((15))

# 3 Physik

## 3.1 Mechanik

### Newton'sche Gesetze und Kräfteaddition

#### 1. Newton'sches Gesetz (Trägheitsprinzip, Trägheitsgesetz)

Unter der Bedingung   
\vec{F\_1} +\vec{F\_2} +... =\vec{0} gilt:

\vec{v} =konstant

\vec{F\_1}, \vec{F\_2}, ...: äußere Kräfte, die auf einen Körper (ein System) wirken  
\vec{v}: Geschwindigkeit

#### 2. Newton'sches Gesetz (Grundgleichung der Mechanik)

\vec{F} =m \*\vec{a}

F \*~Dt =m \*~Dv

\vec{F}: Kraft  
m: Masse  
\vec{a}: Beschleunigung  
t: Zeit  
v: Geschwindigkeit

#### 3. Newton'sches Gesetz (Reaktionsprinzip, Wechselwirkungsgesetz)

\vec{F\_{12}} =-\vec{F\_{21}}

\vec{F}: Kraft

#### Betrag der Gesamtkraft bei der Addition zweier Kräfte

F\_{ges} =\s{(F\_1)^2 +(F\_2)^2 +2 \*F\_1 \*F\_2 \*cos~a}

F\_{ges}: Betrag der Gesamtkraft  
F\_1, F\_2: Beträge der Einzelkräfte  
~a: Winkel zwischen den Kräften

### Kräfte der Mechanik

#### Gewichtskraft

F\_G =m \*g

F\_G : Gewichtskraft  
m: Masse  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers

#### Radialkraft, Zentripetalkraft

F\_r =\frac{m \*v^2}{r} =m \*~w^2 \*r

F\_r: Radialkraft, Zentripetalkraft  
m: Masse  
v: Bahngeschwindigkeit  
r: Radius  
~w: Winkelgeschwindigkeit

#### Federspannkraft (Hooke'sches Gesetz)

F\_S =D \*s

F\_S : Federspannkraft  
D: Federhärte, Richtgröße  
s: Dehnung der Feder

#### Reibungskraft

F\_R =~m \*F\_N

F\_R: Reibungskraft  
~m: Reibungszahl  
F\_N: Normalkraft

((16))

#### Newton'scher Strömungswiderstand

F\_W =1/2 \*c\_w \*A \*~r \*v^2

F\_W: Widerstandskraft  
c\_w: Widerstandsbeiwert  
A: Querschnittsfläche des Körpers senkrecht zur Strömung  
~r: Dichte des umströmenden Mediums  
v: Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Medium

#### Stokes'scher Strömungswiderstand

F\_W =6 \*~p \*~j \*r \*v

F\_W: Widerstandskraft  
~j: Viskosität des umströmenden Mediums  
r: Radius  
v: Geschwindigkeit

#### Auftriebskraft

F\_A =~r \*g \*V

F\_A: Auftriebskraft  
~r: Dichte der Flüssigkeit/des Gases  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers  
V: vom Körper verdrängtes Volumen

### Bewegungen

#### eindimensionale Bewegungen

- mittlere Geschwindigkeit

\ol{v} =\frac{~Ds}{~Dt}

\ol{v}: mittlere Geschwindigkeit  
s: Ort  
t: Zeit

- momentane Geschwindigkeit

v(t)=\frac{ds}{dt} =\dot{s}(t)

v: Geschwindigkeit  
s: Ort  
t: Zeit

- mittlere Beschleunigung

\ol{a} =\frac{~Dv}{~Dt}

\ol{a}: mittlere Beschleunigung  
v: Geschwindigkeit  
t: Zeit

- momentane Beschleunigung

a(t) =\frac{dv}{dt} =\dot{v}(t)

a: Beschleunigung  
v: Geschwindigkeit  
t: Zeit

- gleichförmige Bewegung

s(t) =v \*t +s\_0

v =konstant

a =0 \frac{m}{s^2}

s: Ort  
s\_0: Anfangsort bei t =0s  
v: Geschwindigkeit  
t: Zeit  
a: Beschleunigung

- gleichmäßig beschleunigte Bewegung

s(t) =1/2 \*a \*t^2 +v\_0 \*t +s\_0

v(t) =a \*t +v\_0

a =konstant

s: Ort  
s\_0: Anfangsort bei t =0s  
a: Beschleunigung  
t: Zeit  
v\_0: Anfangsgeschwindigkeit bei t =0\_s  
v: Geschwindigkeit

((17))

- beliebig beschleunigte Bewegung

s(t) =s\_0 +\int\_{t\_0}^t v(t)dt

v(t) =v\_0 +\int\_{t\_0}^t a(t)dt

s: Ort  
s\_0: Anfangsort bei t =t\_0  
v: Geschwindigkeit  
t: Zeit  
v\_0: Anfangsgeschwindigkeit bei t =t\_0  
a: Beschleunigung

#### gleichförmige Kreisbewegung

~w =\frac{~D(~f)}{~Dt}   
=\frac{2~p}{T}   
=2~p \*f

v =~w \*r

~w =konstant

a\_r =\frac{v^2}{r} =~w^2 \*r

~w: Winkelgeschwindigkeit  
~D(~f): überstrichener Winkel  
~Dt: benötigte Zeit  
T: Umlaufdauer  
f: Frequenz  
v: Bahngeschwindigkeit  
r: Radius  
a\_r: Radialbeschleunigung

#### Wurfbewegungen

- senkrechter Wurf

y(t) =-1/2 \*g \*t^2 +v\_0 \*t +y\_0

v\_y(t) =-g \*t +v\_0

a\_y =-g

y: Ort  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers  
t: Zeit  
v\_0: Anfangsgeschwindigkeit bei t =0\_s  
y\_0: Anfangsort bei t =0s  
v\_y: vertikale Geschwindigkeit  
a\_y: vertikale Beschleunigung

- waagerechter Wurf

x(t) =v\_0 \*t

y(t) =-1/2 \*g \*t^2 +y\_0

v\_x =v\_0

v\_y(t) =-g \*t

a\_x =0\frac{m}{s^2}

a\_y =-g

x: x-Koordinate des Ortes  
v\_0: horizontale Anfangsgeschwindigkeit bei t =0s  
t: Zeit  
y: y-Koordinate des Ortes  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers  
y\_0: y-Koordinate des Ortes bei t =0s  
v\_x, v\_y: Geschwindigkeitskomponente  
a\_x, a\_y: Beschleunigungskomponente

- schräger Wurf

x(t) =v\_0 \*t \*cos~a

y(t) =-1/2 \*g \*t^2 +v\_0 \*t \*sin~a +y\_0

v\_x =v\_0 \*cos~a

v\_y(t) =-g \*t +v\_0 \*sin~a

a\_x =0 \frac{m}{s^2}

a\_y =-g

x: x-Koordinate des Ortes  
v\_0: Anfangsgeschwindigkeit bei t =0s  
t: Zeit  
~a: Abwurfwinkel  
y: y-Koordinate des Ortes  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers  
y\_0: y-Koordinate des Ortes bei t =0s  
v\_x, v\_y: Geschwindigkeitskomponente  
a\_x, a\_y: Beschleunigungskomponente

((18))

### Dichte und Druck

#### Dichte

~r =m/V

~r: Dichte  
m: Masse  
V: Volumen

#### Druck

p =\frac{F\_{\perp}}{A}

p: Druck  
F\_{\perp}}: Kraftkomponente senkrecht auf A  
A: Flächeninhalt

#### Schweredruck in Flüssigkeiten

p =~r \*g \*h

p: Druck  
~r: Dichte der Flüssigkeit  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort des Körpers  
h: Höhe der Flüssigkeitssäule

### Kraftumformende Einrichtungen

#### schiefe Ebene

F\_H =F\_G \*sin~a

F\_N =F\_G \*cos~a

\frac{F\_H}{F\_G} =h/l

F\_H: Hangabtriebskraft  
F\_G: Gewichtskraft  
~a: Neigungswinkel der Ebene gegenüber der Horizontalen  
F\_N: Normalkraft  
h: Höhe der schiefen Ebene  
l: Länge der schiefen Ebene

#### Hebelgesetz

M\_1 =M\_2

F\_1 \*l\_1 =F\_2 \*l\_2

M: Drehmoment  
F: Kraft auf Hebelarm  
l: Länge des Hebelarms

#### Rollen, (lineare) Flaschenzüge

F\_Z =1/n \*F\_L

s\_Z =n \*s\_L

F\_Z, F\_L: Zug- bzw. Lastkraft  
s\_Z, s\_L: Zug- bzw. Lastweg  
n: Anzahl der tragenden Seile/Seilstücke

