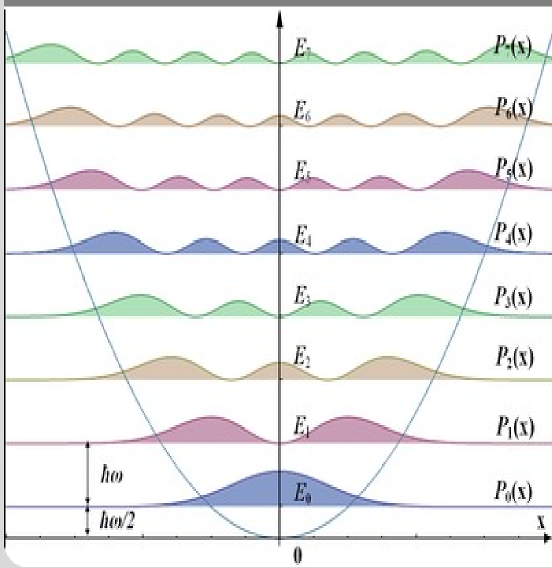
# Moderne Physik für Lehramt

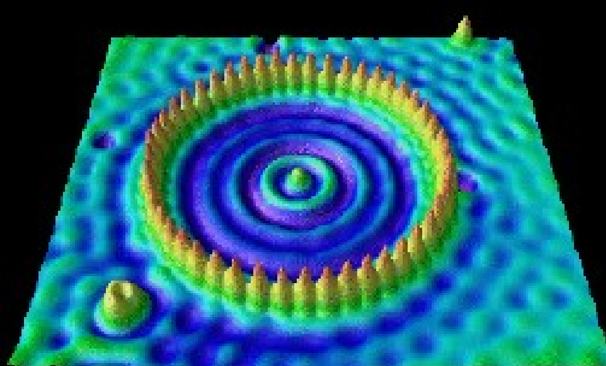
## - Untertitel -

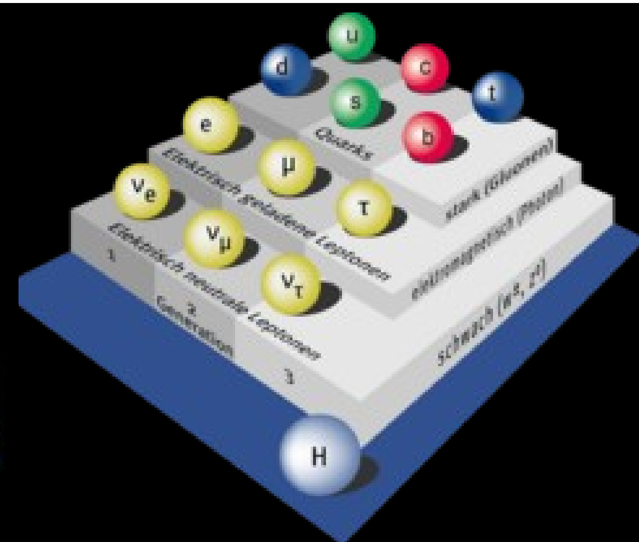
**Günter Quast**

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

**SS '20**





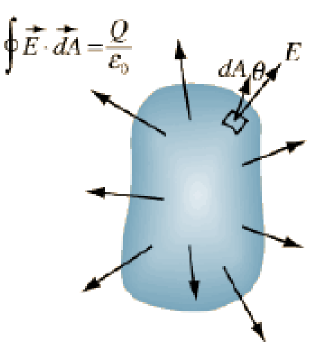
# Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

1) Einführung
2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
3) Spezielle Relativitätstheorie
4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
5) Die Schrödingergleichung
6) Anwendungen der Schrödingergleichung
7) Das Wasserstoff-Atom
8) Atome mit mehreren Elektronen
9) Wechselwirkung von Licht und Materie
10) Grundlagen der Festkörperphysik
11) Kern- und Teilchenphysik
12) Ausblick

