

## Einführung

### 1. Zum Verhältnis zwischen experimenteller und theoretischer Physik

- Max Planck (1858 – 1947):

"Theorie ohne Experiment ist leer, Experiment ohne Theorie ist blind".

Die untrennbare Einheit von experimenteller Forschung und theoretischer Durchdringung sind 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; d.h. das Experiment ist der Prüfstein physikalischen Wissens. In der Physik ist das Experiment alleiniger Richter über wissenschaftliche Wahrheit.

#### Bemerkungen zum "Wahrheitskriterium"

→ Physik (Naturwissenschaften): Experiment

→ Mathematik: Wahr ist, was beweisbar.

Die Mathematik geht in ihrem inneren logischen Aufbau nicht von überprüfbaren Erfahrungen aus, sondern erforscht logisch widerspruchsfreie Strukturen ohne unmittelbaren Bezug auf deren konkrete Realisierung. Vgl. David Hilbert's Programm zur Widerspruchsfreiheit der Mathematik, Kurt Gödel's Unvollständigkeitssatz (1931), nachzulesen in Douglas R. Hofstädter: "Gödel, Escher, Bach – ein endlos geflochtenes Band".

→ Recht: Bürgerliches Gesetzbuch, Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts usw.; in anderen Ländern andere Rechtsprechung ...

Kunst: ...

Religion: ...

## 2. Physikalische Theorien

- ... sind "richtig", wenn sie experimentelle Resultate korrekt beschreiben oder, noch besser, den Ausgang neuartiger Experimente vorhersagen.

- Beispiel Allgemeine Relativitätstheorie: Es ist eine Seite, eine faszinierende Theorie zu entwickeln und zu behaupten, die Metrik der Raum-Zeit sei durch die Masseverteilung im Weltall bestimmt.

Mindestens ebenso wichtig sind auf der Theorie beruhenden experimentelle Vorhersagen, wie

- die Lichtablenkung im Gravitationsfeld eines massereichen Sterns, Gravitationslineseneffekt  
→ bei Sonnenfinsternis am 19.5.1919 von A. Eddington gemessen.
- die Periheldrehung des Merkur
- die gravitative Rotverschiebung
- Gravitationswellen, Existenz nachgewiesen 2015

- Frage: Darf eine physikalische Theorie nicht messbare Größen/beobachtbare Objekte enthalten?

- Beispiel Quantenmechanik: Wellenfunktion

- Atomarer Aufbau der Materie: Vgl. wissenschaftlichen Disput zwischen Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) und Wilhelm Ostwaldt/Ernst Mach) über "Atomistik", kinetische Gastheorie und die Begründung der Statistischen Mechanik. Für B. waren die Atome real und objektiv existierend, auch wenn sie unseren Sinnen nicht direkt zugänglich sind. Mach und Ostwaldt lehnten das strikt ab.

- Lorentz-Kraft und Eichinvarianz des elektromagnetischen Feldes

$$\underline{F} = q(\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B}) \leftrightarrow \underline{A}, \Phi$$

- Der hierarchische Aufbau physikalischer Theorien

- relativistische Mechanik enthält die klassische Mechanik im Grenzfall  $v \ll c$ .

- Quantenphysik beinhaltet klassische Physik im Grenzfall  $\hbar \rightarrow 0$ .

- Der integrative Aspekt physikalischer Theorien

Die Maxwell'schen Gleichungen vereinigen zuvor getrennt betrachtete Phänomene

{  
  *Elektrizität*  
  *Magnetismus*  
  *Licht*

- Der deduktive Aspekt physikalischer Theorien (→ "Weltformel")

Universelle Grundgesetze, aus denen durch mathematische Deduktion exakte Aussagen über Einzelercheinungen ableitbar sind.

- Beispiel Klassische Mechanik "reduziert auf"  $\delta \int_{t_1}^{t_2} dt L(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, t) = 0$ .

### 3. Kurs der Theoretischen Physik im Bachelor-Studiengang an der TU Berlin

2. Fachsemester: Mathematische Methoden der Physik (2 + 2): unbenotete Klausur

Modul Theoretische Physik I/II, zwei Leistungsnachweise (unbenotet)

3. Fachsemester: ThPh I → Mechanik, Spezielle Relativitätstheorie

4. Fachsemester: ThPh II → Quantenmechanik I

Modul Theoretische Physik III/IV, ein Leistungsnachweis (unbenotet)

5. Fachsemester: ThPh III Elektrodynamik/Relativitätstheorie

6. Fachsemester: ThPh IV Thermodynamik und Statistische Physik

In der **Vorlesung** werden grundlegende Ideen, Konzepte und Begriffsbildungen der Physik erarbeitet und die (mathematischen) Methoden der Theoretischen Physik vermittelt.  
→ "physikalisches Weltbild".