### Mechanische Energie

#### kinetische Energie der Translation (Bewegungsenergie)

E =1/2 \*m \*v^2

E: Energie  
m: Masse  
v: Geschwindigkeit

#### kinetische Energie der Rotation (Rotationsenergie)

E =1/2 \*J \*~w^2

E: Energie  
J: Trägheitsmoment  
~w: Winkelgeschwindigkeit

#### potenzielle Energie im homogenen Gravitationsfeld (Lageenergie)

E =F\_G \*h =m \*g \*h

E: Energie  
F\_G: Gewichtskraft  
h: Höhe des Körpers über dem Bezugspunkt  
m: Masse  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor)

((19))

#### Energie einer idealen (Hooke'schen) Feder (Spannenergie)

E =1/2 \*D \*s^2

E: Energie  
D: Federhärte, Richtgröße  
s: Dehnung der Feder

### Mechanische Arbeit

#### mechanische Arbeit

W =~DE

W: Arbeit  
~DE: Energiedifferenz

#### Zusammenhang zwischen Arbeit, Kraft und zurückgelegtem Weg

- Für F =konstant und  
\vec{F} \| ~D\vec{s} gilt:

W =~DE =F \*~Ds

W: Arbeit  
~DE: Energiedifferenz  
F: Kraft  
s: Ort

- Wenn die Kraft- und Wegvektoren den Winkel ~a einschließen, gilt für F =konstant:

W =~DE =F \*~Ds \*cos~a

W: Arbeit  
~DE: Energiedifferenz  
F: Kraft  
s: Ort  
~a: Winkel zwischen \vec{F} und ~D\vec{s}

- Für eine vom Ort s abhängige Kraft \vec{F}(s) gilt unter der Bedingung  
\vec{F} \| d\vec{s}:

W =~DE =\int\_{s\_1}^{s\_2} F(s)ds

W: Arbeit  
~DE: Energiedifferenz  
F: Kraft  
s: Ort

### Leistung und Wirkungsgrad

#### mittlere Leistung (Energiestromstärke)

\ol{P} =\frac{~DE}{~Dt}

\ol{P}: mittlere Leistung (Energiestromstärke)  
E: Energie  
t: Zeit

#### momentane Leistung (Energiestromstärke)

P(t) =\frac{dE}{dt}

P(t) =F \*v(t)

P: Leistung (Energiestromstärke)  
E: Energie  
t: Zeit  
F: Kraft  
v: Geschwindigkeit

#### Wirkungsgrad

~j =\frac{P\_{nutz}}{P\_{zu}}   
=\frac{~DE\_{nutz}}{~DE\_{zu}}

~j: Wirkungsgrad  
P\_{nutz}: Betrag der abgegebenen, genutzten Leistung  
P\_{zu}: Betrag der aufgewandten, zugeführten Leistung  
E\_{nutz}: Betrag der abgegebenen, genutzten Energie  
E\_{zu}: Betrag der aufgewandten, zugeführten Energie

((20))

### Energieerhaltungssatz

E\_{ges} =E\_1 +E\_2 +... =konstant

E\_{ges}: Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems  
E\_1, E\_2, ...: Einzelenergien innerhalb des Systems

### Gravitation

#### Newton'sches Gravitationsgesetz

F\_G =G \*\frac{m\_1 \*m\_2}{r^2}

F\_G: Gravitationskraft  
G: Gravitationskonstante  
m\_1, m\_2: Massen  
r: Abstand der Massen

#### potenzielle Energie im Gravitationsfeld

E=-G \*\frac{m\_1 \*m\_2}{r}

E: Energie  
G: Gravitationskonstante  
m\_1, m\_2: Massen  
r: Abstand der Massen

#### Gravitationsfeldstärke

g =\frac{F\_G}{m}

g: Gravitationsfeldstärke  
F\_G: Gravitationskraft  
m: Masse des Probekörpers

### Impuls

#### Impuls eines Körpers

\vec{p} =m \*\vec{v}

~Dp =F \*~Dt

\vec{F}(t) =\frac{d\vec{p}}{dt} =\dot{\vec{p}}(t)

\vec{p}: Impuls  
m: Masse  
\vec{v}: Geschwindigkeit  
\vec{F}: Kraft  
t: Zeit

#### Impulserhaltungssatz

\vec{p\_{ges}} =\vec{p\_1} +\vec{p\_2} +... =konstant

\vec{p\_{ges}}: Gesamtimpuls eines abgeschlossenen Systems  
\vec{p\_1} ,\vec{p\_2}, ...: Einzelimpulse des Systems

#### Drehimpuls eines Körpers

L =J \*~w

L: Drehimpuls  
J: Trägheitsmoment  
~w: Winkelgeschwindigkeit

#### Drehimpulserhaltungssatz

\vec{L\_{ges}} =\vec{L\_1} +\vec{L\_2} +... =konstant

\vec{L\_{ges}}: Gesamtdrehimpuls eines abgeschlossenen Systems  
\vec{L\_1} ,\vec{L\_2} , ...: Einzeldrehimpulse des Systems

((21))

### Rotation starrer Körper

#### Drehmoment

Unter der Bedingung \vec{r} \perp \vec{F} gilt:

M =r \*F

M: Drehmoment  
r: Radius  
F: Kraft

#### Trägheitsmoment

J =\sum\_i{m\_i} \*(r\_i)^2

J: Trägheitsmoment  
m\_i: Masse des i-ten Massenpunkts  
r\_i: Abstand des i-ten Massenpunkts von der Drehachse

### Zentrale gerade Stöße

#### vollkommen unelastischer Stoß

Geschwindigkeit nach dem Stoß:

u =\frac{m\_1 \*v\_1 +m\_2 \*v\_2}{m\_1 +m\_2}

u: gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoß  
m\_1, m\_2: Massen der Stoßpartner  
v\_1, v\_2: Geschwindigkeiten der Stoßpartner vor dem Stoß

#### vollkommen elastischer Stoß

Geschwindigkeit nach dem Stoß:

u\_1 =\frac{(m\_1 -m\_2) \*v\_1 +2m\_2 \*v\_2}{m\_1 +m\_2}

u\_2 =\frac{(m\_2 -m\_1) \*v\_2 +2m\_1 \*v\_1}{m\_1 +m\_2}

u\_1, u\_2: Geschwindigkeiten der Stoßpartner nach dem Stoß  
m\_1, m\_2: Massen der Stoßpartner  
v\_1, v\_2: Geschwindigkeiten der Stoßpartner vor dem Stoß

### Schwingungen

#### beschreibende Größen der Schwingung

T =1/f

f =n/t

~w =2~p \*f

T: Periodendauer  
f: Frequenz  
n: Anzahl der Perioden  
t: Zeit  
~w: Kreisfrequenz

#### mechanische harmonische Schwingungen

- Kraftgesetz der harmonischen Schwingung

\vec{F}(\vec{s}) =-D \*\vec{s}

\vec{F}: Kraft  
D: Richtgröße, z. B. Federhärte  
\vec{s}: Auslenkung

- Bewegungsgleichungen der ungedämpften harmonischen Schwingung

s(t) =s\_{max} \*sin(~w \*t)

Bei Vorliegen eines Nullphasenwinkels gilt:

s(t) =s\_{max} \*sin(~w \*t +(~f\_0)

v(t) =s\_{max} \*~w \*cos(~w \*t +~f\_0)

a(t) =-s\_{max} \*~w^2 \*sin(~w \*t +~f\_0)

s: Auslenkung, Elongation  
s\_{max}: Amplitude  
~w: Kreisfrequenz  
t: Zeit  
~f\_0: Nullphasenwinkel  
v: Geschwindigkeit  
a: Beschleunigung

((22))

- Differenzialgleichung der ungedämpften harmonischen Schwingung

\ddot{s}(t) +D/m \*s(t) =0

\frac{d^2s}{dt^2} +D/m \*s =0

s: Auslenkung  
D: Richtgröße, z. B. Federhärte  
m: Masse

- gedämpfte harmonische Schwingung (geschwindigkeitsproportionale, schwache Dämpfung)

Für einen bei t =0s ausgelenkten Schwinger gilt:

s(t) =s\_{max} \*e^{-~d \*t} \*cos(~w\_D \*t)

mit: ~w\_D =\s{~w^2 -~d^2}

s: Auslenkung  
s\_{max}: Anfangsamplitude  
~d: Abklingkoeffizient  
t: Zeit  
~w\_D: Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung  
~w: Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung

- Differenzialgleichung der gedämpften harmonischen Schwingung

\ddot{s}(t) +2~d \*\dot{s}(t) +D/m \*s(t) =0

\frac{d^2s}{dt^2} +2~d \*\frac{ds}{dt} +D/m \*s =0

s: Auslenkung  
~d: Abklingkoeffizient  
D: Richtgröße, z. B. Federhärte  
m: Masse

