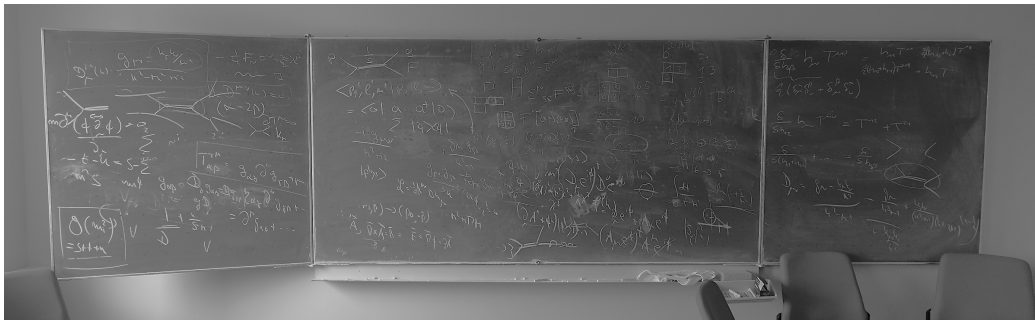


Theoretische Physik I:
Klassische Mechanik
(Wintersemester 2023/24)

Thorsten Ohl
Institut für Theoretische Physik und Astrophysik
Universität Würzburg
D-97070 Würzburg



commit 9a0fc67ef2fb68aeae6cab33741eee4e248b3b8a

Author: Thorsten Ohl <ohl@physik.uni-wuerzburg.de>

Date: Fri Nov 24 11:09:39 2023 +0100

Zusammenfassung

Inhalt der Vorlesung (nicht notwendig chronologisch, weil die Anwendungen auch als erläuternde Beispiele für die Formalismen dienen sollen):

1. Newton'sche Formulierung
 - (a) Inertialsysteme, Newton'sche Gesetze, Bewegungsgleichungen
 - (b) Eindimensionale Bewegung, Energieerhaltung
 - (c) Harmonischer Oszillator
 - (d) Bewegung im Anschauungsraum, konservative Kräfte
2. Lagrange'sche Formulierung
 - (a) Variationsprinzipien, Euler-Lagrange-Gleichungen
 - (b) Nebenbedingungen
 - (c) Koordinatentransformationen, Mechanische Eichtransformationen
 - (d) Symmetrien, Noether'sches Theorem, Zyklische Koordinaten
 - (e) Beschleunigte Bezugssysteme und Scheinkräfte
3. Hamilton'sche Formulierung
 - (a) Legendre-Transformation, Phasenraum
 - (b) Hamiltonfunktion, kanonische Gleichungen
 - (c) Poissonklammern, kanonische Transformationen
 - (d) Erzeugende von Symmetrien, Erhaltungssätze
 - (e) minimale Kopplung
 - (f) Liouville Theorem
 - (g) **Hamilton-Jacobi'sche Formulierung*
4. Anwendungen
 - (a) Zentralkraftprobleme
 - (b) Mechanische Ähnlichkeit, Virialsatz
 - (c) Kleine Schwingungen
 - (d) Teilchen im elektromagnetischen Feld

- (e) Starre Körper
 - i. Drehmoment, Trägheitstensor
 - ii. **Kreisel*, **Euler'sche Gleichungen*
- (f) Streuung, **Wirkungsquerschnitt*

5. Relativistische Dynamik

- (a) Lorentz-Transformationen
- (b) Minkowski-Raum
- (c) Bewegungsgleichungen

6. Nichtlineare Dynamik

- (a) Stabilitätstheorie
- (b) **KAM-Theorie*
- (c) **Deterministisches Chaos*

Die mit * gekennzeichneten Themen können nur bei optimalem Verlauf in einer einsemestrigen Vorlesung in hinreichender Tiefe behandelt werden und sind daher als optional anzusehen.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 | Was heißt und zu welchem Ende studiert man „Klassische Mechanik“? | 1 |
| | Vorlesung 01: Mo, 16. 10. 2023 | |
| 1.2 | Idealisierungen | 2 |
| 1.3 | Formalismen | 3 |
| 1.3.1 | Newton | 3 |
| 1.3.2 | Lagrange | 3 |
| 1.3.3 | Hamilton | 3 |
| 1.4 | Literatur | 4 |
| 1.4.1 | Standardwerke | 4 |
| 1.4.2 | Moderne Vorlesungsskripte | 4 |
| 1.4.3 | Für Fortgeschrittene | 4 |
| 1.4.4 | Spezielles | 4 |
| 2 | NEWTON’SCHES FORMULIERUNG | 5 |
| 2.1 | Bewegung eines Massenpunkts im Anschauungsraum \mathbb{R}^3 | 5 |
| 2.1.1 | Trajektorien, Koordinatensysteme, Bezugssysteme | 5 |
| 2.1.2 | Inertialsysteme, Newton’sche Gesetze | 7 |
| 2.1.3 | Erhaltungsgrößen | 8 |
| 2.1.4 | Arbeit | 9 |
| | Vorlesung 02: Fr, 20. 10. 2023 | |
| 2.1.5 | Konservative Kräfte | 11 |
| 2.2 | Eindimensionale Bewegung eines Massenpunkts | 14 |
| 2.2.1 | Energieerhaltung | 15 |
| 2.2.2 | Integration der Bewegungsgleichung | 15 |
| | Vorlesung 03: Mo, 23. 10. 2023 | |
| 2.2.3 | Phasenraum, Phasenfluß | 20 |
| 3 | LAGRANGE’SCHES FORMULIERUNG | 22 |
| 3.1 | Variationsprinzipien | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.1 | $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ | 23 |
| 3.1.2 | $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^{3n}$ | 26 |
| | Vorlesung 04: Fr, 29. 10. 2021 | |
| 3.2 | Hamilton'sches Prinzip und Euler-Lagrange Gleichungen | 26 |
| 3.2.1 | Beispiele | 28 |
| 3.3 | Koordinatentransformation | 29 |
| | Vorlesung 05: Mo, 30. 10. 2023 | |
| 3.4 | Nebenbedingungen | 33 |
| 3.4.1 | Klassifikation | 33 |
| 3.4.2 | Zwangskräfte | 38 |
| | Vorlesung 06: Fr, 03. 11. 2023 | |
| 3.5 | Variation mit Zwangsbedingungen | 40 |
| 3.5.1 | Lagrangemultiplikatoren | 40 |
| 3.5.2 | Zwangskräfte | 41 |
| 3.6 | Zyklische Koordinaten | 43 |
| 3.6.1 | Beispiele | 43 |
| 3.7 | Mechanische Eichtransformationen | 46 |
| | Vorlesung 07: Mo, 06. 11. 2023 | |
| 3.7.1 | Alternative Herleitung | 47 |
| 3.8 | Noether'sches Theorem | 48 |
| 3.8.1 | Symmetrien | 48 |
| 3.8.2 | Rotationen | 51 |
| | Vorlesung 08: Fr, 10. 11. 2023 | |
| 3.8.3 | Erhaltungssätze | 55 |
| 3.8.4 | Zeittranslationen und Energieerhaltung | 57 |
| | Vorlesung 09: Mo, 13. 11. 2023 | |
| 3.8.5 | Galilei-Gruppe | 59 |
| 3.8.6 | Translationen und Impulserhaltung | 64 |
| 3.8.7 | Rotationen und Drehimpulserhaltung | 65 |
| 3.8.8 | Galilei-Boosts und Schwerpunktsbewegung | 66 |
| | Vorlesung 10: Fr, 17. 11. 2021 | |
| 3.9 | Galilei-Invarianz und Newton'sche Gesetze für nicht konser- | |
| | vative Kräfte | 68 |
| 3.9.1 | Gesamtimpuls und Schwerpunktsbewegung | 68 |
| 3.9.2 | Gesamtdrehimpuls | 69 |
| 4 | ANWENDUNGEN | 70 |
| 4.1 | Zweikörperprobleme | 70 |
| 4.1.1 | Schwerpunkts- und Relativkoordinaten | 71 |
| 4.2 | Zentralkraftprobleme | 72 |
| | Vorlesung 11: Mo, 20. 11. 2023 | |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2.1 | <i>Drehimpuls</i> | 73 |
| 4.2.2 | <i>Isotroper Harmonischer Oszillator</i> | 74 |
| 4.2.3 | <i>Kepler Problem</i> | 79 |
| | Vorlesung 12: Fr, 24. 11. 2023 | |
| 4.2.4 | <i>Existenz von geschlossenen Bahnen</i> | 85 |
| 4.2.5 | <i>Geometrische Lösung für den harmonischen Oszillator und das Keplerproblem</i> | 85 |
| | Vorlesung 13: Mo, 27. 11. 2023 | |
| 4.3 | <i>Planeten und Monde</i> | 92 |
| 4.3.1 | <i>Ausgedehnte Körper</i> | 92 |
| 4.3.2 | <i>Zweizentrenproblem</i> | 93 |
| 4.3.3 | <i>Restringiertes Dreikörperproblem</i> | 93 |
| A | NOTATION | 95 |
| B | MATHEMATISCHER WERKZEUGKASTEN | 97 |
| B.1 | <i>Funktionen</i> | 97 |
| B.2 | <i>Lineare Algebra</i> | 98 |
| B.2.1 | <i>Rechnen mit Indices</i> | 98 |
| B.3 | <i>Ableitungen</i> | 99 |
| B.3.1 | <i>Kettenregel</i> | 101 |
| B.3.2 | <i>Produktregel</i> | 101 |
| B.3.3 | <i>„Vektoranalysis“</i> | 103 |
| C | ABKÜRZUNGEN | 105 |

Vorbemerkung

Dieses Manuskript ist mein persönliches Vorlesungsmanuskript, an vielen Stellen nicht ausformuliert und kann jede Menge Fehler enthalten. Es handelt sich hoffentlich um weniger Denk- als Tippfehler, trotzdem kann ich deshalb ich keine Verantwortung für Fehler übernehmen. Zeittranslationsinvarianz ist natürlich auch nicht gegeben ...

Dennoch, oder gerade deshalb, bin ich für alle Korrekturen und Vorschläge dankbar!

Organisatorisches

Kontakt

- Büro: 22.02.009 (Hubland Nord, Emil-Hilb-Weg 22, 2. Stock)
- Sprechstunde: nach Vereinbarung
- Mail: ohl@physik.uni-wuerzburg.de
- URL: <http://physik.uni-wuerzburg.de/ohl/>

Aktuelle Informationen

<https://wuecampus2.uni-wuerzburg.de/moodle/course/view.php?id=61560>

Übungsgruppen

- #01: Mo, 10-12, SE 4, *Christopher Schwan*
- #02: Mo, 14-16, SE 22.00.017, *Christopher Schwan*
- #03: Mi, 10-12, SE 31.00.017, *Manuel Kunkel*

Übungszettel

- Montags online, Besprechung ab Montag der folgenden Woche.

—1— EINLEITUNG

1.1 Was heißt und zu welchem Ende studiert man „Klassische Mechanik“?

| |
|------------------------------|
| Vorlesung 01: Mo, 16.10.2023 |
|------------------------------|

Theoretische Physik hat

- **Ziel:** Beschreibung eines *Systems*, so daß Kenntnis seines *Zustands* zu einem Zeitpunkt t_0 , die Vorhersage des Zustands zu einem Zeitpunkt $t > t_0$ erlaubt.
- **Zweck:**
 - Anwendungen: Militär, Sport, etc.
 - Wissenschaft: Verifikation, bzw. Falsifikation, einer Beschreibung des Systems

Klassische Mechanik ist

- Fundament und ältester Teil des Gebäudes der Theoretischen Physik (*Isaac Newton: Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, 1687*)
— älter als die Würzburger Residenz.
- am nächsten an der Alltagserfahrung und Intuition
- Modell für modernere Theorien, die im ganz Großen (allgemeine Relativitätstheorie, Kosmologie) und im ganz Kleinen (Quantentheorie) weiter reichen

Abgrenzung zur

- *Quantenmechanik*: Bewegungen mit typischer *Wirkung*

$$S \lesssim \hbar \approx 10^{-34} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}. \quad (1.1)$$

Wirkung wird bald präzise definiert — anschaulich

$$\text{Wirkung} \approx \begin{cases} \text{typische Ausdehnung} \times \text{typischer Impuls} \\ \text{typische Energie} \times \text{typische Dauer} \\ \text{typischer Drehimpuls} \end{cases}, \quad (1.2)$$

- *Statistischen Physik (Thermodynamik)*: Systeme mit vielen Freiheitsgraden, die nicht *individuell* sondern mit Mittelungen beschrieben werden müssen,
- *Feldtheorie (Elektrodynamik)*: nicht nur das Verhalten von Körpern unter dem Einfluß von Fernwirkungen entsprechend gegebener Gesetze (Schwerkraft, Elektromagnetismus), sondern die Dynamik der entsprechenden Felder selbst.

Meistens werden wir nur Systeme betrachten, deren typischer Geschwindigkeiten sehr klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit

$$v \ll c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.3)$$

sind. In Kapitel ?? werden wir kurz auf die Beschreibung (*speziell*) *relativistischer* Bewegung $v \rightarrow c$ eingehen.

1.2 Idealisierungen

Klassische Mechanik betrachtet Systeme mit wenigen Freiheitsgraden, insbesondere

- Massenpunkte (in ART unmöglich, weil sonst schwarzes Loch)
- starre Körper (in spezieller Relativität unmöglich wegen Kausalität)

als *effektive Theorie*, wenn die anderen Freiheitsgrade eines realen Körpers vernachlässigt werden können. Zweck ist

- Gleichungen mit verstehbarer Struktur
- Lösung durch Symmetrien
- robuste Vorhersagen

zu erhalten.

1.3 *Formalismen*

Zunehmende Abstraktion nicht als Selbstzweck, sondern zur Problemlösung.

1.3.1 *Newton*

Kapitel 2

- + allgemeinste Formulierung, erlaubt auch nicht abgeschlossene Systeme, Reibung etc.
- Symmetrien nicht manifest (kovariant, nicht invariant)
- Erhaltungsgrößen nicht systematisch
- Gleichungen schwer aufzustellen, kaum Hilfe bei der Lösung
- kein Weg zur Quantenmechanik

1.3.2 *Lagrange*

Kapitel 3

- + Mächtigstes Werkzeug zum Problemlösen (z. B. in der Klausur)
- + Symmetrien manifest
- + Erhaltungsgrößen systematisch aus Noether Theorem
- + Weg zur Quantenmechanik („Pfadintegral“)
- Nachteil: Reibung etc. nicht natürlich

1.3.3 *Hamilton*

Kapitel ??

- + Noch reichhaltigere Symmetrien
- + mathematisch robuster Weg zur Quantenmechanik

Bemerkung

In Anhang A sind die verwendeten Notationen zusammengefasst. Zwar ist Physik und Mathematik „invariant unter (konsistentem) Austausch von Notationen“, aber es hilft doch, Notationen nicht immer wieder neu definieren zu müssen.

1.4 Literatur

1.4.1 Standardwerke

- Herbert Goldstein: *Classical Mechanics* [1]
- Landau-Lifschitz: *Lehrbuch der Theoretischen Physik 1: Mechanik* [2]

1.4.2 Moderne Vorlesungsskripte

- David Tong: *Lectures on Dynamics and Relativity* [3]
- David Tong: *Lectures on Classical Dynamics* [4]

NB: alle Vorlesungsskripte zu Teilgebieten der theoretischen Physik von David Tong sind hervorragend: <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/teaching.html>.

1.4.3 Für Fortgeschrittene

- Florian Scheck: *Mechanik* [5]

1.4.4 Spezielles

Mathematisch

- V. I. Arnold: *Mathematical Methods of Classical Mechanics* [6]
- Walter Thirring: *Lehrbuch der Mathematischen Physik 1: Klassische Dynamische Systeme* [7]

Computerorientiert

- Gerald Jay Sussman, Jack Wisdom: *Structure and Interpretation of Classical Mechanics* [8]

—2—

NEWTON'SCHE FORMULIERUNG

2.1 Bewegung eines Massenpunkts im
Anschauungsraum \mathbf{R}^3

2.1.1 Trajektorien, Koordinatensysteme, Bezugssysteme

Ein Massenpunkt ist das einfachste Beispiel, weil eine vollständige Beschreibung aller Beobachtungen zu verschiedenen Zeiten t durch eine parametrisierte Kurve, eine *Trajektorie*, im Raum erfolgt, vgl. Abbildung 2.1.

$$\begin{aligned}\gamma : [t_0, t_1] &\rightarrow \mathbf{R}^3 \\ t &\mapsto \vec{x}(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Ziel ist die Vorhersage von γ aus der Kenntnis eines Teils davon.

Bemerkung 2.1. Hierbei spielt es keine Rolle, welche Koordinaten benutzt werden, um die Punkte $\vec{x}(t)$ auszudrücken. Z. B. beschreiben

$$t \mapsto \vec{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t)) = (vt/\sqrt{2}, vt/\sqrt{2}, 0) \tag{2.2a}$$

$$t \mapsto \vec{x}(t) = (r(t), \theta(t), \phi(t)) = (vt, \pi/2, \pi/4) \tag{2.2b}$$

die gleiche Trajektorie, einmal in kartesischen und einmal in sphärischen Polarkoordinaten, vgl. Abb. 2.2. Umgekehrt bezeichnet das gleiche Tripel von reellen Zahlen (a, b, c) im Allgemeinen unterschiedliche Punkte $\vec{x} \in \mathbf{R}^3$, wenn es als die Koordinaten in verschiedenen Koordinatensystemen interpretiert wird:

$$\vec{x} = (a, b, c) \tag{2.3a}$$

$$\vec{x} = (a \sin b \cos c, a \sin b \sin c, a \cos) . \tag{2.3b}$$

Glücklicherweise ist meistens aus dem Kontext offensichtlich, welches Koordinatensystem gemeint ist: (x, y, z) oder (x_1, x_2, x_3) für kartesische Koordinaten, (r, θ, ϕ) für Kugelkoordinaten, usw. Im Fall von nicht-kartesischen Koordinaten kommt hinzu, daß sie nicht alle reellen Werte annehmen,

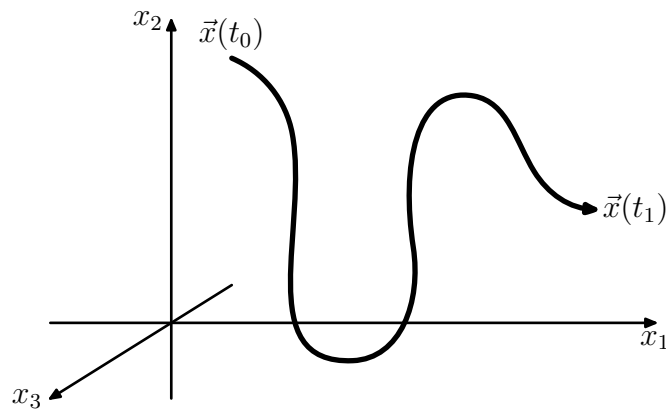
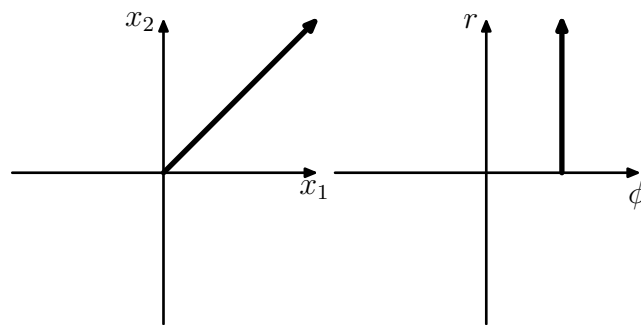
Abbildung 2.1: Trajektorie $\gamma : [t_0, t_1] \rightarrow \mathbf{R}^3$ 

Abbildung 2.2: Die gleiche Trajektorie aus (2.2) in verschiedenen Koordinatensystemen.

z. B. $(r, \theta, \phi) \in \mathbf{R} \times [0, \pi) \times [0, 2\pi)$. Wenn das lateinische und griechische Alphabet nicht zur intuitiven Unterscheidung genügen, muß man natürlich das verwendete Koordinatensystem explizit angeben.

Fast immer gibt es ausgezeichnete Koordinatensysteme, in denen bestimmte Aspekte eines physikalischen Systems besonders einfach beschrieben werden können. Diese Koordinatensysteme werden wir meistens durch Symmetrieüberlegungen finden können. Allerdings sind die Koordinatensysteme, in denen sich verschiedene Aspekte eines Systems einfach beschrieben werden können im Allgemeinen unterschiedlich. Im Abschnitt 4.2 werden wir uns z. B. ausführlich mit Systemen befassen, deren Wechselwirkung besonders einfach in Kugelkoordinaten beschrieben werden kann, während ihre kinetische Energie in kartesischen Koordinaten die einfachste Form an-

nimmt. Ein zentraler Teil in der Lösung physikalischer Problem ist deshalb das Finden von geeigneten Koordinatensystem und die Umrechnung zwischen diesen Koordinatensystem. In den Abschnitten ?? und ?? werden wir sogar zeitabhängige Koordinatensysteme nutzen, um physikalische Probleme elegant zu lösen.

Bemerkung 2.2. Verschiedene Beobachter haben im Allgemeinen verschiedene *Bezugssysteme*, die relativ zueinander translatiert, gedreht oder bewegt sein können. Dabei spielt es keine Rolle, welche *Koordinatensysteme* verwendet werden.

2.1.2 Inertialsysteme, Newton'sche Gesetze

Empirische Beobachtung (Galileo et al.): es gibt spezielle Bezugssysteme, sogenannte *Inertialsysteme*, in denen die *Newton'schen Gesetze* gelten

Definition 2.3 (Newton'sche Gesetze). Es gibt Inertialsysteme und in jedem Inertialsystem ...

1. ... sind die Geschwindigkeiten von allen Körpern, auf die keine Kräfte ausgeübt werden, konstant,
2. ... ist die Änderung der Geschwindigkeiten proportional und parallel zur auf den Körper ausgeübten *Kraft*, d. h.

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\ddot{\vec{x}} = m \frac{d^2\vec{x}}{dt^2} = \frac{d}{dt} (m\dot{\vec{x}}) . \quad (2.4)$$

Die Proportionalitätskonstante m ist die *träge Masse* des Körpers (die hier als konstant angenommen wird),

3. ... sind die von zwei Körpern aufeinander ausgeübten Kräfte antiparallel und von gleichem Betrag, d. h.

$$actio = reactio . \quad (2.5)$$

Bemerkung: dies stellte eine dramatische Abkehr von Aristoteles dar, bei dem Körper immer zur Ruhe streben, wenn sie keiner Kraft unterliegen.

