Einführung in die Theoretische Physik

Priv.-Doz. Dr. Reinhard Mahnke

Lehrveranstaltung Nr. 12554 (4 SWS V + 2 SWS Ü)

Dienstag 11.15 bis 12.45 Uhr, Seminarraum
Donnerstag 7.30 bis 9.00 Uhr, Seminarraum
Freitag 9.15 bis 10.45 Uhr, Seminarraum
Institut für Physik, Wismarsche Str. 44
Sommersemester 2012

Zum Inhalt der Lehrveranstaltung:

1. **Diffusion I** (14. KW, R. Mahnke)
   Diffusion ist (im Gegensatz zur Drift) eine ungerichtete Bewegung. Diffusion ist ein zufälliger Prozeß. Das Galtonbrett ist eine experimentelle Realisierung der (diskreten) Diffusion. Der Zufallswanderer ist ein einfaches Modell der Diffusion. Eine zentrale Gleichung der Physik (Nichtgleichtgewichtsdynamik) ist die Diffusionsgleichung
   $$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = D \, \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \tag{1}$$
   mit der Anfangsbedingung
   $$p(x, t=0) = \delta(x - x_0) \; . \tag{2}$$
   Die Lösung der Diffusionsgleichung ist die bekannte Normal– bzw. Gauss–Verteilung
   $$p(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D t}} \exp\left(- \frac{(x-x_0)^2}{4Dt} \right) \; . \tag{3}$$

2. **Diffusion II** (15. KW, R. Mahnke)
   Aufgaben:

   - Berechnung der ersten drei Momente ($n = 0, 1, 2$)

$$\langle x^n \rangle(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n p(x,t)\, dx \; . \tag{4}$$

     (A. Sch. + R. C.)

$$\langle x^0 \rangle(t) = 1 \tag{5}$$
$$\langle x^1 \rangle(t) = x_0 \tag{6}$$
$$\langle x^2 \rangle(t) = 2Dt + x_0^2 \tag{7}$$

     und Varianz

$$\Delta x \equiv \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = \sqrt{2Dt} \; . \tag{8}$$

   - Überprüfung, dass (3) wirklich Lösung von (1) ist (Probe machen).
     (N. Sp. + K. E.)
   - Ermittlung der Lösungsfunktion (3) mittels Skalierungstransformation

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{Dt}} \qquad ; \qquad p(x,t)dx = Q(\xi)d\xi \tag{9}$$

     angewendet auf (1).
     (A. B. + M. P.)
     Nach Anwendung von (9) folgt aus (1) eine transformierte neue Diffusionsgleichung

$$2\frac{d^2Q(\xi)}{d\xi^2} + \xi\frac{dQ(\xi)}{d\xi} + Q(\xi) = 0. \tag{10}$$

     mit der Lösung (Normalverteilung)

$$Q(\xi) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4}\right) \tag{11}$$

     Nach Rücktransformation folgt die bekannte Lösung (3).

3. **Diffusion III** (15. KW, R. Mahnke)
Der Zufallswanderer wird durch eine iterative Markov–Dynamik beschrieben. Die Einzelwahrscheinlichkeiten lauten p (Schritt nach rechts) und $q = 1 - p$ (Schritt nach links). Der symmetrische Zufallswanderer ($p = q = 1/2$) entspricht der diskreten Diffusion.
The probability $P(m, n + 1)$ that the walker is at position m after $n + 1$ steps is given by the set of probabilities $P(m, n)$ after n steps in accordance with the following equation

$$P(m, n + 1) = p\, P(m - 1, n) + q\, P(m + 1, n) \; . \tag{12}$$

The solution of (12) is the binomial distribution

$$P(m, n) = \frac{n!}{[(n + m)/2]!\, [(n - m)/2]!}\, p^{(n+m)/2}\, q^{(n-m)/2} \; . \tag{13}$$

The first moment of this probability distribution is

$$\langle m \rangle(n) = \sum_{m=-n}^{n} m P(m, n) = 2n \left(p - \frac{1}{2} \right) \tag{14}$$

and the second moment is

$$\langle m^2 \rangle(n) = \sum_{m=-n}^{n} m^2 P(m, n) = 4npq + 4n^2 \left(p - \frac{1}{2} \right)^2 \tag{15}$$