#### Periodendauer von Pendeln

- Federpendel

T =2~p \*\s{m/D}

T: Periodendauer  
m: Masse  
D: Federhärte, Richtgröße

- Fadenpendel (in Kleinwinkelnäherung)

T =2~p \*\s{l/g}

T: Periodendauer  
l: Pendellänge  
g: Fallbeschleunigung (Ortsfaktor) am Ort der Schwingung

### Wellen

#### Ausbreitungsgeschwindigkeit

c =~l \*f

c: Ausbreitungsgeschwindigkeit  
~l: Wellenlänge  
f: Frequenz

#### harmonische Welle

- Wellenfunktion der harmonischen Welle

y(x, t) =y\_{max} \*sin(2~p \*(t/T -\frac{x}{~l})

y: Auslenkung  
y\_{max}: Amplitude  
t: Zeit  
T: Periodendauer  
x: Ort  
~l: Wellenlänge

((23))

- Differenzialgleichung der harmonischen Welle

\ddot{y}(x, t) -c^2 \*y''(x, t) =0

\frac{(\partial)^2 y}{(\partial)t^2} -c^2 \*\frac{(\partial)^2 y}{(\partial)x^2} =0

y: Auslenkung  
x: Ort  
t: Zeit  
c: Ausbreitungsgeschwindigkeit

- Wellenfunktion einer stehenden harmonischen Welle

y(x, t) =2y\_{max} \*cos(2~p \*\frac{x}{~l}) \*sin(2~p \*t/T)

y: Auslenkung  
x: Ort  
t: Zeit  
y\_{max}: Amplitude der einander entgegenlaufenden Wellen  
~l: Wellenlänge  
T: Periodendauer

- stehende Wellen bei zwei festen (zwei losen) Enden

~l\_k =\frac{2l}{k +1}

Grundschwingung: k =0

Oberschwingungen: k =1, 2, 3, ...

~l\_k: Wellenlänge  
l: Länge des Wellenträgers

- stehende Wellen bei einem festen und einem losen Ende

~l\_k =\frac{2l}{k +1/2}

Grundschwingung: k =0

Oberschwingungen: k =1, 2, 3, ...

~l\_k: Wellenlänge;  
l: Länge des Wellenträgers

### Akustik

#### akustischer Dopplereffekt bei bewegtem Sender und bewegtem Empfänger

für Annäherung:  
f\_E =f\_0 \*\frac{c +v\_E}{c -v\_S}

für Entfernungszunahme:  
f\_E =f\_0 \*\frac{c -v\_E}{c +v\_S}

f\_E: vom Empfänger gemessene Frequenz  
f\_0: vom Sender abgestrahlte Frequenz  
c: Schallgeschwindigkeit  
v\_E: Geschwindigkeit des Empfängers  
v\_S : Geschwindigkeit der Schallquelle

#### Schalldruck

p\_{ges} =p\_n +p \*sin(~w \*t)

p\_{ges}: Gesamtdruck  
p\_n: Normaldruck im Medium (konstant)  
p: Schalldruckamplitude  
~w: Kreisfrequenz  
t: Zeit

#### Intensität einer Schallwelle in einem verlustfreien akustischen Medium

I =P/A =\frac{p^2}{2~r \*c}

I: Schallintensität  
P: Schallleistung  
A: Flächeninhalt  
p: Schalldruck  
~r: Dichte des Mediums  
c: Schallgeschwindigkeit im Medium

((24))

#### Schallintensitätspegel

L\_I =10dB \*lg(\frac{l}{l\_0})

mit: I\_0 =10^{-12}\frac{W}{m^2}

L\_I : Schallintensitätspegel  
I: Schallintensität  
I\_0: Bezugswert der Schallintensität

#### Schalldruckpegel

L\_p =20dB \*lg(\frac{p\_{eff}}{p\_0})

mit: p\_0 =20~mPa

L\_p: Schalldruckpegel  
p\_0: Bezugswert des Schalldrucks  
p\_{eff}: Effektivwert des Schalldrucks

## 3.2 Elektrizitätslehre und Magnetismus

### Stromstärke, Spannung, Widerstand, Ladung

#### mittlere elektrische Stromstärke

\ol{I} =\frac{~DQ}{~Dt}

\ol{I}: mittlere elektrische Stromstärke  
Q: elektrische Ladung  
t: Zeit

#### momentane elektrische Stromstärke und elektrische Ladung

I(t) =\frac{dQ}{dt} =\dot{Q}(t)

Q =\int\_{t\_1}^{t\_2}I(t)dt

I: elektrische Stromstärke  
Q: elektrische Ladung  
t: Zeit

#### elektrischer Widerstand

R =U/I

R: elektrischer Widerstand  
U: elektrische Spannung  
I: elektrische Stromstärke

#### Widerstand eines elektrischen Leiters

R =~r \*l/A

R: elektrischer Widerstand  
~r: spezifischer Widerstand  
l: Länge des Leiters  
A: Querschnittsfläche des Leiters

### Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

#### Reihenschaltung

I\_{ges} =I\_1 =I\_2 =... =I\_n

U\_{ges} =U\_1 +U\_2 +... +U\_n

R\_{ges} =R\_1 +R\_2 +... +R\_n

I\_{ges}: Gesamtstromstärke  
I\_1, I\_2, ...: Einzelstromstärken  
U\_{ges}: Gesamtspannung  
U\_1, U\_2, ...: Einzelspannungen  
R\_{ges}: Gesamtwiderstand  
R\_1, R\_2, ...: Einzelwiderstände

((25))

#### Parallelschaltung

I\_ges =I\_1 +I\_2 +... +I\_n

U\_ges =U\_1 =U\_2 =... =U\_n

\frac{1}{R\_{ges}} =\frac{1}{R\_1} +\frac{1}{R\_2} +... +\frac{1}{R\_n}

I\_{ges}: Gesamtstromstärke  
I\_1, I\_2, ...: Einzelstromstärken  
U\_{ges}: Gesamtspannung  
U\_1, U\_2, ...: Einzelspannungen  
R\_{ges}: Gesamtwiderstand  
R\_1, R\_2, ...: Einzelwiderstände

### Kirchhoff'sche Gesetze

#### 1. Kirchhoff'sches Gesetz (Knotenregel)

\sum{I\_{zu}} =\sum{I\_{ab}}

I\_{zu}: Stärken der in den Knoten zufließenden Ströme  
I\_{ab}: Stärken der aus dem Knoten abfließenden Ströme

#### 2. Kirchhoff'sches Gesetz (Maschenregel)

\sum{U\_i} =0

U\_i: Einzelspannungen in einer Masche

### Elektrische Leistung und Energie

#### elektrische Leistung

P =U \*I

P: elektrische Leistung  
U: elektrische Spannung  
I: elektrische Stromstärke

#### elektrisch übertragene Energie

~DE =P \*~Dt

E: Energie  
P: elektrische Leistung  
t: Zeit

#### Energiedifferenz eines geladenen Teilchens beim Durchlaufen einer elektrischen Spannung

~DE =q \*U

E: Energie  
q: Ladung des Teilchens  
U: elektrische Spannung

### Elektrisches Feld

#### Kraft zwischen Punktladungen (Coulomb'sches Gesetz)

F\_C =\frac{1}{4~p \*~e\_0 \*~e\_r} \*\frac{Q\_1 \*Q\_2}{r^2}

F\_C: Coulomb-Kraft  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
~e\_r: Dielektrizitätszahl  
Q\_1, Q\_2 :Ladungen  
r: Abstand der Ladungen voneinander

((26))

#### elektrische Feldstärke

- allgemein:  
E =\frac{F\_{el}}{q}

- Im homogenen Feld eines Plattenkondensators gilt:  
E =U/d

- Im Radialfeld einer Punktladung gilt:  
E =\frac{1}{4~p \*~e\_0 \*~e\_r} \*\frac{Q}{r^2}

E: elektrische Feldstärke  
F\_{el}: elektrische Kraft  
q: Probeladung  
U: elektrische Spannung  
d: Abstand der Kondensatorplatten  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
~e\_r: Dielektrizitätszahl  
Q: felderzeugende Ladung  
r: Abstand von der Ladung Q

#### elektrische Flussdichte

D =~e\_0 \*~e\_r \*E

D: elektrische Flussdichte  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
~e\_r: Dielektrizitätszahl  
E: elektrische Feldstärke im Vakuum

#### Flächenladungsdichte

~s =Q/A

~s =~e\_0 \*~e\_r \*E

~s: Flächenladungsdichte  
Q: Ladung  
A: Fläche  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
~e\_r: Dielektrizitätszahl  
E: elektrische Feldstärke im Vakuum