**Die Vorlesung ist als Anleitung zum (vertiefenden) Selbststudium konzipiert !**

Wichtig: Nicht den "roten Faden verlieren"!

Im Mittelpunkt der **Übungen/Tutorien** stehen die Diskussion der Vorlesungsinhalte und die Anwendung des Erlernten auf die Lösung konkreter physikalischer Probleme in vergleichsweise kleinen Gruppen.

# 1. Newton'sche Mechanik

## 1.1 Historisches

○ Isaac Newton (1643 bis 1727); 1687 Hauptwerk „Philosophiae naturalis principia mathematica“.

Gemeinsam mit Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 bis 1716) Erfinder der Infinitesimalrechnung. Zeitgenosse von Johann Sebastian Bach.

○ Folgende Wissenschaftler (u.a.) formulieren zwischen 1750 und 1850 die Newton'sche Mechanik um

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

→ Joseph-Louis de Lagrange (1736 Turin bis 1813 Paris; Mathematiker und Astronom, 1788 Formulierung der klassischen Mechanik)

→ William Rowan Hamilton (1805 Dublin bis 1865 bei Dublin, 1834 Hamilton'sche Bewegungsgleichungen)

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

Es entsteht das mechanistische Weltbild im 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.

Beachte:

- Deterministisches Chaos ↔ Vorhersagbarkeit (Edward Lorenz, 1987)

- Konzept der Bahnkurve (Trajektorie) eines Teilchens ↔ Unschärferelation

## 1.2 Grundbegriffe

Gegenstand der Newton'schen Mechanik ist die Bewegung von Körpern/Massen in Raum und Zeit unter dem Einfluss von Kräften.

Raum und Zeit sind neben Masse und Kraft a priori vorgegebene Grundbegriffe: "... der schwere Anfang aller Wissenschaft".

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

Newton's Zeit ist absolut und skalar,  $t \in \mathfrak{R}$ .

Raum und Zeit sind absolut und 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:  $v \ll c$ ,

(ii) hinreichend fern von gravitierenden Massen.

(iii) In räumlichen Bereichen von der Größenordnung

$$l \leq l_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar \gamma}{c^3}} \approx 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

ist die Struktur von Raum und Zeit unklar.

### • Einschub: Planck-Größen

Nach der Entdeckung des Wirkungsquantums bemerkte Planck 1906, dass sich aus den universellen Naturkonstanten

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \approx 10^{-34} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}} \rightarrow \text{Planck'sches Wirkungsquantum,}$$

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow \text{Vakuumlichtgeschwindigkeit und}$$

$$\gamma = 6,67408 \pm 0,00031 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2} \rightarrow \text{Gravitationskonstante}$$

ein universell gültiges System von Einheiten definieren lässt:

$$\ell_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar \gamma}{c^3}} \approx 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ m} ,$$

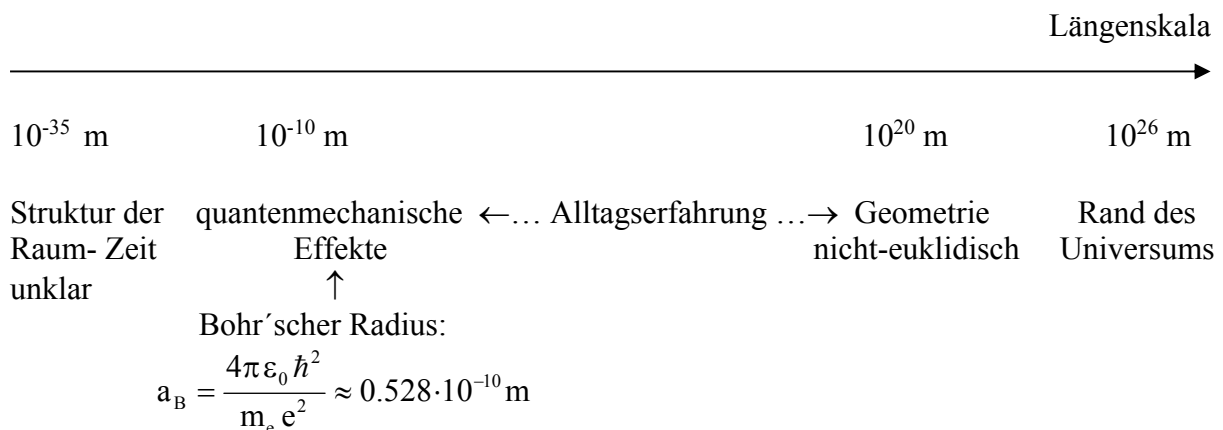
$$t_{\text{Planck}} = \frac{\ell_{\text{Planck}}}{c} = \sqrt{\frac{\hbar \gamma}{c^5}} \approx 5,391 \cdot 10^{-44} \text{ s} ,$$

