

1. Mechanik von Massenpunkten

1.1 Kinetik von Massenpunkten

1.1.1 Massenpunkt

Definition des Massenpunktes

1.1.2 Bahnkurve

Koordinatensystem, Definition der Bahnkurve, Abstand, Beispiele für Bahnkurven: geradlinige gleichförmige Bewegung, gleichförmige Kreisbewegung, Winkelgeschwindigkeit

1.1.3 Geschwindigkeit

Mittlere Geschwindigkeit, Momentangeschwindigkeit, geradlinige gleichförmige Bewegung, gleichförmige Kreisbewegung

1.1.4 Beschleunigung

Definition, gleichförmig beschleunigte Bewegung, gleichförmige u. ungleichförmige Kreisbewegung, Radial- u. Tangentialbeschleunigung, Winkelgeschwindigkeit

1.1.5 Erdbeschleunigung

Fallversuch, schräger Wurf, zusammengesetzte Bewegung, Wurfparabel

1.2 Dynamik von Massenpunkten

1.2.1 Trägheit und Masse

Galileisches Trägheitsprinzip, 1. Newtonsches Axiom, Definition der trägen Masse, Masseneinheit, Massennormale, Definition des Impulses

1.2.2 2. Newtonsches Axiom

2. Newtonsches Axiom, Definition und Einheit der Kraft, experimentelle Überprüfung des Kraftgesetzes mit Luftkissenbahn, Raketenproblem

1.2.3 Beispiele für Kräfte und Kraftgesetze

Allgemeines Gravitationsgesetz, Eigenschaften einer Zentralkraft, 3. Newtonsches Axiom (Reaktionsprinzip), Schwerkraft an Erdoberfläche, Coulombsches Gesetz, Ladung, Einheit der Ladung, Elementarladung, lineares Federkraftgesetz, Reibungskräfte, Haft- und Gleitreibungskräfte, Stokessches Reibungsgesetz

1.2.4 Beispiele für Bewegungsgleichungen und deren Lösungen

Newtonsche Bewegungsgleichungen als Differentialgleichung 2. Ordnung, Anfangsbedingungen, Bewegung im homogenen Schwerfeld, schwingende Masse an Feder, ungedämpfter freier harmonischer Oszillator, harmonische Schwingung, Periode, Frequenz und Kreisfrequenz der Schwingung, Analogie der harmonischen Bewegung zur gleichförmigen Kreisbewegung

1.2.5 Reaktionsprinzip und Impulserhaltung

Äquivalenz des Reaktionsprinzips und der Impulserhaltung zweier paarweise wechselwirkender Körper in einem abgeschlossenen System, Impulserhaltungssatz für N paarweise wechselwirkende Körper in einem abgeschlossenen System

1.2.6 Drehimpuls, Drehmoment und Drehimpulserhaltung

Definition des Drehimpulses eines Massenpunktes, Drehimpuls für die krummlinige Bewegung eines Massenpunktes in einer Ebene, Definition des Drehmomentes, Grundgleichung der Drehbewegung, zeitliche Konstanz des Drehimpulses bei Zentralkräften, Drehimpuls der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, Torsionspendel, Drehimpulserhaltung für N Massenpunkte, die paarweise über Zentralkräfte wechselwirken

1.3 Gravitationskraft

1.3.1 Bestimmung von G und g

Bestimmung der Gravitationskonstanten mit der Drehwaage, g-Bestimmung mit Schwerependel, Fadenpendel, g-Bestimmung mit Reversionspendel

1.3.2 Gleichheit von schwerer und träger Masse

1.3.3 Gravitationsfeld und elektrisches Feld

Fern- und Nahwirkungskräfte, Feldbegriff, Feldstärke, Definition der Gravitations- und elektrischen Feldstärke, Probemasse und –ladung, Feldlinien

1.4 Energie, Arbeit, Potential und Leistung

1.4.1 Energie und Arbeit im homogenen Gravitationsfeld

Energieerhaltungssatz der Mechanik, Definition der kinetischen und potentiellen Energie, Energieeinheit, Anwendungen des Energiesatzes, Definition der Arbeit bei konstanter Kraft, Wegunabhängigkeit der Arbeit im homogenen Gravitationsfeld, Zwangs- und Hangabtriebskraft bei schiefer Ebene, allgemeine Definition der Arbeit bei krummliniger Verschiebung und nichtkonstanter Kraft, Arbeit als Linienintegral, Wegunabhängigkeit der Arbeit bei konservativen Kräften, Unterschied zwischen physikalischer und körperlicher Arbeit

1.4.2 Energie und Arbeit bei einer elastischen Feder

Ableitung des Energiesatzes aus der Bewegungsgleichung, kinetische u. potentielle Energie bei der Federschwingung

1.4.3 Arbeit und Energie im inhomogenen Gravitationsfeld

Arbeit im Gravitationsfeld einer Punktmasse, potentielle Energie der Felder von Punktmassen und -ladungen, Arbeit und potentielle Energie für beliebige Anordnungen mehrerer Punktmassen und –ladungen

1.4.4 Kraft und potentielle Energie

Kraft als Gradient der potentiellen Energie, partielle Ableitungen, Gradient, Nabla-Operator