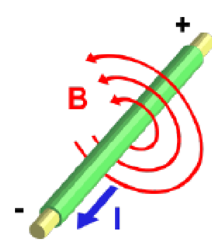
Die **Maxwell-Gleichungen** bilden die Grundlage
der **vereinheitlichten Theorie von Elektrizität und Magnetismus**

| Differentielle Form | Integralform | |
|---|---|---|
| $\operatorname{div}\vec{E} = \dfrac{\varrho}{\varepsilon_0}$ | $\oint_A \vec{E}\cdot d\vec{A} = \dfrac{Q}{\varepsilon_0}$ | *elektrischer Fluss durch geschlossene Oberfläche bestimmt durch Ladungen* |
| $\operatorname{rot}\vec{E} = -\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t}$ | $\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\dfrac{\partial}{\partial t}\oint_A \vec{B}\cdot d\vec{A}$ | Induktionsgesetz, Änderungen der mag. Flussdichte führen zu elekt. Wirbelfeld |
| $\operatorname{div}\vec{B} = 0$ | $\oint_A \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$ | *magnetische Feldlinien sind geschlossen, es gibt keine magnetischen Ladungen* |
| $\operatorname{rot}\vec{B} = \mu_0\left(\vec{j} + \varepsilon_0\dfrac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right)$ | $\oint_C \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0\left(I + \varepsilon_0\dfrac{\partial}{\partial t}\oint_A \vec{E}\cdot d\vec{A}\right)$ | Ampere'sches Gesetz, elektr. Ströme (einschl. Verschiebungsstrom) führen zu mag. Wirbelfeld |

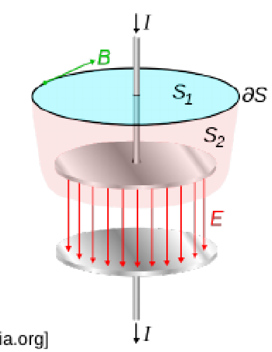
**Gauß'sches Gesetz**




**Ampère'sches Gesetz**




**Verschiebungsstrom**



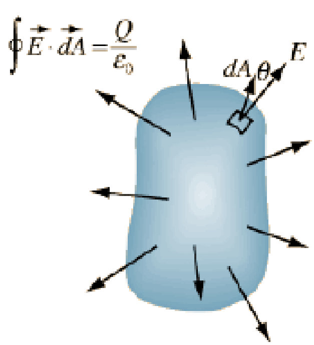

[en.wikipedia.org]

# Elektrodynamik

Die **Maxwell-Gleichungen** bilden die Grundlage der **vereinheitlichten Theorie von Elektrizität und Magnetismus**

| Differentielle Form | Integralform | |
|---|---|---|
| $\mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{\varrho}{\varepsilon_0}$ | $\oint_A \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$ | *elektrischer Fluss durch geschlossene Oberfläche bestimmt durch Ladungen* |
| $\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ | $\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t}\oint_A \vec{B}\cdot d\vec{A}$ | Induktionsgesetz, Änderungen der mag. Flussdichte führen zu elekt. Wirbelfeld |
| $\mathrm{div}\,\vec{B} = 0$ | $\oint_A \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$ | *magnetische Feldlinien sind geschlossen, es gibt keine magnetischen Ladungen* |
| $\mathrm{rot}\,\vec{B} = \mu_0\left(\vec{j} + \varepsilon_0\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right)$ | $\oint_C \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0\left(I + \varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}\oint_A \vec{E}\cdot d\vec{A}\right)$ | Ampere'sches Gesetz, elektr. Ströme (einschl. Verschiebungsstrom) führen zu mag. Wirbelfeld |

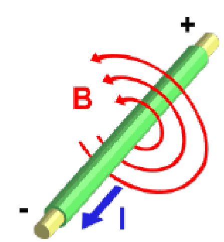
**Gauß'sches Gesetz**



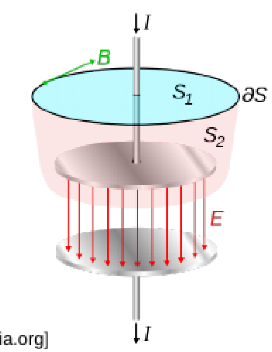

## Lorentz-Kraft

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v}\times\vec{B}$$

**Ampère'sches Gesetz**




**Verschiebungsstrom**




[en.wikipedia.org]