Hence, the variance (root–mean–square) is given by

$$(\Delta m)(n) = \sqrt{\left\langle (m - \langle m \rangle)^2 \right\rangle} = \sqrt{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2} = \sqrt{4npq} \; , \tag{16}$$

and the relative width (error)

$$\frac{\Delta m}{\langle m \rangle} = \frac{\sqrt{4np(1 - p)}}{2n(p - 1/2)} = \sqrt{\frac{p(1 - p)}{(p - 1/2)^2}}\, \frac{1}{\sqrt{n}} \simeq n^{-1/2} \tag{17}$$

tends to zero when n goes to infinity.

4. **Aufgaben zur Diffusion** (zu bearbeiten in 17. KW, Abgabe bis 29.04.2012)
   Die deterministische Bewegung wird durch Schwankungen (Fluktuationen) gestört. Überwiegen die zufälligen Ereignisse wird die Bewegung stochastisch (Physik stochastischer Prozesse). Diffusion ist ein einfacher zufälliger Prozess.

   - Diskrete Diffusion:
     Symmetrischer Zufallswanderer, Münzwurf bzw. „drunken sailor“, Galton–Brett, Wahrscheinlichkeitsverteilung, Pascalsches Dreieck, diskrete Bewegungsgleichung
   - Kontinuierliche Diffusion:
     Diffusionsgleichung als kontinuierliche Bewegungsgleichung und deren Lösung, zeitliche Entwicklung des Dichteprofils, Mittelwert und Schwankung

   Aufgaben:

   (a) Zusammenfassung zum Thema *Diffusion* anfertigen, und zwar in einer Tabelle diskrete und kontinuierliche Ergebnisse gegenüberstellen: Bewegungsgleichung mit Anfangsbedingung; Lösungsfunktion; 0., 1., 2. Moment und Varianz.
   (jeder)

   (b) Original–Arbeit von Albert Einstein 1905 (Annalen der Physik) lesen und seine Herleitung der Diffusionsgleichung nachvollziehen.
   (A. Sch. & N. Sp.)

   (c) Empirische Herleitung der Diffusionsgleichung mittels Fickscher Gesetze präsentieren. Kontinuitätsgleichung verwenden.
   (A. B. & M. P.)

   (d) Machen Sie ein diskretes Diffusionsexperiment mittels Münzwurf. Ermitteln Sie bei 10 Würfen (bzw. bei 10 Schritten) und bei 20 und anschliessend bei 50 Realisierungen den Mittelwert und die Varianz. Vergleichen Sie die erhaltenen Resultate mit der Theorie des Zufallswanderers.
   (A. Sch. & N. Sp. & M. P.)

   (e) Berechnung der ersten drei Momente (bis $\langle m^2 \rangle(n)$) der symmetrischen Binominalverteilung (in Analogie bis zu $\langle x^2 \rangle(t)$).
   (jeder)

(f) Show how the solution of the diffusion equation can be obtained by Fourier transformation to $\widetilde{p}(k,t)$ (transformation to the inverse space by generating function) which is defined by

$$p(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx} \widetilde{p}(k,t) dk \ , \tag{18}$$

$$\widetilde{p}(k,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ikx} p(x,t) dx \ , \tag{19}$$

where k is the wave number.
(R. C. & K. E.)

(g) Betrachten Sie die Diffusion in einem endlichen Intervall der Länge L mit zwei refektierenden Rändern (RR) und berechnen für dieses Anfangs– und Randwertproblem die Wahrscheinlichkeitsdichte $p_{RR}(x,t)$.
The problem is described by the following set of equations:

i. equation of motion (dynamics)

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \ , \tag{20}$$

ii. initial condition (delta function)

$$p(x,t=0) = \delta(x - x_0) \quad \text{with} \quad x_0 = 0 \ , \tag{21}$$

iii. reflecting boundary condition at $x = a = -L/2$ (left border)

$$\left. \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \right|_{x=a} = 0 \ , \tag{22}$$

iv. absorbing boundary condition at $x = b = +L/2$ (right border)

$$p(x = b, t) = 0 \ . \tag{23}$$

Welches Ergebnis erhalten Sie im Grenzfall $L \to \infty$?
(R. C. & K. E. & A. B.)