Theorem 2.4 (Anfangswertproblem für gewöhnliche Differentialgleichungen 2. Ordnung). *Unter hinreichenden Regularitätsbedingungen an die Funktion \vec{f} hat das Anfangswertproblem*

$$\ddot{\vec{x}}(t) = \vec{f}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \quad (2.6a)$$

$$\vec{x}(t_0) = \vec{x}_0 \quad (2.6b)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_0) = \vec{v}_0 \quad (2.6c)$$

in einer hinreichend kleinen Umgebung $U \ni t_0$ eine eindeutige Lösung $U \ni t \mapsto \vec{x}$.

Daraus folgt, daß die Trajektorie eines Massenpunkts bei bekannter Kraft \vec{F} durch Anfangswerte für Ort und Geschwindigkeit zu einem Zeitpunkt durch die Newton'schen Gesetze festgelegt sind.

Der *Zustand* des Systems entspricht also einem Punkt

$$(\vec{x}, \dot{\vec{x}}) \in TQ = \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3 \quad (2.7)$$

im *Geschwindigkeits-Phasenraum* TQ , der später komplizierter sein wird als $\mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3$.

2.1.3 Erhaltungsgrößen

Weil (2.6) numerisch in hoher Präzision gelöst werden kann, könnte man meinen, daß die Aufgabe der theoretischen Physik nur noch in der Bestimmung der Kräfte \vec{F} bestünde. Dies ist *falsch*:

- Differentialgleichungen sind im Allgemeinen nichtlinear und das Verhalten für längere Zeiten kann numerisch nicht beliebig genau bestimmt werden.
- Prinzipielle Fragen, wie die nach der Stabilität des Sonnensystems, bleiben offen.

Es ist vielmehr aus (mindestens) zwei Gründen wichtig, *Erhaltungsgrößen* I (oft auch als *Integrale* bezeichnet)

$$\frac{d}{dt} I(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) = 0 \quad (2.8)$$

zu identifizieren:

1. (2.8) ist eine überprüfbare Voraussage,
2. (2.8) kann bei der Lösung der Bewegungsgleichung helfen.

2.1.4 Arbeit

Vorlesung 02: Fr, 20.10.2023

Sei im Folgenden

$$\begin{aligned}\vec{F} : \mathbf{R}^3 &\rightarrow \mathbf{R}^3 \\ \vec{x} &\mapsto \vec{F}(\vec{x})\end{aligned}\tag{2.9}$$

und nicht

$$\begin{aligned}\vec{F} : \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R}^3 \\ (\vec{x}, \dot{\vec{x}}, t) &\mapsto \vec{F}(\vec{x}, \dot{\vec{x}}, t),\end{aligned}\tag{2.10}$$

d. h. die Kraft hänge nur vom Ort ab.

Definition 2.5 (Arbeit entlang eines Weges). Das Funktional auf der Menge Γ aller Trajektorien

$$\begin{aligned}W : \Gamma &\rightarrow \mathbf{R} \\ \gamma &\mapsto W(\gamma) = - \int_{\gamma} d\vec{x} \cdot \vec{F}(\vec{x})\end{aligned}\tag{2.11}$$

heißt Arbeit.

Konkreter

$$W(\gamma) = - \int_{\gamma} d\vec{x} \cdot \vec{F}(\vec{x}) = - \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{d\vec{x}}{dt}(t) \cdot \vec{F}(\vec{x}(t))\tag{2.12}$$

wobei $W(\gamma)$ wegen der Kettenregel

$$\begin{aligned}\int_{s_0}^{s_1} ds \frac{d\vec{x}}{ds}(t(s)) \cdot \vec{F}(\vec{x}(t(s))) &= \\ \int_{s_0}^{s_1} ds \frac{dt}{ds}(s) \frac{d\vec{x}}{dt}(t(s)) \cdot \vec{F}(\vec{x}(t(s))) &= \int_{t(s_0)}^{t(s_1)} dt \frac{d\vec{x}}{dt}(t) \cdot \vec{F}(\vec{x}(t))\end{aligned}\tag{2.13}$$

unabhängig von der für γ gewählten Parametrisierung ist.

Wenn man für eine gegebene Trajektorie γ nur bis zu einem Zeitpunkt t integriert, erhält man eine Funktion

$$\begin{aligned}W_{\gamma} : [t_0, t_1] &\rightarrow \mathbf{R} \\ t &\mapsto W_{\gamma}(t) = - \int_{t_0}^t dt' \frac{d\vec{x}}{dt'}(t') \cdot \vec{F}(\vec{x}(t'))\end{aligned}\tag{2.14}$$

die von der Parametrisierung *abhängt* und die man differenzieren kann

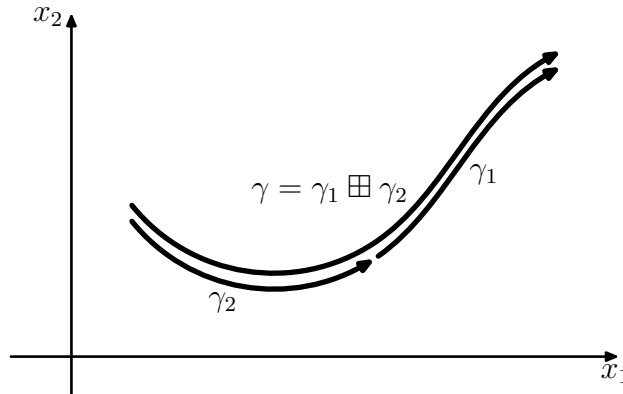


Abbildung 2.3: Additivität der Arbeit.

$$\begin{aligned} \frac{dW_\gamma}{dt}(t) &= -\frac{d\vec{x}}{dt}(t) \cdot \vec{F}(\vec{x}(t)) \\ &= -\frac{d\vec{x}}{dt}(t) \cdot m\ddot{\vec{x}}(t) = -\frac{m}{2} \frac{d}{dt} \left(\dot{\vec{x}}(t) \right)^2 =: -\frac{d}{dt} T(\dot{\vec{x}}(t)), \end{aligned} \quad (2.15)$$

wobei T nur von der Geschwindigkeit $\dot{\vec{x}}$ abhängt. Mit der

Definition 2.6 (Kinetische Energie).

$$\begin{aligned} T : \mathbf{R}^3 &\rightarrow \mathbf{R} \\ \vec{v} &\mapsto T(\vec{v}) = \frac{m}{2} \vec{v}^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

finden wir, daß die Energie

$$E_\gamma(\dot{\vec{x}}(t), t) = T(\dot{\vec{x}}(t)) + W_\gamma(t) \quad (2.17)$$

entlang der Trajektorie γ erhalten ist:

$$\frac{dE_\gamma}{dt}(\dot{\vec{x}}(t), t) = 0. \quad (2.18)$$

Diese Definition ist noch nicht sehr hilfreich, weil E_γ im Prinzip von der ganzen Historie γ abhängen kann, *nicht* nur vom aktuellen Zustand $(\vec{x}, \dot{\vec{x}}) \in TQ$.

2.1.5 Konservative Kräfte

Wenn $W(\gamma)$ für *alle* geschlossenen Wege $\gamma \in \Gamma_c$, mit

$$\Gamma_c = \{\gamma \in \Gamma : \vec{x}(t_1) = \vec{x}(t_0)\} \quad (2.19)$$

verschwindet

$$\forall \gamma \in \Gamma_c : W(\gamma) = - \int_{\gamma} d\vec{x} \cdot \vec{F}(\vec{x}) = 0, \quad (2.20)$$

hängt $W(\gamma)$ wegen

$$W(\gamma_1) + W(\gamma_2) = W(\gamma_1 \boxplus \gamma_2) \quad (2.21)$$

(vgl. Abbildung 2.3) *nicht* vom Weg ab, sondern nur vom Endpunkt $\vec{x}(t_1)$ und Anfangspunkt $\vec{x}(t_0)$. Daher kann man mit Hilfe eines passenden γ eine Funktion $V : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}$ definieren

$$V(\vec{x}(t)) = W_{\gamma}(t), \quad (2.22)$$

die *Potential* oder *potentielle Energie* heißt und

$$\frac{dV}{dt}(\vec{x}(t)) = \frac{dW_{\gamma}}{dt}(t) = - \frac{d}{dt} T(\dot{\vec{x}}(t)) \quad (2.23)$$

erfüllt, sowie eine entlang der Trajektorie *erhaltene Energie*

$$\begin{aligned} E : TQ &\rightarrow \mathbf{R} \\ (\vec{x}, \dot{\vec{x}}) &\mapsto E(\vec{x}, \dot{\vec{x}}) = T(\dot{\vec{x}}) + V(\vec{x}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

mit

$$\frac{dE}{dt}(x(t), \dot{x}(t)) = 0. \quad (2.25)$$

Definition 2.7 (Konservatives Vektorfeld). Ein Vektorfeld, dessen Wegintegral für alle geschlossenen Wege verschwindet, heißt *konservativ*.

Ein einfaches Kriterium dafür, ob ein Vektorfeld konservativ ist, liefert das

Theorem 2.8 (Satz von Stokes in \mathbf{R}^3).

$$\int_D d\vec{\sigma}(\vec{x}) \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{A}(\vec{x})) = \int_{\partial D} d\vec{x} \cdot \vec{A}(\vec{x}) \quad (2.26)$$

Bemerkungen:

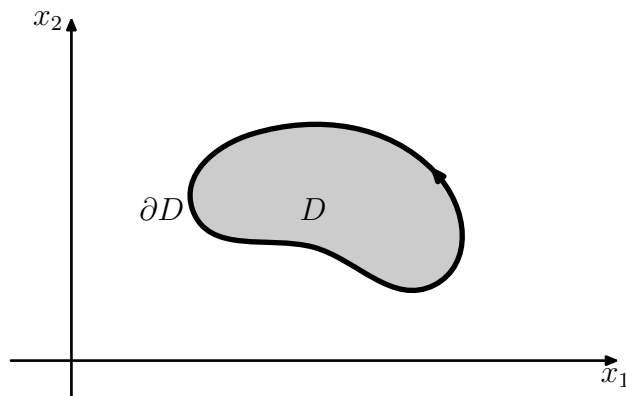


Abbildung 2.4: Satz von Stokes 2.8.

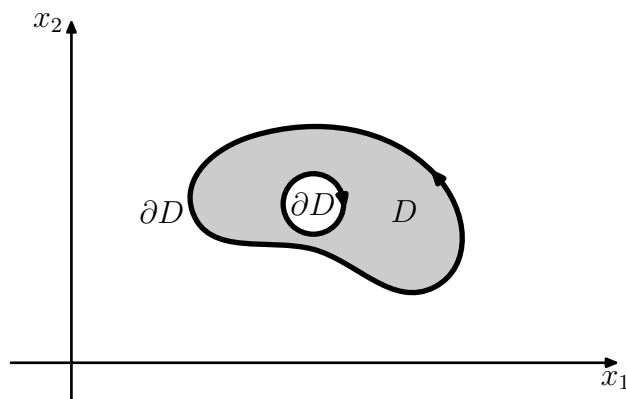


Abbildung 2.5: Nicht einfach zusammenhängendes Gebiet.

- Verallgemeinerung des Hauptsatzes der Differential- und Integralrechnung in einer Dimension

$$\int_a^b dx \frac{d\phi}{dx}(x) = \phi(b) - \phi(a) \quad (2.27)$$

- Das Integral über die Ableitung ist durch die Werte am Rand festgelegt.
- Vorsicht bei mehrfach zusammenhängenden („topologisch nichttrivialen“) Gebieten: innere Ränder nicht vergessen (vgl. Abbildung 2.5)

Daraus ergibt sich das einfache

Korollar 2.9. *Ein Kraftfeld \vec{F} mit auf einem einfach zusammenhängendem Gebiet $D \subseteq \mathbf{R}^3$ verschwindender Rotation*

$$\forall \vec{x} \in D : \vec{\nabla} \times \vec{F}(\vec{x}) = 0 \quad (2.28)$$

ist auf D konservativ.

Noch besser mit dem

Lemma 2.10 (Poincaré Lemma für \mathbf{R}^3). *Sei $D \subseteq \mathbf{R}^3$ ein sternförmiges Gebiet und $\vec{A} : D \rightarrow \mathbf{R}^3$ ein darauf rotationsfreies Vektorfeld, d. h.*

$$\forall x \in D : \vec{\nabla} \times \vec{A}(\vec{x}) = 0. \quad (2.29)$$

Dann gibt es ein, bis auf eine additive Konstante eindeutiges, Potential $\Phi : D \rightarrow \mathbf{R}$ mit

$$\vec{A}(\vec{x}) = \vec{\nabla} \Phi(\vec{x}). \quad (2.30)$$

Beweisskizze.

$$\Phi_{\vec{x}_0}(\vec{x}) = \int_{\vec{x}_0}^{\vec{x}} d\vec{\xi} \cdot \vec{A}(\vec{\xi}) \quad (2.31)$$

ist wegen des Satzes von Stokes (Satz 2.8) wegunabhängig¹ und damit

$$\frac{\partial \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{x})}{\partial x_i} = A_i(\vec{x}), \quad (2.32)$$

bzw. $\vec{\nabla} \Phi = \vec{A}$.

□

Umgekehrt gilt

$$\begin{aligned} \int_{\vec{x}_0}^{\vec{x}} d\vec{\xi} \cdot \vec{\nabla} \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{\xi}) &= \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{d\vec{\xi}}{dt}(t) \cdot \vec{\nabla} \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{\xi}(t)) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \sum_{i=1}^3 \frac{d\xi_i}{dt}(t) \frac{\partial \Phi_{\vec{x}_0}}{\partial \xi_i}(\vec{\xi}(t)) = \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{d\Phi_{\vec{x}_0}}{dt}(\vec{\xi}(t)) \\ &= \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{\xi}(t_1)) - \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{\xi}(t_0)) = \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{x}) - \underbrace{\Phi_{\vec{x}_0}(\vec{x}_0)}_{=0} = \Phi_{\vec{x}_0}(\vec{x}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

und wir erhalten das Ergebnis: aus

$$\forall \vec{x} \in D : \vec{\nabla} \times \vec{F}(\vec{x}) = 0 \quad (2.34)$$

¹Hier ist es wichtig, daß S nicht mehrfach zusammenhängend ist, weil man sich sonst in (2.31) eine Wegabhängigkeit durch die geschlossenen Wege, die „Löcher“ umlaufen, einhandelt.

auf einem sternförmigen, einfach zusammenhängenden Gebiet $D \subset \mathbf{R}^3$ folgt

$$\exists V \in (D \rightarrow \mathbf{R}) : \vec{F} = -\vec{\nabla} V \quad (2.35)$$

und die Energieerhaltung

$$E = T + V = \text{const.} \quad (2.36)$$

Beispiel 2.11 (Schwerefeld auf der Erdoberfläche). Aus der Konstanz des Kraftfeldes

$$\vec{F}(\vec{x}) = -mg\vec{e}_3 \quad (2.37a)$$

folgt trivial

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \vec{0} \quad (2.37b)$$

auf ganz \mathbf{R}^3 . Und offensichtlich ist

$$V(\vec{x}) = mgx_3 \quad (2.37c)$$

ein geeignetes Potential und damit

$$E = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 + mgx_3 \quad (2.37d)$$

eine erhaltene Energie.

2.2 Eindimensionale Bewegung eines Massenpunkts

Sei die Bewegung in eine Richtung (o. B. d. A. entlang einer Koordinatenachse) eingeschränkt:

$$\begin{aligned} \gamma : [t_0, t_1] &\rightarrow \mathbf{R} \\ t &\mapsto x(t) \end{aligned} \quad (2.38)$$

Newton'sche Bewegungsgleichung $F = ma$, bzw. für geschwindigkeitsunabhängige Kräfte

$$m \frac{d^2 x}{dt^2}(t) = F(x(t)). \quad (2.39)$$

2.2.1 Energieerhaltung

In einer Dimension sind alle Kräfte konservativ, die nur vom Ort abhängen: man kann immer die Kraft aufintegrieren, um ein Potential zu definieren

$$V(x) = - \int_{x_0}^x d\xi F(\xi) + V(x_0), \quad (2.40)$$

das

$$\frac{dV}{dx}(x) = -F(x) \quad (2.41)$$

erfüllt. Mit der kinetischen Energie

$$T = \frac{m}{2} \left(\frac{dx}{dt}(t) \right)^2 \quad (2.42)$$

gilt aufgrund der Kettenregel

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(T + V) &= m \frac{dx}{dt} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dV}{dx}(x) \frac{dx}{dt} \\ &= m \frac{dx}{dt} \frac{d^2x}{dt^2} - F(x) \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt} \left(m \frac{d^2x}{dt^2} - F(x) \right) = 0, \end{aligned} \quad (2.43)$$

also Energieerhaltung

$$E = T + V = E_0 = \text{const.} \quad (2.44)$$

2.2.2 Integration der Bewegungsgleichung

In einer Dimension genügt die Energieerhaltung immer zur Lösung („*Integration*“) der Bewegungsgleichung. Aus

$$\frac{m}{2} \left(\frac{dx}{dt}(t) \right)^2 + V(x(t)) = E_0 = \frac{m}{2} v_0^2 + V(x_0) = \text{const.}, \quad (2.45)$$

folgt

$$\left| \frac{dx}{dt} \right| = \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{E_0 - V(x)} \quad (2.46)$$

bzw.

$$\pm \sqrt{\frac{m}{2}} \frac{dx}{\sqrt{E_0 - V(x)}} = dt. \quad (2.47)$$

Wenn $V(x) < E_0$ gilt, ist wegen $|\vec{v}| > 0$ das Vorzeichen durch die Richtung der Bewegung zum Zeitpunkt t_0 eindeutig festgelegt. Wenn die Trajektorie

durch Punkte x mit $V(x) = E_0$ läuft, entsprechen diese Umkehrpunkten und Äste mit verschiedenen Vorzeichen müssen zusammengeklebt werden.

Damit folgt

$$\pm \sqrt{\frac{m}{2}} \int_{x_0}^{x(t)} \frac{dx}{\sqrt{E_0 - V(x)}} = \int_{t_0}^t d\tau = t - t_0 \quad (2.48)$$

und mit

$$\begin{aligned} \Phi_{x_0, E, \pm} : U \subseteq \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ x &\mapsto \Phi_{x_0, E, \pm}(x) = \pm \sqrt{\frac{m}{2}} \int_{x_0}^x \frac{d\xi}{\sqrt{E - V(\xi)}} \end{aligned} \quad (2.49)$$

können wir

$$\Phi_{x_0, \frac{m}{2}v_0^2 + V(x_0), \pm}(x(t)) = t - t_0 \quad (2.50)$$

schreiben.

Theorem 2.12 (Satz über implizite Funktionen). *Sei*

$$\begin{aligned} u : \mathbf{R} \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (x, y) &\mapsto u(x, y) \end{aligned} \quad (2.51)$$

hinreichend regulär mit

$$u(x, y) \Big|_{x=x_0, y=y_0} = 0 \quad (2.52a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x, y) \Big|_{x=x_0, y=y_0} \neq 0 \quad (2.52b)$$

dann existiert genau eine Funktion $f : U \rightarrow \mathbf{R}$ wobei

$$x_0 \in U \subseteq \mathbf{R} \quad (2.53)$$

mit

$$\forall x \in U : u(x, f(x)) = 0 \quad (2.54a)$$

und der Ableitung

$$(Df)(x) = f'(x) = \frac{df}{dx}(x) = - \left(\frac{\partial u}{\partial y}(x, f(x)) \right)^{-1} \frac{\partial u}{\partial x}(x, f(x)). \quad (2.54b)$$

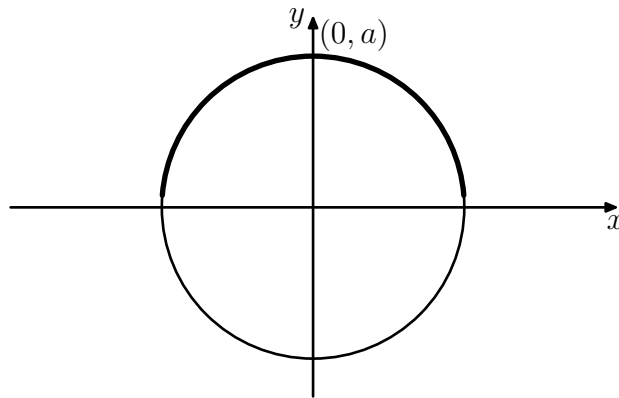


Abbildung 2.6: Implizite Funktion.

Vorlesung 03: Mo, 23.10.2023

Beispiel 2.13. Sei

$$\begin{aligned} u : \mathbf{R} \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (x, y) &\mapsto x^2 + y^2 - a^2 \end{aligned} \quad (2.55)$$

mit $a \neq 0$, dann

$$u(0, a) = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(0, a) = 2a \neq 0 \quad (2.57)$$

und wir können für $-a < x < a$ nach y auflösen

$$y = f(x) = \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.58)$$

Damit finden wir die inverse Funktion $\Phi_{x_0, E_0, \pm}^{-1}$ als Lösung

$$x(t) = \Phi_{x_0, \frac{m}{2}v_0^2 + V(x_0), \pm}^{-1}(t - t_0). \quad (2.59)$$

Bemerkungen zu inversen Funktionen

Für invertierbare Abbildungen

$$\begin{aligned} f : A &\rightarrow B \\ a &\mapsto f(a) \end{aligned} \quad (2.60)$$

gilt

$$\begin{aligned} f^{-1} : B &\rightarrow A \\ b &\mapsto f^{-1}(b) \end{aligned} \quad (2.61)$$

mit

$$f^{-1} \circ f = \text{id}_A \quad (2.62a)$$

$$f \circ f^{-1} = \text{id}_B \quad (2.62b)$$

bzw.

$$f^{-1}(f(a)) = a \quad (2.63a)$$

$$f(f^{-1}(b)) = b \quad (2.63b)$$

oder

$$\begin{array}{ccc} & f & \\ A & \xrightarrow{\quad} & B \\ & f^{-1} & \end{array}, \quad (2.64)$$

aber $f^{-1}(x)$ hat *nichts* mit $\frac{1}{f(x)}$ zu tun²: selbst wenn $\frac{1}{f(x)}$ existiert, haben die Funktionen im Allgemeinen nicht einmal den gleichen Definitionsbereich! Es gilt nur für die Ableitungen der Funktionen, d. h. die linearen Approximationen an die Funktionen,

$$D(f^{-1}) = (Df)^{-1}$$

als Matrizen.