# Erinnerung: Gradient, Divergenz, Rotation

Nabla-Operator:

$$\vec{\nabla} := \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$$

# Erinnerung: Gradient, Divergenz, Rotation

Nabla-Operator:

$$\vec{\nabla} := \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$$

**Gradient:** $$\underbrace{\mathrm{grad}\, f(x,y,z) = \vec{\nabla}}_{\text{Vektoroperator}} \cdot \underbrace{f(x,y,z)}_{\text{skalare Funktion}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \partial f(x,y,z)/\partial x \\ \partial f(x,y,z)/\partial y \\ \partial f(x,y,z)/\partial z \end{pmatrix}}_{\text{Vektor}}$$

# Erinnerung: Gradient, Divergenz, Rotation 

Nabla-Operator:

$$\vec{\nabla} := \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$$

**Gradient:** $\operatorname{grad} f(x,y,z) = \vec{\nabla} \cdot f(x,y,z) = \begin{pmatrix} \partial f(x,y,z)/\partial x \\ \partial f(x,y,z)/\partial y \\ \partial f(x,y,z)/\partial z \end{pmatrix}$

Vektoroperator skalare Funktion Vektor

---

**Divergenz:** $\operatorname{div} \vec{f}(x,y,z) = \vec{\nabla} \cdot \vec{f}(x,y,z) = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_x(x,y,z) \\ f_y(x,y,z) \\ f_z(x,y,z) \end{pmatrix}$

Vektoroperator vektorielle Funktion

$$= \frac{\partial}{\partial x} f_x + \frac{\partial}{\partial y} f_y + \frac{\partial}{\partial z} f_z$$ skalare Funktion

# Erinnerung: Gradient, Divergenz, Rotation

Nabla-Operator:

$$\vec{\nabla} := \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$$

**Gradient:** $\mathrm{grad}\, f(x,y,z) = \vec{\nabla} \cdot f(x,y,z) = \begin{pmatrix} \partial f(x,y,z)/\partial x \\ \partial f(x,y,z)/\partial y \\ \partial f(x,y,z)/\partial z \end{pmatrix}$

Vektoroperator skalare Funktion Vektor

**Divergenz:** $\mathrm{div}\, \vec{f}(x,y,z) = \vec{\nabla} \cdot \vec{f}(x,y,z) = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_x(x,y,z) \\ f_y(x,y,z) \\ f_z(x,y,z) \end{pmatrix}$

Vektoroperator vektorielle Funktion

$$= \frac{\partial}{\partial x} f_x + \frac{\partial}{\partial y} f_y + \frac{\partial}{\partial z} f_z$$ skalare Funktion

**Rotation:** $\mathrm{rot}\, \vec{f}(x,y,z) = \vec{\nabla} \times \vec{f}(x,y,z) = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_x(x,y,z) \\ f_y(x,y,z) \\ f_z(x,y,z) \end{pmatrix}$

Vektoroperator vektorielle Funktion

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_z}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial z} \\ \frac{\partial f_x}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial x} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} - \frac{\partial f_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Vektor

# Elektromagnetische Wellen

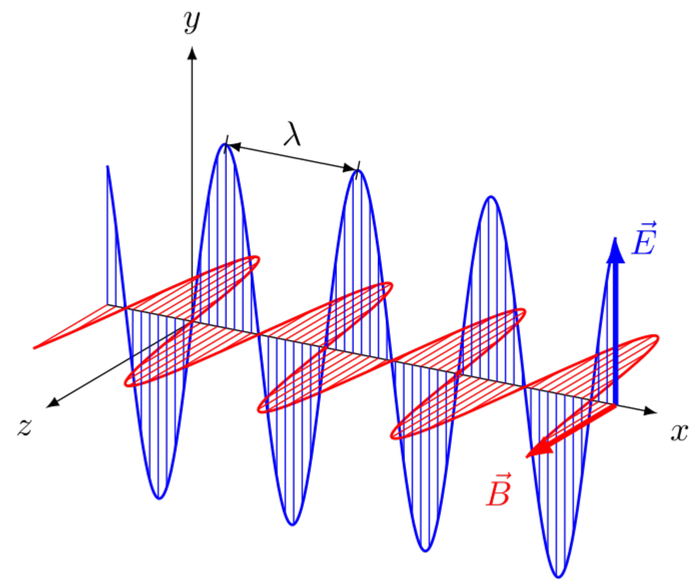
Aus den Maxwell-Gleichungen lässt sich eine Wellengleichung für elektromagnetische Wellen herleiten:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Phasengeschwindigkeit *c* gegeben durch elektrische Eigenschaften des Vakuums




