Einführung

1. Zum Verhältnis zwischen experimenteller und theoretischer Physik

• Max Planck (1858 – 1947). " Theorie ohne Experiment ist leer, Experiment ohne Theorie ist blind".

- Einheit von experimenteller Forschung und theoretischer Durchdringung sind zwei sich gegenseitig ergänzende Seiten des physikalischen Erkenntnisprozesses.

- Es gibt keine Trennung in experimentelle und theoretische Physik, wohl aber eine Arbeitsteilung zwischen Experimentalphysikern und theoretischen Physikern.

• Galileo Galilei (1564 – 1642): "Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben."

Die Physik ist die am stärksten mathematisierte Naturwissenschaft. Die Schnittstelle zur Mathematik ist die theoretische Physik.

• Die Physik ist auf dem Experiment gegründet, das Experiment ist der Prüfstein physikalischer Erkenntnis.

In der Physik ist das Experiment alleiniger Richter über wissenschaftliche Wahrheit.

Bem.: Beachte Unterschiede zur Mathematik. Diese geht in ihrem inneren logischen Aufbau nicht unbedingt von überprüfbaren Erfahrungen aus, sondern erforscht häufig logisch widerspruchsfreie Strukturen ohne unmittelbaren Bezug auf deren konkrete Realisierung.

In diesem Zusammenhang ist der → Gödel´sche Unvollständigkeitssatz für Systeme unabhängiger, widerspruchsfreier und vollständiger Axiome interessant …

2. Physikalische Theorien

(i) sind "richtig", wenn sie experimentelle Resultate korrekt beschreiben bzw. vorhersagen.

■ ART: Zu behaupten, die Struktur der Raum-Zeit (Metrik) sei durch die Masseverteilung im Weltall bestimmt und eine faszinierende Theorie zu entwickeln, ist die eine Seite.

Mindestens ebenso wichtig sind experimentelle Vorhersagen:

- Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne → Sonnenfinsternis 1919 (Gravitationslinse)

- Periheldrehung des Merkur

- Gravitationswellen

- …

(ii) Aus (i) folgt nicht, dass eine physikalische Theorie nur direkt messbare Größen enthalten darf.

■ - Wellenfunktion

- "Hilfsgrößen" wie die elektrodynamischen Potenziale

- vgl. Auseinandersetzung zwischen Ludwig Boltzmann und Wilhelm Ostwald (u. a.) im Zusammenhang mit der kinetischen Gastheorie und der Begründung der statistischen Mechanik.

(iii) ´hierarchischer´ Aufbau physikalischer Theorien

■ relativistische Mechanik enthält die klassische Mechanik im Grenzfall v << c

■ Übergang der Quantenphysik in die klassische Physik. Aus der Schrödinger-Gleichung als Grundgleichung der Wellenmechanik für die Bewegung im Potenzial $U(\underline{r})$ folgt im Grenzfall $\hbar \to 0$ die Hamilton-Jacobi-Gleichung, die manchmal als Krone der klassischen Punktmechanik bezeichnet wir; diesen Zusammenhang werden wir im Kurs QM I beweisen.

(iv) ´integrativer´ Aspekt physikalischer Theorien

■ Maxwell´sche Gleichungen $\left\{ \begin{array}{c} \textit{Elektrizität} \\ \textit{Magnetismus} \\ \textit{Licht} \end{array} \right.$ vereint verschiedene Aspekte des EB Feldes

(v) ´deduktiver Aspekt´ physikalischer Theorien, "Weltformel"

Suche nach universell gültigen Grundgesetzen, aus denen durch mathematische Deduktion Aussagen über ein breites Spektrum von Einzelerscheinungen ableitbar sind.

■ klassische Mechanik "reduziert sich auf"

$$\frac{d}{dt}(m\,\dot{\underline{r}}) = \underline{F} \quad \text{oder} \quad \delta\int_{t_1}^{t_2} dt\ L(\underline{q},\dot{\underline{q}},t) = 0\,.$$

3. Kurs der Theoretischen Physik im Bachelor-Studiengang an der TUB

- Mathematische Methoden: 2 FS; Klausur

- Modul Theoretische Physik I/II; zwei Leistungsnachweise, Modulprüfung mündlich

3 FS: ThPh I $\to$ Mechanik, Spezielle Relativitätstheorie

4 FS: ThPh II $\to$ Quantenmechanik I

- Modul Theoretische Physik III/IV; ein Leistungsnachweis, Modulprüfung mündlich

5 FS: ThPh III $\to$ Elektrodynamik/Relativitätstheorie

6 FS: ThPh IV $\to$ Thermodynamik und Statistische Physik

Vorlesung: grundlegende Ideen und Begriffsbildungen, Konzepte und Methoden $\to$ "Physikalisches Weltbild"

Vorlesung als Anleitung zum Selbststudium !!