Beispiel 2.14 (Schwerefeld auf der Erdoberfläche).

$$V(z) = mgz \quad (2.65a)$$

also

$$t - t_0 = \pm \sqrt{\frac{m}{2}} \int_{z_0}^z \frac{d\zeta}{\sqrt{E_0 - mg\zeta}} = \pm \sqrt{\frac{m}{2}} \int_{z_0}^z \frac{d\zeta}{\sqrt{\frac{m}{2}v_0^2 + mg(z_0 - \zeta)}}$$

²Ein Falle sind die Notationen

$$\sin^2 x = (\sin x)^2$$

$$\sin^{-1} x = \arcsin x \neq (\sin x)^{-1} = \frac{1}{\sin x}$$

die eigentlich inkonsistent, aber trotzdem weit verbreitet sind. Aus dem Kontext ergibt sich glücklicherweise meistens leicht, was gemeint ist.

$$= \mp \frac{1}{g} \sqrt{\frac{2}{m}} \left[\sqrt{\frac{m}{2} v_0^2 + mg(z_0 - \zeta)} \right] \Big|_{z_0}^z = \mp \frac{1}{g} \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{\frac{m}{2} v_0^2 + mg(z_0 - z)} \pm \frac{v_0}{g} \quad (2.65b)$$

daraus

$$\left(t - t_0 \mp \frac{v_0}{g} \right)^2 = \frac{2}{mg^2} \left(\frac{m}{2} v_0^2 + mg(z_0 - z) \right) = \left(\frac{v_0}{g} \right)^2 + 2 \frac{z_0 - z}{g} \quad (2.65c)$$

sowie

$$(t - t_0)^2 \mp 2 \frac{v_0}{g} (t - t_0) = 2 \frac{z_0 - z}{g} \quad (2.65d)$$

und schließlich

$$z = z_0 \pm v_0(t - t_0) - \frac{g}{2}(t - t_0)^2 \quad (2.65e)$$

wobei offensichtlich das positive Vorzeichen für eine anfängliche Aufwärtsbewegung zu wählen ist.

Beispiel 2.15 (Harmonischer Oszillator).

$$V(x) = \frac{m\omega^2}{2} x^2 \quad (2.66a)$$

also

$$\begin{aligned} t - t_0 &= \pm \sqrt{\frac{m}{2}} \int_{x_0}^x \frac{d\xi}{\sqrt{E_0 - \frac{m\omega^2}{2} \xi^2}} = \pm \sqrt{\frac{m}{2E_0}} \int_{x_0}^x \frac{d\xi}{\sqrt{1 - \xi^2/a^2}} \\ &= \pm \frac{1}{\omega} \int_{x_0/a}^{x/a} \frac{d\eta}{\sqrt{1 - \eta^2}} = \pm \frac{1}{\omega} \left[\arcsin \left(\frac{x}{a} \right) - \arcsin \left(\frac{x_0}{a} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.66b)$$

mit der Amplitude

$$a = \sqrt{\frac{2E_0}{m\omega^2}} = x_0 \sqrt{1 + \left(\frac{v_0}{x_0 \omega} \right)^2} \quad (2.66c)$$

bzw.

$$x(t) = a \sin \left(\pm \omega(t - t_0) + \arcsin \frac{x_0}{a} \right) \quad (2.66d)$$

und das Vorzeichen wird wieder durch die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = dx/dt(t_0)$ festgelegt.

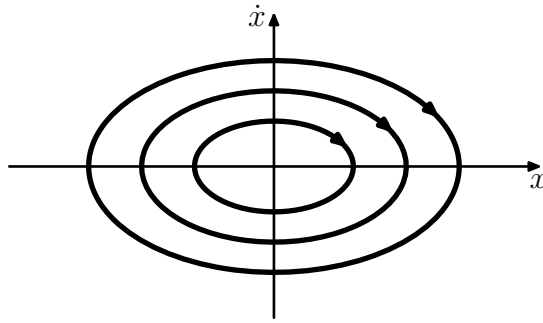


Abbildung 2.7: ...

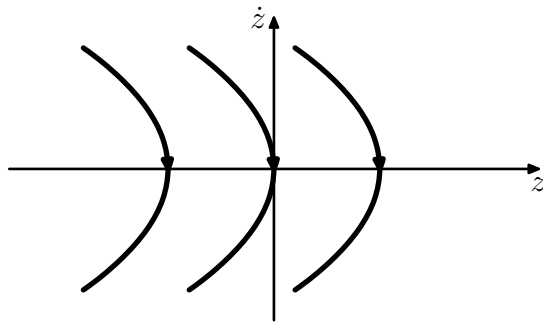


Abbildung 2.8: ...

2.2.3 Phasenraum, Phasenfluß

Die Kurven konstanter Energie $E(x, \dot{x})$ definieren „Höhenlinien“ im Geschwindigkeits-Phasenraum $TQ = \mathbf{R} \times \mathbf{R}$, entlang derer sich das System bewegt. Z. B. Ellipsen für den harmonischen Oszillator mit

$$E = \frac{m}{2} \dot{x}^2 + \frac{m\omega^2}{2} x^2 \quad (2.67)$$

in Abb 2.7 oder Parabeln für ein Teilchen im Schwerfeld

$$E = \frac{m}{2} \dot{z}^2 + mgz \quad (2.68)$$

in Abb 2.8.

Jeder Punkt $(x, \dot{x}) \in TQ$ definiert einen Zustand des Systems, der die weitere Entwicklung, den *Phasenfluß*, entlang der Linien gleicher Energie

eindeutig festlegt. Verlässliche qualitative Aussagen (gebundene Bahnen, Entweichbahnen, etc.) sind möglich, ohne DGL zu lösen!

Das Konzept des Phasenflusses verallgemeinert sich zu komplizierteren Phasenräumen, z. B. $TQ = \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3$, aber dort genügt die Energieerhaltung nicht zur Festlegung der Lösung, dafür werden insgesamt $2 \cdot 3 - 1 = 5$ „Integrale“ gebraucht.

—3—

LAGRANGE'SCHE FORMULIERUNG

Die Bewegungsgleichungen

$$m\ddot{\vec{x}} = \vec{F}(\vec{x}) \quad (3.1)$$

hängen von der Wahl des Koordinatensystems ab. Z.B. dreidimensionaler harmonischer Oszillator in kartesischen Koordinaten

$$\ddot{x}_1 + \omega^2 x_1 = 0 \quad (3.2a)$$

$$\ddot{x}_2 + \omega^2 x_2 = 0 \quad (3.2b)$$

$$\ddot{x}_3 + \omega^2 x_3 = 0 \quad (3.2c)$$

und in sphärischen Polarkoordinaten (Kugelkoordinaten)

$$\ddot{r} + \omega^2 r - r \left(\sin^2 \theta \dot{\phi}^2 + \dot{\theta}^2 \right) = 0 \quad (3.3a)$$

$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \sin^2 \theta \dot{\phi} \right) = 0 \quad (3.3b)$$

$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \dot{\theta} \right) - r^2 \sin \theta \cos \theta \dot{\phi}^2 = 0. \quad (3.3c)$$

Es ist nicht leicht zu erkennen, daß es sich in beiden Fällen um das gleiche System handelt.

Im eindimensionalen Fall bieten die Linien konstanter Energie eine geometrische, d.h. koordinatenunabhängige, Beschreibung, die leider noch nicht zur Beschreibung komplizierterer Probleme genügt.

3.1 Variationsprinzipien

Es ist möglich, die Newton'schen Bewegungsgleichungen aus einem *Variationsprinzip* herzuleiten, d.h. aus der Forderung, daß die Trajektorie des

Systems ein bestimmtes Funktional, die Wirkung

$$S : \Gamma \rightarrow \mathbf{R}$$

$$\gamma \mapsto S(\gamma) = \int dt L(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t), \quad (3.4)$$

extremal macht (minimiert, maximiert, Sattelpunkt), wenn wir L geeignet wählen.

Für Funktionen $f : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ finden wir die extremalen Stellen x^0 durch

$$\frac{df}{dx}(x^0) = 0 \quad (3.5)$$

und für Funktionen $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ durch

$$\forall i : \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = 0. \quad (3.6)$$

Äquivalent zu (3.6) ist die Forderung, daß *alle* Richtungsableitungen verschwinden

$$\forall v \in \mathbf{R}^n : \left. \frac{df}{ds}(x^0 + sv) \right|_{s=0} = 0. \quad (3.7)$$

Dies lässt sich auf Funktionale verallgemeinern.

3.1.1 $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$

Die Menge aller (hinreichend oft stetig differenzierbaren) Kurven mit festen Randpunkten

$$\Gamma_{t_0, x_0}^{t_1, x_1} = \left\{ \gamma : [t_0, t_1] \rightarrow \mathbf{R} \atop t \mapsto x(t) \middle| x(t_0) = x_0 \wedge x(t_1) = x_1 \right\}. \quad (3.8)$$

Jede (hinreichend oft stetig differenzierbare) Funktion dreier Veränderlicher $f : \mathbf{R} \times \mathbf{R} \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ definiert eine Funktion von der Menge aller Kurven in die reellen Zahlen

$$F : \Gamma_{t_0, x_0}^{t_1, x_1} \rightarrow \mathbf{R}$$

$$\gamma \mapsto F(\gamma) = \int_{t_0}^{t_1} dt f(x(t), \dot{x}(t), t). \quad (3.9)$$

NB: höhere Ableitungen, \ddot{x} etc., könnten im Prinzip auch vorkommen, werden aber in unserer Anwendung nicht gebraucht und deshalb hier nicht betrachtet.

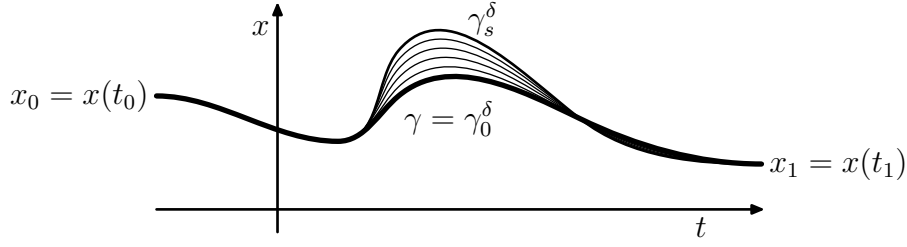


Abbildung 3.1: Eine einparametrische Familie von Kurven $\{\gamma_s^\delta\}_{s \in [0,1]}$ mit festgehaltenen Endpunkten.

Einparametrische Familien von Variationen mit festgehaltenen Endpunkten (vgl. Abb. 3.1)

$$\begin{aligned} \delta : \mathbf{R} \times \Gamma_{t_0, x_0}^{t_1, x_1} &\rightarrow \Gamma_{t_0, x_0}^{t_1, x_1} \\ (s, \gamma) &\mapsto \gamma_s^\delta : t \mapsto x_s^\delta(t) = x(t) + s\delta x(t). \end{aligned} \quad (3.10)$$

damit

$$\left. \frac{d}{ds} x_s^\delta(t) \right|_{s=0} = \delta x(t) \quad (3.11)$$

und

$$\left. \frac{d}{ds} \dot{x}_s^\delta(t) \right|_{s=0} = \frac{d}{ds} \left. \frac{d}{dt} x_s^\delta(t) \right|_{s=0} = \left. \frac{d}{dt} \frac{d}{ds} x_s^\delta(t) \right|_{s=0} = \frac{d}{dt} \delta x(t). \quad (3.12)$$

Betrachten wir nun die Variation des Werts eines Funktionals F bei der Variation seines Arguments, der Trajektorie γ :

$$\begin{aligned} \delta F(\gamma) &:= \left. \frac{dF}{ds}(\gamma_s^\delta) \right|_{s=0} = \int_{t_0}^{t_1} dt \left. \frac{df}{ds}(x_s^\delta(t), \dot{x}_s^\delta(t), t) \right|_{s=0} = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) \left. \frac{d}{ds} x_s^\delta(t) \right|_{s=0} + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) \left. \frac{d}{ds} \dot{x}_s^\delta(t) \right|_{s=0} \right) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) \delta x(t) + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) \frac{d}{dt} \delta x(t) \right) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) \right) \delta x(t) \\ &\quad + \underbrace{\frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t_1), \dot{x}(t_1), t_1) \delta x(t_1)}_{=0} - \underbrace{\frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t_1), \dot{x}(t_0), t_0) \delta x(t_0)}_{=0} \end{aligned}$$

$$= \int_{t_0}^{t_1} dt \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) \right) \delta x(t) \quad (3.13)$$

mit partieller Integration

$$\int_a^b dx f(x) g'(x) = - \int_a^b dx f'(x) g(x) + f(b)g(b) - f(a)g(a) \quad (3.14)$$

im vorletzten Schritt.

Lemma 3.1. Sei $f \in C^\infty([\xi_0, \xi_1])$ und

$$\forall g \in C^\infty([\xi_0, \xi_1]) : \int_{\xi_0}^{\xi_1} d\xi f(\xi) g(\xi) = 0. \quad (3.15)$$

Dann verschwindet f , d. h. $f = 0$.

Beweis. Wähle $g = f$, dann

$$\int_{\xi_0}^{\xi_1} d\xi f(\xi) g(\xi) = \int_{\xi_0}^{\xi_1} d\xi |f(\xi)|^2 \geq 0 \quad (3.16)$$

und das Integral verschwindet dann und nur dann, wenn $f = 0$. \square

Aus (3.13) folgt mit diesem Lemma das

Theorem 3.2.

$$\forall \delta : \delta F(\gamma) = 0 \iff \frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) = 0 \quad (3.17)$$

NB: für die partiellen Ableitungen wurde die übliche Kurzschreibweise gewählt: gemeint ist die partielle Ableitung nach dem ersten oder zweiten Argument

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) = \frac{\partial f}{\partial \xi}(\xi, \eta, t) \Big|_{\xi=x(t), \eta=\frac{dx}{dt}(t)} \quad (3.18a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) = \frac{\partial f}{\partial \eta}(\xi, \eta, t) \Big|_{\xi=x(t), \eta=\frac{dx}{dt}(t)}. \quad (3.18b)$$

Die totale Ableitung wird mit der Kettenregel ausgewertet und entspricht der Änderung der Funktion entlang der Kurve

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt}(x(t), \dot{x}(t), t) = \\ \frac{\partial f}{\partial x}(x(t), \dot{x}(t), t) \frac{dx}{dt}(t) + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}}(x(t), \dot{x}(t), t) \frac{d^2x}{dt^2}(t) + \frac{\partial f}{\partial t}(x(t), \dot{x}(t), t). \end{aligned} \quad (3.19)$$

3.1.2 $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^{3n}$

Vorlesung 04: Fr, 29.10.2021

Wir können (3.13) sofort verallgemeinern zu Kurven im Anschauungsraum \mathbf{R}^3 oder auch für mehrere Teilchen, d. h. für Kurven

$$(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n) \in \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3 \times \dots \times \mathbf{R}^3 = \mathbf{R}^{3n} \quad (3.20)$$

durch

$$\begin{aligned} \delta F(\gamma) &= \left. \frac{dF}{ds}(\gamma_s^\delta) \right|_{s=0} = \int_{t_0}^{t_1} dt \left. \frac{df}{ds}(\vec{x}_s^\delta(t), \dot{\vec{x}}_s^\delta(t), t) \right|_{s=0} = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left(\sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \left. \frac{d}{ds} x_{s,i}^\delta(t) \right|_{s=0} + \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \left. \frac{d}{ds} \dot{x}_{s,i}^\delta(t) \right|_{s=0} \right) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \sum_{i=1}^{3n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \delta x_i(t) + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \frac{d}{dt} \delta x_i(t) \right) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \sum_{i=1}^{3n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \right) \delta x_i(t) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t_1), \dot{\vec{x}}(t_1), t_1) \underbrace{\delta x_i(t_1)}_{=0} - \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t_0), \dot{\vec{x}}(t_0), t_0) \underbrace{\delta x_i(t_0)}_{=0} \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \sum_{i=1}^{3n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \right) \delta x_i(t) \quad (3.21) \end{aligned}$$

Wir erhalten damit, weil die δx_i unabhängig sind,

Theorem 3.3.

$$\forall \delta : \delta F(\gamma) = 0 \iff \forall i : \frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) = 0 \quad (3.22)$$

3.2 Hamilton'sches Prinzip und Euler-Lagrange Gleichungen

Betrachte nun das *Wirkungsfunktional*

$$\begin{aligned} S : \Gamma &\rightarrow \mathbf{R} \\ \gamma &\mapsto S(\gamma) = \int dt L(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

mit der evtl. explizit zeitabhängigen *Lagrangefunktion* auf dem Geschwindigkeits-Phasenraum

$$L : TQ \times \mathbf{R} = \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$$

$$(\vec{x}, \dot{\vec{x}}, t) \mapsto L(\vec{x}, \dot{\vec{x}}, t) = T(\dot{\vec{x}}) - V(\vec{x}, t). \quad (3.24)$$

Dann folgen aus dem *Hamilton'schen Prinzip* (1834), daß die Wirkung unter Variationen mit *festgehaltenen Anfangs- und Endpunkten* stationär sein soll

$$\delta S(\gamma) = 0 \quad (3.25)$$

die

Definition 3.4 (Euler-Lagrange Gleichungen).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) - \frac{\partial L}{\partial x_i}(\vec{x}(t), \dot{\vec{x}}(t), t) = 0. \quad (3.26)$$

Mit der kinetischen Energie in kartesischen Koordinaten

$$T(\dot{x}) = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 = \frac{m}{2} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i^2 \quad (3.27)$$

folgen die Bewegungsgleichungen

$$0 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}(\dot{\vec{x}}(t)) + \frac{\partial V}{\partial x_i}(\vec{x}(t), t) = \frac{d}{dt} (m\dot{x}_i(t)) + \frac{\partial V}{\partial x_i}(\vec{x}(t), t). \quad (3.28)$$

bzw.

$$\frac{d}{dt} (m\dot{\vec{x}}(t)) = -\vec{\nabla} V(\vec{x}(t), t) \quad (3.29)$$

oder

$$m\ddot{\vec{x}}(t) = \vec{F}(\vec{x}(t), t). \quad (3.30)$$

Also:

- das Hamilton'sche Prinzip (3.25) und die Euler-Lagrange Gleichung (ELG) sind also zu den Newton'schen Bewegungsgleichungen für konservative Systeme *äquivalent* und
- jedes *konservative* System kann durch die Angabe einer Lagrangefunktion eindeutig bestimmt werden.

3.2.1 Beispiele

Beispiel 3.5. Zwei Massenpunkte, die über eine harmonische Feder mit Gleichgewichtslänge l verbunden sind.

- in einer Dimension

$$T = \frac{m_1}{2} \dot{x}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{x}_2^2 \quad (3.31a)$$

$$V = \frac{k}{2} (x_1 - x_2 - l)^2 \quad (3.31b)$$

daraus mit $L = T - V$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = -k(x_1 - x_2 - l) \quad (3.32a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = k(x_1 - x_2 - l) \quad (3.32b)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = \frac{d}{dt} m_1 \dot{x}_1 = m_1 \ddot{x}_1 \quad (3.32c)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} = \frac{d}{dt} m_2 \dot{x}_2 = m_2 \ddot{x}_2 \quad (3.32d)$$

also

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k(x_1 - x_2 - l) \quad (3.33a)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2 - l) \quad (3.33b)$$

und damit auch *actio = reactio*.

- in drei Dimensionen

$$T = \frac{m_1}{2} \dot{\vec{x}}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{\vec{x}}_2^2 \quad (3.34a)$$

$$V = \frac{k}{2} (|\vec{x}_1 - \vec{x}_2| - l)^2 \quad (3.34b)$$

mit $L = T - V$

$$\frac{\partial L}{\partial x_{1,i}} = -k (|\vec{x}_1 - \vec{x}_2| - l) \frac{x_{1,i} - x_{2,i}}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|} \quad (3.35a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_{2,i}} = -k (|\vec{x}_1 - \vec{x}_2| - l) \frac{x_{2,i} - x_{1,i}}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|} \quad (3.35b)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{1,i}} = \frac{d}{dt} m_1 \dot{x}_{1,i} = m_1 \ddot{x}_{1,i} \quad (3.35c)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{2,i}} = \frac{d}{dt} m_2 \dot{x}_{2,i} = m_2 \ddot{x}_{2,i} \quad (3.35d)$$

also

$$m_1 \ddot{\vec{x}}_1 = -k (|\vec{x}_1 - \vec{x}_2| - l) \frac{\vec{x}_1 - \vec{x}_2}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|} \quad (3.36a)$$

$$m_2 \ddot{\vec{x}}_2 = -k (|\vec{x}_1 - \vec{x}_2| - l) \frac{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|} \quad (3.36b)$$

3.3 Koordinatentransformation

NB: ab jetzt werden die Vektorpfeile für allgemeine Koordinaten $x \in \mathbf{R}^n$ weggelassen werden. Nur noch dann, wenn betont werden soll, daß es sich um kartesische Koordinaten $\vec{x} \in \mathbf{R}^3$ im Anschauungsraum handelt, werden sie wieder auftauchen.

Gegeben sei ein mechanisches System mit einer Lagrangefunktion

$$L : \overbrace{\mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^n}^{TQ} \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R} \quad (3.37)$$

$$(x, \dot{x}, t) \mapsto L(x, \dot{x}, t).$$

Dann induziert eine, im Allgemeinen nichtlineare und zeitabhängige, Koordinatentransformation

$$\phi : U \times I \subseteq \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n \quad (3.38)$$

$$(q, t) \mapsto x = x(q, t)$$

mit regulärer Jacobi-Matrix

$$\forall q \in U, t \in I : \det J(q, t) \neq 0, \text{ für } J_{ij}(q, t) = \frac{\partial x_i}{\partial q_j}(q, t) \quad (3.39)$$

eine Lagrangefunktion $L^\phi = L \circ \phi$ in den neuen Koordinaten

$$L^\phi : \overbrace{U \times \mathbf{R}^n}^{TQ'} \times I \rightarrow \mathbf{R} \quad (3.40)$$

$$(q, \dot{q}, t) \mapsto L^\phi(q, \dot{q}, t) = L(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t).$$

wobei die neuen Geschwindigkeiten durch

$$\dot{x}_i(q, \dot{q}, t) = \frac{dx_i}{dt}(q, t) = \sum_{j=1}^n \dot{q}_j \frac{\partial x_i}{\partial q_j}(q, t) + \frac{\partial x_i}{\partial t}(q, t) \quad (3.41)$$

festgelegt sind. Aus (3.41) ergibt sich die Jacobi-Matrix der Geschwindigkeiten

$$\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_j}(q, t) = \frac{\partial x_i}{\partial q_j}(q, t) \quad (3.42)$$

als unabhängig von \dot{q} .