#### Potenzial im elektrischen Feld

- allgemein:  
~f =E/q

- Im homogenen Feld eines Plattenkondensators gilt:  
~f =U/d \*s

- Im Radialfeld einer punktförmigen Ladung gilt:  
~f =-\frac{1}{4~p \*~e\_0 \*~e\_r} \*Q/r

~f: elektrisches Potenzial  
E: Energie  
q: Probeladung  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
~e\_r: Dielektrizitätszahl  
U: elektrische Spannung  
d: Abstand der Kondensatorplatten  
s: Abstand von der negativen Platte  
Q: felderzeugende Ladung  
r: Abstand von der Ladung Q

#### elektrische Spannung als Potenzialdifferenz

U =~f\_2 -~f\_1 =~D~f

U: elektrische Spannung zwischen den Orten P\_1 und P\_2  
~f\_1, ~f\_2: elektrisches Potenzial am Ort 1 bzw. 2

### Wechselstromkreis

#### Spannung im Wechselstromkreis

- Für eine sinusförmige Wechselspannung gilt:

U(t) =U\_{max} \*sin(~w \*t)

U\_{eff} =\frac{U\_{max}}{\s{2}}

U: Momentanwert der elektrischen Spannung  
U\_{max}: Scheitelwert der elektrischen Spannung  
~w: Kreisfrequenz  
t: Zeit  
U\_{eff}: Effektivwert der elektrischen Spannung

((27))

#### Stromstärke im Wechselstromkreis

- Für einen sinusförmigen Wechselstrom bei der Wechselspannung  
U(t) =U\_{max} \*sin(~w \*t) gilt:

I(t) =I\_{max} \*sin(~w \*t +~D~f)

I\_{eff} =\frac{I\_{max}}{\s{2}}

U: Momentanwert der elektrischen Spannung  
U\_{max}: Scheitelwert der elektrischen Spannung  
I: Momentanwert der elektrischen Stromstärke  
I\_{max}: Scheitelwert der elektrischen Stromstärke  
~w: Kreisfrequenz  
t: Zeit  
~D~f: Phasenverschiebung zwischen U und I  
I\_{eff}: Effektivwert der elektrischen Stromstärke

#### Widerstände im Wechselstromkreis

- kapazitiver und induktiver Widerstand im Wechselstromkreis

Für eine sinusförmige Wechselspannung gilt:

X\_C =\frac{1}{~w \*C}

X\_L =~w \*L

mit: ~D~f =\pm 1/2 \*~p

Am Kondensator eilt der Strom der Spannung voraus.

An der Spule läuft der Strom der Spannung nach.

X\_C: kapazitiver Widerstand  
~w: Kreisfrequenz  
C: Kapazität  
X\_L: induktiver Widerstand  
L: Induktivität  
~D~f: Phasenverschiebung zwischen U und I

- Reihenschaltung aus kapazitivem, induktiven und Ohm'schen Widerstand

Z =\s{R^2 +(X\_L -X\_C)^2}

Z: Impedanz (Scheinwiderstand)  
R: Ohm'scher Widerstand  
X\_L: induktiver Widerstand  
X\_C: kapazitiver Widerstand

#### Leistung im Wechselstromkreis

P\_S =U\_{eff} \*I\_{eff}

P\_W =U\_{eff} \*I\_{eff} \*cos(~D~f)

P\_B =U\_{eff} \*I\_{eff} \*sin(~D~f)

P\_S: Scheinleistung  
U\_{eff}: Effektivwert der elektrischen Spannung  
I\_{eff}: Effektivwert der elektrischen Stromstärke  
P\_W: Wirkleistung  
~D~f: Phasenverschiebung zwischen U und I  
P\_B: Blindleistung

((28))

### Kondensator

#### Kapazität eines Kondensators

C =Q/U

Für den Plattenkondensator gilt:  
C =~e\_0 \*~E\_r \*A/d

C: Kapazität des Kondensators  
Q: Ladung des Kondensators  
U: elektrische Spannung  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
~e\_r: Dielektrizitätszahl  
A: Flächeninhalt einer Platte  
d: Abstand der Kondensatorplatten

#### Energie des geladenen Kondensators (elektrische Feldenergie)

E =1/2 \*C \*U^2

E: Energie  
C: Kapazität des Kondensators  
U: elektrische Spannung

#### Aufladen und Entladen eines Kondensators über einen Ohm'schen Widerstand

- Aufladen eines Kondensators:

U\_C(t) =U\_0 \*(1 -e^{-\frac{t}{R \*C}}

I(t) =I\_0 \*e^{-\frac{t}{R \*C}}

Q(t) =Q\_0 \*(1 -e^{-\frac{t}{R \*C}}

- Entladen eines Kondensators:

U\_C(t) =U\_0 \*e^{-\frac{t}{R \*C}}

I(t) =-I\_0 \*e^{-\frac{t}{R \*C}}

Q(t) =Q\_0 \*e^{-\frac{t}{R \*C}}

U\_C: elektrische Spannung am Kondensator  
U\_0: Quellenspannung beim Aufladen bzw. elektrische Spannung am Kondensator zu Beginn des Entladevorgangs  
t: Zeit  
R: Ohm'scher Widerstand  
C: Kapazität des Kondensators  
I: elektrische Stromstärke  
I\_0: elektrische Stromstärke zu Beginn des Auf- bzw. Entladevorgangs  
Q: Ladung des Kondensators  
Q\_0: Ladung des Kondensators am Ende des Aufladevorgangs bzw. zu Beginn des Entladevorgangs

#### Differenzialgleichung zur Beschreibung des Aufladevorgangs

\dot{Q}(t) +\frac{1}{R \*C} \*Q(t) =\frac{U\_0}{R}

\frac{dQ}{dt} +\frac{1}{R \*C} \*Q =\frac{U\_0}{R}

Q: Ladung des Kondensators  
R: Ohm'scher Widerstand  
C: Kapazität des Kondensators  
U\_0: Quellenspannung beim Aufladen  
t: Zeit

#### Differenzialgleichung zur Beschreibung des Entladevorgangs

\dot{Q}(t) +\frac{1}{R \*C} \*Q(t) =0

\frac{dQ}{dt} +\frac{1}{R \*C} \*Q =0

Q: Ladung des Kondensators  
R: Ohm'scher Widerstand  
C: Kapazität des Kondensators  
t: Zeit

((29))

#### Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren

- Reihenschaltung:

Q\_{ges} =Q\_1 =Q\_2 =... =Q\_n

U\_{ges} =U\_1 +U\_2 +... +U\_n

\frac{1}{C\_{ges}} =\frac{1}{C\_1} +\frac{1}{C\_2} +... +\frac{1}{C\_n}

- Parallelschaltung:

Q\_{ges} =Q\_1 +Q\_2 +... +Q\_n

U\_{ges} =U\_1 =U\_2 =... =U\_n

C\_{ges} =C\_1 +C\_2 +... +C\_n

Q\_{ges}: Gesamtladung  
Q\_1, Q\_2, ...: Einzelladungen  
U\_{ges}: Gesamtspannung  
U\_1, U\_2, ...: Einzelspannungen  
C\_{ges}: Gesamtkapazität  
C\_1, C\_2, ...: Einzelkapazitäten

### Magnetisches Feld

#### magnetische Flussdichte

B =\frac{F}{I \*s}

Außerhalb eines geraden stromdurchflossenen Leiters gilt:

B =~m\_0 -~m\_r \*\frac{I}{2~p \*r}

Innerhalb einer stromdurchflossenen langgestreckten Spule gilt:

B =~m\_0 \*~m\_r \*\frac{N \*I}{l}

B: magnetische Flussdichte  
F: Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter  
I: elektrische Stromstärke  
s: wirksame Länge des Leiters im Magnetfeld  
~m\_0: magnetische Feldkonstante  
~m\_r: Permeabilitätszahl des Mediums  
r: Abstand vom Leiter  
N: Windungszahl der Spule  
l: Länge der Spule

#### magnetische Feldstärke

Innerhalb einer stromdurchflossenen langgestreckten Spule gilt:

H =N \*I/l

Außerhalb eines geraden stromdurchflossenen Leiters gilt:

H =\frac{I}{2~p \*r}

H: magnetische Feldstärke  
N: Windungszahl der Spule  
l: Länge der Spule  
I: elektrische Stromstärke  
r: Abstand vom Leiter

#### Lorentz-Kraft auf bewegte Ladungsträger

allgemein:

\vec{F\_L} =q \*(\vec{v} \times \vec{B})

F\_L =q \*v \*B \*sin~a

Unter der Bedingung \vec{v} \perp \vec{B} gilt:

F\_L =q \*v \*B

F\_L: Lorentz-Kraft  
q: Ladung  
v: Geschwindigkeit  
B: magnetische Flussdichte  
~a: Winkel zwischen Geschwindigkeit und magnetischer Flussdichte

((30))