Wichtig: Nicht den "roten Faden verlieren" !

Übung/Tutorien: Anwendung der Theorie auf Lösung konkreter Aufgaben in kleinen Gruppen

1. Newton´sche Mechanik (klassische Massepunktmechanik)

1.1 Historie: Isaac Newton

PHILOSOPHIAE
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

anno MDCLXXXVII

Isaac Newton (1643 bis 1727), Zeitgenosse von Johann Sebastian Bach (1685 bis 1750). Newton gilt, gemeinsam mit Leibniz (1646 bis 1716), als Erfinder der Infinitesimalrechnung.

○ Zwischen 1750 und 1850 wird die Newton´sche Mechanik neu formuliert. Maßgeblich beteiligt sind u.a. folgende Wissenschaftler:

→ Leonard Euler (1707 Basel bis 1783 St. Petersburg)

→ Joseph-Louis de Lagrange (1736 Turin bis 1813 Paris; Mathematiker und Astronom)

→ William Rowan Hamilton (1805 Dublin bis 1865 bei Dublin, 1834 Hamilton´sche Glgn.)

→ Carl Gustav Jakob Jacobi (1804 Potsdam bis 1851 Berlin, Mathematiker)

Es entsteht das mechanistische Weltbild im (neuen) Glauben, alles sei auf mechanische Bewegungen zurückführbar.

Dieser mechanische Determinismus stellte eine Herausforderung/Kampfansage an die Philosophie/Religion dar, insbesondere im Zusammenhang mit den Vorstellungen über Willensfreiheit, Schicksal usw.

Interessante Aspekte:

→ Konzept der Bahnkurve (Trajektorie) eines Teilchens ↔ Unschärferelation

→ mikroskopisch: Reversibilität der mechanischen Grundgleichungen (Invarianz unter $t \to -t$) ↔ makroskopisch: irreversible Prozesse.

Laplace´scher Dämon, II. Hauptsatz der Thermodynamik (Wärme, Entropie)

→ deterministisches Chaos und Vorhersagbarkeit, Edward Lorenz (1967)

1.2 Grundbegriffe

- Gegenstand der Newton´schen Mechanik ist die

makroskopisch, ansonsten QM
↓
Bewegung von Körpern/Massen in Raum und Zeit unter dem Einfluss von Kräften.
↑
v << c, ansonsten relativistische Mechanik

<u>Raum</u> und <u>Zeit</u> sind neben <u>Masse</u> und <u>Kraft</u> a priori vorgegebene Grundbegriffe, "… der schwere Anfang aller Wissenschaft".

Newton´s Raum ist absolut, euklidisch und dreidimensional, Ortsvektor $\underline{r} \in \Re^3$.

Newton´s Zeit ist absolut und skalar, $t \in \Re$.

Raum und Zeit sind also voneinander unabhängig.

Die Newton´schen Annahmen zu Raum und Zeit sind gültig

(i) wenn die Geschwindigkeit der Körper, v, viel kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit, c ist: v << c.

(ii) hinreichend fern von gravitierenden Massen.

In starken Gravitationsfeldern bestimmt die Materieverteilung die Geometrie der nicht-euklidischen, gekrümmten Raum-Zeit.

(iii) In räumlichen Bereichen von der Größenordnung der Planck´schen Elementarlänge

$$L_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar\gamma}{c^3}} \approx 1.5\,10^{-35}\,m$$

ist die Struktur der Raum-Zeit unklar.

• Einschub: Planck-Größen

Aus den drei fundamentalen/universellen Natur´konstanten´

$\rightarrow \hbar = \dfrac{h}{2\pi} = 1{,}0546 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js} \approx 10^{-34}\,\dfrac{\mathrm{kg\,m^2}}{\mathrm{s}}$, <u>Planck´sches Wirkungsquantum</u>

$\rightarrow \; c = 2.997925 \cdot 10^{8}\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$, <u>Vakuumlichtgeschwindigkeit</u> und

$\rightarrow \gamma = 6.67 \cdot 10^{-11}\,\dfrac{\mathrm{N\,m^2}}{\mathrm{kg^2}}$, <u>Gravitationskonstante</u>

lassen sich die Planck-Länge und die Planck-Zeit

$$L_{\mathrm{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar\gamma}{c^3}} \approx 1.5\,10^{-35}\,\mathrm{m} \quad , \qquad t_{\mathrm{Planck}} = \frac{L_{\mathrm{Planck}}}{c} = \sqrt{\frac{\hbar\gamma}{c^5}} \approx 0.5\,10^{-43}\,\mathrm{s}$$

bilden.
Auf diesen Skalen sind Quanteneffekte und Gravitation untrennbar verknüpft. Bisher ist es nicht gelungen, das Gravitationsfeld zu quantisieren. Die Struktur der Raum-Zeit auf diesen Skalen ist unklar.