Beispiel 3.6 (Zeitunabhängige Kugelkoordinaten (sphärische Polarkoordinaten)).

$$\begin{aligned} \phi : Q = [0, \infty[\times [0, \pi] \times [0, 2\pi[&\rightarrow \mathbf{R}^3 \\ \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} &\mapsto \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \phi \sin \theta \\ r \sin \phi \sin \theta \\ r \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.43a)$$

Jacobi-Matrix

$$J_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial q_j} = \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta & r \cos \phi \cos \theta & -r \sin \phi \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & r \sin \phi \cos \theta & r \cos \phi \sin \theta \\ \cos \theta & -r \sin \theta & 0 \end{pmatrix} \quad (3.43b)$$

mit Determinante

$$\begin{aligned} \det J(r, \phi, \theta) &= \cos \theta (r^2 \cos^2 \phi \sin \theta \cos \theta + r^2 \sin^2 \phi \sin \theta \cos \theta) \\ &\quad + r \sin \theta (r \cos^2 \phi \sin^2 \theta + r \sin^2 \phi \sin^2 \theta) \\ &= r^2 \cos^2 \theta \sin \theta + r^2 \sin^3 \theta = r^2 \sin \theta \end{aligned} \quad (3.44)$$

also außerhalb der x_3 -Achse nichtsingulär

$$\forall r > 0, 0 < \theta < \pi : \det J(r, \theta, \phi) > 0. \quad (3.45)$$

Außerdem

$$\dot{x}_1 = \dot{r} \cos \phi \sin \theta - r \sin \phi \dot{\phi} \sin \theta + r \cos \phi \cos \theta \dot{\theta} \quad (3.46a)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{r} \sin \phi \sin \theta + r \cos \phi \dot{\phi} \sin \theta + r \sin \phi \cos \theta \dot{\theta} \quad (3.46b)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{r} \cos \theta - r \sin \theta \dot{\theta} \quad (3.46c)$$

bzw.

$$\dot{x}_i = \sum_{j=1}^3 J_{ij} \dot{q}_j, \quad (3.47)$$

wegen der Zeitunabhängigkeit der betrachteten Koordinatentransformation, also

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + \dot{x}_3^2 &= \left(\dot{r} \cos \phi \sin \theta - r \sin \phi \dot{\phi} \sin \theta + r \cos \phi \cos \theta \dot{\theta} \right)^2 \\
&+ \left(\dot{r} \sin \phi \sin \theta + r \cos \phi \dot{\phi} \sin \theta + r \sin \phi \cos \theta \dot{\theta} \right)^2 + \left(\dot{r} \cos \theta - r \sin \theta \dot{\theta} \right)^2 \\
&= \dot{r}^2 \cos^2 \phi \sin^2 \theta + r^2 \sin^2 \phi \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \cos^2 \phi \cos^2 \theta \dot{\theta}^2 + 2r\dot{r} \cos^2 \phi \sin \theta \cos \theta \dot{\theta} \\
&+ \dot{r}^2 \sin^2 \phi \sin^2 \theta + r^2 \cos^2 \phi \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \sin^2 \phi \cos^2 \theta \dot{\theta}^2 + 2r\dot{r} \sin^2 \phi \sin \theta \cos \theta \dot{\theta} \\
&\quad + \dot{r}^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta \dot{\theta}^2 - 2r\dot{r} \sin \theta \cos \theta \dot{\theta} \\
&= \dot{r}^2 \sin^2 \theta + r^2 \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \cos^2 \theta \dot{\theta}^2 + \dot{r}^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta \dot{\theta}^2 \\
&= \dot{r}^2 + r^2 \left(\dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + \dot{\theta}^2 \right) \quad (3.48)
\end{aligned}$$

deshalb

$$\begin{aligned}
T^\phi(r, \theta, \phi, \dot{r}, \dot{\theta}, \dot{\phi}) &= T(\dot{\vec{x}}(r, \theta, \phi, \dot{r}, \dot{\theta}, \dot{\phi})) \\
&= \frac{m}{2} \left(\dot{\vec{x}}(r, \theta, \phi, \dot{r}, \dot{\theta}, \dot{\phi}) \right)^2 = \frac{m}{2} \left(\dot{r}^2 + r^2 \left(\dot{\theta}^2 + \sin^2 \theta \dot{\phi}^2 \right) \right) \quad (3.49)
\end{aligned}$$

Wichtige Konsequenz: *nur* in kartesischen Koordinaten hat die kinetische Energie die Form

$$T = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2, \quad (3.50)$$

in anderen Koordinaten hat sie eine andere Form und ist im Allgemeinen *nicht nur* eine Funktion der Geschwindigkeiten \dot{q}_i .

Vorlesung 05: Mo, 30. 10. 2023

Also gilt

$$\begin{aligned}
L : TQ \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\
(x, \dot{x}, t) &\mapsto L(x, \dot{x}, t) = T(x, \dot{x}, t) - V(x, \dot{x}, t). \quad (3.51)
\end{aligned}$$

Die partiellen Ableitungen von L^ϕ können mit der Kettenregel durch die partiellen Ableitungen von L ausgedrückt werden. Zunächst die Ableitungen nach den Geschwindigkeiten

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L^\phi}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \dot{x}_j}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \\
&= \sum_{j=1}^n \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \quad (3.52)
\end{aligned}$$

deren totale Zeitableitung sich anschließend mit der Produktregel ergibt¹

¹Die Identität

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) = \frac{\partial \dot{x}_j}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial L^\phi}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) &= \sum_{j=1}^n \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \right) \\
&= \sum_{j=1}^n \overbrace{\left(\frac{d}{dt} \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \right)}^{\frac{\partial \dot{x}_j}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t)} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \\
&\quad + \sum_{j=1}^n \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t). \quad (3.56a)
\end{aligned}$$

Die Ableitungen nach den Koordinaten ergeben sich ebenfalls aus der Kettenregel

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L^\phi}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \frac{\partial L}{\partial x_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \\
&\quad + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \dot{x}_j}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \quad (3.56b)
\end{aligned}$$

und wir erhalten daraus die Transformation der **ELG**

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial L^\phi}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) - \frac{\partial L^\phi}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \right. \\
&\quad \left. - \frac{\partial L}{\partial x_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) \right). \quad (3.57)
\end{aligned}$$

Weil wir vorausgesetzt hatten, daß die Jacobi-Matrix $J_{ji} = \partial x_j / \partial q_i$ *nicht* singulär ist, folgt daraus

ist plausibel, aber nicht völlig trivial, weil totale und partielle Ableitungen vertauscht werden. Man kann sie aber leicht aus der Unabhängigkeit von Koordinaten und Geschwindigkeiten

$$\frac{\partial \dot{q}_i}{\partial q_j} = 0 \quad (3.54)$$

mit

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \dot{x}_j}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) &= \frac{\partial}{\partial q_i} \frac{dx_j}{dt}(q, t) = \frac{\partial}{\partial q_i} \left(\sum_{k=1}^n \dot{q}_k \frac{\partial x_j}{\partial q_k}(q, t) + \frac{\partial x_j}{\partial t}(q, t) \right) \\
&= \sum_{k=1}^n \dot{q}_k \frac{\partial^2 x_j}{\partial q_i \partial q_k}(q, t) + \frac{\partial^2 x_j}{\partial q_i \partial t}(q, t) = \sum_{k=1}^n \dot{q}_k \frac{\partial}{\partial q_k} \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) = \frac{d}{dt} \frac{\partial x_j}{\partial q_i}(q, t) \quad (3.55)
\end{aligned}$$

aus der Vertauschbarkeit partieller Ableitungen folgern.

Theorem 3.7.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L^\phi}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) - \frac{\partial L^\phi}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) &= 0 \\ \iff \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) - \frac{\partial L}{\partial x_j}(x(q, t), \dot{x}(q, \dot{q}, t), t) &= 0, \end{aligned} \quad (3.58)$$

d. h. die Abbildung ϕ transformiert Lösungen der zur Lagrangefunktion L^ϕ gehörenden **ELG** in Lösungen der zur Lagrangefunktion L gehörenden **ELG**.

Dies ist nicht verwunderlich, weil die Wirkung einer Trajektorie in TQ als Kurvenintegral nicht davon abhängig, in welchem Koordinatensystem die Kurve ausgedrückt wird.

In diesem Sinne ist der Lagrangeformalismus *unabhängig* vom Koordinatensystem und wir dürfen *immer* die Koordinaten wählen, in denen die Lagrangefunktion und damit die **ELG** am einfachsten werden. Diese Koordinaten, werden oft *verallgemeinerte Koordinaten* genannt und mit

$$(q, \dot{q}) = (q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \in TQ \quad (3.59)$$

bezeichnet.

Beispiel 3.8 (Kugelkoordinaten redux).

$$L(r, \theta, \phi, \dot{r}, \dot{\theta}, \dot{\phi}) = \frac{m}{2} \left(\dot{r}^2 + r^2 \left(\dot{\theta}^2 + \sin^2 \theta \dot{\phi}^2 \right) \right) - V(r, \theta, \phi) \quad (3.60)$$

Damit

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} - \frac{\partial L}{\partial r} = m\ddot{r} - mr \left(\dot{\theta}^2 + \sin^2 \theta \dot{\phi}^2 \right) + \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (3.61a)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = m \frac{d}{dt} \left(r^2 \dot{\theta} \right) - mr^2 \sin \theta \cos \theta \dot{\phi}^2 + \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (3.61b)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} - \frac{\partial L}{\partial \phi} = m \frac{d}{dt} \left(r^2 \sin^2 \theta \dot{\phi} \right) + \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0 \quad (3.61c)$$

3.4 Nebenbedingungen

3.4.1 Klassifikation

Holonom

Zwangsbedingungen heissen *holonom*, wenn sie vollständig durch einen Satz von Gleichungen in den Koordinaten bestimmt werden können

$$\forall k = 1, 2, \dots, m : \chi_k(q_1, q_2, \dots, q_n, t) = 0. \quad (3.62)$$

Solche Zwangsbedingungen können lokal mit dem Satz über implizite Funktionen aufgelöst werden. Wenn alle χ_k unabhängig sind, bleiben von den n Freiheitsgraden $n - m$ Freiheitsgrade übrig. Diesen Fall werden wir vorwiegend studieren. Wenn wir die Zwangsbedingungen vollständig auflösen können, können wir die verbleibenden Koordinaten direkt in der Lagrange-funktion verwenden.

Beispiel 3.9 (Massenpunkt auf Kreis mit Radius R in der x_1 - x_2 -Ebene). In kartesischen Koordinaten

$$\chi_1(\vec{x}) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - R^2 = 0 \quad (3.63a)$$

$$\chi_2(\vec{x}) = x_3 = 0 \quad (3.63b)$$

oder äquivalent

$$\chi_1(\vec{x}) = x_1^2 + x_2^2 - R^2 = 0 \quad (3.64a)$$

$$\chi_2(\vec{x}) = x_3 = 0. \quad (3.64b)$$

In Kugelkoordinaten

$$\chi_1(r, \theta, \phi) = r - R = 0 \quad (3.65a)$$

$$\chi_2(r, \theta, \phi) = \theta - \frac{\pi}{2} = 0 \quad (3.65b)$$

können wir r und θ eliminieren und nur ϕ bleibt übrig. Mit $\dot{r} = 0$ und $\dot{\theta} = 0$ folgen

$$T(\dot{\phi}) = \frac{m}{2} \left(\dot{r}^2 + r^2 \left(\dot{\theta}^2 + \sin^2 \theta \dot{\phi}^2 \right) \right) = \frac{m}{2} R^2 \dot{\phi}^2 \quad (3.66a)$$

$$V(\phi) = V_{\text{kartesisch}}(R \cos \phi, R \sin \phi, 0) \quad (3.66b)$$

und

$$\begin{aligned} mR^2 \ddot{\phi} = -\frac{dV}{d\phi} &= \frac{\partial V_{\text{kartesisch}}}{\partial x_1}(R \cos \phi, R \sin \phi, 0) R \sin \phi \\ &\quad - \frac{\partial V_{\text{kartesisch}}}{\partial x_2}(R \cos \phi, R \sin \phi, 0) R \cos \phi. \end{aligned} \quad (3.67)$$

Alternativ kann man \vec{x} direkt durch einen Winkel ϕ parametrisieren

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos \phi \\ R \sin \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.68a)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R \sin \phi \dot{\phi} \\ R \cos \phi \dot{\phi} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.68b)$$

also

$$\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + \dot{x}_3^2 = R^2 \sin^2 \phi \dot{\phi}^2 + R^2 \cos^2 \phi \dot{\phi}^2 + 0 = R^2 \dot{\phi}^2. \quad (3.69)$$

Als Spezialfall ergibt sich das mathematische Pendel mit Länge l in der x - z -Ebene

$$\chi(x, z) = x^2 + z^2 - l^2 = 0 \quad (3.70)$$

bzw. in ebenen Polarkoordinaten

$$\chi(r, \phi) = r - l = 0. \quad (3.71)$$

Wieder bleibt nur ϕ als unabhängige Koordinate übrig und

$$L = \frac{ml^2}{2} \dot{\phi}^2 + mg \underbrace{l \cos \phi}_{-z} \quad (3.72)$$

sowie

$$ml^2 \ddot{\phi} + mgl \sin \phi = 0 \quad (3.73)$$

bzw.

$$\ddot{\phi} + \frac{g}{l} \sin \phi = 0. \quad (3.74)$$

Beispiel 3.10 (Massenpunkt auf schiefer Ebene mit Winkel α).

$$\chi(\vec{x}) = x_1 \tan \alpha - x_3 = 0 \quad (3.75)$$

zwei Freiheitsgrade $q_{1,2}$ bleiben übrig:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_1 \tan \alpha \end{pmatrix} \quad (3.76a)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 \tan \alpha \end{pmatrix} \quad (3.76b)$$

und

$$T(\dot{q}_1, \dot{q}_2) = \frac{m}{2} ((1 + \tan^2 \alpha) \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2). \quad (3.77)$$

Beispiel 3.11 (Hantel, d.h. zwei Massenpunkte, durch starre Stange der Länge l verbunden).

$$\chi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = (\vec{x}_1 - \vec{x}_2)^2 - l^2 = 0. \quad (3.78)$$

Hier bleiben fünf Freiheitsgrade übrig: drei Translationen des Schwerpunkts \vec{X} und zwei Rotationswinkel θ, ϕ :

$$\vec{x}_{1/2} = \vec{X} \pm \frac{l}{2} \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.79)$$

Zusatzmaterial (nicht in der Vorlesung besprochen):

Beispiel 3.12 (Zylinder). Betrachte einen homogenen Zylinder der Masse m , Länge l und Radius r , der um seine Symmetrieachse rotieren kann. Verallgemeinerte Koordinaten sind

- der Ort \vec{X} des Mittelpunkts
- der Drehwinkel ϕ .

Geeignete Koordinaten im Zylinder sind ρ, θ, z

$$\vec{x} = \vec{X} + \vec{\xi} \quad (3.80a)$$

$$\dot{\vec{x}} = \dot{\vec{X}} + \dot{\vec{\xi}} \quad (3.80b)$$

mit

$$\vec{\xi} = \begin{pmatrix} \rho \cos(\phi + \theta) \\ \rho \sin(\phi + \theta) \\ z \end{pmatrix} \quad (3.81a)$$

$$\dot{\vec{\xi}} = \begin{pmatrix} -\rho \sin(\phi + \theta) \dot{\phi} \\ \rho \cos(\phi + \theta) \dot{\phi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.81b)$$

also

$$\dot{\vec{x}}^2 = \dot{\vec{X}}^2 + 2\dot{\vec{X}}\dot{\vec{\xi}} + \dot{\vec{\xi}}^2 \quad (3.82)$$

mit

$$\dot{\vec{\xi}}^2 = \rho^2 \dot{\phi}^2. \quad (3.83)$$

Homogene Massenverteilung $\rho = m/V = m/(lr^2\pi)$

$$\begin{aligned} T &= \int_Z d^3\xi \frac{1}{2} \frac{m}{lr^2\pi} \dot{\vec{x}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{m}{lr^2\pi} \dot{\vec{X}}^2 \int_Z d^3\xi + \frac{1}{2} \frac{m}{lr^2\pi} \dot{\vec{X}} \underbrace{\int_Z d^3\xi \dot{\vec{\xi}}}_{=0 \text{ Symmetrie!}} + \frac{1}{2} \frac{m}{lr^2\pi} \int_Z d^3\xi \dot{\vec{\xi}}^2 \\ &= \frac{m}{2} \dot{\vec{X}}^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{lr^2\pi} \int_{-l/2}^{l/2} dz \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^r \rho d\rho \rho^2 \dot{\phi}^2 \end{aligned}$$

$$= \frac{m}{2} \dot{\vec{X}}^2 + \frac{1}{2} \frac{m}{lr^2\pi} l 2\pi \frac{r^4}{4} \dot{\phi}^2 = \frac{m}{2} \dot{\vec{X}}^2 + \frac{mr^2}{4} \dot{\phi}^2 = \frac{m}{2} \dot{\vec{X}}^2 + \frac{J}{2} \dot{\phi}^2 \quad (3.84)$$

mit dem *Trägheitsmoment* des Zylinders bzgl. seiner Symmetrieachse

$$J = \frac{1}{2} mr^2. \quad (3.85)$$

Die kinetische Energie läßt sich also in Schwerpunktsbewegung und Rotation

$$T(\dot{\vec{X}}, \dot{\phi}) = T_{\text{Translation}}(\dot{\vec{X}}) + T_{\text{Rotation}}(\dot{\phi}) \quad (3.86)$$

trennen und die potentielle Energie hängt oft (homogene Körper) nur vom Schwerpunkt ab (z. B. homogenes Schwerefeld)

$$L(\vec{X}, \dot{\vec{X}}, \dot{\phi}) = L_{\text{Translation}}(\vec{X}, \dot{\vec{X}}) + T_{\text{Rotation}}(\dot{\phi}) \quad (3.87)$$

und die Freiheitsgrade werden nur über Zwangsbedingungen gekoppelt. Dies wird in Kapitel ?? „Starrer Körper“ verallgemeinert werden.

Anholonom

Anholonome oder auch *nicht-holonome* Zwangsbedingungen enthalten die Geschwindigkeiten

$$\forall k : \sum_i \chi_{k,i}(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \dot{q}_i = \tilde{\chi}_k(q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n, t) = 0 \quad (3.88)$$

(zum Beispiel als Abrollbedingungen) und lassen sich nicht immer in der Form (3.62) aufintegrieren, weil Wegabhängigkeiten auftreten. NB: aus (3.62) kann man durch Ableiten immer Bedingungen der Form (3.88) erhalten, aber die Umkehrung gilt nicht.

Beispiele für anholonome Zwangsbedingungen:

- Kugel auf Ebene abrollend
- Rad (Fahreug) auf Ebene abrollend

NB: beim Zylinder ist die Abrollbedingung integrierbar, weil die Richtung festliegt.

Skleronom

Skleronome Zwangsbedingungen sind zeitunabhängig.

Rheonom

Rheonome Zwangsbedingungen sind zeitabhängig.

Ungleichungen

Neben Gleichungen können auch Ungleichungen auftreten, in der die Bewegung in einem Bereich eingeschränkt ist, z. B. in einem Würfel in einer Kugel oder Kugelschale. Diesen Fall werden wir nur im Zusammenhang mit elastischen Stößen im Abschnitt ?? behandeln.

3.4.2 Zwangskräfte

Die Bewegung *ohne* Zwangsbedingungen erfüllt **ELG**

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i}(x, \dot{x}, t) - \frac{\partial L}{\partial x_i}(x, \dot{x}, t) = 0 \quad (3.89)$$

mit der Lagrangefunktion

$$L = T - V, \quad (3.90)$$

die die konservativen *externen* Kräfte beschreibt. Wenn die Bewegung unter Zwangsbedingungen davon abweicht, sind *Zwangskräfte* X_i am Werk

$$X_i(x, \dot{x}, t) = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i}(x, \dot{x}, t) - \frac{\partial L}{\partial x_i}(x, \dot{x}, t) \quad (3.91)$$

die durch Einsetzen der Lösung *mit* Zwangsbedingungen in die rechte Seite berechnet werden können.

Vorlesung 06: Fr, 03.11.2023

Beispiel 3.13 (Massenpunkt auf Kreis (vgl. Bsp. 3.9)). Kartesische Koordinaten x_1, x_2

$$L = \frac{m}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) - V(x_1, x_2) \quad (3.92a)$$

$$\chi = x_1^2 + x_2^2 - R^2 = 0 \quad (3.92b)$$

und als **ELG** ergeben sich

$$m\ddot{x}_1 + \frac{\partial V}{\partial x_1} = X_1 \quad (3.93a)$$

$$m\ddot{x}_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} = X_2 \quad (3.93b)$$

wobei das Potential V eine konservative Kraft

$$F_1 = -\frac{\partial V}{\partial x_1} \quad (3.94a)$$

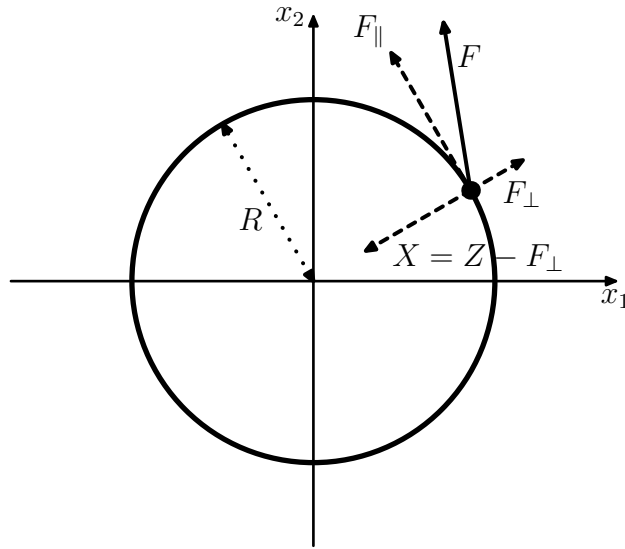


Abbildung 3.2: Massenpunkt auf Kreis.

$$F_2 = -\frac{\partial V}{\partial x_2} \quad (3.94b)$$

beschreibt. Aus den **ELG** für ϕ (vgl. (3.67))

$$\begin{aligned} mR^2\ddot{\phi} &= -\frac{d}{d\phi}V(R\cos\phi, R\sin\phi) \\ &= \frac{\partial V}{\partial x_1}(R\cos\phi, R\sin\phi)R\sin\phi - \frac{\partial V}{\partial x_2}(R\cos\phi, R\sin\phi)R\cos\phi \\ &= -F_1(\phi)x_2 + F_2(\phi)x_1 \quad (3.95) \end{aligned}$$

(wobei $F_i = -\partial V/\partial x_i$) finden wir mit

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \end{pmatrix} \quad (3.96a)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} -\sin\phi \\ \cos\phi \end{pmatrix} \dot{\phi} \quad (3.96b)$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} -\cos\phi\dot{\phi}^2 - \sin\phi\ddot{\phi} \\ -\sin\phi\dot{\phi}^2 + \cos\phi\ddot{\phi} \end{pmatrix} \quad (3.96c)$$

und

$$\cos\phi = \frac{x_1}{R} \quad (3.97a)$$

$$\sin \phi = \frac{x_2}{R} \quad (3.97b)$$

$$\dot{\phi}^2 = \frac{\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2}{R^2} \quad (3.97c)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{x_1 F_2 - x_2 F_1}{m R^2} \quad (3.97d)$$

zunächst

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} = -\frac{\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2}{R^2} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \frac{1}{m R^2} \begin{pmatrix} x_2(x_2 F_1 - x_1 F_2) \\ x_1(x_1 F_2 - x_2 F_1) \end{pmatrix}. \quad (3.98)$$

Und mit $x_1^2 + x_2^2 = R^2$

$$\frac{x_2^2 F_1 - x_1 x_2 F_2}{m R^2} = \frac{F_1}{m} - \frac{x_1^2 F_1 + x_1 x_2 F_2}{m R^2} = \frac{F_1}{m} - \frac{x_1}{m R^2} (x_1 F_1 + x_2 F_2) \quad (3.99a)$$

$$\frac{x_1^2 F_2 - x_2 x_1 F_1}{m R^2} = \frac{F_2}{m} - \frac{x_2^2 F_2 + x_2 x_1 F_1}{m R^2} = \frac{F_2}{m} - \frac{x_2}{m R^2} (x_1 F_1 + x_2 F_2) \quad (3.99b)$$

ergeben sich schließlich die Zwangskräfte

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \underbrace{-m \frac{\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2}{R^2} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}}_Z - \underbrace{\frac{x_1 F_1 + x_2 F_2}{R^2} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}}_{F_\perp}, \quad (3.100)$$

womit X als die Differenz von *Zentripetalkraft* Z und radialem Anteil F_\perp der konservativen Kraft $F = -\nabla V$ entlarvt wurde (vgl. Abb. 3.2).