1.4.5 Potentiale und Äquipotentialflächen

Definition des Gravitationspotentials und des elektrostatischen Potentials, Potential einer Punktmasse/Punktladung, Definition und Einheit der elektrischen Spannung, Äquipotentialflächen, Zusammenhang zwischen Feldstärken und Äquipotentialflächen, Beispiele für Äquipotentialflächen

1.4.6 Nichtkonservative Kräfte

Beispiele für konservative Kräfte, Gleitreibungskraft, Stokessche Reibung

1.4.7 Leistung

Definition und Einheiten der Leistung, Leistung bei konstanter Beschleunigung, Leistung bei Stokesscher Reibung

1.5 Bewegte Bezugssysteme und Trägheitskräfte

1.5.1 Inertialsysteme und Galilei-Transformation

Bezugssysteme, Inertial- und Nichtinertialsysteme, Galileitransformation

1.5.2 Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme

Trägheitskräfte in geradlinig beschleunigten Bezugssystemen, Äquivalenz von homogenem Schwerfeld und konstant beschleunigtem Bezugssystem

1.5.3 Rotierende Bezugssysteme: Zentrifugal- und Corioliskraft

Zentripetal- und Zentrifugalbeschleunigung, Zentrifugalkraft, Corioliskraft, Foucaultscher Pendelversuch, Corioliskräfte in der Meteorologie

- 2. **Zweikörpermechanik**
- 2.1 **Grundbegriffe der Mechanik mehrerer Massenpunkte**
- 2.1.1 Schwerpunktsbewegung
Definition des Massenmittelpunktes, Schwerpunkt, Schwerpunktsystem
- 2.1.2 Relativbewegung und reduzierte Masse
Relativkoordinaten, reduzierte Masse
- 2.2 **Stöße zwischen zwei Körpern**
Elastischer und inelastischer Stoss
- 2.2.1 Zentrale Stöße
Elastische und inelastische zentrale Stöße, ballistisches Pendel, optimaler Energieübertrag beim elastischen Stoss
- 2.2.2 Bemerkungen zu nichtzentralen Stößen
- 2.3 **Himmelsmechanik**
Geo- und heliozentrisches Weltbild
- 2.3.1 Keplersche Gesetze
Ellipsenbahnen, Flächensatz, Umlaufzeiten, Drehimpulserhaltung
- 2.3.2 Meeresgezeiten
Gravitation und Gezeiten, Spring- und Nippflut
- 3. **Dynamik starrer ausgedehnter Körper**
- 3.1 **Modell des starren Körpers**
Merkmal des starren Körpers
- 3.2 **Schwerpunkt**
Definition der Massendichte, Definition des Schwerpunkts des starren Körpers
- 3.2.1 Experimentelle Bestimmung des Schwerpunkts
- 3.3 **Rotation starrer Körper um feste Achsen**
- 3.3.1 Trägheitsmoment und Rotationsenergie
Trägheitsmoment starrer Körper, Drehachsenbezogenheit des Trägheitsmomentes, Rotationsenergie, Zusammenhang zwischen Rotationsenergie und Winkelgeschwindigkeit, Zusammenhang zwischen Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit, Trägheitsmoment eines Vollzylinders
- 3.3.2 Steinerscher Satz
- 3.3.3 Dynamik der Rotation um eine feste Achse
Definition der Winkelbeschleunigung, Bewegungsgleichung, Drehschwingung, experimentelle Überprüfung des Steinerschen Satzes, Experimente zum Trägheitsmoment und zur Drehimpulserhaltung
- 3.4 **Rotation um freie Achsen**
- 3.4.1 Bewegung eines starren Körpers
Beschreibung der Bewegung eines starren Körpers durch Schwerpunktsbewegung und Drehbewegung um momentane Drehachse durch Schwerpunkt, momentane Winkelgeschwindigkeit, Freiheitsgrade der Bewegung eines starren Körpers
- 3.4.2 Trägheitstensor
Definition des Trägheitstensors, Zusammenhang zwischen Trägheitstensor und Trägheitsmoment, Rotationsenergie
- 3.4.3 Hauptträgheitsachsen und Hauptträgheitsmomente

Hauptträgheitsachsen, Hauptträgheitsmomente, sphärischer, prolater, oblater und asymmetrischer Kreisel, physikalische Bedeutung der Hauptträgheitsmomente

3.4.4 Freie Achsen

Definition und Bedeutung der freien Achsen, stabile und instabile Rotation um freie Achsen

3.4.5 Nutation kräftefreier Kreisel

Kräftefreier symmetrischer Kreisel, Nutationsbewegung, Bewegung von Figurenachse und momentaner Drehachse, Nutationskegel, experimentelle Sichtbarmachung der momentanen Drehachse, Energieellipsoid, Konstruktion der Bewegung der Figurenachse durch Energieellipsoid und Drehimpulsellipsoid, Nachweis der stabilen Bewegung bei Rotation um Achse des größten und kleinsten Trägheitsmomentes und der Instabilität bei Rotation um Achse des mittleren Trägheitsmomentes

3.4.6 Präzession des schweren symmetrischen Kreisels

Präzessionsbewegung, Präzessionskegel, Präzessionswinkelgeschwindigkeit, zusammengesetzte Nutations- und Präzessionsbewegung des schweren symmetrischen Kreisels