#### Hall-Spannung

<Bild>Ein elektrischer Strom fließt von links nach rechts durch ein quaderförmiges Plättchen mit Breite b und Dicke d. Das Plättchen wird von vorne nach hinten senkrecht zur Stromrichtung und parallel zur Oberseite von einem Magnetfeld mit magnetischer Flussdichte B durchdrungen. Zwischen der Oberseite und der Unterseite des Plättchens wird eine Spannung gemessen.  
</Bild>

U\_H =R\_H \*\frac{I \*B}{d}

U\_H =b \*v \*B

R\_H =\frac{1}{n \*q}

U\_H: Hall-Spannung  
R\_H: Hall-Konstante  
I: elektrische Stromstärke durch das Plättchen  
B: magnetische Flussdichte  
d: Dicke des Plättchens  
b: Breite des Plättchens  
v: Geschwindigkeit der Ladungsträger durch das Plättchen  
n: Ladungsträgerdichte  
q: Ladung des Ladungsträgers

### Induktion

#### magnetischer Fluss

<Bild>Eine Fläche A steht im Winkel ~f zu einer wirksamen Fläche A\_{\perp}.  
Ein senkrecht zu A\_{\perp} stehendes Magnetfeld mit Flussdichte B durchdringt beide Flächen.  
</Bild>

~F =B \*A\_{\perp} =B \*A \*cos~f

~F: magnetischer Fluss  
B: magnetische Flussdichte  
A\_{\perp}: wirksamer Flächeninhalt  
A: Flächeninhalt  
~f: Winkel zwischen Fläche und wirksamer Fläche

#### Induktionsgesetz

- Für eine Leiterschleife gilt:

U\_{ind}(t) =-\frac{d~F}{dt} =-\dot{~F}(t)

- Für eine Spule gilt:

U\_{ind} =-N \*\frac{~D~F}{~Dt}

- Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte bei A\_{\perp} =konstant:

U\_{ind} =-N \*A\_{\perp} \*\frac{~DB}{~Dt}

U\_{ind}(t}=-N \*A\_{\perp} \*\frac{dB}{dt}   
=-N \*A\_{\perp} \*\dot{B}(t)

- Induktion durch Änderung des wirksamen Flächeninhalts bei B =konstant:

U\_{ind} =-N \*B \*\frac{~D(A\_{\perp})}{~Dt}

U\_{ind}(t) =-N \*B \*\frac{d(A\_{\perp})}{dt}   
=-N \*B \*\dot{A\_{\perp}}(t)

- Induktionsspannung am bewegten Leiter im homogenen Magnetfeld:

Unter der Bedingung \vec{v} \perp \vec{B} gilt:  
U\_{ind} =-B \*l \*v

U\_ind: induzierte Spannung  
~F: magnetischer Fluss  
t: Zeit  
N: Windungszahl der Spule  
A\_{\perp}: wirksamer Flächeninhalt  
B: magnetische Flussdichte  
l: wirksame Länge des Leiters  
v: Geschwindigkeit des Leiters

((31))

### Transformator

#### Verhältnis der Spannungen eines unbelasteten idealen Transformators

\frac{U\_1}{U\_2} =\frac{N\_1}{N\_2}

U\_1: elektrische Spannung an der felderzeugenden Spule (Primärspule)  
U\_2: elektrische Spannung an der Induktionsspule (Sekundärspule)  
N\_1: Windungszahl der felderzeugenden Spule (Primärspule)  
N\_2: Windungszahl der Induktionsspule (Sekundärspule)

#### Verhältnis der Ströme eines stark belasteten idealen Transformators (Kurzschlussfall)

\frac{I\_1}{I\_2} =\frac{N\_2}{N\_1}

I\_1: elektrische Stromstärke durch die felderzeugende Spule (Primärspule)  
I\_2: elektrische Stromstärke durch die Induktionsspule (Sekundärspule)  
N\_1: Windungszahl der felderzeugenden Spule (Primärspule)  
N\_2: Windungszahl der Induktionsspule (Sekundärspule)

### Spule

#### Induktivität einer langgestreckten Spule

L =\frac{~m\_0 \*~m\_r \*N^2 \*A}{l}

L: Induktivität  
~m\_0: magnetische Feldkonstante  
~m\_r: Permeabilitätszahl des Mediums  
N: Windungszahl der Spule  
A: Querschnittsfläche der Spule  
l: Länge der Spule

#### Selbstinduktionsspannung einer Spule

U\_{ind} =-L \*\frac{~DI}{~Dt}

allgemein:

U\_{ind}(t) =-L \*\frac{dI}{dt}   
=-L \*\dot{I}(t)

U\_{ind}: induzierte Spannung  
L: Induktivität  
I: elektrische Stromstärke  
t: Zeit

#### Energie der stromdurchflossenen Spule (magnetische Feldenergie)

E =1/2 \*L \*I^2

E: Energie  
L: Induktivität  
I: elektrische Stromstärke

((32))

#### Schaltvorgänge an einer Spule

Einschaltvorgang:

I(t) =I\_0 \*(1 -e^{-R/L \*t})

Ausschaltvorgang:

I(t) =I\_0 \*e^(-R/L \*t})

I: elektrische Stromstärke  
I\_0: elektrische Stromstärke durch die Spule am Ende bzw. zu Beginn des Schaltvorgangs  
R: Ohm'scher Widerstand  
L: Induktivität der Spule  
t: Zeit

#### Differenzialgleichung zur Beschreibung des Ausschaltvorgangs

\dot{I}(t) +R/L \*I(t) =0

\frac{dI}{dt} +R/L \*I =0

I: Stromstärke  
t: Zeit  
R: Ohm'scher Widerstand  
L: Induktivität der Spule

#### Differenzialgleichung zur Beschreibung des Einschaltvorgangs

\dot{I}(t) +R/L \*I(t) =\frac{U\_0}{L}

\frac{dI}{dt} +R/L \*I =\frac{U\_0}{L}

I: Stromstärke  
t: Zeit  
R: Ohm'scher Widerstand  
L: Induktivität der Spule  
U\_0: Quellenspannung beim Einschalten

### Elektromagnetische Schwingungen

#### Periodendauer einer ungedämpften elektromagnetischen Schwingung im Schwingkreis (Thomson'sche Schwingungsgleichung)

T =2~p \*\s{L \*C}

T: Periodendauer  
L: Induktivität  
C: Kapazität

#### Schwingungsgleichungen der ungedämpften harmonischen elektromagnetischen Schwingung

Für einen bei t =0s geladenen Kondensator gilt:

U(t) =U\_{max} \*cos(~w \*t)

I(t) =-I\_{max} \*sin(~w \*t)

Q(t) =Q\_{max} \*cos(~w \*t)

U: elektrische Spannung;  
U\_{max}: maximale auftretende elektrische Spannung  
~w: Kreisfrequenz  
t: Zeit  
I: elektrische Stromstärke  
I\_{max}: maximale auftretende elektrische Stromstärke  
Q: Ladung des Kondensators  
Q\_{max}: maximale Ladung des Kondensators

#### Differenzialgleichung der ungedämpften harmonischen elektromagnetischen Schwingung

\ddot{Q}(t) +\frac{1}{L \*C} \*Q(t) =0

\frac{d^2Q}{dt^2} +\frac{1}{L \*C} \*Q =0

Q: Ladung des Kondensators  
t: Zeit  
L: Induktivität  
C: Kapazität

((33))

#### gedämpfte harmonische elektromagnetische Schwingung (Schwingfall)

Für einen bei t =0 s geladenen Kondensator gilt:

Q(t) =Q\_{max} \*e^{-~d \*t} \*cos(~w\_D \*t)

mit: ~w\_D =\s{(~w)^2 -(~d)^2}

Q: Ladung des Kondensators  
Q\_{max}: maximale Ladung des Kondensators  
~d: Abklingkoeffizient  
t: Zeit  
~w\_D: Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung  
~w: Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung

#### Differenzialgleichung der gedämpften harmonischen elektromagnetischen Schwingung

\ddot{Q}(t) +2~d \*dot{Q}(t) +\frac{1}{L \*C} \*Q(t) =0

\frac{d^2Q}{dt^2} +2~d \*\frac{dQ}{dt} +\frac{1}{L \*C} \*Q =0

mit: ~d =\frac{R}{2L}

Q: Ladung des Kondensators  
t: Zeit  
~d: Abklingkoeffizient  
L: Induktivität  
C: Kapazität  
R: Ohm'scher Widerstand

#### Grundfrequenz eines Dipols

f =\frac{c}{2l}

f: Frequenz  
c: Ausbreitungsgeschwindigkeit  
l: Länge des Dipols

### Elektromagnetische Wellen

#### Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum

c =\frac{1}{\s{~e\_0 -~m\_0}}

c: Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum  
~m\_0: magnetische Feldkonstante  
~e\_0: elektrische Feldkonstante