$$m_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{\gamma}} \approx 2.176 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

Das funktioniert auch für alle aus Länge, Zeit und Masse abgeleiteten physikalischen Größen. Beispielsweise überzeugt man sich leicht, dass der Drehimpuls von der Größenordnung  $\hbar$  ist: Planck-Länge  $\times$  Planck-Masse  $\times$  Planck-Länge  $\times$  (Planck-Zeit) $^{-1} = \dots = \hbar$

Auf den Planck-Skalen sind Quanteneffekte und Gravitation untrennbar verknüpft. Bisher ist es jedoch nicht gelungen, das Gravitationsfeld zu quantisieren.  $\ell_{\text{Planck}}$  gilt als hypothetische untere Messschranke für Längenmessungen im Zusammenhang mit Quantenfluktuationen des Gravitationsfeldes.

60 Größenordnungen liegen zwischen der Planck-Länge und der Entfernung der Quasare am "Rand des Universums" in  $10^{10}$  Lichtjahren (etwa  $10^{26}$  m).



Ebenfalls 60 Größenordnungen trennen die Planck-Zeit und das Alter des Universums,  $2 \cdot 10^{10}$  a (20 Mrd. Jahre nach dem "Urknall").

Je ein charakteristisches Beispiel für physikalische Prozesse auf den unterschiedlichen Skalen wird in dem Buch "Time in powers of ten – Natural phenomena and their time-scales (World Scientific, 2014) diskutiert. Das Buch ist als e-book vorhanden:

<http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8786#t=toc>

Bemerkungen:

(i) Unser jetziges Verständnis (besser Glaube) ist, dass Zeit und Raum beim Urknall entstanden sind. Nach der Planck-Zeit ( $5.39 \cdot 10^{-44}$  s) war das Universum etwa  $L_{\text{Planck}} \sim 1,62 \cdot 10^{-35}$  m groß (zum Vergleich: Durchmesser des H-Atoms etwa  $5 \cdot 10^{11}$  m, eines Protons etwa  $10^{-15}$  m).

(ii) Die aktuelle Messgrenze für Zeitdauern liegt bei etwa  $10^{-16}$  s (100 Attosekunden).

(iii) Auf den Planck-Skalen sind

Quantenphänomene  $\rightarrow h$ ,

Gravitation (verantwortlich für die Krümmung der Raum-Zeit)  $\rightarrow \gamma$  und

Lichtgeschwindigkeit (bestimmt, wie schnell sich Krümmungsänderungen ausbreiten)  $\rightarrow c$

gleich wichtig/ untrennbar miteinander verbunden.

Auf kleinen Skalen oberhalb der Planck-Skalen dominieren Quanteneffekte, auf sehr großen Skalen die Gravitation, d.h., auf allen anderen Skalen sind die drei Faktoren (wahrscheinlich) nicht gleichzeitig wichtig.

(iv) Die Messung der Gravitationskonstanten ist am ungenauesten, deshalb ist  $\gamma$  die mit dem größten Fehler behaftete Naturkonstante.

Erste Ergebnisse von Cavendish (1798) mit der Gravitationswaage: 2 Testmassen durch eine Hantel verbunden an einem Torsionsdraht aufgehängt.

Das Planck'sche Wirkungsquantum wird 1000 mal genauer gemessen.

### 1.3 Kinematik (Wiederholung Experimentalphysik und MMP)

- Massepunkt (MP): Physikalischer Körper der Masse  $m$  und vernachlässigbarer Ausdehnung

→ idealisiertes Teilchen

Bahnkurve des MP: Ort  $\underline{r}$  zur Zeit  $t$ ,  $\underline{r}(t) \in \mathfrak{R}^3$

In kartesischen Koordinaten:  $\underline{r}(t) = x(t) \underline{e}_x + y(t) \underline{e}_y + z(t) \underline{e}_z =: \sum_{i=1}^3 x_i(t) \underline{e}_i = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix}$ .