3.5 Variation mit Zwangsbedingungen

Wenn wir keine Koordinaten benutzen, in denen die Zwangsbedingungen trivial sind, z. B. weil sie nicht global definierbar sind oder weil die Zwangsbedingungen anholonom sind, können die korrekten Bewegungsgleichungen mit einer Erweiterung des Lagrangeformalismus ermittelt werden.

3.5.1 Lagrangemultiplikatoren

Addiere eine Linearkombination der Zwangsbedingungen χ_k zur Lagrange-funktion und behandle die Koeffizienten $\lambda_k \in \mathbf{R}$ wie neue Freiheitsgrade:

$$L_\chi(q, \dot{q}, t; \lambda) = L(q, \dot{q}, t) + \sum_k \lambda_k \chi_k(q, \dot{q}, t). \quad (3.101)$$

Daraus folgen, weil die $\dot{\lambda}_k$ nirgendwo vorkommen, die **ELG**

$$\frac{\partial L_\chi}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t; \lambda) - \frac{d}{dt} \frac{\partial L_\chi}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t; \lambda) = 0 \quad (3.102a)$$

$$\frac{\partial L_\chi}{\partial \lambda_k}(q, \dot{q}, t; \lambda) = \chi_k(q, \dot{q}, t) = 0. \quad (3.102b)$$

3.5.2 Zwangskräfte

Für holonome Zwangsbedingungen, also $\chi_k(q, t) = 0$ können die **ELG** (3.102) mit

$$\frac{\partial L_\chi}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t; \lambda) = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \quad (3.103a)$$

$$\frac{\partial L_\chi}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t; \lambda) = \frac{\partial L}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) + \sum_k \lambda_k \frac{\partial \chi_k}{\partial q_i}(q, t) \quad (3.103b)$$

auch wie in (3.91) als

$$X_i(q, \dot{q}, t) = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) - \frac{\partial L}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) = \sum_k \lambda_k \frac{\partial \chi_k}{\partial q_i}(q, t) \quad (3.104a)$$

$$\chi_k(q, t) = 0 \quad (3.104b)$$

geschrieben werden, wobei in (3.104a) links die Definition der *Zwangskräfte* X_i über die **ELG** mit den konservativen Kräften steht und rechts ein Ausdruck, der nur von Lagrangemultiplikatoren und Nebenbedingungen abhängt. Dieser kann implizit (durch Nachdifferenzieren) von \dot{q} abhängen, nachdem die λ_k mit Hilfe von

$$\forall j \in \mathbf{N} : \frac{d^j \chi_k}{dt^j}(q, t) = 0 \quad (3.105)$$

eliminiert werden, weil $\chi_k(q, t) = 0$ für *alle* Zeiten gelten muß.

Für skleronome Zwangsbedingungen folgt aus

$$\frac{d\chi_k}{dt}(q) = 0 \quad (3.106)$$

daß die von den Zwangskräften geleistete Arbeit

$$\begin{aligned} \sum_i \dot{q}_i(t) X_i(q, \dot{q}, t) &= \sum_i \dot{q}_i(t) \sum_k \lambda_k \frac{\partial \chi_k}{\partial q_i}(q) \\ &= \sum_{k,i} \lambda_k \frac{dq_i}{dt}(t) \frac{\partial \chi_k}{\partial q_i}(q) = \sum_k \lambda_k \frac{d\chi_k}{dt}(q) = 0 \end{aligned} \quad (3.107)$$

verschwindet.

Beispiel 3.14 (Massenpunkt auf Kreis redux (vgl. Bsp. 3.9)). Kartesische Koordinaten x_1, x_2 :

$$L = \frac{m}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) - V(x_1, x_2) \quad (3.108a)$$

$$\chi = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2 - R^2) \quad (3.108b)$$

(der Faktor 1/2 ist eine für die Zwischenschritte geschickte Normierung und kommt im Endergebnis nicht mehr vor). Als **ELG** ergeben sich aus

$$L_\chi = L + \lambda\chi = \frac{m}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) - V(x_1, x_2) + \frac{\lambda}{2} (x_1^2 + x_2^2 - R^2) \quad (3.109)$$

die drei Gleichungen

$$m\ddot{x}_1 + \frac{\partial V}{\partial x_1} = \lambda x_1 = X_1 \quad (3.110a)$$

$$m\ddot{x}_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} = \lambda x_2 = X_2 \quad (3.110b)$$

$$x_1^2 + x_2^2 = R^2 \quad (3.110c)$$

wobei aus dem Potential V eine konservative Kraft

$$F_1 = -\frac{\partial V}{\partial x_1} \quad (3.111a)$$

$$F_2 = -\frac{\partial V}{\partial x_2} \quad (3.111b)$$

folgt. Weil die Nebenbedingung für alle Zeiten gelten muß, kann man mit

$$\begin{aligned} 0 = \frac{d^2}{dt^2}\chi &= \frac{d}{dt} (x_1\dot{x}_1 + x_2\dot{x}_2) = x_1\ddot{x}_1 + \dot{x}_1^2 + x_2\ddot{x}_2 + \dot{x}_2^2 \\ &\stackrel{(3.110a),(3.110b)}{=} \frac{\lambda}{m} (x_1^2 + x_2^2) + \frac{1}{m} (x_1F_1 + x_2F_2) + \dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 \\ &\stackrel{(3.110c)}{=} \frac{\lambda R^2}{m} + \frac{1}{m} (x_1F_1 + x_2F_2) + \dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 \end{aligned} \quad (3.112)$$

den Lagrangemultiplikator λ ermitteln, also

$$\lambda = -\frac{m}{R^2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) - \frac{1}{R^2} (x_1F_1 + x_2F_2) \quad (3.113)$$

und in den **ELG**

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} - F = -\frac{m}{R^2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - \frac{1}{R^2} (x_1F_1 + x_2F_2) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = X \quad (3.114a)$$

$$x_1^2 + x_2^2 = R^2 \quad (3.114b)$$

ebenso wie (3.100).

3.6 Zyklische Koordinaten

Definition 3.15 (Zyklische Koordinaten). Falls die Lagrangefunktion L von einer Koordinate q_i *nicht* abhängt

$$\frac{\partial L}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) = 0, \quad (3.115)$$

dann heißt q_i *zyklisch*.

Diese haben eine besondere Bedeutung, weil dann die **ELG**

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) = \frac{\partial L}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) = 0, \quad (3.116)$$

zu einem Erhaltungssatz führt. Der *konjugierte Impuls* p_i ist erhalten

$$p_i(q, \dot{q}, t) = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) = \text{const.} \quad (3.117)$$

Im Kapitel ?? „Hamilton’sche Formulierung“ werden wir sogar überall \dot{q} durch p ersetzen, um zyklische Koordinaten optimal zu nutzen.

3.6.1 Beispiele

Beispiel 3.16 (Freies Teilchen). Die Lagrangefunktion

$$L = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 \quad (3.118)$$

hängt nicht von \vec{x} ab, deshalb sind die Impulse

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} = m \dot{x}_i \quad (3.119)$$

erhalten:

$$\vec{p} = m \dot{\vec{x}} = \text{const.} \quad (3.120)$$

Beispiel 3.17 (Teilchen in der Ebene). Die Lagrangefunktion

$$L = \frac{m}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) - V \left(\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \right) \quad (3.121)$$

lässt sich in Polarkoordinaten einfacher schreiben

$$L = \frac{m}{2} \dot{r}^2 + \frac{m}{2} r^2 \dot{\phi}^2 - V(r). \quad (3.122)$$

Offensichtlich

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = 0 \quad (3.123)$$

und damit

$$p_\phi = \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = mr^2 \dot{\phi} = \text{const.} \quad (3.124)$$

p_ϕ ist natürlich nichts anderes als der *Drehimpuls*, bzw. dessen aus der Ebene herauszeigende Komponente

$$p_\phi = \left[\vec{x} \times m\dot{\vec{x}} \right]_3 \quad (3.125)$$

In der **ELG** für r

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} - \frac{\partial L}{\partial r} = m\ddot{r} - m\dot{\phi}^2 r + \frac{dV}{dr}(r) = 0 \quad (3.126)$$

kann $\dot{\phi}$ durch p_ϕ und r ausgedrückt werden²

$$\dot{\phi} = \frac{p_\phi}{mr^2} \quad (3.127)$$

und man erhält zu jedem vorgegebenen p_ϕ ein eindimensionales Problem

$$m\ddot{r} - \frac{p_\phi^2}{mr^3} + \frac{dV}{dr}(r) = 0 \quad (3.128)$$

Für das *effektive Potential*

$$V_{\text{eff.}, p_\phi}(r) = V(r) + \frac{p_\phi^2}{2mr^2} \quad (3.129)$$

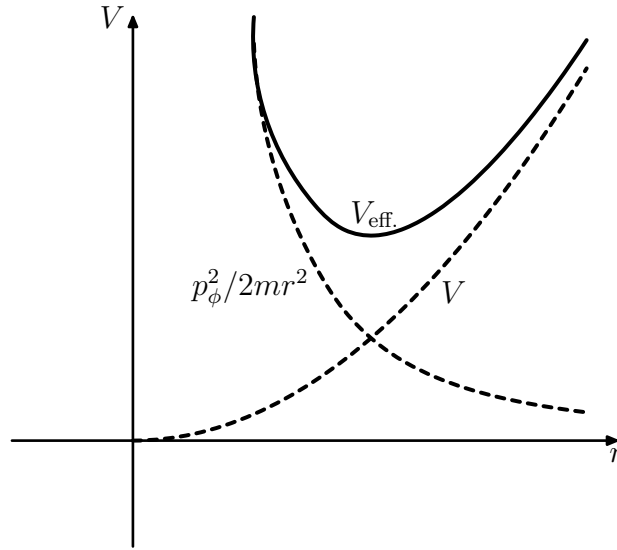
²Es wäre übrigens *nicht* korrekt, p_ϕ bereits in (3.122) zu ersetzen

$$„L“ = \frac{m}{2} \dot{r}^2 + \frac{p_\phi^2}{2mr^2} - V(r)$$

weil man damit zu jedem vorgegebenen p_ϕ ein eindimensionales Problem mit dem *falschen* effektiven Potential

$$„V_{\text{eff.}, p_\phi}“ = V(r) - \frac{p_\phi^2}{2mr^2} \cdot$$

erhielte. Der Grund hierfür ist, daß der Lagrangeformalismus darauf beruht, daß die Wege *frei* variiert werden können solange alle Nebenbedingungen erfüllt sind. Man sieht auch sofort, daß das Vorzeichen des Zentrifugalterms falsch ist, was daran liegt, daß in $L = T - V$ ein Term aus der kinetischen Energie T als Teil des Potentials V uminterpretiert würde. Im Hamiltonformalismus (Kapitel ??) funktioniert das entsprechende Argument und ist korrekt!

Abbildung 3.3: *Effektives Potential.*

(vgl. Abb. 3.3) findet man

$$\frac{dV_{\text{eff.},p_\phi}}{dr}(r) = \frac{dV}{dr}(r) - \frac{p_\phi^2}{mr^3}, \quad (3.130)$$

also

$$m\ddot{r} + \frac{dV_{\text{eff.},p_\phi}}{dr}(r) = 0, \quad (3.131)$$

was mittels Energieerhaltung

$$\frac{m}{2}\dot{r}^2 + V_{\text{eff.},p_\phi}(r) = \text{const.} \quad (3.132)$$

integriert werden kann. Die Bahnen sind durch r_0 , ϕ_0 , $p_\phi = mr_0^2\dot{\phi}_0$ und E im vierdimensionalen Phasenraum eindeutig bestimmt.

Diese Beispiele motivieren eine systematische Suche nach zyklischen Koordinaten, sowohl Existenzfragen

- existieren genügend zyklische Koordinaten, um das System vollständig zu integrieren?

als auch Konstruktionsfragen

- kann man die zyklischen Koordinaten explizit hinschreiben?

Es wird sich herausstellen, daß es kein Zufall ist, daß die Erhaltungsgröße p_ϕ im Beispiel mit einer *Symmetrie* in Verbindung steht: der Unabhängigkeit der Lagrangefunktion vom Winkel ϕ .

3.7 Mechanische Eichtransformationen

Vorlesung 07: Mo, 06. 11. 2023

Zunächst jedoch eine Komplikation: Lagrangefunktionen sind *nicht* eindeutig: verschiedene Lagrangefunktionen können zu den gleichen **ELG** führen.

Gegeben sei eine Lagrangefunktion $L : TQ \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$, dann definiert eine, evtl. zeitabhängige, reellwertige Funktion der Koordinaten $\Phi : Q \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ eine transformierte Lagrangefunktion $L_\Phi : TQ \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$

$$\begin{aligned} L_\Phi(q, \dot{q}, t) &= L(q, \dot{q}, t) + \frac{d}{dt} \Phi(q, t) \\ &= L(q, \dot{q}, t) + \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial \Phi}{\partial q_i}(q, t) + \frac{\partial \Phi}{\partial t}(q, t). \end{aligned} \quad (3.133)$$

Diese Transformation nennt man *mechanische Eichtransformation* \mathcal{G}

$$\begin{aligned} \mathcal{G} : (Q \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}) \times (TQ \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}) &\rightarrow (TQ \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}) \\ (\Phi, L) &\mapsto L_\Phi. \end{aligned} \quad (3.134)$$

NB: Φ darf explizit nur von q und t abhängen, nicht von \dot{q} , weil sonst L_Φ von \ddot{q} abhinge und keine Funktion auf $TQ \times \mathbf{R}$ wäre.

Jede Bahnkurve $\gamma_0 : [t_0, t_1] \rightarrow Q$ im Konfigurationsraum definiert eine Bahnkurve

$$\begin{aligned} \gamma : [t_0, t_1] &\rightarrow TQ \\ t &\mapsto (q(t), \dot{q}(t)) = \left(q(t), \frac{dq}{dt}(t) \right) \end{aligned} \quad (3.135a)$$

im Geschwindigkeits-Phasenraum. Dafür gilt

$$\begin{aligned} S_\Phi(\gamma) &= \int_{t_0}^{t_1} dt L_\Phi(q(t), \dot{q}(t), t) = \int_{t_0}^{t_1} dt L(q(t), \dot{q}(t), t) + \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{d}{dt} \Phi(q(t), t) \\ &= S(\gamma) + \Phi(q(t_1), t_1) - \Phi(q(t_0), t_0). \end{aligned} \quad (3.135b)$$

Hieraus folgt für Variationen, die die Endpunkte $q(t_0)$ und $q(t_1)$ festhalten

$$\delta S_\Phi = \delta S, \quad (3.136)$$

und damit das

Theorem 3.18. Die **ELG**, die aus L_Φ folgen sind identisch zu den **ELG**, die aus L folgen.

NB: Wenn Φ nicht-trivial von \dot{q} abhinge, würden die Randterme

$$\Phi(q(t_1), \dot{q}(t_1), t_1) - \Phi(q(t_0), \dot{q}(t_0), t_0)$$

zu den Variationen und damit zu den **ELG** beitragen.

3.7.1 Alternative Herleitung

Aus

$$\frac{d\Phi}{dt}(q, t) = \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial \Phi}{\partial q_i}(q, t) + \frac{\partial \Phi}{\partial t}(q, t) \quad (3.137)$$

folgt durch Ableiten

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \frac{d\Phi}{dt}(q, t) = \sum_j \dot{q}_j \frac{\partial^2 \Phi}{\partial q_i \partial q_j}(q, t) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial q_i}(q, t) \quad (3.138a)$$

$$\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \frac{d\Phi}{dt}(q, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial q_i}(q, t) \quad (3.138b)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \frac{d\Phi}{dt}(q, t) = \sum_j \dot{q}_j \frac{\partial^2 \Phi}{\partial q_i \partial q_j}(q, t) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial q_i}(q, t) = \frac{\partial}{\partial q_i} \frac{d\Phi}{dt}(q, t) \quad (3.138c)$$

also

$$\frac{\partial}{\partial q_i} \frac{d\Phi}{dt} - \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (3.139)$$

und die Addition von $\frac{d\Phi}{dt}(q, t)$ trägt nicht zu den **ELG** bei. Dafür muß *nicht* von den **ELG** Gebrauch gemacht werden.

Beispiel 3.19 (Harmonischer Oszillator).

$$L = \frac{m}{2} \dot{x}^2 - \frac{m\omega^2}{2} x^2 \quad (3.140)$$

Mit

$$\Phi = \frac{m\omega}{2} x^2 \quad (3.141)$$

folgt

$$\frac{d\Phi}{dt} = m\omega x \dot{x} \quad (3.142)$$

und

$$L_\Phi = \frac{m}{2} \dot{x}^2 - \frac{m\omega^2}{2} x^2 + m\omega x \dot{x} = \frac{m}{2} (\dot{x} + \omega x)^2 - m\omega^2 x^2. \quad (3.143)$$

Kontrolle:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L_\Phi}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L_\Phi}{\partial x} \\ = m(\ddot{x} + \omega \dot{x}) - m(\dot{x} + \omega x)\omega + 2m\omega^2 x = m\ddot{x} + m\omega^2 x = 0. \end{aligned} \quad (3.144)$$

3.8 Noether'sches Theorem

3.8.1 Symmetrien

In der Mathematik und Physik wird ein viel allgemeinerer Begriff der *Symmetrie* verwendet als der umgangssprachliche, der oft auf Spiegelungen um eine Achse in der Ebene reduziert ist.

Symmetrien in der Physik sind Transformationen von Objekten und Mengen von Objekten, insbesondere Transformationen des Konfigurationsraums Q und des Geschwindigkeits-Phasenraums TQ . Prominente Beispiele sind Translationen, Rotationen und Permutationen. Von besonderem Interesse werden solche Transformationen sein, die Strukturen und Objekte invariant lassen. Wenn sich z. B. die Lagrangefunktion eines Systems unter einer Transformation nicht ändert³, sagen wir, daß das System die entsprechende Symmetrie habe.

Die mathematische Struktur zur Beschreibung von Symmetrien in der Physik bieten *Gruppen* (vgl. Definition 3.20), insbesondere *Lie-Gruppen* (vgl. Definition 3.21) und ihre assoziierte *Lie-Algebren* (vgl. Definition 3.22).

Gruppen

Eine weitreichenden Eigenschaft von Symmetrien ist, daß man sie verknüpfen und invertieren kann:

- eine Rotation um eine Achse um den Winkel α gefolgt um eine Rotation um die gleiche Achse um den Winkel β entspricht eine Rotation um die gleiche Achse um den Winkel $\alpha + \beta$,
- eine Verschiebung um den Vektor \vec{x} gefolgt von einer Verschiebung um den Vektor \vec{y} entspricht einer Verschiebung um den Vektor $\vec{x} + \vec{y}$,
- die Hintereinanderausführung zweier Spiegelungen an der gleichen Ebene ergibt die Identität, die sicher eine Symmetrie ist.

Dies motiviert die folgende

Definition 3.20 (Gruppe). Eine Gruppe (G, \circ) ist ein Paar aus einer Menge G und einer inneren Verknüpfung \circ

$$\begin{aligned} \circ : G \times G &\rightarrow G \\ (x, y) &\mapsto x \circ y \end{aligned} \tag{3.145}$$

die den folgenden Axiomen genügt

³Oder nur eine totale Zeitableitung hinzukommt.

1. Abgeschlossenheit: $\forall x, y \in G : x \circ y \in G$,
2. Assoziativität: $\forall x, y, z \in G : x \circ (y \circ z) = (x \circ y) \circ z$,
3. Existenz einer eindeutigen Einheit: $\exists_1 e \in G : \forall x \in G : e \circ x = x \circ e = x$,
4. Existenz von eindeutigen Inversen: $\forall x \in G : \exists_1 x^{-1} \in G : x \circ x^{-1} = x^{-1} \circ x = e$.

Beispiele aus der Mathematik:

- $(\mathbf{Z}, +)$, $(\mathbf{R}, +)$, $(\mathbf{C}, +)$,
- (\mathbf{R}_+, \times) ,

NB: (\mathbf{Z}_+, \times) ist keine Gruppe, weil nur 1 ein Inverses hat und (\mathbf{R}, \times) , sowie (\mathbf{C}, \times) sind *keine* Gruppen, weil die jeweiligen 0 kein Inverses haben,

- $\text{SL}(n, \mathbf{R})$, $\text{SL}(n, \mathbf{C})$, d. h. reelle und komplexe $n \times n$ Matrixen mit Determinante +1 unter Matrixmultiplikation.

