

Die Welt der klassischen Physik

Hans J. Pirner

26. April

Inhalt:

- (A) Die physikalische Methode
Beispiel: Der freie Fall
- (B) Prinzipien der klassischen Mechanik
 - I. Determinismus im Zustandsraum
 - II. Zustandsraum: Orte und Geschwindigkeiten
 - III. Das Bewegungsgesetz
- (C) Die Rolle von Raum und Zeit
- (D) Die physikalisch realisierte Welt als die „beste“ aller möglichen Welten

(A) Die physikalische Methode:

- Experiment und Messung sind die Ausgangspunkte der modernen Physik
- Galileo Galilei analysiert den freien Fall durch eine Versuchsanordnung
- Er benutzte die schiefe Ebene, die ihm erlaubte die Zeiten zu messen, die ein Klotz braucht um herunter zu gleiten
- Für die Zeitmessung nimmt er eine Wasseruhr (Gefäß mit einer kleinen Öffnung)

Der freie Fall:

- Daten: Fallhöhen und Fallzeiten
(H1,t1),(H2,t2).....
- Verbindung der Daten zu H und t:
- Ergebnis: $H \approx c t^2$
- Kann für verschiedene Steigungen wiederholt werden, für verschieden schwere Klötze
- Steigung ändert c
- Verschieden schwere Klötze ->c konstant
- Gesetz: $M \frac{d^2}{dt^2} H = M g_{\text{eff}}$
 $g_{\text{eff}} = g \sin(\beta)^2$; M=Klotz Masse
 $g = G(\text{Newton}) M(\text{Erde})/R(\text{Erde})^2 = 9.8 \text{ m/sec}^2$

Freier senkrechter Fall



Newtonsche Gesetz:

$$M \frac{d^2}{dt^2} H = M g$$

$$H = \frac{1}{2} g t^2$$

Die Aufnahmen sind in Abständen von $T=0.2$ Sekunden gemacht

Wie kommt es zum Newtonschen Gesetz? Welche Prinzipien enthält es?

(B) Prinzipien der Mechanik:

(1) Determinismus

- Annahme 1: Es gibt nur zwei Zustände- wie bei einer Münze : Zahl (Z) und Wappen (W): Diese bilden unseren Zustandsraum
- Annahme 2: Zeit ist diskret, wir messen Zeit in Abschnitten , d.h. bei $T, 2T, 3T, \dots$
- Annahme 3: Jedem Element zum Zeitpunkt nT wird zum nächsten Zeitpunkt $(n+1)T$ ein anderes Element aus dem Zustandsraum zuordnet , nämlich $E[(n T)] \rightarrow E' [(n+1)T]$

Mögliche Zuordnungen:

- (a) $Z \rightarrow Z$ und $W \rightarrow W$
- (b) $Z \rightarrow W$ und $W \rightarrow Z$
- (c) $Z \rightarrow W$ und $W \rightarrow W$
- (d) $Z \rightarrow Z$ und $W \rightarrow Z$

- Die Mechanik ist invariant unter Zeitspiegelung, wenn ich den Klotz mit der Endgeschwindigkeit die schiefe Ebene hochschieße, wird er wieder oben mit Geschwindigkeit null ankommen: Möglichkeiten (c) und (d) sind nicht erlaubt, nimm (d) und kehre Zeit um:
- Z weiß ich nicht, ob Z zu Z oder zu W gehen soll.

Kompliziertere Zuordnungen

- $Z Z \rightarrow Z$
- $Z W \rightarrow Z$
- $W Z \rightarrow W$
- $W W \rightarrow W$

Man braucht nicht nur den letzten Zustand, sondern auch noch den zuvor !

Übergang zu kontinuierlichen Variablen : Genügt die Ortsvariable? NEIN!

Die klassische Mechanik braucht nicht nur den letzten Ort, sondern auch noch den Ort zuvor- oder den letzten Ort und die letzte Geschwindigkeit

II. Zustandsraum: Orte und Geschwindigkeiten

- Elemente des Zustandsraums verändern sich in der Zeit
- Veränderung der Orte
- Veränderung der Geschwindigkeiten
- Wir nehmen an, dass beide kontinuierliche Variable sind
- Zeit ist ein externer Parameter und wird von einer Uhr außerhalb (der schiefen Ebene gemessen)
- Gesetze der Mechanik selektieren eine physikalische Bewegung unter vielen möglichen Bewegungen.