5. **Theoretische Mechanik I** (16. KW, H. Weber & R. Mahnke)
Deterministische Dynamik: Newtonsche Bewegungsgleichung(en) plus Anfangsbedingungen.

Rein deterministische Prozesse erscheinen unvorhersehbar, wenn die (nichtlineare) Dynamik eine sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingen aufweist. Dieses sog. deterministische Chaos kann schon mittels (mindestens dreier) Differentialgleichungen erzeugt werden.

1. **Harmonischer Oszillator**
Modell des Federschwingers (lineares Modell), Hook'sches Gesetz, Federkraft, Newton'sche Bewegungsgleichung, Anfangsbedingungen, dynamisches System aus zwei gekoppelten Bewegungsgleichungen, verschiedene Lösungsmethoden (exp–Ansatz, Eigenvektoren, Energieerhaltung). Ermittlung der zeitabhängigen Lösungen $x = x(t)$ (Ort über Zeit) und $v = v(t)$ (Geschwindigkeit über Zeit) des Federschwingers. Eventuell zuerst lineare Transformation der Ortskoordinate zur Verschiebung des Koordinatenursprungs. Verschiedene Lösungsmethoden:
1.) Anwendung der Energieerhaltung
2.) Anwendung des Ansatzes $\exp(\lambda t)$
3.) Berechnung von Eigenwerten und Eigenfunktionen
Die mathematische Form der Lösungen ist unterschiedlich. Sie können aber ineinander überführt werden. Es gibt nur eine physikalische Lösung des Federschwingers, aber verschiedene mathematische Schreibweisen.

Gekoppelte harmonische Oszillatoren bilden eine Federkette. Am Beispiel der zweier Kette wurden die verschiedenen Moden erläutert.

2. **Mathematisches Pendel**
Modell des mathematischen Pendels (nichtlineares Modell), Dynamik einer Masse an einem Faden unter Einfluss der Schwerkraft. Newton–Formalismus, Tangentialkraft, dynamisches System. Hamilton–Formalismus, kanonische Bewegungsgleichungen, Energieerhaltung. Diskussion des Phasenraumporträts (Ruhelage, Schwingungsregime, Separatrix (Grenzkurve), Rotationsregime). Integration der Bewegungsgleichung unter Verwendung der Energieerhaltung zur Bestimmung $\alpha = \alpha(t)$. Es gibt eine spezielle Situation (Grenzfall): Bewegung auf der Separatrix.

6. **Diskussion Hausaufgaben** (18. KW, R. Mahnke)
   6.1 Kontrolle der Hausaufgaben zum 29.04.2012.

   (a) **Vergleich Zufallswanderer und Diffusion (Tabelle)**
   alle
   (b) **Einstein'sche Herleitung der Diffusionsgleichung**
   Alko Schurr
   (c) **Fick'sche Herleitung der Diffusionsgleichung**
   R. M.
   (d) **Realexperiment zum Zufallswanderer**
   alle
   (e) **Momente der symmetrischen Biniminalverteilung**
   keiner
   (f) **Lösung der Diffusionsgleichung mittels Fourier-Transformation**
   Robert Clasen
   (g) **Diffusion zwischen reflektierenden Rändern**
   steht noch aus

   Alle erfolgreich.

   6.2 Abschlusskontrolle zum Thema Diffusion am 04.05.2012

   (a) Diffusion ist ...

   -
   -
   -

   (b) Wie hängen Diffusionsgleichung und Gaußsche Normalverteilung zusammen?

   (c) Der Zufallswanderer als Münzwurf–Experiment. Was ist zu tun? Machen Sie zwei Versuche mit jeweils fünf Würfen und protokollieren Sie die Ergebnisse.

   Alle erfolgreich (ausser N. Sp.).