Die Symmetrien eines physikalischen Systems werden mathematisch durch eine Gruppe beschrieben, wobei die Symmetrietransformationen die Elemente der Gruppe sind und die Verknüpfung der Hintereinanderausführung dieser Transformationen entspricht.

Beispiele aus der Physik. Betrachte zwei Massenpunkte (Teilchen) mit gleicher Masse (gleichen Eigenschaften), die über ein Potential wechselwirken, das nur vom Abstand der beiden abhängt:

$$L = \frac{m}{2} \left(\dot{\vec{x}}_1^2 + \dot{\vec{x}}_2^2 \right) - V(|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|). \quad (3.146)$$

Wie finden u. a. folgende Symmetrien

- Permutationen: L ändert sich nicht unter dem Austausch $1 \leftrightarrow 2$, bzw.

$$(\vec{x}_1, \dot{\vec{x}}_1, \vec{x}_2, \dot{\vec{x}}_2) \mapsto (\vec{x}_2, \dot{\vec{x}}_2, \vec{x}_1, \dot{\vec{x}}_1) : L \mapsto L, \quad (3.147)$$

- Translationen: L ändert sich nicht unter

$$\forall i = 1, 2 : (\vec{x}_i, \dot{\vec{x}}_i) \mapsto (\vec{x}_i + \vec{a}, \dot{\vec{x}}_i) : L \mapsto L, \quad (3.148)$$

- Rotationen: L ändert sich nicht unter

$$\forall i = 1, 2 : (\vec{x}_i, \dot{\vec{x}}_i) \mapsto (R \vec{x}_i, R \dot{\vec{x}}_i) : L \mapsto L \quad (3.149)$$

wenn R eine orthogonale 3×3 -Matrix ist:

$$R^T R = R R^T = \mathbf{1}_{3 \times 3}. \quad (3.150)$$

Diese Symmetrieen müssen die *Mengen aller Lösungen* der **ELG** respektieren, allerdings werden sie für *einzelne Lösungen* durch die Wahl der Anfangsbedingungen gebrochen.

Lie-Gruppen

Symmetrien, die von kontinuierlichen Parametern abhängen, sind für uns besonders wichtig und motivieren die

Definition 3.21 (Lie-Gruppe). Eine Lie-Gruppe (G, \circ) ist eine Gruppe (Definition 3.20) deren Elemente eine differenzierbare Mannigfaltigkeit bilden⁴ und für die die innere Verknüpfung \circ in beiden Argumenten beliebig oft stetig differenzierbar ist.

Wichtigste Beispiele aus der Physik

- Translationen: $\vec{x} \mapsto \vec{x} + \vec{a}$,
- $\text{SO}(3)$, Rotationen: $\vec{x} \mapsto R(\vec{\theta}) \vec{x}$,
- Wechsel des Inertialsystems (spezielle Galilei-Transformationen, Kapitel 3.8.5) $\vec{x} \mapsto \vec{x} + \vec{v}t$,
- Lorentz-Transformationen (Kapitel ??).

NB: nicht alle Systeme weisen diese Symmetrien auf. Wenn ein System eine oder mehrere dieser Symmetrien aufweist, hat dies nicht-triviale Konsequenzen, z. B. Erhaltungssätze.

Lie-Algebren

„Kleine“ Transformationen in der Nähe der Identität einer Lie-Gruppe können durch *infinitesimale Erzeugende* beschrieben werden, die die Struktur einer *Lie-Algebra* tragen.

Definition 3.22 (Lie-Algebra). Eine Lie-Algebra $(A, [\cdot, \cdot])$ ist ein Vektorraum A über einem Körper K mit einer nicht-assoziativen, antisymmetrischen und bilinearen inneren Verknüpfung $[\cdot, \cdot]$

$$\begin{aligned} [\cdot, \cdot] : A \times A &\rightarrow A \\ (a, b) &\mapsto [a, b] \end{aligned} \tag{3.151}$$

die den folgenden Axiomen genügt:

⁴d. h. jede offene Teilmenge kann durch Koordinaten aus \mathbf{R}^n für festes n parametrisiert werden. Z. B. \mathbf{R}^n , Kreis, glatte Kurve, Kugeloberfläche, Torus, etc.

1. Abgeschlossenheit: $\forall a, b \in A : [a, b] \in A$,
2. Antisymmetrie: $\forall a, b \in A : [a, b] = -[b, a]$
3. Bilinearität: $\forall \alpha, \beta \in K : \forall a, b, c \in A : [\alpha a + \beta b, c] = \alpha[a, c] + \beta[b, c]$
4. Jacobi-Identität: $\forall a, b, c \in A : [a, [b, c]] + [b, [c, a]] + [c, [a, b]] = 0$

Für unsere Anwendungen werden wir nur reelle Lie-Algebren verwenden, d. h. $K = \mathbf{R}$. Später in der Quantenmechanik wird $K = \mathbf{C}$ wichtig werden.

3.8.2 Rotationen

Drehmatrizen

Drehungen sind lineare Transformationen, die längenerhaltend sind, d. h.

$$\vec{x} \mapsto \vec{x}' = R\vec{x} \quad (3.152)$$

mit

$$\vec{x}^2 = \vec{x}'^2. \quad (3.153)$$

Im Anschauungsraum \mathbf{R}^3

$$x_i \mapsto x'_i = \sum_{j=1}^3 R_{ij} x_j \quad (3.154)$$

und aus

$$\forall \vec{x}, \vec{y} : \vec{x}' \cdot \vec{y}' = \frac{1}{2} \left((\vec{x}' + \vec{y}')^2 - \vec{x}'^2 - \vec{y}'^2 \right) = \frac{1}{2} ((\vec{x} + \vec{y})^2 - \vec{x}^2 - \vec{y}^2) = \vec{x} \cdot \vec{y} \quad (3.155)$$

folgt für beliebige x_j und y_k

$$\sum_{j,k=1}^3 \delta_{jk} x_j y_k = \sum_{i=1}^3 x_i y_i = \vec{x} \cdot \vec{y} \stackrel{!}{=} \vec{x}' \cdot \vec{y}' = \sum_{i=1}^3 x'_i y'_i = \sum_{i,j,k=1}^3 R_{ij} R_{ik} x_j y_k \quad (3.156)$$

also nach Koeffizientenvergleich

$$\sum_{i=1}^3 R_{ij} R_{ik} = \delta_{jk} \quad (3.157)$$

bzw. in Matrixschreibweise

$$R^T R = \mathbf{1} \quad (3.158)$$

und wir finden, daß die R *orthogonale* Matrizen sind, die die Gruppe $O(3)$ bilden. Deshalb

$$\det R = \pm 1 \quad (3.159)$$

und nur die Matrizen mit $\det R = +1$ sind Rotationen, die die Orientierung erhalten. Sie bilden die Gruppe der speziellen orthogonalen Matrizen $SO(3)$. Die Matrizen mit $\det R = -1$ können als Hintereinanderausführung einer orientierungserhaltenden Rotation und einer Spiegelung $\vec{x} \mapsto -\vec{x}$ aufgefasst werden, bilden aber *keine* Gruppe.

Im folgenden schreiben wir zunächst alle Gleichungen für orthogonale $N \times N$ -Matrizen aus $O(N)$ und spezialisieren uns erst am Ende auf $N = 3$. Von den $N^2 = 9$ Gleichungen (3.158) für die $N^2 = 9$ reellen Matrixelemente von R , sind nur $N(N+1)/2 = 6$ unabhängig, weil $R^T R$ symmetrisch ist:

$$(R^T R)^T = R^T (R^T)^T = R^T R. \quad (3.160)$$

Also gibt es $N^2 - N(N+1)/2 = N(N-1)/2 = 3$ *unabhängige reelle* Parameter.

Erzeugende

Vorlesung 08: Fr, 10. 11. 2023

Alternativ kann man auch

$$R = e^A = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A^n}{n!} = \mathbf{1} + A + \frac{1}{2}A^2 + \frac{1}{6}A^3 + \dots \quad (3.161)$$

schreiben, dann gilt wegen $(A^n)^T = (A^T)^n$

$$R^T = (e^A)^T = e^{(A^T)} \quad (3.162)$$

und die Bedingungsgleichung

$$R^T R = e^{(A^T)} e^A = \mathbf{1} \quad (3.163)$$

wird von

$$A^T = -A \quad (3.164)$$

gelöst, weil

$$\forall \alpha, \beta \in \mathbf{R} : e^{\alpha A} e^{\beta A} = e^{(\alpha+\beta)A}. \quad (3.165)$$

obwohl im Allgemeinen $e^A e^B \neq e^{A+B}$ gilt. Und es gibt wieder $N(N-1)/2 = 3$ *unabhängige reelle* Parameter in antisymmetrischen Matrizen. Weil die Bedingungsgleichungen (3.164) für die Antisymmetrie *linear* sind, im Gegensatz zu (3.158) für die Orthogonalität, sind sie viel leichter zu lösen.

Als Beispiele die drei Drehungen um die Koordinatenachsen:

$$\vec{e}_1 : \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} = e^{\theta \tau_1} = \mathbf{1} + \theta \tau_1 + \mathcal{O}(\theta^2) \quad (3.166a)$$

$$\vec{e}_2 : \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} = e^{\theta \tau_2} = \mathbf{1} + \theta \tau_2 + \mathcal{O}(\theta^2) \quad (3.166b)$$

$$\vec{e}_3 : \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = e^{\theta \tau_3} = \mathbf{1} + \theta \tau_3 + \mathcal{O}(\theta^2) \quad (3.166c)$$

mit

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.167a)$$

$$\tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.167b)$$

$$\tau_3 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} . \quad (3.167c)$$

Später werden wir noch benötigen, daß die Anwendung der Matrizen τ_i auf die Einheitsvektoren⁵ \vec{e}_i

$$\tau_i \vec{e}_j = \sum_{k=1}^3 \epsilon_{ijk} \vec{e}_k \quad (3.168)$$

ergibt, wobei ϵ der total antisymmetrische Tensor dritter Stufe ist (Levi-Civita Symbol), d. h.

$$\epsilon_{123} = \epsilon_{231} = \epsilon_{312} = 1 = -\epsilon_{213} = -\epsilon_{132} = -\epsilon_{321} \quad (3.169)$$

und alle anderen Komponenten verschwinden. Aus (3.168) folgt

$$\left(\vec{\theta} \vec{\tau} \right) \vec{x} = \sum_{i,j=1}^3 \theta_i x_j \tau_i \vec{e}_j = \sum_{i,j,k=1}^3 \theta_i x_j \epsilon_{ijk} \vec{e}_k = \sum_{k=1}^3 \left[\vec{\theta} \times \vec{x} \right]_k \vec{e}_k = \vec{\theta} \times \vec{x} \quad (3.170)$$

⁵ \vec{e}_i ist der Einheitsvektor in i -Richtung, nicht die i te Komponente!

durch direkte Rechnung.

In der Tat sind die τ_i antisymmetrisch

$$\forall i : \tau_i = -\tau_i^T \quad (3.171)$$

und *jede* antisymmetrische Matrix kann

$$A = \sum_{i=1}^3 \theta_i \tau_i = \begin{pmatrix} 0 & -\theta_3 & \theta_2 \\ \theta_3 & 0 & -\theta_1 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.172)$$

geschrieben werden.

Die τ_i schließen *nicht* unter Matrixmultiplikation

$$\tau_1 \tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.173a)$$

$$\tau_2 \tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.173b)$$

aber mit dem *Kommutator*

$$[A, B] = AB - BA \quad (3.174)$$

bilden sie eine Lie-Algebra

$$[\tau_1, \tau_2] = \tau_3 \quad (3.175)$$

wie man leicht auch für die anderen Generatoren überprüfen kann:

$$[\tau_i, \tau_j] = \sum_{k=1}^3 \epsilon_{ijk} \tau_k. \quad (3.176)$$

Alternativ kann man

$$[\vec{\theta}_1 \vec{\tau}, \vec{\theta}_2 \vec{\tau}] = (\vec{\theta}_1 \times \vec{\theta}_2) \vec{\tau} \quad (3.177)$$

schreiben.

Bemerkung 3.23. Der Kommutator zweier antisymmetrischer Matrizen ist antisymmetrisch

$$\begin{aligned} [A, A']^T &= (AA')^T - (A'A)^T = (A')^T A^T - A^T (A')^T \\ &= A'A - AA' = -[A, A'], \end{aligned} \quad (3.178)$$

also *muß* die Lie-Algebra der antisymmetrischen Matrizen abschließen.

3.8.3 Erhaltungssätze

Sei ϕ eine differenzierbare einparametrische Familie von möglicherweise zeit- und geschwindigkeitsabhängigen Koordinatentransformationen

$$\begin{aligned} \phi : \mathbf{R} \times TQ \times \mathbf{R} &\rightarrow Q \\ (s, q, \dot{q}, t) &\mapsto \phi_s(q, \dot{q}, t) = q + s\delta_\phi q(q, \dot{q}, t) + \mathcal{O}(s^2), \end{aligned} \quad (3.179)$$

wobei die infinitesimale Transformation $\delta_\phi q$, bzw. die Erzeugende der Familie ϕ , über

$$\delta_\phi q(q, \dot{q}, t) = \left. \frac{d}{ds} \phi_s(q, \dot{q}, t) \right|_{s=0} \quad (3.180)$$

definiert ist. Diese induziert, ebenso wie in Abschnitt 3.3, eine einparametrische Familie von Transformationen von beliebigen Funktionen

$$\begin{aligned} f : TQ \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (q, \dot{q}, t) &\mapsto f(q, \dot{q}, t) \end{aligned} \quad (3.181)$$

auf dem Geschwindigkeits-Phasenraum $TQ \cong Q \times \mathbf{R}^n$ in Funktionen

$$\begin{aligned} f' : T^2Q \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (q, \dot{q}, \ddot{q}, t) &\mapsto f'(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \end{aligned} \quad (3.182)$$

auf dem Raum $T^2Q \cong Q \times \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^n$ der Koordinaten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen mittels

$$\begin{aligned} f^\phi : \mathbf{R} \times T^2Q \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (s, q, \dot{q}, \ddot{q}, t) &\mapsto f^{\phi_s}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = f(\phi_s(q, \dot{q}, t), \dot{\phi}_s(q, \dot{q}, \ddot{q}, t), t) \\ &= f(q, \dot{q}, t) + s\delta_\phi f(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) + \mathcal{O}(s^2), \end{aligned} \quad (3.183)$$

wobei in

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_s(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) &= \frac{d\phi_s}{dt}(q, \dot{q}, t) \\ &= \sum_j \dot{q}_j \frac{\partial \phi_s}{\partial q_j}(q, \dot{q}, t) + \sum_j \ddot{q}_j \frac{\partial \phi_s}{\partial \dot{q}_j}(q, \dot{q}, t) + \frac{\partial \phi_s}{\partial t}(q, \dot{q}, t) \end{aligned} \quad (3.184)$$

die Abhängigkeit von den Beschleunigungen \ddot{q}_j nur bei geschwindigkeitsabhängigen Transformationen entsteht und ansonsten ignoriert werden kann. Die infinitesimale Transformation der Funktion f ist somit

$$\delta_\phi f(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = \left. \frac{d}{ds} f^{\phi_s}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \right|_{s=0}$$

$$= \sum_i \frac{\partial f}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) \frac{d}{ds} \phi_{s,i}(q, \dot{q}, t) \Big|_{s=0} + \sum_i \frac{\partial f}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \frac{d}{ds} \dot{\phi}_{s,i}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \Big|_{s=0}, \quad (3.185)$$

wobei es keinen Beitrag von $\partial f / \partial t$ gibt, weil t nicht transformiert wird. Wenn wir als Spezialfall für die Funktion f die i -te Komponente der Geschwindigkeit $f : (q, \dot{q}, t) \mapsto \dot{q}_i$ wählen, finden wir

$$\delta_\phi \dot{q}_i(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = \frac{d}{ds} \dot{\phi}_{s,i}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \Big|_{s=0} \quad (3.186)$$

(vgl. (3.180)). Wir können also auch

$$\begin{aligned} \delta_\phi f(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = \\ \sum_i \frac{\partial f}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \delta_\phi \dot{q}_i(q, \dot{q}, \ddot{q}, t), \end{aligned} \quad (3.187)$$

schreiben.

Außerdem gilt

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) &= \frac{d}{dt} \frac{d}{ds} \phi_{s,i}(q, \dot{q}, t) \Big|_{s=0} \\ &= \frac{d}{ds} \frac{d}{dt} \phi_{s,i}(q, \dot{q}, t) \Big|_{s=0} = \frac{d}{ds} \dot{\phi}_{s,i}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \Big|_{s=0} = \delta_\phi \dot{q}_i(q, \dot{q}, \ddot{q}, t), \end{aligned} \quad (3.188)$$

weil s und t unabhängig voneinander variieren. Nun haben wir alle Bausteine für das

Theorem 3.24 (Emmy Noether, 1915). *Wenn sich eine Lagrangefunktion L unter einer Erzeugenden δ_ϕ einer Familie ϕ von möglicherweise zeit- und geschwindigkeitsabhängigen Koordinatentransformation in eine totale Zeitableitung transformiert*

$$\delta_\phi L(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = \frac{d}{dt} \Lambda_\phi(q, \dot{q}, t) \quad (3.189)$$

dann ist das Integral

$$\begin{aligned} I_\phi(q, \dot{q}, t) &= \sum_i p_i(q, \dot{q}, t) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) - \Lambda_\phi(q, \dot{q}, t) \\ &= \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) - \Lambda_\phi(q, \dot{q}, t) \end{aligned} \quad (3.190)$$

entlang der Lösungen der **ELG** erhalten

$$\frac{d}{dt} I_\phi(q(t), \dot{q}(t), t) = 0. \quad (3.191)$$

NB: im Gegensatz zu den Eichtransformationen (3.133) in Abschnitt 3.7 darf Λ_ϕ von \dot{q} abhängen!

NB: für die rechte Seite von (3.189) ist es wichtig, daß es sich um die totale Zeitableitung einer auf dem Phasenraum wohldefinierten Funktion

$$\Lambda_\phi : TQ \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R} \quad (3.192)$$

handelt

$$\frac{d\Lambda_\phi}{dt} = \sum_i \frac{\partial \Lambda_\phi}{\partial q_i} \dot{q}_i + \sum_i \frac{\partial \Lambda_\phi}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i + \frac{\partial \Lambda_\phi}{\partial t}. \quad (3.193)$$

Der Versuch, einfach die linke Seite von (3.189) entlang einer beliebigen Lösung der ELG aufzuintegrieren

$$\tilde{\Lambda}_\phi(t) = \int^t dt' \delta_\phi L(q(t'), \dot{q}(t'), \ddot{q}(t'), t')$$

definiert eben *nicht* eine solche Funktion, sondern hängt von der gewählten Lösung ab.

Beweis durch Nachrechnen.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\sum_i p_i(q, \dot{q}, t) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) \right) &= \frac{d}{dt} \left(\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) \right) \\ &= \sum_i \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \right) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt} \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) \\ &\stackrel{ELG}{=} \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i}(q, \dot{q}, t) \delta_\phi q_i(q, \dot{q}, t) + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}(q, \dot{q}, t) \delta_\phi \dot{q}_i(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \\ &\stackrel{(3.187)}{=} \delta_\phi L(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) \stackrel{(3.189)}{=} \frac{d\Lambda_\phi}{dt}(q, \dot{q}, t). \quad \square \quad (3.194) \end{aligned}$$

3.8.4 Zeittranslationen und Energieerhaltung

Statt $t \mapsto t' = t + s$ können wir auch

$$q_k(t) \mapsto q_k(t - s) = q_k(t) \underbrace{- s \dot{q}_k(t)}_{s \delta_\eta q_k(t)} + \mathcal{O}(s^2) \quad (3.195a)$$

schreiben (vgl. Abb. 3.4) und damit

$$\dot{q}_k(t) \mapsto \dot{q}_k(t - s) = \dot{q}_k(t) \underbrace{- s \ddot{q}_k(t)}_{s \delta_\eta \dot{q}_k(t)} + \mathcal{O}(s^2), \quad (3.195b)$$

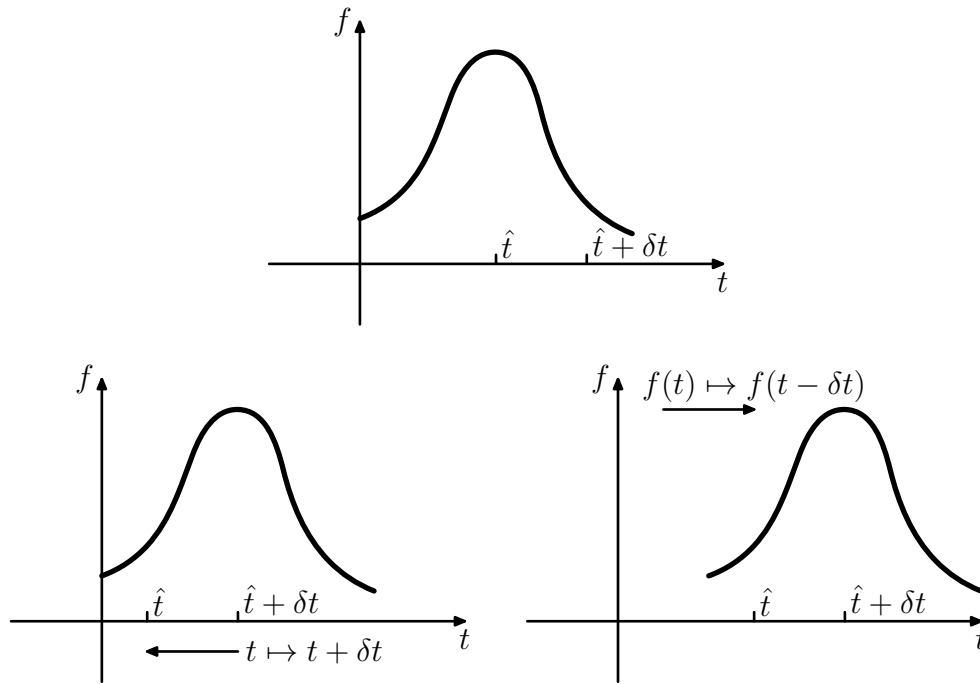


Abbildung 3.4: Veranschaulichung von (3.195a): eine Verschiebung der Zeitkoordinate $t \mapsto t + \delta t$ (links unten) ist äquivalent zu einer Verschiebung der Funktionsargumente $f(t) \mapsto f(t - \delta t)$ (rechts unten).