4. Eigenschaften deformierbarer fester Körper

4.1 **Elastische Eigenschaften fester Körper**

Elastische und plastische Deformation

4.1.1 Hookesches Gesetz

Hookesches Gesetz, Elastizitätsmodul, Gültigkeitsbereich des Hookeschen Gesetzes, Dehnung, Zugspannung, molekulare Deutung des linearen Kraftgesetzes, Zugversuch, elastische Deformationsenergie, Hysteresekurve bei teilweise plastischer Verformung

4.1.2 Querkontraktion

Querkontraktion, Poissonzahl, relative Volumenänderung, Druckkraft, Definition und Einheiten des Druckes

4.1.3 Allseitige Kompression und Kompressionsmodul

Relative Volumenänderung, Kompressionsmodul und Kompressibilität

4.1.4 Scherung und Torsionsmodul

Schwerkraft und –winkel, Schubspannung, Schubmodul, plastische Verformung bei Scherung, Wandern von Stufenversetzungen im Kristall, Torsion und Torsionsmodul eines Drahtes

4.2 **Reibung von Festkörpern**

Bedeutung der Reibung für das menschliche Leben

4.2.1 Haft- und Gleitreibung

Definition des Haft- und Gleitreibungskoeffizienten, Stick-Slip-Bewegung, mikroskopische Prozesse der Reibung

4.2.2 Rollreibung

Mechanismus der Rollreibung, Definition des Rollreibungskoeffizienten

5. Harmonische Schwingungen

5.1 **Komplexe Darstellung von harmonischen Schwingungen**

Eulersche Formel, komplexe Ebene, harmonische Schwingungen im Zeigerdiagramm

5.2 **Gedämpfte freie harmonische Schwingungen**

Mechanische Dämpfung, Bewegungsgleichung, Schwingfall, Kriechfall, aperiodischer Grenzfall, Energie des gedämpften harmonischen Oszillators, Lebensdauer der Schwingung, Gütefaktor eines Oszillators

5.3 Erzwungene Schwingung und Resonanz

Äußere Kraft mit harmonischer Zeitabhängigkeit, Lösung der homogenen und inhomogenen Differentialgleichung, stationäre Lösung und Einschwingvorgang, Frequenzabhängigkeit von Amplitude und Phase, Abhängigkeit der Amplitude und Phase von der Dämpfung, Amplitudenresonanzkurve, mittlere Leistungsaufnahme des Oszillators, Leistungsresonanzkurve, Lorentz-Profil

6. Hydrostatik

6.1 Merkmale von realen und idealen Flüssigkeiten

Nah- und Fernordnung, Wahrscheinlichkeitsdichte und Dichte-Korrelationsfunktion von Kristallen und Flüssigkeiten, Merkmale idealer Flüssigkeiten: freie Verschiebbarkeit, Fehlen von Scherkräften, Kompressibilität von Flüssigkeiten

6.2 Statischer Druck in Flüssigkeiten

6.2.1 Isotropie der Druckausbreitung

Isotropie und Gleichheit des Druckes in ruhenden Flüssigkeiten, hydraulische Presse

6.2.2 Schweredruck

Schweredruck einer Wassersäule, Prinzip der Staumauer, Systeme kommunizierender Röhren, hydrostatisches Paradoxon, Höhenabhängigkeit der Ausflussreichweite von Flüssigkeiten aus einem Gefäß, Flüssigkeitsmanometer

6.2.3 Auftrieb

Auftriebskraft, Archimedisches Prinzip, Schwimmen von Festkörpern in Flüssigkeiten, cartesischer Taucher, Bestimmung des Körpervolumens durch Messung des Auftriebs (Jollysche Federwaage), Kippstabilität schwimmender Körper bei Schiefelage, Metazentrum

6.3 Grenzflächenphänomene bei Flüssigkeiten

6.3.1 Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Definition der spezifischen Oberflächenenergie, Definition der Oberflächenspannung, Gleichheit derselben bei Flüssigkeiten, molekulare Ursachen für Oberflächenenergie und Oberflächenspannung, Krümmungsdruck in Seifenblasen

6.3.2 Grenzflächenspannung und Benetzung

Kohäsions- und Adhäsionskräfte, Grenzflächenspannungen benetzender und nicht benetzender Flüssigkeiten, spitzer und stumpfer Randwinkel der Benetzung, vollständige Benetzung

6.3.3 Krümmungsdruck

Molekulare Ursache des Krümmungsdruckes, Krümmungsdruck für Kugeloberfläche, Zylinderoberfläche und dünnen Flüssigkeitsfilm zwischen Glasplatten

6.3.4 Kapillarität

Kapillarität, Steighöhe in Kapillaren

7. Hydrodynamik

7.1 Grundbegriffe und Strömungstypen

Stromlinie, Stromröhre, Geschwindigkeitsfeld, stationäre, laminare und turbulente Strömung

7.2 Kontinuitätsgleichung

Ableitung der Kontinuitätsgleichung

7.3 Bernoulli-Gleichung

Ableitung der Bernoulli-Gleichung aus der Energieerhaltung, statischer Druck und dynamischer Druck, Messung von statischem Druck, Gesamtdruck und dynamischem Druck, Prandtl'sches Staurohr, Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit dem Staurohr, Wirkungen des dynamischen Druckes im Alltag, Gesetz von Torricelli