- Wie schnell bewegt sich der MP entlang der BK? → Geschwindigkeit des MP.

Momentangeschwindigkeit es MP zum Zeitpunkt  $t$ :  $\Delta t \rightarrow 0$

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

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

Kartesische Koordinaten:

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

- Beschleunigung des MP zum Zeitpunkt  $t$ :

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

Kartesische Koordinaten:  $\underline{a}(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \underline{e}_x + \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \underline{e}_y + \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \underline{e}_z =: \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i(t) \underline{e}_i = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{pmatrix}$ .



■ Beispiel: Ebene Polarkoordinaten

Bahnkurve:  $\underline{r}(t) = r \underline{e}_r$

Geschwindigkeit:  $\frac{d\underline{r}(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(r(t)\underline{e}_r(t)) = \dot{r}\underline{e}_r + r\dot{\underline{e}}_r = \dot{r}\underline{e}_r + r\dot{\varphi}\underline{e}_\varphi = \underline{v}(t)$ .

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

Daraus ergibt sich für die kinetische Energie  $\frac{m}{2} v^2 = \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2)$

oder für den Drehimpuls  $\underline{L} = \underline{r} \times \underline{p} = m \underline{r} \times \dot{\underline{r}} = m r \underline{e}_r \times (\dot{r} \underline{e}_r + r \dot{\varphi} \underline{e}_\varphi) = m r^2 \dot{\varphi} \underline{e}_r \times \underline{e}_\varphi = \underline{m r^2 \dot{\varphi} \underline{e}_z}$ .

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

Für die Beschleunigung finden wir  $\underline{a}(t) = (\ddot{r} - r \dot{\varphi}^2) \underline{e}_r + (r \ddot{\varphi} + 2 \dot{r} \dot{\varphi}) \underline{e}_\varphi$ ,

denn  $\frac{d\underline{v}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} (\dot{r} \underline{e}_r + r \dot{\varphi} \underline{e}_\varphi) = \ddot{r} \underline{e}_r + \dot{r} \dot{\underline{e}}_r + \dot{r} \dot{\varphi} \underline{e}_\varphi + r \ddot{\varphi} \underline{e}_\varphi + r \dot{\varphi} \dot{\underline{e}}_\varphi$ .

$\uparrow$   $\dot{\varphi} \underline{e}_\varphi$   $\uparrow$   $-\dot{\varphi} \underline{e}_r$

## 1.4 Dynamik, Newton'sche Axiome

Ausgangspunkt/Motivation: Die Kinematik sagt nichts über die Ursache der Bewegung von Körpern in Raum und Zeit.

In der Dynamik wird die Bewegung von Körpern unter dem Einfluss von Kräften betrachtet, deren Wirkung auf die Körper Newton als Ursache für ihre Bewegung postuliert hat.

Beachte: Auch kräftefreie Körper können sich bewegen.

### 1.4.1 I. Newton'sches Axiom, Inertialsysteme, Galilei-Transformation

Newtons Formulierung: Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

Heutige Formulierung: Es gibt Koordinatensysteme, in denen ein kräftefreier Körper im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung verharrt

→ diese heißen **Inertialsysteme**.

Der Übergang zwischen zwei Inertialsystemen, die sich mit konstanter Geschwindigkeit  $\underline{u}$  relativ zueinander bewegen und deren Koordinatenursprünge zum Zeitpunkt  $t = 0$  um  $\underline{R}$  verschoben sind, wird durch die

→ **Galilei-Transformation**  $\underline{r} = \underline{r}' + \underline{R} + \underline{u} \cdot t$ ,  $t = t'$

beschrieben.

Bahnkurve des kräftefreien Körpers (MP):  $\underline{r}(t) = \underline{v}_0 \cdot t + \underline{r}_0$

Bemerkungen:

(i) Bewegen sich zwei Körper geradlinig gleichförmig mit  $v_1$  bzw.  $v_2$ , so ist nicht entscheidbar, welcher von beiden ruht. Im Ruhesystem eines jeden bewegt sich der andere usw. usf.

(ii) Mach'sche Hypothese zum Ursprung der Trägheit: Die Trägheit eines Körpers hat ihren Ursprung in der Existenz der "fernen" Massen des Kosmos. Sie ist eine Art kollektiver Effekt ihrer Wechselwirkungen. Entfernte man die übrigen Massen aus dem Kosmos, würde die Trägheit verschwinden.

