TU Graz Institut für Festkörperphysik

Physik ET, TE

Egbert Zojer

Institut für Festkörperphysik
Technische Universität Graz

TU Graz Institut für Festkörperphysik

Diese Vorlesung basiert auf:
Hering et al., „Physik für Ingenieure“

erhältlich als e-book über die Bibliothek der TU Graz

ISSN 0937-7433
ISBN 978-3-642-22568-0 e-ISBN 978-3-642-22569-7
DOI 10.1007/978-3-642-22569-7
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Experimente:
Dr. Roland Lammegger,
Institut für Experimentalphysik

Die ausgegebenen Folien sind ausschließlich zusammen mit diesem Buch zu verwenden und dürfen nicht weitergegeben werden!

Foliendownload: Homepage der VL in TUG online

Aufzeichnung der Vorlesung erwünscht ?

Ablehnung: bitte e-mail an egbert.zojer@tugraz.at

Prüfungen:

- **Schriftlich im Hörsaal P1; Dauer 1h**
- **Werde am Ende der Vorlesung einen exemplarischen Fragenkatalog schicken**
- **Stoff ab Jännertermin entsprechend WS 2017/2018**
- **20 kurze Fragen zum gesamten Stoff; kurze Rechenbeispiele („Zweizeiler“)**
- **3 Termine im Winter- und 3 im Sommersemester (in Zukunft keine Sondertermine)**

Di 10.10.2017	18:00 bis 20:00
Di 5.12.2017	18:00 bis 20:00
Di 30.1.2018	18:00 bis 20:00
Di 6.3.2018	18:00 bis 20:00

Nach den Ferien, Anfang Dezember, Ende Jänner, vor den Sommerferien

Bei Nichtteilnahme abmelden !

Überblick:

- **Einführung** (3h)
- **Mechanik** (6h)
- **Thermodynamik** (5h)
- **Elektrizität und Magnetismus** (9h)
- **Schwingungen, Wellen, Akustik und Optik** (12h)
- **Quantenmechanik, Atom- und Kernphysik** (3h)
- **Festkörper- und Halbleiterphysik** (6h)

TU Graz Institut für Festkörperphysik

1. Einführung in die Physik

- **Der physikalische Erkenntnisprozess**
- **Physikalische Größen**
- **Messgenauigkeit und Fehlerfortpflanzung**

Egbert Zojer Physik ET / Physik TE

Der physikalische Erkenntnisprozess

I Anfang: Experiment

- Messung physikalischer Größen
- Beobachtung gewisser Zusammenhänge

II Induktionsschluß

- Wenn Zusammenhänge immer wieder beobachtet
- → Schluss: Zusammenhang zu jeder Zeit und an jedem Ort gültig
- Analog zu Induktionsschluss (n → n+1) in der Mathematik
- Annahme der Konstanz der Naturereignisse

TU Graz Institut für Festkörperphysik

Aus Induktionsschluss abgeleitet:

III Physikalisches Gesetz

- Praktischerweise mathematisch formuliert
- z.B.: F = m a
- Deshalb: Mathematische Gleichungen werden uns für den Rest der Vorlesung „verfolgen".

Physikalische Theorie

System aus einer Vielzahl physikalischer Gesetze, die zu widerspruchsfreien Aussagen führen.

Egbert Zojer Physik ET / Physik TE

IV Deduktion

- Treffen (exakter) Vorhersagen auf Basis von Theorien
- Beispiele: Zukünftiges Verhalten von Schaltungen, Maschinen, Materialien …
- Erfolg der exakten Naturwissenschaften: Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Vorhersagen

V Verifikation

Überprüfung der Vorhersagen durch ein Experiment

Einstein: Jedes physikalische Gesetzt muss zugleich eine Messvorschrift für eine reproduzierbare Messung darstellen

Häufiges Missverständnis:

Aufgabe der Naturwissenschaften NICHT Suche nach Wahrheit, sondern systematische Beobachtung der Natur nach gewissen, vorgegebenen Regeln → Entwicklung von (hoffentlich allgemein gültigen) Theorien → daraus abgeleitet: Vorhersage

Eine wissenschaftliche Theorie kann NIE bewiesen, sondern höchstens widerlegt werden !

Such nach Wahrheit ist die Aufgabe von Religion und Philosophie !