Quelle: Wikipedia

# Elektrodynamik und Prinzipien der Mechanik

- In welchem Medium breiten sich elektromagnetische Wellen aus ?
- Eine Galilei-Transformation ändert die Lichtgeschwindigkeit –
  die ist aber durch $\varepsilon_0$ und $\mu_0$ bestimmt ?

  Ändern sich diese Größen dann auch ?
- Anwendung von Galilei-Transformationen auf ruhende bzw. bewegte Ladungen,
  führt zu Problemen:
  Coulombkraft vs. Lorentz-Kraft (s. Übungsaufgabe)

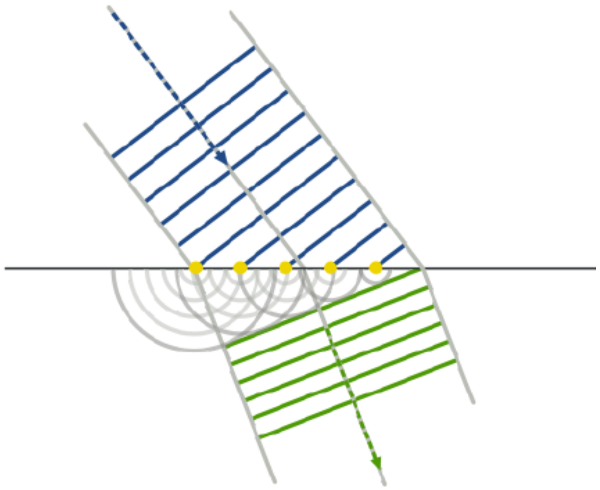
# Brechung, Beugung und Interferenz

## Huygens‘sches Prinzip:

Ebene Wellen als Überlagerung von Kugel-Wellen

→ Erklärung von Reflexion, Brechung, Beugung als Wellenphänomene

**Brechung**



[de.wikipedia.org]

Reflexions- und Brechungsgesetz:

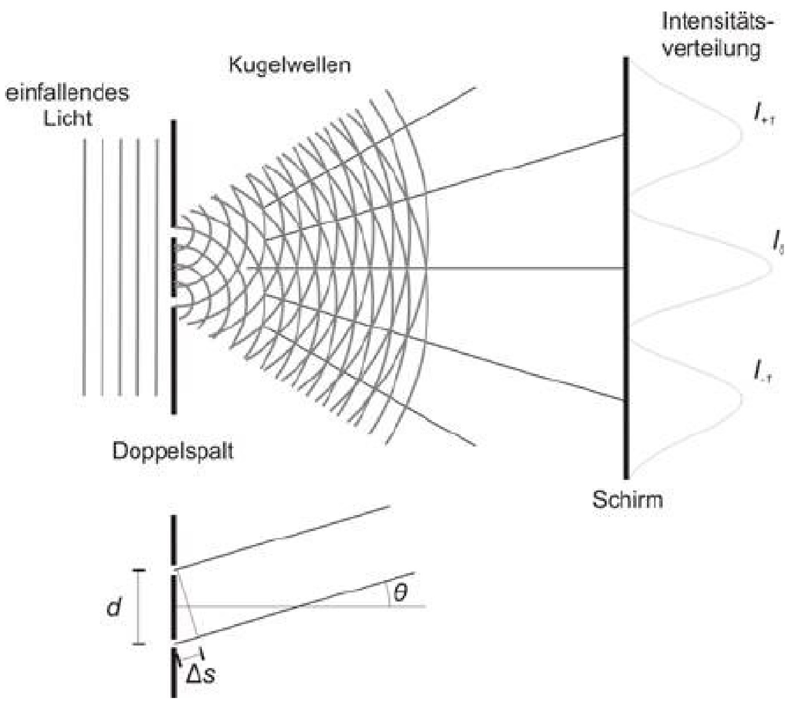
$$\boxed{\alpha_i = \alpha_r} \text{ und } \boxed{\frac{\sin\alpha_i}{\sin\alpha_b} = \frac{n_2}{n_1}}$$