#### Intensität ungedämpfter elektromagnetischer Wellen

I =P/A

I =1/2 \*c \*~e\_0 \*(E\_{max})^2

I =1/2 \*c \*\frac{1}{~m\_0} \*(B\_{max})^2

I: Intensität  
P: Leistung  
A: Flächeninhalt  
c: Ausbreitungsgeschwindigkeit  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
E\_{max}: maximale elektrische Feldstärke des elektrischen Felds der Welle  
~m\_0: magnetische Feldkonstante  
B\_{max}: maximale magnetische Flussdichte des magnetischen Felds der Welle

((34))

## 3.3 Optik

### Geometrische Optik

#### Reflexionsgesetz

~a =~a'

~a: Einfallswinkel  
~a': Reflexionswinkel

#### Brechung

- Brechungsgesetz

<Bild>Ein einfallender Strahl trifft im optischen Medium mit Brechzahl n\_1 unter dem Winkel ~a zum Lot (Einfallswinkel) auf eine Grenzfläche, an die sich ein optisches Medium mit Brechzahl n\_2 anschließt. Beim Übergang in das optische Medium mit Brechzahl n\_2 ändert der Strahl seine Richtung. Der gebrochene Strahl geht im optischen Medium n\_2 im Winkel ~b zum Lot (Brechungswinkel) weiter, wobei ~b <~a gilt.  
</Bild>

n\_2 >n\_1

\frac{sin~a}{sin~b} =\frac{n\_2}{n\_1} =\frac{c\_1}{c\_2}

~a: Einfallswinkel  
~b: Brechungswinkel  
n\_1, n\_2: Brechzahlen der optischen Medien  
c\_1, c\_2: Lichtgeschwindigkeiten in den optischen Medien

- Brechzahl

n =\frac{c\_{Vakuum}}{c\_{Medium}}

n: Brechzahl des optischen Mediums  
c\_{Vakuum}: Vakuumlichtgeschwindigkeit  
c\_{Medium}: Lichtgeschwindigkeit im optischen Medium

- Grenzwinkel der Totalreflexion

sin(~a\_G) =\frac{n\_2}{n\_1}

~a\_G: Grenzwinkel der Totalreflexion  
n\_1, n\_2: Brechzahlen der optischen Medien

#### Abbildungsgleichung für dünne Linsen und für Spiegel

1/f =1/g +1/b

f: Brennweite  
g: Gegenstandsweite  
b: Bildweite

#### Abbildungsmaßstab für dünne Linsen und für Spiegel

A =B/G =b/g

A: Abbildungsmaßstab  
B: Bildgröße  
G: Gegenstandsgröße  
b: Bildweite  
g: Gegenstandsweite

((35))

### Wellenoptik

#### Interferenz

- Doppelspalt

Für Maxima gilt:

\frac{k \*~l}{g} =sin(~a\_k)

k =0, 1, 2, ...

Für Minima gilt:

\frac{(2k -1) \*1/2 ~l}{g} =sin(~a\_k)

k =1, 2, 3, ...

~l: Wellenlänge  
g: Spaltmittenabstand  
~a\_k: Winkel, unter dem das Maximum bzw. Minimum k-ter Ordnung erscheint

- Gitter

Für Hauptmaxima gilt:

\frac{k \*~l}{g} =sin(~a\_k)

k =0, 1, 2, ...

~l: Wellenlänge  
g: Spaltmittenabstand  
~a\_k: Winkel, unter dem das Hauptmaximum k-ter Ordnung erscheint

- Einzelspalt

Für Minima gilt:

\frac{k \*~l}{d} =sin(~a\_k)

k =1, 2, 3, ...

Für Maxima ab der ersten Ordnung gilt (Näherung):

\frac{(2k +1) \*1/2 ~l}{d} =sin(~a\_k)

k =1, 2, 3, ...

~l: Wellenlänge  
d: Spaltbreite  
~a\_k: Winkel, unter dem das Maximum bzw. Minimum k-ter Ordnung erscheint

#### Bragg-Beziehung

2d \*sin(~f\_k) =k \*~l

k =1, 2, 3, ...

d: Netzebenenabstand  
~f\_k: Glanzwinkel (zur Netzebene)  
~l: Wellenlänge

#### Rayleigh'sches Kriterium der Auflösung

~a\_k =1,22 \*\frac{~l}{d}

~l: Wellenlänge  
d: Durchmesser der Öffnung  
~a\_k: kritischer Winkel, bei dem die beiden Quellen gerade noch getrennt wahrgenommen werden

((36))

#### Durchlässigkeit beim linearen Polarisationsfilter

\frac{I}{I\_0} =(cos~f)^2

I: Intensität der durchgelassenen Welle  
I\_0: Intensität der einlaufenden Welle  
~f: Winkel zwischen der Schwingungsrichtung des einfallenden Lichts und der Polarisationsachse des Filters

#### Brewster-Gesetz zur Polarisation des Lichts, senkrecht zur Zeichenebene

<Bild>Ein einfallender Strahl trifft im optischen Medium mit Brechzahl n\_1 im Winkel ~e\_P zum Lot (Polarisations-/Einfallswinkel) auf eine Grenzfläche, an die sich ein optisches Medium mit Brechzahl n\_2 anschließt.  
Von der Stelle, an der der einfallende Strahl die Grenzfläche trifft, gehen zwei Strahlen aus:  
Der reflektierte Strahl bleibt im optischen Medium n\_1 und verlässt die Grenzfläche unter dem Winkel ~e\_P zum Lot.  
Der gebrochene Strahl im Medium mit der Brechzahl n\_2 verläuft unter einem kleineren Winkel zum Lot.  
Dabei stehen der reflektierte Strahl und der gebrochene Strahl im rechten Winkel zueinander.  
</Bild>

n\_1 <n\_2

tan(~e\_P) =\frac{c\_1}{c\_2} =\frac{n\_2}{n\_1}

~e\_P: Polarisationswinkel (Einfallswinkel)  
c\_1, c\_2: Lichtgeschwindigkeit im optischen Medium  
n\_1, n\_2: Brechzahlen der optischen Medien

## 3.4 Quantenphysik und Materie

### Quantenobjekte

#### Energie eines Photons

E =h \*f

E: Energie  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
f: Frequenz des Photons

#### Energiebilanz beim Fotoeffekt

E\_{kin, max} =h \*f - W\_A

E\_{kin, max}: maximale kinetische Energie der Fotoelektronen  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
f: Frequenz des Photons  
W\_A: Auslösearbeit

#### Impuls eines Photons

p =E/c

p: Impuls  
E: Energie  
c: Lichtgeschwindigkeit

#### Wellenlänge eines Quantenobjekts (de-Broglie-Wellenlänge)

~l =h/p

~l: Wellenlänge  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
p: Impuls des Quantenobjekts

((37))

#### Compton-Effekt

~D~l =~l\_C \*(1 -cos~f)

mit: ~l\_C =\frac{h}{m \*c}

~D~l: Änderung der Wellenlänge  
~l\_C: Compton-Wellenlänge  
~f: Streuwinkel (Winkel zwischen der Richtung des eingestrahlten und der Richtung des gestreuten Photons)  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
m: Masse des Quantenobjekts  
c: Lichtgeschwindigkeit

#### Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation

~Dx \*~D(p\_x) >=\frac{h}{4~p}

~Dx: Ortsunbestimmtheit  
~D(p\_x): Impulsunbestimmtheit  
h: Planck'sches Wirkungsquantum

#### Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation

~DE \*~Dt >=\frac{h}{4~p}

~DE: Energieunbestimmtheit  
~Dt: Zeitunbestimmtheit  
h: Planck'sches Wirkungsquantum

#### zeitunabhängige Schrödingergleichung

(~F\_n)''(x) =\frac{8~p^2 \*m}{h^2} \*(E\_{pot}(x) -E\_n) \*~F\_n(x)

n =1, 2, 3, ...

Lösung für den Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden:

~F\_n(x) =A\_n \*sin(\frac{~p \*n}{L} \*x)  
für 0 <x <L,

sonst: ~F\_n(x) =0

~F: Wellenfunktion  
m: Masse  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
x: Ort  
E\_{pot}: potenzielle Energie  
E\_n: Energiewerte  
A\_n: Normierungsfaktor  
L: Länge des Potenzialtopfes

### Atomhülle

#### Frequenzbedingung für Übergänge zwischen den diskreten Energieniveaus

h \*f =E\_m -E\_n =~DE

n, m =1, 2, 3, ...

h: Planck'sches Wirkungsquantum  
f: Frequenz  
E\_m, E\_n: Energieniveaus  
~DE: Energiedifferenz

#### Spektrallinien des Wasserstoffatoms

f =c \*R\_H \*(\frac{1}{n^2} -\frac{1}{m^2})

n, m =1, 2, 3, ...

m >n

f: Frequenz  
c: Vakuumlichtgeschwindigkeit  
R\_H: Rydberg-Konstante des Wasserstoffatoms

((38))

#### Energieniveaus des Wasserstoffatoms (ohne Korrektur des mitbewegten Kerns)

E\_n =-\frac{m\_e \*e^4}{8(~e\_0)^2 \*h^2} \*\frac{1}{n^2}   
=-13,6eV \*\frac{1}{n^2}

n =1, 2, 3, ...