7.4 Laminare Strömung mit Reibung

7.4.1 Innere Reibung von Fluiden

Scherung von Flüssigkeiten, Definition der Viskosität

7.4.2 Laminare Strömung durch Rohre mit Reibung

Herleitung des parabolischen Geschwindigkeitsprofils einer viskosen Strömung in einem Rohr und zwischen zwei Platten

7.4.3 Hagen-Poiseuillesches Gesetz

7.5 Turbulente Strömung, Reynolds-Zahl

Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, Karman-Wirbelstraßen, Definition und Bedeutung der Reynolds-Zahl, charakteristische Länge für ein Strömungsprofil, Ähnlichkeitsgesetz, Bemerkungen zur Wirbelentstehung

7.6 Hydrodynamische/aerodynamische Kräfte

7.6.1 (Luft)widerstandskraft

Widerstandsbeiwert

7.6.2 Dynamischer Auftrieb

Anfahr- und Mitfahrwirbel, Auftriebsbeiwert, Zweikomponentenwaage zur gleichzeitigen Messung von Widerstands- und Auftriebskraft

7.6.3 Kräfte beim Fliegen

Segelflug, Gleitzahl, Motorflug, Steigwinkel

7.6.4 Magnus-Effekt

8. Temperatur und Wärme

8.1 Makroskopische Betrachtungen zu Gasen

Charakteristische makroskopische Unterschiede zwischen Gasen einerseits und Flüssigkeiten und Festkörpern andererseits

8.1.1 Boyle-Mariottesches Gesetz

Boyle-Mariottesches Gesetz, Kompressibilität von Gasen

8.1.2 Luftdruck und barometrische Höhenformel

Toricellische Röhre, barometrische Höhenformel, exponentielle Atmosphäre

8.2 Kinetische Gastheorie

Molekulare Bewegung in Gasen, Brownsche Bewegung

8.2.1 Modell des idealen Gases

8.2.2 Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie

Gasdruck und Impulsübertrag auf Wand, Zusammenhang von Druck, Volumen und mittlerem Geschwindigkeitsquadrat

8.2.3 Mittlere kinetische Energie und absolute Temperatur

Definition der absoluten Temperatur eines Gases durch das mittlere Geschwindigkeitsquadrat, Boltzmann-Konstante, Idealgasgleichung, mittlere Energie pro Freiheitsgrad

8.2.4 Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung

Ableitung der Maxwell-Boltzmannschen Geschwindigkeitsverteilung durch Betrachtung der von Gasteilchen erreichten Höhe in der exponentiellen Atmosphäre, Verteilungsfunktionen für Geschwindigkeitskomponenten und Geschwindigkeitsbetrag, Messung der Geschwindigkeitsverteilung mit Geschwindigkeitsselektor

8.3 Temperatur und Temperaturmessung

Problematik der subjektiven Temperaturwahrnehmung, Temperaturabhängigkeit von Stoffeigenschaften

8.3.1 Temperaturskalen

Definition der Celsius-, Kelvin- und Fahrenheit-Skala

8.3.2 Elektrische Temperaturmessverfahren

Thermoelement, Thermospannung, Widerstandsthermometer

8.3.3 Thermische Ausdehnung

Definition des linearen Ausdehnungskoeffizienten, molekulare Ursache für thermische Ausdehnung (Asymmetrie des interatomaren Potentials), Anwendungen der thermischen Ausdehnung, Volumenausdehnung fester Körper

8.3.4 Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer

Thermische Volumenausdehnung von Gasen, Gesetz von Gay-Lussac, Gasthermometer, Zusammenhang zwischen Celsius- und Kelvin-Skala

8.4 Spezifische Wärme und innere Energie

8.4.1 Wärmeenergie, spezifische Wärme und Wärmeäquivalent

Wärme als Energieform, Definition und Einheit der Wärmemenge, Definition der spezifischen Wärme, Wärmeäquivalent und Kalorie, Messung der spezifischen Wärme mit dem Mischungskalorimeter

8.4.2 Mol, Molvolumen und Avogadro-Konstante

Definition der Stoffmengeneinheit mol, Molvolumen, Avogadro-Konstante, allgemeine Gaskonstante

8.4.3 Innere Energie und spezifische Molwärme idealer Gase

Definition der spezifischen Molwärme = molare Wärmekapazität, Wärmekapazität, Definition der inneren Energie eines Gases, spezifische Wärme idealer Gase bei konstantem Volumen

8.4.4 Molekulare Deutung der spezifischen Wärme von Gasen

Gleichverteilungssatz, Freiheitsgrade von Molekülen, Rotationsfreiheitsgrade zweiatomiger Moleküle, Schwingungsfreiheitsgrad, Quantisierung der Rotations- und Schwingungsenergien von Molekülen, Einfrieren der Rotations- und Schwingungsfreiheitsgrade bei tiefen Temperaturen, Rotations- und Schwingungsfreiheitsgrade mehratomiger Moleküle

8.4.5 Spezifische Wärme eines idealen Gases bei konstantem Druck

Spezifische Molwärme bei konstantem Druck, Definition des Adiabatenindex

8.4.6 Spezifische Wärme fester Körper

Dulong-Petitsches Gesetz, tatsächliche Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme von Festkörpern