# Brechung, Beugung und Interferenz (2)

**Interferenz:** Überlagerung von Wellen:

$$A_1 \cos(\omega t - \underbrace{\vec{k}_1 \cdot \vec{x}}_{\varphi_1}) \text{ und } A_2 \cos(\omega t - \underbrace{\vec{k}_2 \cdot \vec{x}}_{\varphi_2})$$

**Beugung am Doppelspalt**

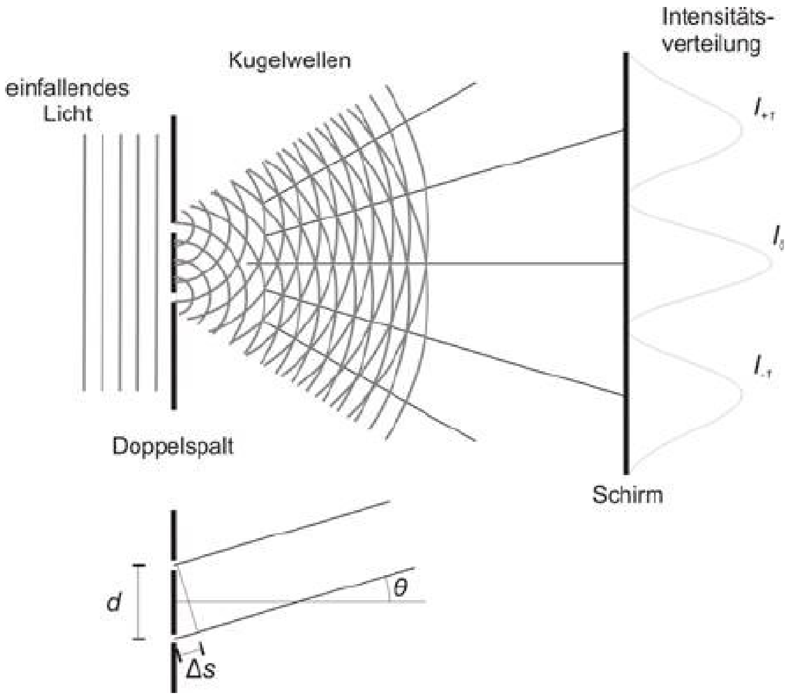



[wiki.physik.fu-berlin.de]

**Interferenz:** Überlagerung von Wellen:

$$A_1 \cos(\omega t - \underbrace{\vec{k}_1 \cdot \vec{x}}_{\varphi_1}) \text{ und } A_2 \cos(\omega t - \underbrace{\vec{k}_2 \cdot \vec{x}}_{\varphi_2})$$

**Beugung am Doppelspalt**




[wiki.physik.fu-berlin.de]

- Maximum für
  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi m, \;\; m = 0, 1, 2, \ldots$
- Minimum für
  $\varphi_1 - \varphi_2 = (2m+1)\pi, \;\; m = 0, 1, 2, \ldots$