10^{-35} m $\qquad$ 10^{-10} m $\qquad$ 10^{20} m Längenskala

Struktur der Raum-Zeit unklar $\qquad$ quantenm. Effekte ← … Alltagserfahrung …→ Geometrie nicht euklidisch

↑

z.B. Bohr´scher Radius

$$a_B = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{m_e\,e^2} \approx 0.528 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{m}$$

60 Größenordnungen liegen zwischen der Planck-Länge und der Entfernung der Quasare als dem "Rand des Universums", 10^{10} Lichtjahre, etwa 10^{26} m.

vgl./ ergänze TIME IN POWERS OF TEN – Natural phenomena and their time sacles (World Scientific, 2014)

als e-book unter http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8786#t=toc $\qquad$ Zeitskala

Ebenfalls 60 Größenordnungen trennen die Planck-Zeit und das Alter des Universums von 13,8 Mrd. Jahren ("Urknall").

1.3 Kinematik ((Wiederholung Experimentalphysik und MMP SS14, Kap. 3 und 5)

• <u>Massepunkt (MP)</u>: Physikalischer Körper der Masse m und vernachlässigbarer Ausdehnung

$\rightarrow$ idealisiertes Teilchen

<u>Bahnkurve (BK) des MP</u>: Ort $\underline{r}$ zur Zeit t , $\underline{r}(t) \in \Re^3$

In kartesischen Koordinaten:

$$\underline{r}(t) = x(t)\ \underline{e}_x + y(t)\ \underline{e}_y + z(t)\ \underline{e}_z =: \sum_{i=1}^{3} x_i(t)\ \underline{e}_i = x_i(t)\ \underline{e}_i \ \rightarrow \text{Summenkonvention}$$

• Wie schnell bewegt sich der MP entlang der BK?

<u>Geschwindigkeit des MP zum Zeitpunkt t</u>:

$$\frac{d\underline{r}(t)}{dt} =: \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \underline{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\underline{r}(t+\Delta t) - \underline{r}(t)}{\Delta t} =: \dot{\underline{r}}(t) = \underline{v}(t)$$

Der Vektor der Momentangeschwindigkeit $\underline{v}(t)$ ist
tangential zur Bahnkurve gerichtet.

Kartesische Koordinaten:

$$\underline{v}(t) = \dot{\underline{r}}(t) = \frac{dx(t)}{dt}\ \underline{e}_x + \frac{dy(t)}{dt}\ \underline{e}_y + \frac{dz(t)}{dt}\ \underline{e}_z =: \dot{x}_i(t)\ \underline{e}_i = \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix}$$

<u>Beschleunigung des MP zum Zeitpunkt t:</u>

$$\frac{d^2\underline{r}(t)}{dt^2} =: \left(\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \underline{v}}{\Delta t} \right) =: \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\dot{\underline{r}}(t+\Delta t) - \dot{\underline{r}}(t)}{\Delta t} = \frac{d\dot{\underline{r}}(t)}{dt} = \frac{d\underline{v}(t)}{dt} = \ddot{\underline{r}}(t) =: \underline{a}(t)$$

Kartesische Koordinaten:

$$\underline{a}(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}\ \underline{e}_x + \frac{d^2y(t)}{dt^2}\ \underline{e}_y + \frac{dz^2(t)}{dt^2}\ \underline{e}_z =: \ddot{x}_i(t)\ \underline{e}_i = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{pmatrix}.$$

■ Rotation mit Winkelgeschwindigkeit $\underline{\omega}(t)$ um eine Drehachse durch den Koordinatenursprung

Zerlege $\underline{r}(t) = \underline{r}_{\|} + \underline{r}_{\perp}(t)$, wobei $\underline{r}_{\|} \parallel \underline{\omega}$ und $\underline{r}_{\perp} \perp \underline{\omega}$.