Newton

- Wir brauchen nicht nur den letzten Ort sondern auch noch die letzte Geschwindigkeit um den neuen Ort vorherzusagen
- Zustandsraum der Mechanik=
(Orte, Geschwindigkeiten)
- In diesem Raum gibt es eine deterministische Zuordnung

III. Das Bewegungsgesetz

- Aristoteles : $\text{Kraft} = \text{Masse} * \text{Geschwindigkeit}$
- „Beobachtung“ : nur wenn ein Körper eine Kraft erfährt, dann bewegt er sich.

„Alleingelassene Körper können sich nur durch Seelenkräfte bewegen“

- Newton: Ein Körper verharrt in Ruhe oder bewegt sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, wenn keine Kräfte auf ihn wirken.

$\text{Kraft} = \text{Masse} * \text{Beschleunigung}$

Warum es so schwer war von Aristoteles wegzukommen:

- Die meisten Körper bewegen sich unter Einfluß der Reibung, die Reibungskräfte sind oft proportional zur Geschwindigkeit
- $M \frac{d^2 x}{dt^2}$ (Trägheitskraft)
 $+ \gamma \frac{dx}{dt}$ (Reibungskraft)=Externe Kraft
- Wenn die Reibungskraft überwiegt, dann hat man das Kraftgesetz von Aristoteles. Galileo hat mit dem Fall in verschiedenen Flüssigkeiten experimentiert und dabei den Einfluss der Reibungskraft kontinuierlich verringert und dann extrapoliert auf den idealen Fall ohne Reibung

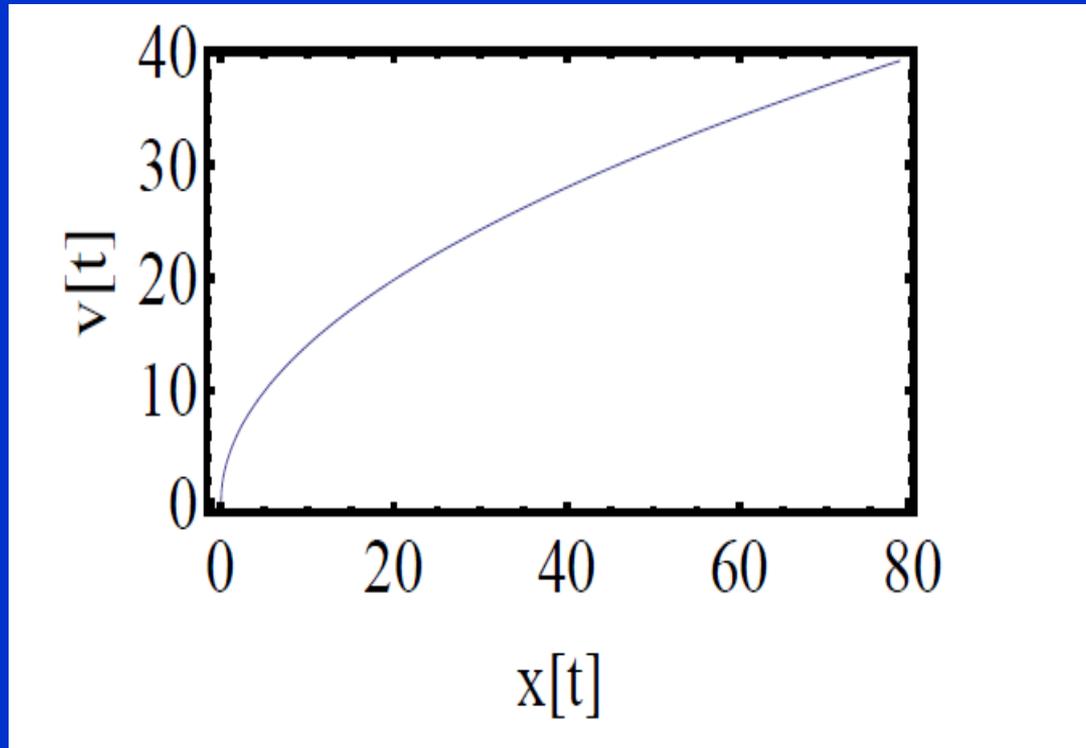
Gravitation:

- Newton gelang die Verbindung der Schwerkraft auf der Erde mit der Schwerkraft, die unseren Erdplaneten an die Sonne bindet durch das universelle Gravitationsgesetz
- $V(r) = - M_1 M_2 G(\text{Newton})/r$
- Damit wird die Lebenswelt mit der kosmischen Welt in Einklang gebracht

(C) Die Rolle von Raum und Zeit

- Newton postuliert den 3d-Raum als „Behälter“ in dem alle Bewegungen stattfinden.
- Die Trajektorie im Zustandsraum (Geschwindigkeiten, Orte) beschreibt eindeutig die Bewegung. Die Zeit spielt nur die Rolle eines Parameters.
- In diesem Sinn ist die Zeit nicht mit der mechanischen Bewegung selbst verbunden. Zeit wird nur außerhalb des Systems durch eine Uhr gemessen.

Bewegung im Phasenraum



Freier Fall: Geschwindigkeit als Funktion des Ortes. Die Zeit ist nur ein Parameter

Symmetrien von Raum und Zeit:

- Eigenschaften des 3d-Raums in der klassischen Physik:
- Metrik: Euklidischer Abstand zwischen zwei Punkten
- Translationsinvarianz ist verbunden mit der Impulserhaltung
- Rotationsinvarianz mit der Erhaltung des Drehimpuls
- Invarianz unter Zeitverschiebungen (Energieerhaltung)

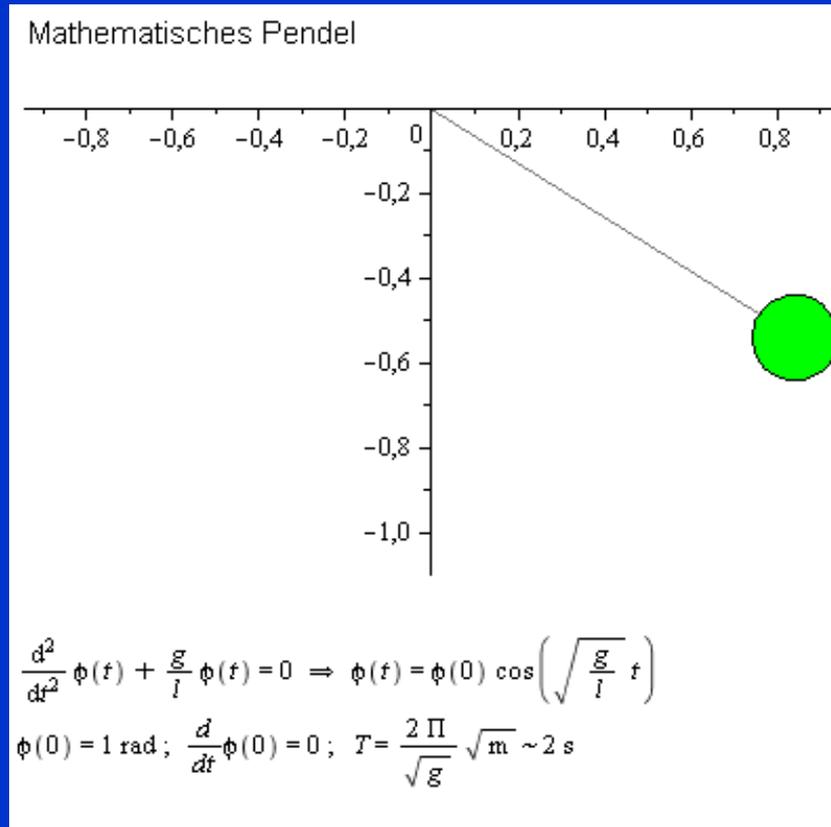
Koordinaten:

- Die Wahl der Koordinaten hängt von der Problemstellung ab. Nicht immer sind kartesische Koordinaten die besten, z.B. nicht bei der Planetenbewegung
- Die klassische Mechanik zeichnet Inertialsysteme aus, solche die sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit gegeneinander bewegen, in diesen sind die Gesetze der Mechanik unverändert.

Was sagen Physiker zur Zeit?