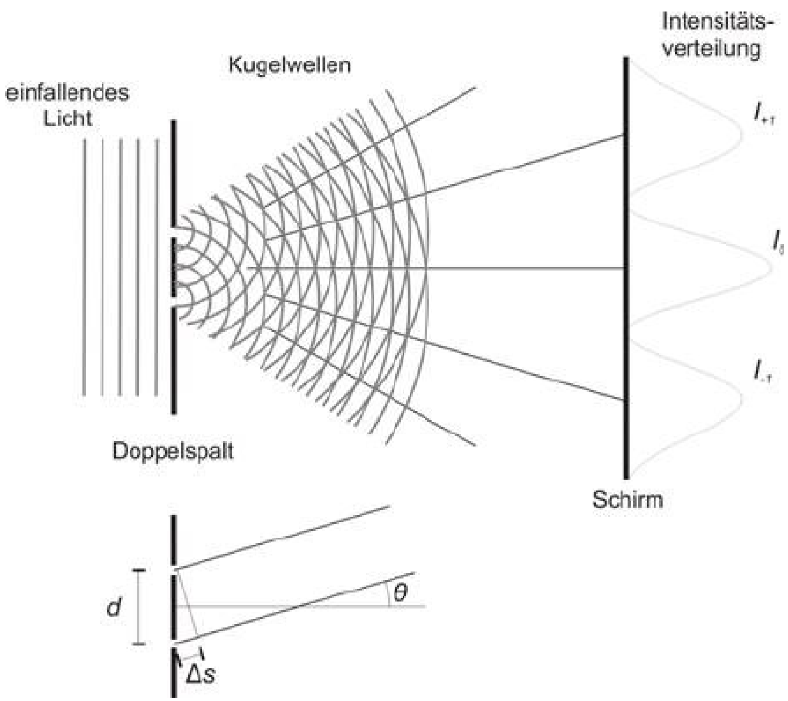
# Brechung, Beugung und Interferenz (2)



**Interferenz:** Überlagerung von Wellen:

$$A_1 \cos(\omega t - \underbrace{\vec{k}_1 \cdot \vec{x}}_{\varphi_1}) \text{ und } A_2 \cos(\omega t - \underbrace{\vec{k}_2 \cdot \vec{x}}_{\varphi_2})$$

**Beugung am Doppelspalt**




[wiki.physik.fu-berlin.de]

- Maximum für

  $$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi m, \;\; m = 0, 1, 2, \ldots$$

- Minimum für

  $$\varphi_1 - \varphi_2 = (2m+1)\pi, \;\; m = 0, 1, 2, \ldots$$

Intensität $I$:

$$\boxed{I(\alpha) = I_0 \cdot \underbrace{\frac{\sin^2 x}{x^2}}_{\text{Einzelspalt}} \cdot \underbrace{\frac{\sin^2(py)}{\sin^2(y)}}_{\text{Vielfachspalt / Gitter}}}$$

– $x = \frac{\pi b}{\lambda} \sin\alpha$, $b$: Spaltbreite

– $y = \frac{\pi g}{\lambda} \sin\alpha$, $g$: Spaltabstand,
$p$: Anzahl der (ausgeleuchteten) Spalte

Im Kapitel „Festkörperphysik“ werden wir einige Zusammenhänge aus der Thermodynamik und der statistischen Mechanik benötigen.

Hier zur Erinnerung das Wichtigste:

- ideales Gas, Zusammenhang zwischen Druck P, Volumen V und Temperatur T:

$$PV = nRT = Nk_\mathrm{B}T$$

$n$: Stoffmenge, $R$ Gaskonstante, $N$ Teilchenzahl, $k_\mathrm{B}$ Boltzmannkonstante
in der statistischen Mechanik:

$$PV = \frac{N}{3}m\overline{v^2} = \frac{2}{3}N\overline{E_\mathrm{kin}}$$

daraus folgt:

$$\overline{E_\mathrm{kin}} = 3 \cdot \frac{1}{2}k_\mathrm{B}T$$

$\frac{1}{2}k_\mathrm{B}T$ ist die mittlere Energie pro Freiheitsgrad

# Statistische Mechanik (2)



- Zusammenhang zwischen innerer Energie $U$, Wärme $Q$ und Arbeit $W$

$$dU = \delta Q + \delta W$$

- Wärmekapazität $C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$
- 2. Hauptsatz der Thermodynamik
  Wärme kann nicht vollständig in Arbeit verwandelt werden, die Entropie $S$ wächst i.a. an,

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{rev}}{T} \geq 0$$

- statistische Verteilung der Energie, Boltzmann-Verteilung

$$w(E)dE = \frac{1}{Z} \exp(-\frac{E}{k_{\mathrm{B}}T})\, dE;$$

dabei ist $Z$ eine Normierungskonstante, die Zustandssumme.