also

$$\delta_\eta q_k = -\dot{q}_k \quad (3.196a)$$

$$\delta_\eta \dot{q}_k = -\ddot{q}_k. \quad (3.196b)$$

Damit

$$\begin{aligned} \delta_\eta L &= \sum_k \frac{\partial L}{\partial q_k} \delta_\eta q_k + \sum_k \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \delta_\eta \dot{q}_k \\ &= -\sum_k \frac{\partial L}{\partial q_k} \dot{q}_k - \sum_k \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \ddot{q}_k = \frac{\partial L}{\partial t} - \frac{dL}{dt}. \end{aligned} \quad (3.197)$$

Wenn $L(q, \dot{q})$ nicht *explizit* von t abhängt, ist in der Voraussetzung in (3.190) für das Noether-Theorem $\Lambda_\eta = -L$ und folglich ist

$$I_\eta(q, \dot{q}) = \sum_k \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}(q, \dot{q}) \delta_\eta q_k - \Lambda_\eta(q, \dot{q}) = -\sum_k p_k(q, \dot{q}) \dot{q}_k + L(q, \dot{q}) = \text{const.} \quad (3.198)$$

ein Integral der Bewegung. Weil es eine so zentrale Rolle spielt, wird sein Negatives als *Hamiltonfunktion* bezeichnet

$$H(q, \dot{q}) = -I_\eta(q, \dot{q}) = \sum_k p_k(q, \dot{q}) \dot{q}_k - L(q, \dot{q}) = \text{const.} \quad (3.199)$$

Falls

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) = \sum_k f_k(q) \dot{q}_k^2 - V(q), \quad (3.200)$$

dann

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}(q, \dot{q}) = 2f_k(q) \dot{q}_k \quad (3.201)$$

und die Hamiltonfunktion ist gleich der Gesamtenergie

$$\begin{aligned} H(q, \dot{q}) &= \sum_k 2f_k(q) \dot{q}_k \dot{q}_k - L(q, \dot{q}) \\ &= \sum_k f_k(q) \dot{q}_k^2 + V(q) = T(q, \dot{q}) + V(q) = E. \end{aligned} \quad (3.202)$$

Vorlesung 09: Mo, 13. 11. 2023

Ein Nachweis ohne das Noether-Theorem ist auch möglich

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} H(q, \dot{q}, t) &= \sum_k \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}(q, \dot{q}, t) \dot{q}_k + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}(q, \dot{q}, t) \ddot{q}_k \right) \\ &\quad - \sum_k \left(\frac{\partial L}{\partial q_k}(q, \dot{q}, t) \dot{q}_k + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}(q, \dot{q}, t) \ddot{q}_k \right) - \frac{\partial L}{\partial t}(q, \dot{q}, t) \\ &= \sum_k \underbrace{\left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}(q, \dot{q}, t) - \frac{\partial L}{\partial q_k}(q, \dot{q}, t) \right)}_{\substack{\text{ELG} \\ = 0}} \dot{q}_k - \frac{\partial L}{\partial t}(q, \dot{q}, t) = -\frac{\partial L}{\partial t}(q, \dot{q}, t). \end{aligned} \quad (3.203)$$

3.8.5 Galilei-Gruppe

Die Galilei-Gruppe ist die Invarianzgruppe der nichtrelativistischen Physik abgeschlossener Systeme. Jedes Element $G[R, \vec{a}, \vec{v}, \eta, \lambda]$ der Galilei-Gruppe entspricht einer affinen Transformation des Produkts von Anschauungsraum und Zeitstrahl, sodaß Inertialsysteme auf Inertialsysteme abgebildet werden:

$$\begin{aligned} G[R, \vec{a}, \vec{v}, \eta, \lambda] : \mathbf{R} \times \mathbf{R}^3 &\rightarrow \mathbf{R} \times \mathbf{R}^3 \\ (t, \vec{x}) &\mapsto G[R, \vec{a}, \vec{v}, \eta, \lambda](t, \vec{x}) = (\lambda t + \eta, R\vec{x} + \vec{v}t + \vec{a}). \end{aligned} \quad (3.204)$$

Die einzelnen Transformationen sind

1. Rotation und Raumspiegelung $R \in O(3)$:

(a) Rotation $R \in SO(3)$: $G[R, \vec{0}, \vec{0}, 0, +1](t, \vec{x}) = (t, R\vec{x})$

(b) Raumspiegelung $R = -\mathbf{1}$: $G[-\mathbf{1}, \vec{0}, \vec{0}, 0, +1](t, \vec{x}) = (t, -\vec{x})$

Raumspiegelung- oder Paritätsinvarianz wird von der schwachen Wechselwirkung verletzt (Wu, 1957). Dieser Effekt ist aber zu klein, um in der klassischen Physik wichtig zu sein.

2. Translation $\vec{a} \in \mathbf{R}^3$: $G[\mathbf{1}, \vec{a}, \vec{0}, 0, +1](t, \vec{x}) = (t, \vec{x} + \vec{a})$

3. Galilei-Boost $\vec{v} \in \mathbf{R}^3$: $G[\mathbf{1}, \vec{0}, \vec{v}, 0, +1](t, \vec{x}) = (t, \vec{x} + \vec{v}t)$ d. h. Wechsel in ein neues, mit der Relativgeschwindigkeit $-\vec{v}$ bewegtes, Inertialsystem.

Galilei-Boosts müssen für $|\vec{v}| \lesssim c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ durch Lorentz-Boosts (siehe Kapitel ??) ersetzt werden.

4. Zeitumkehr $\lambda \in \{-1, +1\}$: $G[\mathbf{1}, \vec{0}, \vec{0}, 0, -1](t, \vec{x}) = (-t, \vec{x})$

Es gibt zwei Arten der Verletzung der Zeitumkehrinvarianz in der Physik

- mikroskopisch durch die CP -Verletzung (Cronin und Fitch, 1964): winziger Effekt, der in der klassischen Physik nicht merkbar ist,
- makroskopisch durch Dissipation oder andere thermodynamische Effekte (2. Hauptsatz, Zunahme der Entropie). Als Dämpfungseffekt spielen sie in der Anwendung der klassischen Mechanik auf die reale Welt eine Rolle, weil selten *alle* Freiheitsgrade beschrieben werden können. Die Beschreibung verwendet die Newton'schen Gesetze.

5. Zeittranslation $\eta \in \mathbf{R}$: $G[\mathbf{1}, \vec{0}, \vec{0}, \eta, +1](t, \vec{x}) = (t + \eta, \vec{x})$

und diejenigen, die miteinander nicht vertauschen, werden in der Reihenfolge 1, 2, 3, 4, 5 angewandt.

Lie-Gruppe

Durch explizite Berechnung der Hintereinanderausführung

$$\begin{aligned}
 (G[R_1, \vec{a}_1, \vec{v}_1, \eta_1, \lambda_1] \circ G[R_2, \vec{a}_2, \vec{v}_2, \eta_2, \lambda_2])(t, \vec{x}) &= \\
 G[R_1, \vec{a}_1, \vec{v}_1, \eta_1, \lambda_1](G[R_2, \vec{a}_2, \vec{v}_2, \eta_2, \lambda_2](t, \vec{x})) &= \\
 G[R_1, \vec{a}_1, \vec{v}_1, \eta_1, \lambda_1](\lambda_2 t + \eta_2, R_2 \vec{x} + \vec{v}_2 t + \vec{a}_2) &= \\
 (\lambda_1(\lambda_2 t + \eta_2) + \eta_1, R_1(R_2 \vec{x} + \vec{v}_2 t + \vec{a}_2) + \vec{v}_1(\lambda_2 t + \eta_2) + \vec{a}_1) &= \\
 (\lambda_1 \lambda_2 t + \eta_1 + \lambda_1 \eta_2, R_1 R_2 \vec{x} + (R_1 \vec{v}_2 + \lambda_2 \vec{v}_1)t + R_1 \vec{a}_2 + \vec{a}_1 + \eta_2 \vec{v}_1) &= \\
 G[R_1 R_2, R_1 \vec{a}_2 + \vec{a}_1 + \eta_2 \vec{v}_1, R_1 \vec{v}_2 + \lambda_2 \vec{v}_1, \lambda_1 \eta_2 + \eta_1, \lambda_1 \lambda_2](t, \vec{x}) &= \quad (3.205)
 \end{aligned}$$

finden wir als Verknüpfung

$$\begin{aligned}
 G[R_1, \vec{a}_1, \vec{v}_1, \eta_1, \lambda_1] \circ G[R_2, \vec{a}_2, \vec{v}_2, \eta_2, \lambda_2] \\
 = G[R_1 R_2, R_1 \vec{a}_2 + \vec{a}_1 + \eta_2 \vec{v}_1, R_1 \vec{v}_2 + \lambda_2 \vec{v}_1, \lambda_1 \eta_2 + \eta_1, \lambda_1 \lambda_2]. \quad (3.206)
 \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich Einheit

$$e = G[\mathbf{1}, \vec{0}, \vec{0}, 0, +1] \quad (3.207)$$

und das Inverse

$$(G[R, \vec{a}, \vec{v}, \eta, \lambda])^{-1} = G[R^T, \lambda \eta R^T \vec{v} - R^T \vec{a}, -\lambda R^T \vec{v}, -\lambda \eta, \lambda]. \quad (3.208)$$

Die Assoziativität folgt aus der Assoziativität

$$\begin{aligned}
 ((f \circ g) \circ h)(x) &= (f \circ g)(h(x)) = f(g(h(x))) \\
 &= f((g \circ h)(x)) = (f \circ (g \circ h))(x) \quad (3.209)
 \end{aligned}$$

der Hintereinanderausführung

$$(f \circ g)(x) = f(g(x)) \quad (3.210)$$

von beliebigen Abbildungen $f : C \rightarrow D$, $g : B \rightarrow C$ und $h : A \rightarrow B$.

Lineare Realisierung

Zusatzmaterial (nicht in der Vorlesung besprochen):

Weil es sich um affine Transformationen handelt, können wir die Galilei-Gruppe *nicht* durch lineare Operationen, d. h. Matrizen, realisieren, die auf $(t, \vec{x}) \in \mathbf{R} \times \mathbf{R}^3$ wirken. Es hilft ein Trick. Durch Hinzufügen einer weiteren Dimension $(t, \vec{x}) \rightarrow (1, t, \vec{x}) \in \mathbf{R}^5$,

können wir die Verschiebungen als 5×5 -Matrix schreiben, die die erste Komponente auf 1 festhalten:

$$G[R, \vec{a}, \vec{v}, \eta, \lambda] \mapsto \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & v_1 & R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ a_2 & v_2 & R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ a_3 & v_3 & R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}. \quad (3.211)$$

In der Tat:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & v_1 & R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ a_2 & v_2 & R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ a_3 & v_3 & R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda t + \eta \\ (Rx)_1 + v_1 t + a_1 \\ (Rx)_2 + v_2 t + a_2 \\ (Rx)_3 + v_3 t + a_3 \end{pmatrix}. \quad (3.212)$$

Lie-Algebra

Zusatzmaterial (nicht in der Vorlesung besprochen):

Die Entwicklung der Matrix-Realisierung für $\det R = 1$ und $\lambda = 1$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & v_1 & R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ a_2 & v_2 & R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ a_3 & v_3 & R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} &= \mathbf{1}_{5 \times 5} + g[\vec{\theta}, \vec{a}, \vec{v}, \eta] + \mathcal{O}(\theta^2, \theta v, \theta a, \theta \eta) \\ &= \mathbf{1}_{5 \times 5} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & v_1 & 0 & -\theta_3 & \theta_2 \\ a_2 & v_2 & \theta_3 & 0 & -\theta_1 \\ a_3 & v_3 & -\theta_2 & \theta_1 & 0 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\theta^2, \theta v, \theta a, \theta \eta) \end{aligned} \quad (3.213)$$

legt die infinitesimalen Erzeugenden

$$g[\vec{\theta}, \vec{a}, \vec{v}, \eta] = \vec{\theta} \vec{L} + \vec{a} \vec{P} + \vec{v} \vec{C} + \eta H \quad (3.214)$$

mit den 10 Generatoren

1. 3 Rotationen \vec{L} : $L_i(u, t, \vec{x}) = (0, 0, \tau_i \vec{x})$
2. 3 Translationen \vec{P} : $P_i(u, t, \vec{x}) = (0, 0, \vec{e}_i u)$
3. 3 Galilei-Boosts \vec{C} : $C_i(u, t, \vec{x}) = (0, 0, \vec{e}_i t)$
4. 1 Zeittranslation H : $H(u, t, \vec{x}) = (0, u, \vec{0})$

nahe.

Die allgemeine Linearkombination kann

$$g[\vec{\theta}, \vec{a}, \vec{v}, \eta](u, t, \vec{x}) = \left(0, \eta u, \vec{\theta} \times \vec{x} + \vec{v} t + \vec{a} \right) \quad (3.215)$$

geschrieben werden, wobei wir für die Rotationen

$$(\vec{\theta}\vec{\tau})\vec{x} = \sum_{k,l=1}^3 \theta_k x_l \tau_k \vec{e}_l = \sum_{k,l,m=1}^3 \theta_k x_l \epsilon_{klm} \vec{e}_m = \vec{\theta} \times \vec{x} \quad (3.216)$$

ausgenutzt haben. Die Matrixrealisierung der Generatoren erhält man durch Koeffizientenvergleich⁶ aus (3.213) und (3.214). NB: für die diskreten Transformationen Raumspiegelung und Zeitumkehr gibt es keine Erzeugenden.

Vertauschungsrelationen für Rotationen

$$\begin{aligned} [L_i, L_j](1, t, \vec{x}) &= L_i L_j(1, t, \vec{x}) - L_j L_i(1, t, \vec{x}) \\ &= L_i(0, 0, \tau_j \vec{x}) - L_j(0, 0, \tau_i \vec{x}) = (0, 0, \tau_i \tau_j \vec{x}) - (0, 0, \tau_j \tau_i \vec{x}) \\ &= (0, 0, [\tau_i, \tau_j] \vec{x}) = \sum_k \epsilon_{ijk}(0, 0, \tau_k \vec{x}) = \sum_k \epsilon_{ijk} L_k(1, t, \vec{x}) \end{aligned} \quad (3.217a)$$

und Rotationen mit Galilei-Boost

$$\begin{aligned} [L_i, C_j](1, t, \vec{x}) &= L_i C_j(1, t, \vec{x}) - C_j L_i(1, t, \vec{x}) \\ &= L_i(0, 0, \vec{e}_j t) - C_j(0, 0, \tau_i \vec{x}) = (0, 0, \tau_i \vec{e}_j t) - (0, 0, \vec{0}) \\ &= \sum_k \epsilon_{ijk}(0, 0, \vec{e}_k t) = \sum_k \epsilon_{ijk} C_k(1, t, \vec{x}). \end{aligned} \quad (3.217b)$$

Die Rechnung für $[L_i, P_j]$ ist identisch⁷. Galilei-Boosts und Zeittranslationen vertauschen ebenfalls nicht

$$\begin{aligned} [C_i, H](1, t, \vec{x}) &= C_i H(1, t, \vec{x}) - H C_i(1, t, \vec{x}) = C_i(0, 1, \vec{0}) - H(0, 0, \vec{e}_i t) \\ &= (0, 0, \vec{e}_i) - (0, 0, \vec{0}) = P_i(1, t, \vec{x}). \end{aligned} \quad (3.217d)$$

Alle anderen vertauschen⁸.

Insgesamt erhalten wir die Lie-Algebra der Galilei-Gruppe

$$[L_i, L_j] = \sum_k \epsilon_{ijk} L_k \quad (3.218a)$$

$$[L_i, C_j] = \sum_k \epsilon_{ijk} C_k \quad (3.218b)$$

$$[L_i, P_j] = \sum_k \epsilon_{ijk} P_k \quad (3.218c)$$

$$[L_i, H] = 0 \quad (3.218d)$$

$$[C_i, P_j] = 0 \quad (3.218e)$$

$$[C_i, H] = P_i \quad (3.218f)$$

$$[P_i, H] = 0 \quad (3.218g)$$

3.8.6 Translationen und Impulserhaltung

Zeitlich konstante Verschiebungen des Systems (aktive Transformation) oder des Koordinatensystems (passive Transformation)

$$\forall n : \vec{x}_n \mapsto \vec{x}'_n = \vec{x}_n + s\vec{a}, \quad (3.219)$$

bzw.

$$\delta_{\vec{a}}\vec{x}_n = \vec{a} \quad (3.220a)$$

$$\delta_{\vec{a}}\dot{\vec{x}}_n = \vec{0} \quad (3.220b)$$

Mit der Notation

$$\vec{x}_n = (x_{n,1}, x_{n,2}, x_{n,3}) \quad (3.221)$$

finden wir

$$\begin{aligned} \delta_{\vec{a}}L(x, \dot{x}, t) &= \sum_{k,i} \frac{\partial L}{\partial x_{k,i}}(x, \dot{x}, t) \delta_{\vec{a}}x_{k,i} + \sum_{k,i} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{k,i}}(x, \dot{x}, t) \delta_{\vec{a}}\dot{x}_{k,i} \\ &= \sum_i a_i \sum_k \frac{\partial L}{\partial x_{k,i}}(x, \dot{x}, t) \end{aligned} \quad (3.222)$$

die Terme $\sum_k \frac{\partial L}{\partial x_{k,i}}(x, \dot{x}, t)$ verschwinden unter folgenden Bedingungen

- L hängt garnicht von \vec{x}_k ab (trivial)
- L hängt nur von Differenzen $\vec{x}_k - \vec{x}_l$ ab, weil nach der Kettenregel

$$\frac{\partial}{\partial x_{l,i}} f(\vec{x}_k - \vec{x}_l) = -\frac{\partial}{\partial x_{k,i}} f(\vec{x}_k - \vec{x}_l) \quad (3.223)$$

gilt. Eine alternative Begründung ist

$$\forall n : \vec{x}_n \mapsto \vec{x}_n + \vec{a} \Rightarrow f(\vec{x}_k - \vec{x}_l) \mapsto f(\vec{x}_k + \vec{a} - \vec{x}_l - \vec{a}) = f(\vec{x}_k - \vec{x}_l). \quad (3.224)$$

In einem *abgeschlossenen System* sollte L in der Tat nur von den Differenzen abhängen, weil alle Kräfte von Wechselwirkungen von Teilen des Systems untereinander herrühren.

In diesem Fall folgt mit dem Noether-Theorem für $\Lambda = 0$, daß

$$I_{\vec{a}}(x, \dot{x}, t) = \sum_{k,i} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{k,i}}(x, \dot{x}, t) \delta_{\vec{a}}x_{k,i}$$

$$= \sum_{k,i} p_{k,i}(x, \dot{x}, t) a_i = \vec{a} \sum_k \vec{p}_k(x, \dot{x}, t) = \vec{a} \vec{P}(x, \dot{x}, t) \quad (3.225)$$

erhalten ist, mit dem Impuls des k -ten Teilchens

$$p_{k,i}(x, \dot{x}, t) = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{k,i}}(x, \dot{x}, t) \quad (3.226)$$

bzw. dem erhaltenen *Gesamtimpuls*

$$\vec{P}(x, \dot{x}, t) = \sum_k \vec{p}_k(x, \dot{x}, t) = \text{const.} \quad (3.227)$$

3.8.7 Rotationen und Drehimpulserhaltung

Zeitlich konstante Rotation des Systems

$$\forall n : \vec{x}_n \mapsto \vec{x}'_n = R\vec{x}_n = \vec{x}_n + \underbrace{s(\vec{\theta}\vec{\tau})\vec{x}_n}_{\stackrel{(3.170)}{=} s\vec{\theta} \times \vec{x}_n} + \mathcal{O}(s^2) \quad (3.228)$$

also

$$\delta_{\vec{\theta}} \vec{x}_n = \vec{\theta} \times \vec{x}_n \quad (3.229a)$$

$$\delta_{\vec{\theta}} \dot{\vec{x}}_n = \vec{\theta} \times \dot{\vec{x}}_n \quad (3.229b)$$

oder in Komponenten

$$\delta_{\vec{\theta}} x_{n,i} = \sum_{j,k} \epsilon_{ijk} \theta_j x_{n,k} \quad (3.230a)$$

$$\delta_{\vec{\theta}} \dot{x}_{n,i} = \sum_{j,k} \epsilon_{ijk} \theta_j \dot{x}_{n,k} \quad (3.230b)$$

Wenn die Lagrangefunktion von den Orten \vec{x}_n und Geschwindigkeiten $\dot{\vec{x}}_n$ nur über Skalarprodukte

$$X_{nm}(x, \dot{x}) = \vec{x}_n \cdot \vec{x}_m \quad (3.231a)$$

$$Y_{nm}(x, \dot{x}) = \vec{x}_n \cdot \dot{\vec{x}}_m \quad (3.231b)$$

$$Z_{nm}(x, \dot{x}) = \dot{\vec{x}}_n \cdot \dot{\vec{x}}_m, \quad (3.231c)$$

abhängt, d. h.

$$L(x, \dot{x}, t) = \tilde{L}(X(x, \dot{x}), Y(x, \dot{x}), Z(x, \dot{x}), t), \quad (3.232)$$

dann gilt wegen

$$\begin{aligned}\delta_{\vec{\theta}} X_{nm}(x, \dot{x}) &= \delta_{\vec{\theta}} \vec{x}_n \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_n \cdot \delta_{\vec{\theta}} \vec{x}_m = \left(\vec{\theta} \times \vec{x}_n \right) \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_n \cdot \left(\vec{\theta} \times \vec{x}_m \right) \\ &= \sum_{ijk} \epsilon_{ijk} \theta_i x_{n,j} x_{m,k} + \sum_{ijk} \epsilon_{ijk} x_{n,i} \theta_j x_{m,k} = 0\end{aligned}\quad (3.233a)$$

$$\delta_{\vec{\theta}} Y_{nm}(x, \dot{x}) = \dots = 0 \quad (3.233b)$$

$$\delta_{\vec{\theta}} Z_{nm}(x, \dot{x}) = \dots = 0 \quad (3.233c)$$

auch

$$\delta_{\vec{\theta}} L = \sum_{nm} \frac{\partial \tilde{L}}{\partial X_{nm}} \delta_{\vec{\theta}} X_{nm} + \sum_{nm} \frac{\partial \tilde{L}}{\partial Y_{nm}} \delta_{\vec{\theta}} Y_{nm} + \sum_{nm} \frac{\partial \tilde{L}}{\partial Z_{nm}} \delta_{\vec{\theta}} Z_{nm} = 0. \quad (3.234)$$