E\_n: Energieniveau des Wasserstoffatoms  
m\_e: Elektronenmasse  
e: Elementarladung  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
h: Planck'sches Wirkungsquantum

#### Energieniveaus eines Ein-Elektronen-Atoms (ohne Korrektur des mitbewegten Kerns)

E\_n =-\frac{m\_e \*e^4}{8(~e\_0)^2 \*h^2} \*\frac{Z^2}{n^2}   
=-13,6eV \*\frac{Z^2}{n^2}

n =1, 2, 3, ...

E\_n: Energieniveau eines Ein-Elektronen-Atoms  
m\_e: Elektronenmasse  
e: Elementarladung  
~e\_0: elektrische Feldkonstante  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
Z: Ordnungszahl

#### Moseley-Gesetz für die K\_{~a}-Linie eines Röntgenspektrums

E\_{K\_{~a}} =13,6eV \*3/4 \*(Z -1)^2

E\_{K\_{~a}}: Energie des beim K\_{~a}-Übergang emittierten Photons  
Z: Ordnungszahl

#### Energie im eindimensionalen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden

E\_n =\frac{h^2}{8m \*L^2} \*n^2

n =1, 2, 3, ...

Im Inneren gilt: E\_{pot} =0eV

E\_n: Energieniveau  
h: Planck'sches Wirkungsquantum  
m: Masse des Quantenobjekts  
L: Länge des Potenzialtopfes

#### Materiewellenlänge bei stationären Zuständen im eindimensionalen Potenzialtopf

~l\_n =2 \*L/n

n =1, 2, 3, ...

~l\_n: Materiewellenlänge  
L: Länge des Potenzialtopfs

## 3.5 Wärmelehre

### Grundgleichung der Wärmelehre

Q =~DE =c \*m \*~DT

Q: aufgenommene bzw. abgegebene Wärme  
E: Energie  
c: spezifische Wärmekapazität  
m: Masse  
T: Temperatur

### Entropieänderung

~DS =\frac{Q\_{rev}}{T}

S: Entropie  
Q\_{rev}: reversibel aufgenommene bzw. abgegebene Wärme  
T: Temperatur

((39))

### Hauptsätze der Wärmelehre

#### 1. Hauptsatz

~DU =Q +W

U: innere Energie  
Q: Wärme  
W: Arbeit

#### 2. Hauptsatz

~DS >=0

S: Entropie

### Zustandsgleichung für ideale Gase

\frac{p \*V}{T} =konstant

p: Druck  
V: Volumen  
T: Temperatur

### Thermisches Verhalten von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen

#### Aggregatzustandsänderungen

- Verdampfungswärme

Q\_V =q\_V \*m

Q\_V: Verdampfungswärme  
q\_V: spezifische Verdampfungswärme  
m: Masse

- Schmelzwärme

Q\_S =q\_S \*m

Q\_S: Schmelzwärme  
q\_S: spezifische Schmelzwärme  
m: Masse

#### Wärmeleitung

Q =~DE =~l \*A \*\frac{~DT}{d} \*~Dt

Q: Wärme  
E: Energie  
~l: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient  
A: Flächeninhalt  
T: Temperatur  
d: Dicke/Länge des Körpers  
t: Zeit

#### Thermische Längenänderung

~Dl =~a \*l\_0 \*~DT

l: Länge  
~a: Längenausdehnungskoeffizient  
l\_0: Ausgangslänge  
T: Temperatur

#### Thermische Volumenänderung

~DV =~c \*V\_0 \*~DT

V: Volumen  
~c: Volumenausdehnungskoeffizient  
V\_0: Ausgangsvolumen  
T: Temperatur

((40))

## 3.6 Spezielle Relativitätstheorie

### Galilei-Transformation

S \to S'

x' =x -v \*t

y' =y

z' =z

t' =t

S' \to S

x =x' +v \*t

y =y'

z =z'

t =t'

x, y, z: Koordinaten im Inertialsystem S  
x', y', z': Koordinaten im Inertialsystem S'  
t, t': Zeiten in den jeweiligen Systemen  
v: Relativgeschwindigkeit der Inertialsysteme S und S'

### Lorentz-Faktor

~c =\frac{1}{\s{1 -(v/c)^2}}

~c: Lorentz-Faktor  
v: Relativgeschwindigkeit der Inertialsysteme S und S'  
c: Lichtgeschwindigkeit

### Lorentz-Transformation

S \to S'

x' =~c \*(x -v \*t)

y' =y

z' =z

t' =~c \*(t -\frac{v}{c^2} \*x)

S' \to S

x =~c \*(x' +v \*t')

y =y'

z =z'

t =~c \*(t' +\frac{v}{c^2} \*x')

x, y, z: Koordinaten im Inertialsystem S  
x', y', z': Koordinaten im Inertialsystem S'  
t, t': Zeiten in den jeweiligen Systemen  
v: Relativgeschwindigkeit der Inertialsysteme S und S' zueinander  
~c: Lorentz-Faktor  
c: Lichtgeschwindigkeit

### Zeitdilatation

~Dt =~c \*~D(t\_0)

~Dt: Zeitdauer, die ein Beobachter aus seinem Ruhesystem S für einen Vorgang misst  
~c: Lorentz-Faktor  
~D(t\_0): Zeitdauer, in der im dazu mit der Relativgeschwindigkeit v bewegten Bezugssystem S' ein Vorgang abläuft

### Längenkontraktion

l =\frac{l\_0}{~c}

l: Länge eines im bewegten Bezugssystem S' ruhenden Stabes, die ein Beobachter aus seinem Ruhesystem S misst;  
l\_0: Länge eines im bewegten Bezugssystem S' ruhenden Stabes, im bewegten Bezugssystem S' gemessen  
~c: Lorentz-Faktor

((41))

### Impuls

p =~c \*m \*v

p: Impuls  
~c: Lorentz-Faktor  
m: Masse  
v: Geschwindigkeit

### Energie

E =~c \*m \*c^2 =E\_0 +E\_{kin}

E: Energie  
~c: Lorentz-Faktor  
m: Masse  
c: Lichtgeschwindigkeit  
E\_0: Ruheenergie  
E\_{kin}: kinetische Energie

### Energie-Impuls-Beziehung

E^2 =c^2 \*p^2 +(E\_0)^2

E: Energie  
c: Lichtgeschwindigkeit  
p: Impuls  
E\_0: Ruheenergie

## 3.7 Kernphysik

### Nukleonen

A =Z +N

A: Nukleonenzahl, Massenzahl  
N: Neutronenzahl  
Z: Protonenzahl, Kernladungszahl

### Freisetzung von ~a-, ~b-, ~c-Strahlung

~a-Zerfall:

^{A}\_{Z}X \ra ^{A -4}\_{Z -2}Y +^{4}\_{2}He

~b-Zerfälle:

^{A}\_{Z}X \ra ^{A}\_{Z +1}Y +^{0}\_{-1}e +^{0}\_{0}\ol{v\_e}

^{A}\_{Z}X \ra ^{A}\_{Z -1}Y +^{0}\_{1}e +^{0}\_{0}v\_e

~c-Strahlung:

^{A}\_{Z}X\* \ra ^{A}\_{Z}X +^{0}\_{0}~c

A: Massenzahl  
Z: Protonenzahl, Kernladungszahl  
X, Y: Elementsymbol  
X\*: angeregtes Nuklid  
\ol{v\_e}: Elektron-Antineutrino  
v\_e : Elektron-Neutrino

### Aktivität einer radioaktiven Substanz

A(t) =-\dot{N}(t) =-\frac{dN}{dt} =~l \*N(t)

A: Aktivität  
N: Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne  
~l: Zerfallskonstante

((42))

### Zerfallsgesetz

N(t) =N\_0 \*e^{-~l \*t}

N(t) =N\_0-\*(1/2)^{\frac{t}{T\_{1/2}}}

mit: T\_{1/2} =\frac{ln2}{~l}

N: Anzahl der zur Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne  
N\_0: Anzahl der ursprünglich vorhandenen Kerne  
~l: Zerfallskonstante  
t: Zeit  
T\_{1/2}: Halbwertszeit

### Absorptionsgesetz

z(d) =z\_0 \*e^{-~m \*d}   
=z\_0 \*(1/2)^{\frac{d}{D\_{1/2}}}

z: Zählrate (hinter einem Absorber der Dicke d)  
z\_0: Zählrate (ohne Absorber, gleicher Ort)  
~m: Schwächungskoeffizient  
D\_{1/2}: Halbwertsdicke

### Energiedosis

D =E/m

D: Energiedosis  
E: aufgenommene Energie  
m: Masse

### Äquivalentdosis

H =D \*q

H: Äquivalentdosis  
D: Energiedosis  
q: Qualitätsfaktor

### Effektive Dosis

E =w\_{T\_1} \*H\_{T\_1} +w\_{T\_2} \*H\_{T\_2} +...