8.4.7 Schmelzwärme und Verdampfungswärme

Schmelzkurve von Festkörpern, Verdampfungskurve von Flüssigkeiten, molare Schmelz- und Verdampfungswärme, molekulare Deutung der großen Verdampfungswärme von Wasser

8.5 Wärmetransport

8.5.1 Konvektion

Eigenschaft von Konvektion, Zentralheizungsmodell, Konvektion in der Atmosphäre

8.5.2 Wärmeleitung
Lineare Wärmeleitung, Definition der Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitungsgesetz, Wärmeleitung in Metallen und Nichtmetallen

8.5.3 Wärmestrahlung
Physikalische Natur der Wärmestrahlung, Definition von Emissions- und Absorptionsvermögen von Oberflächen, Schwarzer Körper, Hohlraumstrahlung, Eigenschaften der Hohlraumstrahlung, spektrales Emissions- und Absorptionsvermögen, spektrale Strahlungsdichte der Hohlraumstrahlung, Kirchhoffsches Gesetz, Plancksche Formel der Hohlraumstrahlung, Wiensches Verschiebungsgesetz, Stefan-Boltzmannsches Gesetz

9. Hauptsätze der Wärmelehre

9.1 Erster Hauptsatz

9.1.1 Zustandsgrößen und Zustandsgleichung
Gleichgewichtszustand, Zustandsgrößen, Zustandsgleichung

9.1.2 Erster Hauptsatz
Formulierung des 1. Hauptsatzes als Energiebilanz bei Zu- bzw. Abfuhr von Wärme, Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile 1. Art, Vorzeichenkonvention für Wärmemenge und Arbeit, Kompressionsarbeit an einem Gas, Ausdehnungsarbeit an einer Flüssigkeitslamelle

9.1.3 Reversible Zustandsänderungen
Definition einer reversiblen Zustandsänderung, Irreversibilität realer Prozesse

9.1.4 Zustandsänderungen idealer Gase
Isochore Prozesse, isobare Prozesse, Definition der Enthalpie, Zusammenhang zwischen spezifischer Wärme bei konstantem Druck und Enthalpie, isotherme Prozesse, p-V-Diagramm, adiabatische Prozesse

9.2 Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Formulierung des zweiten Hauptsatzes als Unmöglichkeit der spontanen Erzeugung bzw. Erhöhung von Temperaturdifferenzen in abgeschlossenen Systemen

9.2.1 Carnotscher Kreisprozess
Definition eines Kreisprozesses, Carnotscher Kreisprozess, Wirkungsgrad der Carnot-Maschine, Wärme-Kraft-Maschine und Wärmepumpe, gleicher Wirkungsgrad bei allen zwischen den gleichen Temperaturen reversibel arbeitenden Maschinen, Formulierung des zweiten Hauptsatzes als Unmöglichkeit, dass eine periodisch arbeitende Maschine Wärme vollständig in mechanische Energie umwandelt, Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile 2. Art, Wirkungsgrad bei irreversiblen Prozessen

9.2.2 Entropie
Reversibler Austausch von Wärmemengen im Carnot-Prozess, reduzierte Wärmemenge, Definition der Entropie als reversibel zugeführte reduzierte Wärmemenge, Entropie als Zustandsgröße, Berechnung von Entropieänderungen bei irreversiblen Prozessen durch reversible Ersatzprozesse, Gesetz von der Zunahme der Entropie bei realen Prozessen

9.2.3 Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Entropie

9.2.4 Kältemaschine und Wärmepumpe
Definition der Leistungszahl einer Kältemaschine, Definition der Leistungszahl einer Wärmepumpe

9.3 Dritter Hauptsatz (Nernstsches Wärmetheorem)

Entropie reiner Stoffe bei tiefen Temperaturen, Zusammenhang zwischen Entropie und spezifischer Wärme, dritter Hauptsatz: Prinzip der Unmöglichkeit, den absoluten Temperaturnullpunkt zu erreichen, absoluter Temperaturnullpunkt als Zustand maximaler Ordnung, Mischungsentropie

9.4 Reale Flüssigkeiten und Gase

9.4.1 Van-der Waalssche Zustandsgleichung

Eigenvolumen eines Gases, molekulare Anziehungskräfte, Binnendruck, van-der-Waalssche Zustandsgleichung und Isothermen, Maxwellsche Konstruktion der Isothermen realer Gase

9.4.2 Dampfdruck und Phasengleichgewichte

Sättigungsdampfdruck, Clausius-Clapeyron-Gleichung, Ursachen der Verdampfungswärme, Van't-Hoffsche Gleichung, Phasendiagramm, Dampfdruck-, Schmelz- und Sublimationskurve, Tripelpunkt, kritischer Punkt, Schmelzwärme eines Festkörpers

9.4.3 Joule-Thomson-Effekt

Freie adiabatische Expansion, Inversionstemperatur, Joule-Thomson-Effekt

10. Elektrostatik

10.1 Grundlagen der Elektrostatik

10.1.1 Elektrische Ladungen, Coulombsches Gesetz (teilweise Wiederholung)

Kraftwirkung elektrischer Ladungen, Ladungseinheit, Elementarladung, Coulombsches Gesetz, Erzeugung von Ladungen durch Reibung und Spannungsquellen, Messung von Ladungen, Definition der elektrischen Ladungsdichte