7. **Theoretische Mechanik II** (19. KW, R. Mahnke)
   Wiederholung der bekannten Newtonschen Beschreibung (Masse mal Beschleunigung gleich Kraft) der Dynamik eines Massenpunktes.
   Einführung von generalisierten Koordinaten q und Geschwindigkeiten $\dot{q}$. Vorstellung der Lagrangeschen Beschreibung der Mechanik durch Einführung der Lagrange–Funktion $L(q, \dot{q}, t)$ und der Lagrangeschen Bewegungsgleichung. Vorstellung der Hamiltonschen Beschreibung der Mechanik durch Einführung der Hamilton–Funktion $H(q, p, t)$ als Funktion der generalisierten Koordinaten q und Impulse p und der Hamiltonschen bzw. kanonischen Bewegungsgleichungen.
   Übergang vom Trajektorienbild (Bahnkurven im Zustands- bzw. Phasenraum) zur Ensemble–Betrachtung in der klassischen Mechanik. Einführung der Verteilungsfunktion $\varrho(q, p, t)$ als Wahrscheinlichkeitsdichte im Phasenraum in Analogie zur Diffusion mit der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung $p(x, t)$. Diskussion der Liouville Gleichung als (lokaler) Erhaltungssatz (inkompressibler Fluss im Phasenraum).

   Anwendungen auf ein einfaches lineares System
   1. **Harmonischer Oszillator**
   und ein nichtlineares System
   2. **Mathematisches Pendel**

8. **Aufgaben zur klassischen Mechanik** (zu bearbeiten in 20. KW, Abgabe bis 21.05.2012)

   Aufgaben:

   (a) Mathematisches Pendel $\Longrightarrow$ Neele Spiekermann
   (b) Kettenkarussell $\Longrightarrow$ Alexander Bechthold
   (c) Schwingende Atwood–Maschine $\Longrightarrow$ Markus Porzig
   (d) Van der Pol–Oszillator $\Longrightarrow$ Khaled El-Zayat
   (e) Zentralkörperproblem $\Longrightarrow$ Alko Schurr
   (f) Automobildynamik (1dim) auf freier Strecke und mit Hindernis $\Longrightarrow$ Robert Clasen

   Literaturhinweis zu (a) – (e):
   R. Mahnke: Nichtlineare Physik in Aufgaben, Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1994

Hinweis zur Automobildynamik (N-dim)

Gegeben sei ein System von N Auto-Teilchen auf einem Kreis der Länge L, d. h. es gelte $x_i \in [0, L), \quad i = 1, \dots, N$ für ihre Orte. Die Bewegungsgleichungen seien dann gegeben durch

$$\begin{aligned} m\frac{dv_i}{dt} &= F_{\text{kons}}(\Delta x_i) + F_{\text{diss}}(v_i), \\ \frac{dx_i}{dt} &= v_i, \end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned} F_{\text{kons}}(\Delta x_i) &= \frac{m}{\tau}(v_{\text{opt}}(\Delta x_i) - v_{\max}) \leq 0 \\ & \quad \text{mit} \quad v_{\text{opt}}(\Delta x_i) = v_{\max}\frac{(\Delta x_i)^2}{D^2 + (\Delta x_i)^2}, \\ F_{\text{diss}}(v_i) &= \frac{m}{\tau}(v_{\max} - v_i) \geq 0 \end{aligned}$$

und die Abstände Δx_i zwischen den Autos zyklisch gegeben sind durch $\forall i = 1, \dots, N-1 : \Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ und $\Delta x_N = x_1 - x_N$.

9. **Diskussion Hausaufgaben** (21. KW, R. Mahnke)

   9.1 Kontrolle der Hausaufgaben zum 21.05.2012.

   9.2 Transformation der Geschwindigkeit $v_{kar}(\dot{x}, \dot{y}) \to v_{pol}(\dot{\alpha}, \dot{r})$

10. **Projektwoche** (22. KW, R. Mahnke)

    Termin: Do, d. 31.05.2012, 9.15 Uhr, Wismarsche Str. 44

11. **Zentralkörperbewegung** (23. KW, R. Mahnke)
    Zentralkörperproblem in Hamiltonscher Formulierung; Bewegung der Erde um die Sonne (ebene Bewegung, Kreis, Ellipse, Parabel, Hyperbel) unter Einfluss der Gravitationskraft; zwei Erhaltungssätze (Energie, Drehimpuls).

    Abschluss und Zusammenfassung der Theoretischen Mechanik.