- „Time is what happens, when nothing else happens,“ R. Feynman Lectures on Physics
- Time is an abstraction at which we arrive by means of the changes of things, E. Mach
- By a clock we understand anything characterized by a phenomenon passing periodically through identical phases, A. Einstein

Mathematisches Pendel



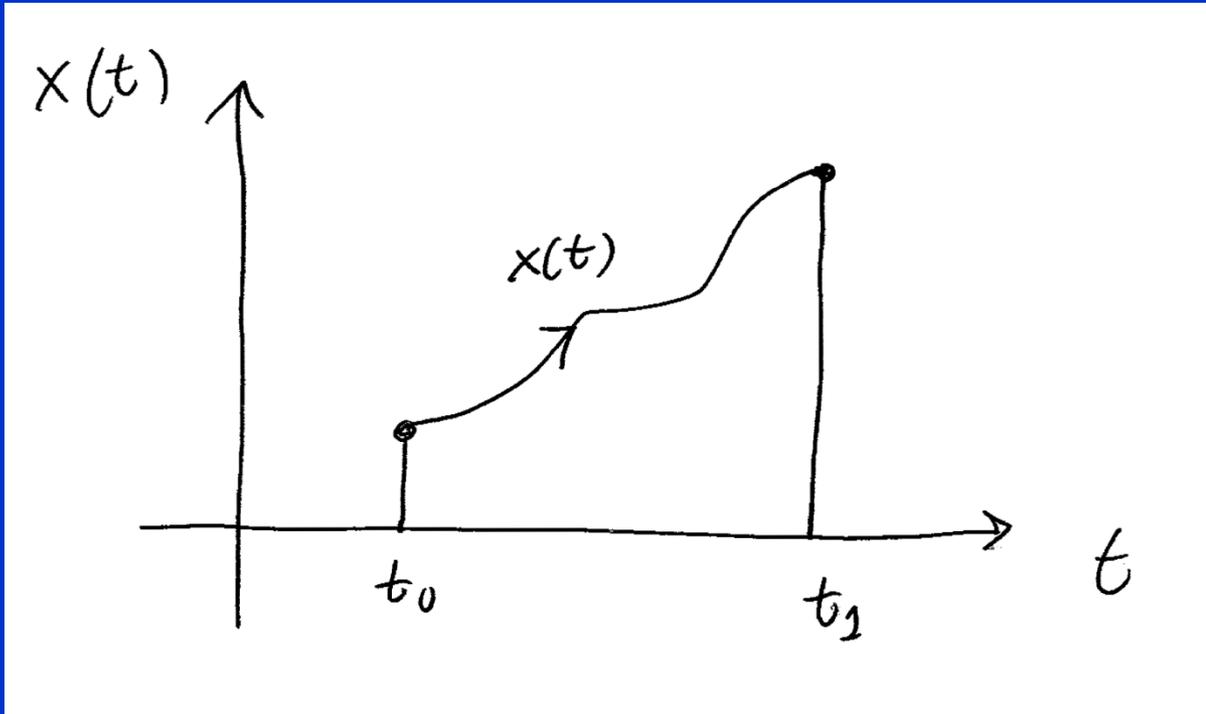
Die Zeit wird durch Uhren (von der mechanischen Uhr zur Atomuhr) immer besser messbar . Prinzip: Dauer einer Periode

Physikalische Zeit

(D) Die physikalische Welt als die Beste aller möglichen

- Prinzip der minimalen Wirkung:
- Wirkung : $S = \text{Zeit-Integral}(\text{kinetischer Energie-potentieller Energie})$ z.B.
- $S = \int dt (1/2 m (dH/dt)^2 - m g H)$ für die schiefe Ebene
- Dann gilt für feste Anfangs-und Endpunkte, die physikalische Bewegung entspricht derjenigen unter allen möglichen Bewegungen mit der kleinsten Wirkung. Die physikalische Welt stellt die optimale Welt dar.

Die Trajektorie $x(t)$ minimiert die Wirkung



Andere
Ortsveränderungen
Produzieren eine
größere Wirkung

Zusammenfassung:

- Die klassische Mechanik erwirbt mit der Newtonschen Dynamik ein Werkzeug die Trajektorien von Massenpunkten zu beschreiben. Wenn die Geschwindigkeit und der Ort eines Massenpunktes zu einem Zeitpunkt gegeben ist, kann aus der Kraft die Trajektorie des Massenpunktes zu allen späteren Zeiten berechnet werden.
- Die physikalisch realisierte Trajektorie ist eine unter vielen möglichen und wird ausgewählt durch die minimale Wirkung. „Unsere Welt als die beste aller möglichen Welten“