10.1.2 Elektrische Feldstärke (Wiederholung)

Definition und Vektorcharakter der elektrischen Feldstärke, Feldstärke einer Punktladung, Bedeutung von Feldlinien,

10.1.3 Elektrischer Fluss und Gaussches Gesetz

Definition des elektrischen Flusses, Gaussches Gesetz der Elektrostatik, Äquivalenz von Gausschem und Coulombschem Gesetz, Divergenz eines Vektorfeldes, Gausscher Satz der Vektoranalysis, Gaussches Gesetz in differentieller Form (Maxwell-Gleichung)

10.1.4 Arbeit, Potential und Spannung (teilweise Wiederholung)

Potentielle Energie im Feld einer Punktladung, Superpositionsprinzip für elektrisches Feld und potentielle Energie, Zusammenhang zwischen Kraft und potentielle Energie in einem konservativen Feld, Definition des elektrostatischen Potentials einer Anordnung von Ladungen und einer kontinuierlichen Ladungsverteilung, Definition und Einheit der elektrischen Spannung, Äquipotentialflächen und Beispiele hierzu

10.1.5 Elektrische Felder in symmetrischen Situationen

Außenfeld einer radialsymmetrisch geladenen Kugel, Feld einer unendlich ausgedehnten Ebene mit konstanter Flächenladungsdichte

10.1.6 Elektrischer Dipol

Definition des elektrischen Dipols und des elektrischen Dipolmomentes, Dipolpotential und Dipol-Feldstärke mit Herleitung, Dipolmomente von Molekülen, Dipol im homogenen elektrischen Feld, Drehmoment und potentielle Energie des Dipols

10.2 Elektrostatik von Leitern

Definition von elektrischen Leitern, freie Verschiebbarkeit von Ladungen

10.2.1 Influenz und Oberflächenladungen

Verschwinden des elektrostatischen Feldes im Inneren von Leitern, Existenz von Oberflächenladungen, Leiter mit parallelen Oberflächen im homogenen elektrischen Feld, Influenz, Abschirmung, Eigenschaften von elektrostatischen Feldern an Leiteroberflächen, Leiteroberflächen als Äquipotentialflächen, Zusammenhang von elektrischer Feldstärke und Oberflächenladungsdichte, Erzeugung von elektrischen Ladungen durch Influenz und Ladungstrennung im elektrischen Feld

10.2.2 Leiter mit Hohlraum im äußeren Feld

Feldfreiheit von Hohlräumen in einem Leiter, Faraday-Käfig

10.2.3 Kondensatoren und Kapazität

Kondensator als Ladungsspeicher, Definition und Einheit der Kapazität eines Kondensators, Kapazität des Platten-, Kugel- und Zylinderkondensators

10.2.4 Schaltungen von Kondensatoren

Schaltzeichen, Kapazität von Parallel- und Serienschaltung

10.2.5 Feldenergie und –energiedichte im Kondensator

10.3 Dielektrika

10.3.1 Dielektrika und Dielektrizitätskonstante

Eigenschaften eines Dielektrikums, Kapazitätserhöhung eines Kondensators mit Dielektrikum, Definition der Dielektrizitätskonstanten, Abschwächung elektrischer Felder durch Dielektrika

10.3.2 Polarisierung im Dielektrikum

Polarisierung im Dielektrikum durch Verschiebungs- und Orientierungspolarisation, Abschwächung des elektrischen Feldes in einem Dielektrikum durch Polarisationsladungen an den Oberflächen, Analogie von Influenz und Polarisation

10.3.3 Dielektrische Verschiebung und Polarisation

Definition und Einheit der dielektrischen Verschiebung und Polarisation, freie Ladungen und Polarisationsladungen, Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke, dielektrischer Verschiebung und dielektrischer Polarisation

10.3.4 Ferroelektrika und damit verwandte Effekte

Eigenschaften von und Beispiele für Ferroelektrika, Elektrostriktion, Piezoelektrizität

10.3.5 Elektrische Energie und Energiedichte im Dielektrikum

10.3.6 Elektrostatische Feldgleichungen für Dielektrika

Gauss'sches Gesetz für Dielektrika in integraler und differentieller Form, Zusammenhang zwischen dielektrischer Polarisation und Polarisationsladungsdichte

11. Elektrischer Strom

11.1 Strom als Ladungstransport

Beispiele für Transport elektrischer Ladungen: Elektronenstrahlen im Vakuum, Festkörper als elektronische Leiter, Ionenleiter, gemischte Leiter

11.1.1 Elektrische Stromstärke und Stromdichte

Definition und Einheit der elektrischen Stromstärke und der elektrischen Stromdichte, Stromdichte von Ladungen mit gegebener Teilchendichte und Geschwindigkeit, technische Stromrichtung

11.1.2 Ladungserhaltung und Kontinuitätsgleichung

Gesetz der Ladungserhaltung, Kontinuitätsgleichung für die elektrische Ladung

11.2 Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz

11.2.1 Driftgeschwindigkeit und Stromdichte

Elektrischer Strom als Driftbewegung im äußeren elektrischen Feld, mittlere freie Weglänge der Ladungsträger, linearer Zusammenhang zwischen Stromdichte und Feldstärke als Ohmsches Gesetz, Definition der elektrischen Leitfähigkeit, Beweglichkeit, Driftgeschwindigkeiten bei Elektronenleitung im Metall und Ionenleitung in Elektrolyten, Wiedemann-Franz'sches Gesetz