$d\underline{r} = d\underline{r}_{\perp} = \underline{\omega}(t)\,dt \times \underline{r}_{\perp}$ (*)

<u>Betrag:</u> $\frac{dr_{\perp}}{r_{\perp}} = d\varphi = \omega\,dt$, d.h. $dr_{\perp} = d\varphi = \omega\,dt\,r_{\perp}$

in Übereinstimmung mit (*), da $\angle\left(\underline{\omega}(t), \underline{r}_{\perp}(t)\right) = \frac{\pi}{2}$.

<u>Richtung:</u> $d\underline{r}_{\perp}$ (Bahnebene) steht senkrecht auf der von $\underline{\omega}$ und $\underline{r}_{\perp}$ aufgespannten Ebene.

(*) $d\underline{r} = d\underline{r}_{\perp} = \underline{\omega}(t)\,dt \times \underline{r}_{\perp} \underset{\underline{\omega} \| \underline{r}_{\|}}{=} \underline{\omega}(t)\,dt \times \left(\underline{r}_{\perp} + \underline{r}_{\|}\right) = \underline{\omega}(t)\,dt \times \underline{r}$.

Damit ergibt sich für die Momentangeschwindigkeit des MP

$$\frac{d\underline{r}}{dt} = \underline{v}(t) = \underline{\omega}(t) \times \underline{r}(t)$$

und für die Beschleunigung zum Zeitpunkt t

$$\frac{d^2\underline{r}}{dt^2} = \frac{d}{dt}\left(\underline{\omega}(t) \times \underline{r}(t)\right) = \dot{\underline{\omega}}(t) \times \underline{r}(t) + \underline{\omega}(t) \times \dot{\underline{r}}(t) = \dot{\underline{\omega}}(t) \times \underline{r}(t) + \underline{\omega}(t) \times \left(\underline{\omega}(t) \times \underline{r}(t)\right) = \underline{a}(t).$$

■ Bahnkurve, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines MP bei Verwendung ebener Polar-koordinaten (bei Bedarf, krummlinige Koordinaten, (MMP SS14, Kap. 10, wiederholen).

<u>Bahnkurve:</u> $\underline{r}(t) = r\,\underline{e}_r$

<u>Geschwindigkeit:</u> $\frac{d\underline{r}(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left(r(t)\,\underline{e}_r(t)\right) = \dot{r}\,\underline{e}_r + r\,\dot{\underline{e}}_r = \dot{r}\,\underline{e}_r + r\,\dot{\varphi}\,\underline{e}_{\varphi} = \underline{v}(t)$.

$$\dot{\underline{e}}_r = \frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\cos\varphi \\ \sin\varphi\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-\dot{\varphi}\cos\varphi \\ \dot{\varphi}\sin\varphi\end{pmatrix} = \dot{\varphi}\begin{pmatrix}-\cos\varphi \\ \sin\varphi\end{pmatrix} = \dot{\varphi}\,\underline{e}_{\varphi}.$$

Damit ergibt sich zum Beispiel für die kinetische Energie

$$\frac{m}{2}v^2 = \frac{m}{2}\left(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2\right) \qquad \text{(merken)}$$

oder für den Drehimpuls

$$\underline{L} = \underline{r}\times\underline{p} = m\,\underline{r}\times\dot{\underline{r}} = m\,r\,\underline{e}_r \times \left(\dot{r}\,\underline{e}_r + r\,\dot{\varphi}\,\underline{e}_\varphi\right) = m\,r^2\,\dot{\varphi}\;\underline{e}_r \times \underline{e}_\varphi = m\,r^2\,\dot{\varphi}\;\underline{e}_z \quad \text{(merken!)}$$

(bezüglich der z-Achse durch den Koordinatenursprung, also senkrecht zur Bahnebene).

<u>Beschleunigung:</u> $\underline{a}(t) = (\ddot{r} - r\,\dot{\varphi}^2)\;\underline{e}_r + (r\,\ddot{\varphi} + 2\,\dot{r}\,\dot{\varphi})\;\underline{e}_\varphi$, denn

$$\frac{d\underline{v}(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\dot{r}\,\underline{e}_r + r\,\dot{\varphi}\,\underline{e}_\varphi\right) = \ddot{r}\,\underline{e}_r + \dot{r}\,\underset{\substack{\uparrow \\ \dot{\varphi}\,\underline{e}_\varphi}}{\dot{\underline{e}}_r} + \dot{r}\,\dot{\varphi}\,\underline{e}_\varphi + r\,\ddot{\varphi}\,\underline{e}_\varphi + r\,\dot{\varphi}\;\underset{\substack{\uparrow \\ -\dot{\varphi}\,\underline{e}_r}}{\dot{\underline{e}}_\varphi} \;.$$