Klassische Physik vs. Quantenphysik

Für Klassifikation relevant: **Wirkung = Energie x Zeit**

Planck'sches Wirkungsquantum: $h = 6{,}626\ 10^{-34}$ J s

Wirkungen >> h: klassische Physik
Wirkungen ~ h: Quantenphysik

Anschauliche Unterscheidung:

- Klassische Physik: bis zu Längenskalen, die mit dem Lichtmikroskop beobachtbar sind
- Quantenphysik: atomarer und sub-atomarer Bereich relevant

Klassische Physik:

- Mechanik
- Thermodynamik
- Elektrizität und Magnetismus
- Akustik
- Optik

Erweiterung: endliche Signalgeschwindigkeit → Relativitätstheorie

- anschaulich: Vorgänge unmittelbar erfahrbar
- streng kausal und deterministisch: streng vorherbestimmte Prozesse
- genaue Messungen möglich

Institut für Festkörperphysik

Quantenphysik:

- o Atom- und Molekülphysik
- o Festkörperphysik (großteils)
- o Kern- und Elementarteilchenphysik

- ➢ **abstrakt:** Vorgänge nicht unmittelbar erfahrbar
- ➢ **nicht deterministisch:** statistische Gesetzmäßigkeiten = **Wahrscheinlichkeitsaussagen** (nicht chaotisch !) **Konstanz statistischer Zusammenhänge**
- ➢ **gleichzeitige genaue** Messung bestimmter Größen nur innerhalb einer gewissen **Unschärfe** möglich (z. B.: Ort und Geschwindigkeit, Energie und Zeit ….)

Messung einer Größe → andere nicht mehr exakt messbar

Institut für Festkörperphysik

Beispiel:

Heisenberg'sche Unschärferelation:

$$\Delta x \, \Delta p_x \geq h$$

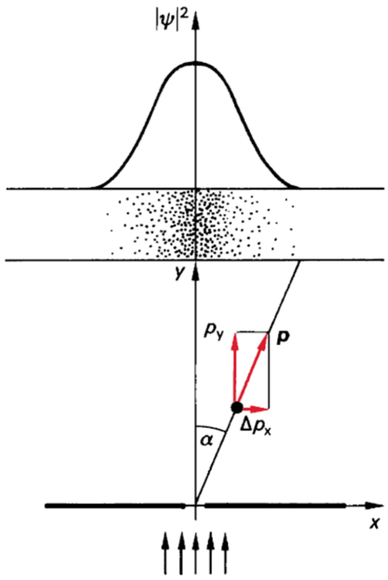

Abb. 6.139 Zur Ableitung der Heisenberg'schen Unschärferelation: Beugung von Elektronen an einem Spalt

Aus: Hering et al., „Physik für Ingenieure"

TU Graz Institut für Festkörperphysik

Physikalische Größen

- Beschreibt Eigenschaften, Zustände von Objekten, Zustandsänderungen …
- Muss messbar sein !

Zur Angabe einer Größe G immer: $G = \{G\} \bullet [G]$

Größe = Maßzahl x Maßeinheit

Auswahl der Maßeinheit bestimmt Wert der Maßzahl !

In AT für amtlichen und geschäftlichen Verkehr verpflichtend:

SI-Einheiten (Système International d'Unités)

TU Graz Institut für Festkörperphysik

Beispiele für SI Einheiten: Kilogramm, Meter, Sekunden, Ampere …

- Leider nicht in allen Ländern der Welt verpflichtend
- Zweckmäßigerweise auch nicht in allen Bereichen der Physik verwendet (z.B. Quantenphysik)

Beispiel: Körpergewicht

100 kg (AT) = 220 lb (Pounds; USA) = 15 st (stone) and 10,46 lb (GB)

Beispiel: Bier in einem Lokal

USA: 1 US pint = 0,473 l oder 0,473 dm^3

GB: 1 imperial pint = 0,568 l oder 0,568 dm^3

Einheiten oft mit Präfix kombiniert:

Tabelle 1.1 Bezeichnung der dezimalen Vielfachen und Teile von Einheiten

Zehner-potenz	Vorsilbe	Kurz-zeichen	Beispiel
10^{18}	Exa	E	Em, EJ
10^{15}	Peta	P	Pm, PJ
10^{12}	Tera	T	Tm, TJ
10^{9}	Giga	G	Gm, GJ
10^{6}	Mega	M	Mm, MJ
10^{3}	Kilo	k	km, kJ
10^{2}	Hekto	h	hPa, hJ
10^{1}	Deka	da	dam, daJ
[3pt] 10^{-1}	Dezi	d	dm, dJ
10^{-2}	Zenti	c	cm, cJ
10^{-3}	Milli	m	mm, mJ
10^{-6}	Mikro	µ	µm, µJ
10^{-9}	Nano	n	nm, nJ
10^{-12}	Piko	p	pm, pJ
10^{-15}	Femto	f	fm, fJ
10^{-18}	Atto	a	am, aJ