11.2.2 Ohmsches Gesetz

Definition und Einheit des elektrischen Widerstandes, spezifischer Widerstand, Spannungsabfall in einem stromdurchflossenen Leiter, Anwendungen von Widerständen als Spannungsteiler, Potentiometer, Kondensatorentladung über Widerstand, Zeitkonstante der Entladung

11.2.3 Stromleistung und Joulesche Wärme

Definition und Einheit der elektrischen Leistung an einem Ohmschen Widerstand, Joulesche Wärme

11.3 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

11.3.1 Metalle

Matthiesensche Regel, Streuung der Elektronen an Gitterschwingungen und an statischen Defekten, Restwiderstand

11.3.2 Supraleiter

Supraleitung, Sprungtemperatur, klassische (BCS-)Supraleiter, Cooper-Paare, Hochtemperatur-Supraleiter

11.3.3 Halbleiter

Element- und Verbindungshalbleiter, Energielücke, Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte im intrinsischen Halbleiter, Dotierung, Donatoren, Akzeptoren, Elektronen- und Löcherleitung, Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Halbleitern: Störstellenreserve, Störstellenerschöpfung, Eigenleitung, Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit

11.4 Stromkreise

11.4.1 Kirchhoffsche Regeln

Knotenregel, Maschenregel

11.4.2 Reihen- und Parallelschaltung

11.4.3 Innenwiderstände, Strom- und Spannungsmessung

Ideale Spannungs- und Strommessung, Innenwiderstand einer Spannungsquelle, elektromotorische Kraft, Abhängigkeit der Klemmenspannung vom Lastwiderstand, Strommessung mit Drehspulgeräten

11.5 Thermoelektrische Effekte

11.5.1 Kontaktspannung

Kontaktspannung, Austrittsarbeit

11.5.2 Thermoelektrische Spannungen und Ströme

Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannung, Thermospannung, Seebeck-Effekt

11.5.3 Peltier-Effekt

Peltier-Effekt als Umkehrung des Seebeck-Effektes, Peltier-Kühlung

12. Magnetostatik

12.1 Das Magnetfeld

Kraftwirkungen des Magnetfeldes, Magnetfeldlinien und deren Sichtbarmachung, magnetische Dipolfelder von Stabmagneten, magn. Nord- und Südpol, Unmöglichkeit der Isolierung einzelner magnetischer Pole, Geschlossenheit der Magnetfeldlinien

12.2 Kraftwirkung des Magnetfeldes

12.2.1 Lorentz-Kraft

Definition der magnetischen Feldstärke durch die Lorentz-Kraft, Einheiten der magnetischen Feldstärke, Drei-Finger-Regel, Wirkung des Magnetfeldes auf Elektronenstrahl im Fadenstrahlrohr

12.2.2 Kraftwirkungen auf stromführende Leiter

12.2.3 Hall-Effekt

Hall-Feldstärke, Hallspannung, Bestimmung der Art der Ladungsträger in Halbleitern durch das Vorzeichen der Hallspannung, Hall-Sonden zur Messung von Magnetfeldern

12.3 Feldgleichungen der Magnetostatik

12.3.1 Magnetischer Fluss

Definition des magnetischen Flusses, magnetischer Fluss durch geschlossene Oberfläche, Quellenfreiheit des magnetischen Feldes (Maxwell-Gleichung)

12.3.2 Amperesches Gesetz

Amperesches Gesetz, magnetische Feldkonstante, Rotation eines Vektorfeldes, Stokesscher Integralsatz der Vektoranalysis, differentielle Form des Ampereschen Gesetzes, Definition der magnetischen Erregung im Vakuum

12.4 Magnetfelder stromdurchflossener Leiter

12.4.1 Gerader stromdurchflossener Leiter

Radiale Abhängigkeit der Magnetfeldstärke innerhalb und außerhalb des Leiters

12.4.2 Magnetfeld im Inneren einer langen Spule

12.4.3 Magnetfeld einer beliebigen stationären Stromverteilung – Biot-Savartsches Gesetz

12.5 Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld

Lorentz-Kraft als Ursache der Kraftwirkung des Magnetfeldes auf stromdurchflossene Leiter

12.2.4 Kraft zwischen zwei parallelen Stromleitern

Berechnung der Kraft zwischen zwei parallelen Stromleitern, Definition der Einheit Ampere, Festlegung der magnetischen Feldkonstanten

12.2.5 Stromdurchflossene Leiterschleifen als magnetische Dipole

Definition des magnetischen Dipolmomentes einer ebenen Stromschleife, Drehmoment auf Stromschleife im Magnetfeld, potentielle Energie einer Leiterschleife im Magnetfeld, Kraftwirkung auf magnetischen Dipol im inhomogenen Magnetfeld

12.6 Magnetismus in Materie

Atomare Ursachen des Magnetismus, atomare Kreisströme, magnetische Bahnmomente, gyromagnetisches Verhältnis zwischen magnetischem Dipolmoment und Drehimpuls, Quantisierung des Drehimpulses, Existenz des Elektronenspins, Bohrsches Magneton