E: Effektive Dosis  
w\_{T\_1}, w\_{T\_2}, ...: Gewebe-Wichtungsfaktoren  
H\_{T\_1}, H\_{T\_2}, ...: Organ-Äquivalentdosen

### Bindungsenergie des Kerns

E\_B =~Dm \*c^2

mit: ~Dm =Z \*m\_p +N \*m\_n -m\_K

E\_B: Bindungsenergie  
~Dm: Massendefekt  
c: Lichtgeschwindigkeit  
Z: Protonenzahl, Kernladungszahl  
m\_p: Protonenmasse  
N: Neutronenzahl  
m\_n: Neutronenmasse  
m\_K: Kernmasse

### Freiwerdende Energie bei Kernreaktionen (Q-Wert)

Q =~DE =(m\_{vor} -m\_{nach}) \*c^2

r\_K \apx 1,4 \*10^{-15} m \*\s[3]{A}

Q: Q-Wert der Kernreaktion  
E: Energie  
m\_{vor}: Masse vor der Kernreaktion  
m\_{nach}: Masse nach der Kernreaktion  
c: Lichtgeschwindigkeit  
r\_K: Kernradius  
A: Massenzahl

((43))

## 3.8 Astrophysik

### Kepler'sche Gesetze

#### 1. Kepler'sches Gesetz

Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

<Bild>Die Planeten P bewegen sich auf Ellipsenbahnen um die Sonne, die in einem ihrer Brennpunkte F\_1 bzw. F\_2 steht.  
Der Abstand eines Brennpunkts zum Schnittpunkt der beiden Symmetrieachsen der Ellipse mit großer Halbachse a und kleiner Halbachse b wird als lineare Exzentrizität e bezeichnet.  
Ein Planet P bildet bei seinem Lauf auf der Ellipsenbahn mit den Brennpunkten F\_1 und F\_2 gedachte Dreiecke.  
</Bild>

mit: ~e =e/a

a, b: große bzw. kleine Halbachse  
e: lineare Exzentrizität  
F\_1, F\_2: Brennpunkte  
P: Planet  
~e: numerische Exzentrizität

#### 2. Kepler'sches Gesetz

<Bild>Die Verbindungsstrecke zwischen Sonne und einem Planeten überstreicht in einer gewissen Zeit eine bestimmte Fläche mit Flächeninhalt A.  
</Bild>

\frac{~DA}{~Dt} =konstant

A: Flächeninhalt der vom Leitstrahl überstrichene Fläche  
t: Zeit

#### 3. Kepler'sches Gesetz

\frac{(T\_1)^2}{(T\_2)^2} =\frac{(a\_1)^3}{(a\_2)^3}

T\_1, T\_2: Umlaufzeiten der Objekte beim Umlauf um den Zentralkörper  
a\_1, a\_2: große Halbachsen der Objekte beim Umlauf um den Zentralkörper

### Bewegung im Gravitationsfeld

#### Bahngeschwindigkeit eines Körpers auf einer Keplerellipse

v =\s{G \*M \*(2/r -1/a)}

v: Bahngeschwindigkeit  
G: Gravitationskonstante  
M: Masse des Zentralkörpers  
r: Abstand vom Zentralkörper  
a: große Halbachse der Bahnellipse

((44))

#### Zweikörperproblem

\frac{T^2}{a^3} =\frac{4~p^2}{G \*(m\_1 +m\_2)}

mit: a =a\_1 +a\_2

T: Umlaufzeit  
a\_1, a\_2: große Halbachsen der Himmelskörper (gemeinsamer Schwerpunkt)  
G: Gravitationskonstante  
m\_1, m\_2: Massen

#### Schwerpunktsatz

m\_1 \*a\_1 =m\_2 \*a\_2

m\_1, m\_2: Massen  
a\_1, a\_2: große Halbachsen der Himmelskörper (gemeinsamer Schwerpunkt)

#### Umlaufzeiten

\frac{1}{T\_{sid}} =\frac{1}{T\_{Erde}} \pm \frac{1}{T\_{syn}}

T\_{sid}: siderische Umlaufzeit  
T\_{Erde}: Umlaufzeit der Erde  
T\_{syn}: synodische Umlaufzeit

#### Kreisbahngeschwindigkeit

v =\s{\frac{G \*M}{r}}

v: Geschwindigkeit  
G: Gravitationskonstante  
M: Masse des Zentralkörpers  
r: Abstand vom Mittelpunkt des Zentralkörpers

#### Fluchtgeschwindigkeit

v =\s{\frac{2 \*G \*M}{r}}

v: Geschwindigkeit  
G: Gravitationskonstante  
M: Masse des Zentralkörpers  
r: Abstand vom Mittelpunkt des Zentralkörpers

### Schwarzschild-Radius eines schwarzen Lochs

R\_S =\frac{2 \*G \*M}{c^2}

R\_S: Radius des Ereignishorizonts des schwarzen Lochs  
G: Gravitationskonstante  
M: Masse des schwarzen Lochs  
c: Lichtgeschwindigkeit

### Strahlungsgesetze

#### Bestrahlungsstärke

E =\frac{~F}{4~p \*r^2}

E: Bestrahlungsstärke  
~F: Strahlungsleistung, Leuchtkraft  
r: Abstand vom Körper

#### Empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung (Näherung)

L \sim M^3

L: Leuchtkraft eines Hauptreihensterns;  
M: Masse des Sterns

#### Stefan-Boltzmann-Gesetz für schwarze Strahler

~F =~s \*A \*T^4

~F: Strahlungsleistung, Leuchtkraft  
~s: Stefan-Boltzmann-Konstante  
A: Flächeninhalt der abstrahlenden Fläche  
T: Temperatur

((45))

#### Wien'sches Verschiebungsgesetz

~l\_{max} \*T =b

~l\_{max}: Wellenlänge des Maximums der spektralen Verteilung der Strahlungsintensität  
T: Temperatur  
b: Wien'sche Verschiebungskonstante

### Entfernung und Helligkeit

#### Trigonometrische Parallaxe p in Bogensekunden

\frac{r}{1pc} =\frac{1''}{p}

r: Entfernung des Sterns  
p: trigonometrische Parallaxe

#### Eigenbewegung

v\_t =~m \*r

v\_t: Tangentialgeschwindigkeit;  
~m: Winkelgeschwindigkeit des Sterns (Eigenbewegung)  
r: Entfernung des Sterns

#### Beziehung zwischen den scheinbaren Helligkeiten m\_1 und m\_2 zweier Sterne

m\_1 -m\_2 =-2,5 \*lg(\frac{E\_1}{E\_2})

m\_1, m\_2: scheinbare Helligkeiten  
E\_1, E\_2: Bestrahlungsstärken

#### Beziehung zwischen den absoluten Helligkeiten M\_1 und M\_2 zweier Sterne

M\_1 -M\_2 =-2,5 \*lg(\frac{L\_1}{L\_2})

M\_1, M\_2: absolute Helligkeiten  
L\_1, L\_2: Leuchtkräfte

#### Entfernungsmodul eines Sternes

m -M =5 \*lg(\frac{r}{10pc})

m: scheinbare Helligkeit  
M: absolute Helligkeit  
r: Abstand zwischen Stern und Beobachter in pc

#### Empirische Perioden-Helligkeits-Beziehung bei Cepheiden

M =-1,84 -2,24 \*lg(\frac{p}{1d})

M: mittlere absolute Helligkeit  
p: Periodendauer des ~d-Cephei-Sternes in d

#### Hubble-Beziehung

v =H\_0 \*r

v: Radialgeschwindigkeit einer weit entfernten Galaxie  
H\_0: Hubble-Parameter  
r: Entfernung

((46))

#### Nichtrelativistische Näherung des optischen Doppler-Effekts

\frac{~Df}{f} \apx \pm v/c

\frac{~D~l}{~l} \apx \pm v/c

f: Frequenz  
v: Relativgeschwindigkeit von Sender und Empfänger  
c: Lichtgeschwindigkeit  
~l: Wellenlänge