Aus: Hering et al., „Physik für Ingenieure“

7 Basisgrößen und entsprechend 7 Basiseinheiten

Basisgröße	Basiseinheit	Symbol	Definition	relative Unsicherheit
Zeit	Sekunde	s	1 Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.	10^{-14}
Länge	Meter	m	1 Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft.	10^{-14}
Masse	Kilogramm	kg	1 Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.	10^{-9}
elektrische Stromstärke	Ampere	A	1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stroms, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorruft.	10^{-6}

Aus: Hering et al., „Physik für Ingenieure“

Temperatur	Kelvin	K	1 Kelvin ist der 273,16-te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.	10^{-6}
Lichtstärke	Candela	cd	1 Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 W/sr beträgt.	$5 \cdot 10^{-3}$
Stoffmenge	Mol	mol	1 Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso viel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12/1 000 Kilogramm des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind.	10^{-6}

Aus: Hering et al., „Physik für Ingenieure“

Alle anderen Größen: abgeleitete Größen

Beispiel (Beachte: Dimension einer Größe):

[Energie] = [Kraft x Weg] = [Masse x Beschleunigung x Weg] = [Masse x Weg^2 / Zeit^2]

[Energie] = kg m^2 / s^2 = J (Joule) … **abgeleitete Einheiten oft mit Namen**

Grundregel für jedes Physikalische Gesetz:

Dimensionen (Einheiten) der Größen links und rechts des „=“ müssen identisch sein !

Beziehung der eigentlichen Größen:

- **vom jeweiligen physikalischen Prozess abhängig**
- **Proportionalitätskonstanten (incl. Naturkonstanten)**

@ Beziehung zwischen Basiseinheiten bzw. Naturkonstanten:
7 Definitionen sind „frei wählbar“

Beispiele:

SI: 6 x Einheitendefinition; 1 x Naturkonstante (Vakuumlichtgeschwindigkeit)

atomic units (in der computational Quantenmechanik): Alle Naturkonstanten auf 1 gesetzt → keine Freie Wahl der Einheiten (z.B., Längen automatisch in Vielfachen der Bohrschen Radien)

Messgenauigkeit und Messfehler

Messungen sind unvermeidlicher fehlerbehaftet !

Systematische Fehler

- für die Messmethode charakteristisch
- durch wiederholtes Messen nicht minimierbar
- Ursachen z.B.: falsche Kalibrierung der Messgeräte, falsche Justierung, Beeinflussung des Messergebnisses durch Messverfahren …
- Charakterisierung: Genaue Angaben zur Messung (Institutsname, Datum, verwendete Messgeräte)

Zufällige oder statistische Fehler

- Vom Experimentator abhängig
- Durch wiederholtes Messen minimierbar
- Ursachen: Falsches Anlegen von Maßstäben, elektronische Triggerschwankungen …
- Charakterisierung: Fehlerrechnung

Analyse der Messwertschwankungen:
Histogramm

Häufigkeit $h_j = N_j/N$, dass Messergebnis in einem bestimmten Bereich liegt

Bei rein zufälligem Messfehler für N→∞ häufig:
Normalverteilung

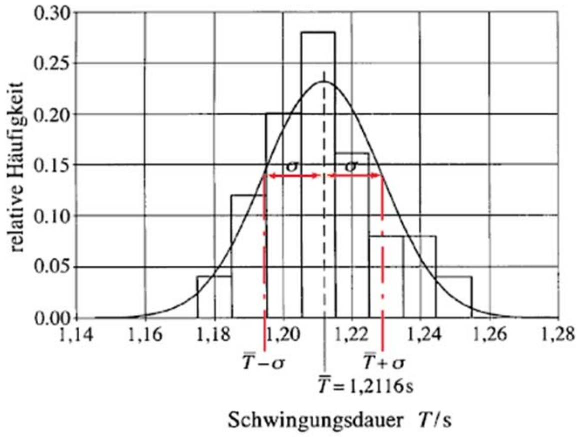

Abb. 1.5 Histogramm der Häufigkeitsverteilung $h_j(T)$ bei einer Schwingungsdauermessung sowie die Normalverteilungskurve nach (1.3) für $\mu = \overline{T}$ und $\sigma^2 = s_T^2$ mit $\overline{T} = 1{,}2116\,\text{s}$ und $s_T = 0{,}0172\,\text{s}$

Aus: Hering et al., „Physik für Ingenieure“

TU Graz Institut für Festkörperphysik

Normalverteilungsfunktion (Gauß-Verteilung):

$$h(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- **h(x)dx … Wahrscheinlichkeit für Messwert zwischen x und x+dx**
- **μ … Erwartungswert**
- **σ^2 … Varianz (Halbwertsbreite ~ 2.4 σ)**

68,3 % der Messwerte im Bereich x = μ ± σ

95,4 % der Messwerte im Bereich x = μ ± 2σ

99,7 % der Messwerte im Bereich x = μ ± 3σ

Wie bestimme ich nun den Schätzwert für mein Messergebnis und dessen (zufälligen) Fehler ?