12.6.1 Diamagnetismus

Induzierung magnetischer Momente durch ein äußeres Feld, Definition der Magnetisierung, Definition der diamagnetischen Suszeptibilität, Größenordnungen diamagnetischer Suszeptibilitäten von Festkörpern

12.6.2 Paramagnetismus

Ausrichtung permanenter magnetischer Momente im äußeren Feld, Temperaturabhängigkeit des Grades der Ausrichtung (Boltzmann), Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung und der paramagnetischen Suszeptibilität (Curiesches Gesetz), Größenordnungen paramagnetischer Suszeptibilitäten, magnetische Dipole im inhomogenen Feld, unterschiedliche Kraftwirkungen auf diamagnetische, paramagnetische und ferromagnetische Proben im inhomogenen Magnetfeld

12.6.3 Magnetisierungsströme und die Feldgleichungen der Magnetostatik in Materie

Magnetisierungsstromdichte, Amperesches Gesetz in Anwesenheit von freien Strömen und Magnetisierungsströmen, Zusammenhang zwischen der Magnetisierungsstromdichte und der Magnetisierung, Definition der magnetischen Erregung, beschränkte physikalische Bedeutung der magnetischen Erregung, Definition der magnetischen Permeabilität

12.6.4 Ferromagnetismus

Elektronenspin als Ursache der spontanen Magnetisierung in Ferromagneten, magnetisches Spinnmoment des Elektrons, Landé-Faktor des Elektrons, parallele Ausrichtung der Spinnmomente durch Austauschwechselwirkung, Austauschenergie, Domänenstruktur von Ferromagneten, Weißsche Bezirke, Energie der Streufelder, Blochwand, Bittertechnik, Anisotropieenergie, Richtung der leichten Magnetisierung, Magnetisierungskurven von Ferromagneten, Neukurve, Hysterese, magnetische Remanenz, Koerzitivfeldstärke, reversible und irreversible Wandverschiebungen, Barkhausen-Effekt, Magnetisierungskurven für Weicheisen und Permanentmagnete, Antiferromagnetismus, Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung, Curie-Temperatur, Curie-Weißches Gesetz, Néel-Temperatur bei Antiferromagneten

13. Zeitabhängige elektromagnetische Felder

13.1 **Induktion**

13.1.1 Induktionsgesetz

Experimentelle Demonstration von Induktionsspannungen und –strömen, zeitliche Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife als Ursache für Induktionsspannung, Induktion durch Bewegung einer Leiterschleife im inhomogenen Magnetfeld, Bedeutung der Relativgeschwindigkeit zwischen felderzeugendem Magneten und Leiterschleife, Wechselspannungsgenerator für Induktionsspannung mit harmonischer Zeitabhängigkeit, Einfluss der Windungsdichte auf Induktionsspannung, Wechselstromerzeugung im Erdmagnetfeld, Kompensation des Erdmagnetfeldes durch Helmholtz-Spulenpaar

13.1.2 Lenzsche Regel

Demonstration und Formulierung der Lenzschen Regel, Wirbelströme, Wirbelstrombremse, Waltenhofensches Pendel

13.1.3 Selbstinduktion

Allgemeiner Zusammenhang zwischen magnetischem Fluss und Stromstärke, Definition der Induktivität, Zusammenhang zwischen Induktionsspannung, Induktivität und Zeitableitung der Stromstärke, Induktivität einer langen

Zylinderspule, verzögertes Aufleuchten einer Lampe in einem Stromkreis mit Induktivität, Zeitkonstante des Stromes, Selbstinduktion im RL-Kreis

13.1.4 Gegenseitige Induktivität

Ableitung eines Ausdrucks für die Gegeninduktivität zweier geschlossener Leitersysteme aus dem Biot-Savartschen Gesetz

13.2 **Transformatoren**

Selbstinduktion in Primärspule, Gegeninduktion in Sekundärspule, Funktion des Trafokerns, Bedeutung der Höhe der Spannung für den elektrischen Energietransport mit Überlandleitungen

13.3 **Wechselströme**

13.3.1 Effektive Leistung

13.3.2 Wechselstromkreis mit Induktivität

Komplexe Schreibweise für Spannung und Strom, komplexer Wechselstromwiderstand einer Induktivität, Verzögerung des Stroms

13.3.3 Wechselstromkreis mit Kapazität

Kapazitiver Wechselstromwiderstand, Voreilung des Stroms

13.3.4 Wechselstromimpedanzen

Komplexe Darstellung von Wechselstromwiderständen im Zeigerdiagramm, Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom, Wirkleistung, Blindleistung

13.4 **Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik**

13.4.1 Induktionsgesetz

Differentielle Formulierung des Induktionsgesetzes (Maxwell-Gleichung), elektrische Wirbelfelder

13.4.2 Maxwell-Amperesche Gesetz

Notwendigkeit der Verschiebungsstromdichte, magnetische Wirbelfelder, Formulierung des Maxwell-Ampereschen Gesetzes in differentieller Form (Maxwell-Gleichung), Aufteilung der elektrischen Stromdichte in Stromdichte frei verschiebbarer Ladungen, Magnetisierungsstromdichte und Polarisationsstromdichte

13.4.3 Grundgleichungen des Elektromagnetismus

Maxwell-Gleichungen in differentieller Form, Lorentz-Kraft, Kontinuitätsgleichung, elektromagnetische Energiedichte für das Vakuum