12. **Quantenphysik I** (24. KW, R. Mahnke)
    Einführung in die Quantenphysik der Mikroteilchen im Vergleich zur klassischen Mechanik der Makroteilchen mit folgenden Schwerpunkten:

    (a) Planck'schen Wirkungsquantum h, Phasenraumzelle, Wahrscheinlichkeitsaussagen (anstelle des klassischen Bahnbegriffs)
        $\Rightarrow$ Vortrag Nele Spiekermann
    (b) Heisenberg'sche Unschärferelation in Ort und Impuls
        $\Rightarrow$ Vortrag Markus Porzig
    (c) Welle–Teilchen–Dualismus am Beispiel Fotoeffekt und Einzel- bzw. Doppelspalt
        $\Rightarrow$ Vortrag Alexander Bechthold
    (d) Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung und ihre stationäre Variante
        $\Rightarrow$ Vortrag Alko Schurr

13. **Quantenphysik II** (25. KW, R. Mahnke)
    Anwendungen der Quantenphysik auf konkrete Fragestellungen

    (a) 1dim Bewegung eines Mikroteilchens innerhalb einer Box der Länge L mit unendlich hohen Wänden
    (b) 1dim Bewegung eines Mikroteilchens in einem quadratischem Potential $v(x) = kx^2/2 = m\omega^2 x^2/2$ (quantenmechanischer harmonischer Oszillator)

    zur Lösung des Eigenwertgleichung und Berechnung der Energie-Eigenwerte und Wellenfunktionen.

    Zusammenfassung zur Quantenmechanik:

    (a) Heisenbergsche Unschärferelation

    $$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$$

    wobei $\Delta q = \sqrt{< q^2 > - < q >^2}$, $\hbar = h/(2\pi)$ und $p_x = (\hbar/i)\partial/\partial x$.

    (b) Schrödinger Gleichung

    $$i\hbar \frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} = H\Phi(x,t) \text{ mit } H = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x)$$

    wobei $\Phi(x,t) = \phi(x) \exp\{-(i/\hbar)Et\}$.
    Die zeitunabhängige Wellenfunktion $\phi(x)$ folgt aus der stationären Schrödinger Gleichung $H\phi(x) = E\phi(x)$.

(c) Wahrscheinlichkeitsdichte (Tunneleffekt)
Aus der Wellenfunktion $\Phi(x,t)$ bzw. $\phi(x)$ folgt die stationäre Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung

$$p(x) = \Phi^*(x,t)\Phi(x,t) = \phi(x)^2$$

Es gibt diskrete Energieniveaus E_n mit den korrespondierenden Wellenfunktionen $\phi_n(x)$. Das Energiespektrum lautet

$$E_n = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right) \qquad , \qquad E_0 > 0$$

beim harmonischen Oszillator und

$$E_n = \frac{\pi^2\hbar^2}{2mL^2}n^2 \qquad , \qquad E_1 > 0$$

beim Teilchen in einer Box.

Hausaufgabe: (für Robert Clasen und Khaded El-Zayat)
Überprüfen Sie, dass der Grundzustand des Teilchens in der Box bzw. des harmonischen Oszillators der Heisenbergschen Unbestimmheitsrelation genügt.
Show that the ground state satisfies the Uncertainty Principle.

14. **Elektrodynamik I** (26. KW, R. Mahnke)
Grundbegriffe der klassischen Elektrodynamik (u. a. skalare und vektorielle Feldfunktionen); wichtige Entwicklungsetappen (Coulomb, Oersted, Faraday, Maxwell); Symbole und SI–Einheiten (m, kg, s, A, K, mol, cd); Punktladung; Coulomb–Kraft zwischen zwei Punktladungen; Einführung von Ladung bzw. Ladungsdichte und Strom bzw. Stromdichtevektor; Ladungserhaltung als Zusammenhang zwischen zeitlicher Änderung der Ladungsdichte und Divergenz des Stromdichtevektors.

Grundgleichungen der Elektrodynamik sind als Maxwell–Gleichungen bekannt. Sie bestehen aus Quellen– und Wirbelgleichungen für das elektrische und das magnetische Feld. Äquivalenz zwischen lokaler (bzw. differentialer) und globaler (bzw. integraler) Formulierung. Materialgleichungen als Zusatzbeziehungen. Ladungserhaltung (Kontinuitätsgleichung) wird durch die Maxwellgleichungen erfüllt.