Annahme: Normalverteilung der Messergebnisse

bester Schätzwert für Erwartungswert:
arithmetischer Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

bester Schätzwert für σ:
Standardabweichung s

Von N praktisch unabhängig !

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Genauigkeit des Messverfahrens (durch Breite der Verteilungsfunktion gegeben) kann durch Wiederholungsmessung NICHT erhöht werden !

ABER: Wiederholungsmessungen erhöhen die Genauigkeit der Bestimmung von $\bar{X}$ als Näherung für μ !

Entsprechende Standardabweichung:

$$\Delta\bar{x} = \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Angabe des Messergebnisses:

$$x_p = \bar{x} \pm t_p \frac{s}{\sqrt{N}}$$

t_p: Faktor, der von Zahl der Messungen und der geforderten statistischen Sicherheit abhängt ! (für N > 100 t=1 für 68, 3% und 2 für 95,4%)

Zusätzlich systematische Fehler: zu statistischem Fehler addieren !

Fehlerfortpflanzung

Fehler einer indirekt bestimmten physikalischen Größe, f, mit f = f(x,y,z)

Größtfehler:

$$\boxed{\Delta f = \left|\frac{\partial f(x,y,z)}{\partial x}\right| |\Delta x| + \left|\frac{\partial f(x,y,z)}{\partial y}\right| |\Delta y| + \left|\frac{\partial f(x,y,z)}{\partial z}\right| |\Delta z|}$$

Beispiele:

$$f = a\,x + b\,y + c\,z \;\Rightarrow\; \Delta f = |a||\Delta x| + |b||\Delta y| + |c||\Delta z|$$

$$f = x\,y\,z \;\Rightarrow\; \frac{\Delta f}{f} = \left|\frac{\Delta x}{x}\right| + \left|\frac{\Delta y}{y}\right| + \left|\frac{\Delta z}{z}\right|$$

Kurvenanpassung

Situation:
Messung von Wertepaaren (f_i,x_i) → bei bekanntem Zusammenhang f=f(x; a_1, a_2, a_3 …) mit a_k = aus Messung zu bestimmende Parameter.

zB.: Kugelfallexperiment mit verschiedenen Fallhöhen, h_i, und Fallzeiten, t_i. Dazu:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}}$$

Frage: Wie groß ist a ?

Wahrscheinlichste Werte für a_k die, für die gilt:

$$\sum_{i=1}^{N} \left[f_i - f(x_i; a_1, a_2, a_3, \ldots) \right]^2 \stackrel{!}{=} MIN$$

Annahme: Standardabweichung der Messungen f_i für alle x_i gleich !

Institut für Festkörperphysik

Häufige Situation: linearer Zusammenhang (lineare Regression)

Entsprechende Gleichungen siehe z.B. Hering et al., „Physik für Ingenieure“

Frage: Macht der zugrunde gelegte physikalische Zusammenhang Sinn ?

aus: Hering et al., „Physik für Ingenieure“

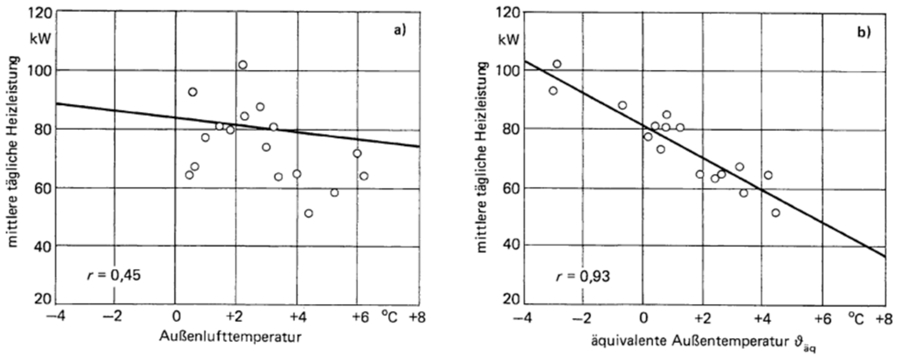

Abb. 1.10 Korrelationsanalyse der mittleren täglichen Heizleistung eines Wohnhauses

Maß für Wahrscheinlichkeit dafür: Korrelationskoeffizient , r