Inertialsysteme der Newton'schen Mechanik sind experimentell durch bezüglich des Systems der Fixsterne rotationsfreie Bezugssysteme realisierbar.

(iii) Es gibt zumindest ein Inertialsystem (z.B. das, in dem die Fixsterne ruhen)  $\leftrightarrow$  Newton'sche Fiktion vom absoluten Raum.

Unser Standpunkt: Es gibt Koordinatensysteme, in denen die Newton'sche Mechanik gültig ist.

(iv) Die Zeit wird nicht mittransformiert  $\leftrightarrow$  Newton'sche Fiktion von der absoluten Zeit.

## 1.4.2 II. Newton'sches Axiom, Newton'sche Bewegungsgleichung (NBG)

Was passiert bei  $\underline{F} \neq 0$ ?

Es bedarf einer Kraft  $\underline{F}$ , um die Geschwindigkeit  $\underline{v}$  eines Körpers zu ändern.  
Maßeinheit:  $[\underline{F}] = \text{kg m s}^{-2} = 1 \text{ N}$ .

Experimentell findet man  $\frac{\Delta \underline{v}}{\Delta t} \sim \underline{F}$ , Proportionalitätsfaktor:  $m \rightarrow$  **träge Masse**,  $[m] = \text{kg}$ .

Der Körper setzt der Bewegungsänderung den **Trägheitswiderstand** entgegen, der unabhängig von der Stärke der Kraft ist und in diesem Sinne den Körper selbst charakterisiert. Durch Messung der durch die Kraft hervorgerufenen Beschleunigung wird jedem Körper eine **träge Masse** zugeordnet.

**Def.:**  $\underline{p} := m \underline{v} = m \dot{\underline{r}} \rightarrow$  **Impuls** des Körpers/MP

Newton postuliert: Die zeitliche Änderung des Impulses ist gleich der wirkenden Kraft

$$\underline{F} = \frac{d\underline{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m \underline{v}) = \frac{d}{dt}(m \dot{\underline{r}})$$

Ist die Masse  $m$  zeitunabhängig, folgt

$$\underline{F} = m \ddot{\underline{r}} = m \underline{a} \quad \text{bzw.} \quad \underline{F}(\underline{r}, \dot{\underline{r}}, t) = m \frac{d^2 \underline{r}(t)}{dt^2} \rightarrow \text{Newton'sche Bewegungsgleichung (NBG)}$$

Die NBG ist die Grundgleichung der Newton'schen Dynamik. Es handelt sich um eine ODE 2. Ordnung für die Bahnkurve des Körpers  $\underline{r}(t)$ . Für "realistische" Kräfte sind Existenz und Eindeutigkeit der Lösung gesichert.

Grundaufgabe der Newton'schen Mechanik: Bestimme aus der auf den MP wirkenden resultierenden Kraft unter Verwendung der Anfangsbedingungen

$$\underline{r}(t = t_0) = \underline{r}_0 \text{ und } \underline{v}(t = t_0) = \underline{v}_0$$

durch Integration der NBG die Bahnkurve  $\underline{r}(t)$ .

**"Rezept" zur Lösung von Bewegungsproblemen** auf der Basis der Newton'schen Bewegungsgleichung:

(i) Ermittle die (resultierende) wirkende Kraft  $\underline{F}(\underline{r}, \dot{\underline{r}}, t)$

↓  
Lorentz, Reibung

(ii) Integriere die NBG  $m\ddot{\underline{r}} = \underline{F}(\underline{r}, \dot{\underline{r}}, t)$  und bestimme aus den Anfangsbedingungen die Integrationskonstanten.

(iii) Diskutiere die Lösung.

Die Newton'sche Bewegungsgleichung invariant gegen Zeitumkehr (reversibel) und unter der **Galilei-Transformation**:

$$\underline{r}(t) = \underline{r}'(t) + \underline{R} + \underline{u} \cdot t, \quad t = t',$$

$$\frac{d\underline{r}}{dt} = \frac{d\underline{r}'}{dt} + \underline{u} \quad \text{bzw.} \quad \underline{v} = \underline{v}' + \underline{u},$$

$$\frac{d^2\underline{r}}{dt^2} = \frac{d^2\underline{r}'}{dt^2}, \quad \text{d. h. aus } \underline{F}(\underline{r}) = m \frac{d^2\underline{r}}{dt^2} \rightarrow \underline{F}(\underline{r}') = m \frac{d^2\underline{r}'}{dt^2}.$$

In allen Inertialsystemen gelten die Newton'schen Axiome.