Stationäre Felder. Analyse von Spezialfällen: Elektrostatik und Magnetostatik. Die elektrostatischen Feldgleichungen führen unter Benutzung des elektrostatischen Potentials auf die Poisson–Gleichung bzw.

auf die Laplace–Gleichung im ladungsfreien Fall. Das Coulombsche Gesetz ist die Lösung des elekrischen Feldes im Aufpunkt bei Existenz einer Punktladung im Quellpunkt. Es gilt das Superpositionsprinzip bei einem System von N Punktladungen.

15. **Quantenphysik III** (27. KW, Studenten)
Vorstellung der o.g. Hausaufgaben zur Quantenphysik (Robert Clasen und Khaded El-Zayat) am Dienstag, d. 03.07.2012
und Hausaufgabe zur Elektrostatik (radialsymmetrisch homogen geladene Kugel mit Radius R) zur Berechnung des Potential und des elektrischen Feldes.

16. **Elektrodynamik II** (28. KW, R. Mahnke)
Analyse eines weiteren Spezialfalls: Elektromagnetisches Feld als Welle. Herleitung der Wellengleichung auf den Maxwell–Gleichungen mit verschwindender Ladungs– und Stromdichte. Diskussion der Lösung der Wellengleichung als sich bewegende ebene elektromagnetische Welle mit zeitlicher und räumlicher Periode. Ermittlung der Dispersionsrelation als Zusammenhang zwischen Kreisfrequenz, Wellenzahl und Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Abschluss–Quiz 2012
zur Vorbereitung auf die Prüfung

1. Wie lautet die 3dim Diffusionsgleichung? Was ist gegeben? Was wird berechnet?
2. Wie lautet die Lösung der 1dim Diffusionsgleichung grafisch?
3. Wie ist das n–te Momente bezüglich einer Verteilungsfunktion $f(x,t)$ definiert?
4. Welche Bedeutung haben das 0., 1. und 2. Moment? Was ist Varianz bzw. Streuung oder Unschärfe?
5. Was beschreiben wir mit einem (diskreten) Zufallswanderer?
6. Wie lautet die 3dim Newtonsche Bewegungsgleichung? Was ist gegeben? Was wird berechnet?
7. Was ist ein 1dim klassischer harmonischer Oszilator? Geben Sie die Kraft und das Potential an.
8. Beschreibt das mathematische Pendel nur Schwingungen?
9. Was beschreibt die Hamiltonfunktion in konservativen Systemen?
10. Skizzieren Sie den Phasenraum für das mathematische Pendel.
11. Was beschreibt die Zentralkörperbewegung?
12. Wie lautet das Gravitationspotential?
13. Nennen Sie zwei Erhaltungssätze der Mechanik.
14. Was sind aktive Teilchen (im Gegensatz zu passiven)?
15. Wie lautet die Heisenbergsche Unschärferelation?
16. Wie lautet die 3dim Schrödinger–Gleichung? Was ist gegeben? Was wird berechnet?
17. Wie lautet die stationäre Schrödinger-Gleichung des 1dim quantenmechanischen harmonischen Oszillators?
18. Benennen Sie das Energiespektrum des quantenmechanischen harmonischen Oszillators.

19. Was verstehen Sie unter einem Grundzustand?

20. Wie berechnet sich die Impulsunschärfe in der Quantenmechanik?

21. Ist die zeitabhängige Wellenfunktion $\Phi(x, t)$ eine messbare Größe?

22. Liefert die Quantenmechanik Wahrscheinlichkeitsaussagen?

23. Erklären Sie: Die Mechanik ist Teilchenphysik; der Elektromagnetismus ist Feldphysik.

24. Welche Felder werden durch die Maxwell–Gleichungen berechnet? Was ist gegeben?

25. Formulieren Sie die Ladungserhaltung lokal und global.

26. Welche Spezialfälle des Elektromagnetismus kennen Sie?

27. Gilt bei den elektromagnetischen Feldern das Superpositionsprinzip?

28. Wie lautet die 3dim Wellengleichung? Was ist gegeben? Was ist gesucht?

29. Wie lautet die Lösung der 1dim Wellengleichung grafisch?

30. Was ist eine ebene elektromagnetische Welle?