Damit liefert das Noether-Theorem die Integrale

$$\begin{aligned}I_{\vec{\theta}} &= \sum_{n,i} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{n,i}} \delta_{\vec{\theta}} x_{n,i} = \sum_{n,i} p_{n,i} \sum_{j,k} \epsilon_{ijk} \theta_j x_{n,k} \\ &= \sum_j \theta_j \sum_n \sum_{i,k} \epsilon_{jki} x_{n,k} p_{n,i} = \vec{\theta} \sum_n \vec{L}_n = \vec{\theta} \vec{L}\end{aligned}\quad (3.235)$$

mit dem *Drehimpuls* des n -ten Teilchens

$$\vec{L}_n = \vec{x}_n \times \vec{p}_n \quad (3.236)$$

und dem *erhaltenen* Gesamtdrehimpuls

$$\vec{L} = \sum_n \vec{x}_n \times \vec{p}_n = \text{const.} \quad (3.237)$$

3.8.8 Galilei-Boosts und Schwerpunktsbewegung

Vorlesung 10: Fr, 17. 11. 2021

$$\forall n : \vec{x}_n \mapsto \vec{x}'_n = \vec{x}_n + s \vec{v} t, \quad (3.238)$$

bzw.

$$\delta_{\vec{v}} \vec{x}_n = \vec{v} t \quad (3.239a)$$

$$\delta_{\vec{v}} \dot{\vec{x}}_n = \vec{v} \quad (3.239b)$$

Unter der Annahme, daß die Orte \vec{x}_n wieder *nur als Differenzen* vorkommen finden wir

$$\begin{aligned}\delta_{\vec{v}}L &= \sum_{n,i} \frac{\partial L}{\partial x_{n,i}} \delta_{\vec{v}} x_{n,i} + \sum_{n,i} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{n,i}} \delta_{\vec{v}} \dot{x}_{n,i} \\ &= \sum_i v_i t \underbrace{\sum_n \frac{\partial L}{\partial x_{n,i}}}_{=0} + \sum_i v_i \sum_n p_{n,i} = \vec{v} \sum_n \vec{p}_n. \quad (3.240)\end{aligned}$$

Wenn wir eine „normale“ kinetische Energie in kartesischen Koordinaten

$$T(\dot{\vec{x}}) = \sum_n \frac{m_n}{2} \dot{\vec{x}}_n^2 \quad (3.241)$$

haben, gilt

$$\vec{p}_n = m_n \dot{\vec{x}}_n \quad (3.242)$$

und damit

$$\delta_{\vec{v}}L = \frac{d}{dt} \left(\vec{v} \sum_n m_n \vec{x}_n \right), \quad (3.243)$$

also

$$\Lambda_{\vec{v}} = \vec{v} \sum_n m_n \vec{x}_n \quad (3.244)$$

in der Voraussetzung (3.190) für das Noether-Theorem. Für andere Formen der kinetischen Energie oder für geschwindigkeitsabhängige Potentiale ist diese Voraussetzung *nicht* gegeben. Die resultierenden Integrale sind

$$\begin{aligned}I_{\vec{v}} &= \sum_{n,i} p_{n,i} \delta_{\vec{v}} x_{n,i} - \Lambda_{\vec{v}} = \sum_{n,i} p_{n,i} v_i t - \vec{v} \sum_n m_n \vec{x}_n \\ &= \vec{v} \left(t \sum_n \vec{p}_n - \sum_n m_n \vec{x}_n \right) = \vec{v} \left(t \vec{P} - M \vec{X} \right) = \vec{v} \vec{C} \quad (3.245)\end{aligned}$$

mit dem Gesamtimpuls \vec{P} , der Gesamtmasse

$$M = \sum_n m_n \quad (3.246)$$

und der Lage des Schwerpunkts

$$\vec{X} = \frac{1}{M} \sum_n m_n \vec{x}_n. \quad (3.247)$$

Wir finden also eine „explizit zeitabhängige Erhaltungsgröße“

$$\vec{C} = t\vec{P} - M\vec{X} = \text{const.} \quad (3.248)$$

bzw. die lineare Bewegung des Schwerpunkts

$$\vec{X} = \vec{X}\Big|_{t=0} + t\frac{1}{M}\vec{P} \quad (3.249)$$

als Konsequenz der Invarianz unter Galilei-Boosts.

Im Lehrbuch von Landau und Lifshitz [2] wird übrigens in umgekehrter Richtung argumentiert: damit sich der Schwerpunkt linear bewegt, muß die kinetische Energie in kartesischen Koordinaten die Form (3.241) haben.

3.9 Galilei-Invarianz und Newton'sche Gesetze für nicht konservative Kräfte

System von N wechselwirkenden Massenpunkten

$$\forall n = 1, \dots, N : m_n \ddot{\vec{x}}_n = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) + \vec{F}_{\text{ext},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t) \quad (3.250)$$

mit inneren Kräften \vec{F}_{nm} zwischen den Massenpunkten, die dem 3. Newton'schen Gesetz („actio = reactio“) genügen

$$\forall n, m = 1, \dots, N : \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) = -\vec{F}_{mn}(\vec{x}_m - \vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_m - \dot{\vec{x}}_n, t) \quad (3.251)$$

und äußeren Kräften $\vec{F}_{\text{ext},n}$ auf die Massenpunkte.

Energieerhaltung können wir nur für konservative Kräfte erwarten, die wir im Lagrangeformalismus erschöpfend behandeln können. Für Impuls und Drehimpuls finden wir aber verallgemeinerte Ergebnisse und damit ebenso für die Schwerpunktsbewegung.

3.9.1 Gesamtimpuls und Schwerpunktsbewegung

Dann

$$M\ddot{\vec{X}} = \sum_{n=1}^N m_n \ddot{\vec{x}}_n = \sum_{\substack{n,m=1 \\ m \neq n}}^N \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) + \sum_{n=1}^N \vec{F}_{\text{ext},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{\substack{n,m=1 \\ m>n}}^N \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) + \underbrace{\sum_{\substack{n,m=1 \\ m<n}}^N \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t)}_{\sum_{\substack{n,m=1 \\ m>n}}^N \vec{F}_{mn}(\vec{x}_m - \vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_m - \dot{\vec{x}}_n, t) = -\vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t)} \\
&\quad + \sum_{n=1}^N \vec{F}_{\text{ext.},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t) = \sum_{n=1}^N \vec{F}_{\text{ext.},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t) = \vec{F}_{\text{ext.}}. \quad (3.252)
\end{aligned}$$

Damit ist die Änderung des Gesamtimpulses durch die Summe der *äußeren* Kräfte gegeben

$$M\ddot{\vec{X}} = \frac{d}{dt}\vec{P} = \vec{F}_{\text{ext.}}. \quad (3.253)$$

3.9.2 Gesamtdrehimpuls

Für *Zentralkräfte*

$$\vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) \propto \vec{x}_n - \vec{x}_m \quad (3.254)$$

finden wir

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\vec{L} &= \frac{d}{dt} \sum_{n=1}^N m_n \vec{x}_n \times \dot{\vec{x}}_n = \sum_{n=1}^N m_n \underbrace{\dot{\vec{x}}_n \times \dot{\vec{x}}_n}_{=0} + \sum_{n=1}^N m_n \vec{x}_n \times \ddot{\vec{x}}_n \\
&= \sum_{\substack{n,m=1 \\ m \neq n}}^N \vec{x}_n \times \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) + \sum_{n=1}^N \vec{x}_n \times \vec{F}_{\text{ext.},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t) \\
&= \sum_{\substack{n,m=1 \\ m>n}}^N \underbrace{\left(\vec{x}_n \times \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) + \vec{x}_m \times \vec{F}_{mn}(\vec{x}_m - \vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_m - \dot{\vec{x}}_n, t) \right)}_{(\vec{x}_n - \vec{x}_m) \times \vec{F}_{nm}(\vec{x}_n - \vec{x}_m, \dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m, t) = 0} \\
&\quad + \sum_{n=1}^N \vec{x}_n \times \vec{F}_{\text{ext.},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t) = \sum_{n=1}^N \vec{x}_n \times \vec{F}_{\text{ext.},n}(\vec{x}_n, \dot{\vec{x}}_n, t) = \vec{M}_{\text{ext.}}. \quad (3.255)
\end{aligned}$$

Und die Änderung des Gesamtdrehimpulses ist durch die Summe der äußeren Drehmomente $\vec{x}_n \times \vec{F}_{\text{ext.},n}$ gegeben

$$\frac{d}{dt}\vec{L} = \vec{M}_{\text{ext.}}. \quad (3.256)$$

NB: geschwindigkeitsunabhängige *innere* Kräfte müssen aus Symmetriegründen Zentralkräfte sein, weil $\vec{x}_n - \vec{x}_m$ die einzige ausgezeichnete Richtung ist. Dies gilt *nicht* für geschwindigkeitsabhängige Kräfte, weil auch $\dot{\vec{x}}_n - \dot{\vec{x}}_m$ als Vektor zur Verfügung steht.

—4—

ANWENDUNGEN

4.1 Zweikörperprobleme

Zwei Teilchen m_1 und m_2 unter dem Einfluß eines Potentials, das nur vom Abstandsvektor $\vec{x}_1 - \vec{x}_2$ abhängt:

$$L(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dot{\vec{x}}_1, \dot{\vec{x}}_2, t) = \frac{m_1}{2} \dot{\vec{x}}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{\vec{x}}_2^2 - V(\vec{x}_1 - \vec{x}_2, t) \quad (4.1)$$

Die Galilei-Symmetrien des Problems sind

- die Translationsinvarianz von $\vec{x}_1 - \vec{x}_2$ liefert Gesamtimpulserhaltung

$$\vec{P} = m_1 \dot{\vec{x}}_1 + m_2 \dot{\vec{x}}_2 = \text{const.}, \quad (4.2)$$

- die Galilei-Invarianz der kinetischen Energie und des Potentials liefert

$$\vec{C} = t\vec{P} - M\vec{X} = \text{const.} \quad (4.3)$$

mit

$$M = m_1 + m_2 \quad (4.4a)$$

$$\vec{X} = \frac{m_1 \vec{x}_1 + m_2 \vec{x}_2}{m_1 + m_2}, \quad (4.4b)$$

- falls zusätzlich Rotationsinvarianz vorliegt

$$V(\vec{x}_1 - \vec{x}_2, t) = \tilde{V}(|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|, t), \quad (4.5)$$

dann Gesamtdrehimpulserhaltung

$$\vec{L} = m_1 \vec{x}_1 \times \dot{\vec{x}}_1 + m_2 \vec{x}_2 \times \dot{\vec{x}}_2 = \text{const.} \quad (4.6)$$

(siehe Abschnitt 4.2), und

- falls $\partial V / \partial t = 0$, dann

$$H = \frac{m_1}{2} \dot{\vec{x}}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{\vec{x}}_2^2 + V(\vec{x}_1 - \vec{x}_2) = \text{const.} \quad (4.7)$$

4.1.1 Schwerpunkts- und Relativkoordinaten

Deshalb bietet sich an, neue Koordinaten

$$\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{\xi} \end{pmatrix} = A_x \begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{m_1}{M} & \frac{m_2}{M} \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \end{pmatrix} \quad (4.8a)$$

$$\begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \end{pmatrix} = A_x^{-1} \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{m_2}{M} \\ 1 & -\frac{m_1}{M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\mu}{m_1} \\ 1 & -\frac{\mu}{m_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{\xi} \end{pmatrix} \quad (4.8b)$$

mit der *reduzierten Masse*

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} = \frac{M}{m_1 m_2} \quad (4.9)$$

einzuführen. Damit

$$m_1 \dot{\vec{x}}_1^2 + m_2 \dot{\vec{x}}_2^2 = m_1 \left(\dot{\vec{X}} + \frac{\mu}{m_1} \dot{\vec{\xi}} \right)^2 + m_2 \left(\dot{\vec{X}} - \frac{\mu}{m_2} \dot{\vec{\xi}} \right)^2 = M \dot{\vec{X}}^2 + \mu \dot{\vec{\xi}}^2 \quad (4.10)$$

also

$$L'(\vec{\xi}, \dot{\vec{\xi}}, \dot{\vec{X}}, t) = L(x(\vec{\xi}, \dot{\vec{\xi}}, \dot{\vec{X}}), \dot{x}(\vec{\xi}, \dot{\vec{\xi}}, \dot{\vec{X}}), t) = \frac{M}{2} \dot{\vec{X}}^2 + \frac{\mu}{2} \dot{\vec{\xi}}^2 - V(\vec{\xi}, t). \quad (4.11)$$

Daraus

$$P_i = \frac{\partial L'}{\partial \dot{X}_i} = M \dot{X}_i = m_1 \dot{x}_{1,i} + m_2 \dot{x}_{2,i} = p_{1,i} + p_{2,i} = P_i = \text{const.} \quad (4.12a)$$

$$\pi_i = \frac{\partial L'}{\partial \dot{\xi}_i} = \mu \dot{\xi}_i = \mu \dot{x}_{1,i} - \mu \dot{x}_{2,i} = \frac{\mu}{m_1} p_{1,i} - \frac{\mu}{m_2} p_{2,i}, \quad (4.12b)$$

bzw.

$$\begin{pmatrix} \vec{P} \\ \vec{\pi} \end{pmatrix} = A_p \begin{pmatrix} \vec{p}_1 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \frac{\mu}{m_1} & -\frac{\mu}{m_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{p}_1 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \frac{m_2}{M} & -\frac{m_1}{M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{p}_1 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} \quad (4.13a)$$

$$\begin{pmatrix} \vec{p}_1 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} = A_p^{-1} \begin{pmatrix} \vec{P} \\ \vec{\pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{m_1}{M} & 1 \\ \frac{m_2}{M} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{P} \\ \vec{\pi} \end{pmatrix}. \quad (4.13b)$$

Es ist kein Zufall, daß

$$A_p^T = A_x^{-1} \quad (4.14)$$

gilt, wie im Abschnitt (??) gezeigt werden wird.

Es ergeben sich entkoppelte Bewegungsgleichungen für Schwerpunkts- und Relativbewegung

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = M \ddot{\vec{X}} = 0 \quad (4.15a)$$

$$\mu \ddot{\vec{\xi}} + \vec{\nabla}_{\vec{\xi}} V(\vec{\xi}, t) = 0 \quad (4.15b)$$

und eine effektive Lagrangefunktion für die Relativbewegung allein:

$$L_{\text{rel.}}(\vec{\xi}, \dot{\vec{\xi}}, t) = \frac{\mu}{2} \dot{\vec{\xi}}^2 - V(\vec{\xi}, t). \quad (4.16)$$

4.2 Zentralkraftprobleme

Vorlesung 11: Mo, 20.11.2023

$$F : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^3$$

$$\vec{x} \mapsto \vec{F}(\vec{x}) = \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|} F(|\vec{x}|) \quad (4.17)$$

Mit

$$\begin{aligned} \left[\vec{\nabla} \times \vec{F}(\vec{x}) \right]_i &= \sum_{jk} \epsilon_{ijk} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{x_k}{|\vec{x}|} F(|\vec{x}|) \right) \\ &= \sum_{jk} \epsilon_{ijk} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{x_k}{|\vec{x}|} \right) F(|\vec{x}|) + \sum_{jk} \epsilon_{ijk} \frac{x_k}{|\vec{x}|} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} F(|\vec{x}|) \right) \\ &= \sum_{jk} \epsilon_{ijk} \left(\frac{\delta_{jk}}{|\vec{x}|} - \frac{x_j x_k}{|\vec{x}|^3} \right) F(|\vec{x}|) + \sum_{jk} \epsilon_{ijk} \frac{x_j x_k}{|\vec{x}|^2} F'(|\vec{x}|) = 0, \end{aligned} \quad (4.18)$$

wegen der Antisymmetrie von ϵ , sehen wir, daß *jedes* geschwindigkeitsunabhängige Zentralkraftfeld F konservativ ist

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = 0. \quad (4.19)$$

Ein geeignetes Potential ist

$$V(\vec{x}) = \tilde{V}(|\vec{x}|) = - \int^{|\vec{x}|} d\xi F(\xi) \quad (4.20)$$

weil

$$-\vec{\nabla} V(\vec{x}) = F(|\vec{x}|) \vec{\nabla} |\vec{x}| = F(|\vec{x}|) \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|} \quad (4.21)$$

auch dann, wenn \vec{F} am Ursprung eine Singularität hat. Wir können also o. B. d. A. den Lagrangeformalismus benutzen.

4.2.1 Drehimpuls

Aus der Rotationsinvarianz der Lagrangefunktion wissen wir, daß der Drehimpuls

$$\vec{L} = m\vec{x} \times \dot{\vec{x}} = \text{const.} \quad (4.22)$$

erhalten ist. Außerdem folgt aus der Antisymmetrie des Vektorprodukts

$$\vec{x}\vec{L} = 0 \quad (4.23a)$$

$$\dot{\vec{x}}\vec{L} = 0 \quad (4.23b)$$

und wir sehen, daß die Bewegung in der *konstanten* Ebene senkrecht zu \vec{L} verläuft. Wir dürfen also o. B. d. A. ein Koordinatensystem mit

$$\vec{L} = |\vec{L}|\vec{e}_3 \quad (4.24)$$

und $\vec{x}, \dot{\vec{x}}$ in der x_1 - x_2 -Ebene wählen, für die wir wegen der Symmetrie Polarkoordinaten (r, ϕ) benutzen

$$L(r, \phi, \dot{r}, \dot{\phi}) = \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2) - V(r). \quad (4.25)$$

Daraus ergeben sich wie auf Seite 43 in Abschnitt 3.6.1 die ELG

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} - \frac{\partial L}{\partial r} = m\ddot{r} - mr\dot{\phi}^2 + \frac{dV}{dr}(r) = 0 \quad (4.26a)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} - \frac{\partial L}{\partial \phi} = m \frac{d}{dt} (r^2 \dot{\phi}) = 0. \quad (4.26b)$$

Wir sehen wieder die Konstanz des Betrages des Drehimpulses

$$|\vec{L}| = p_\phi = mr^2 \dot{\phi} \quad (4.27)$$

und erhalten zu jedem vorgegebenen p_ϕ ein eindimensionales Problem

$$m\ddot{r} - \frac{p_\phi^2}{mr^3} + \frac{dV}{dr}(r) = 0. \quad (4.28)$$

Mit effektivem Potential

$$V_{\text{eff.}, p_\phi}(r) = V(r) + \frac{p_\phi^2}{2mr^2} \quad (4.29)$$

(vgl. Abb. 3.3), also

$$m\ddot{r} + \frac{dV_{\text{eff.}, p_\phi}}{dr}(r) = 0, \quad (4.30)$$

was mittels Energieerhaltung

$$E = \frac{m}{2}\dot{r}^2 + V_{\text{eff.},p_\phi}(r) = \frac{m}{2}\dot{r}^2 + \frac{p_\phi^2}{2mr^2} + V(r) = \text{const.} \quad (4.31)$$

integriert werden kann.

Aus

$$\left| \frac{dr}{dt} \right| = \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{E - V(r) - \frac{p_\phi^2}{2mr^2}} \quad (4.32)$$

folgt durch Trennung der Veränderlichen

$$\int_{t_0}^{t_1} dt = \pm \int_{r(t_0)}^{r(t_1)} \frac{m dr}{\sqrt{2m(E - V(r)) - p_\phi^2/r^2}}. \quad (4.33)$$

Wenn man zunächst nur an der Form der Bahn interessiert ist, kann man t durch ϕ ersetzen

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{p_\phi}{mr^2}, \quad (4.34)$$

also

$$\begin{aligned} \frac{dr}{d\phi} &= \frac{mr^2}{p_\phi} \frac{dr}{dt} = \pm \frac{mr^2}{p_\phi} \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{E - V(r) - \frac{p_\phi^2}{2mr^2}} \\ &= \pm r \sqrt{2mr^2(E - V(r))/p_\phi^2 - 1}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Je nach Form von V , bzw. $V_{\text{eff.}}$ gibt es, in Abhängigkeit von p_ϕ , gebundene Bahnen vs. Entweichbahnen:

- $\lim_{r \rightarrow \infty} V_{\text{eff.}}(r) = \lim_{r \rightarrow \infty} V(r) = +\infty$: es gibt keine Trajektorie, die ins Unendliche entweichen kann,
- $V_{\text{eff.}}$ hat Extrema: es gibt Kreisbahnen,
- $V_{\text{eff.}}$ hat lokale Minima: es gibt für geeignete Energien und Drehimpulse periodische Bahnen zwischen r_{\min} und r_{\max} mit $V_{\text{eff.}}(r_{\min/\max}) = E$, die nicht notwendig geschlossen sind (vgl. Abbildung 4.3),
- $\lim_{r \rightarrow 0} V_{\text{eff.},p_\phi}(r) < +\infty$: es gibt Bahnen, die das Zentrum erreichen.

4.2.2 Isotroper Harmonischer Oszillator

$$L = \frac{m}{2}\dot{\vec{x}}^2 - \frac{k}{2}\vec{x}^2 = \frac{m}{2}\dot{\vec{x}}^2 - \frac{m}{2}\omega^2\vec{x}^2 \quad (4.36)$$

ELG

$$\ddot{\vec{x}} + \omega^2\vec{x} = 0 \quad (4.37)$$

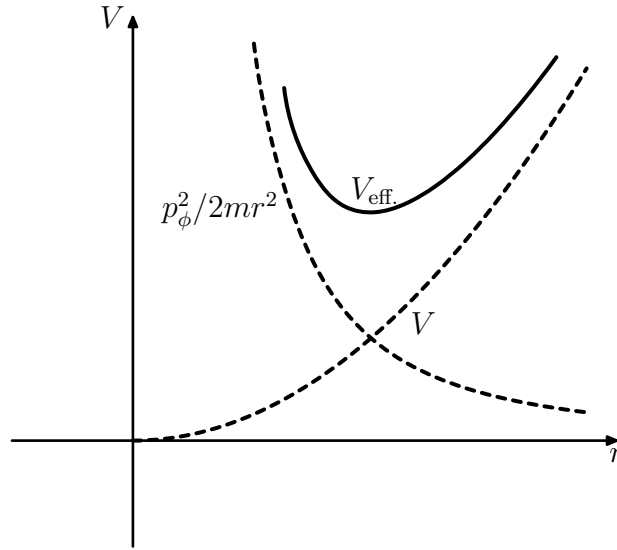


Abbildung 4.1: *Effektives Potential für $V(r) = m\omega^2 r^2/2$.*

Entkoppelte kartesische Koordinaten

Weil

$$L = \frac{m}{2} \dot{x}_1^2 - \frac{m}{2} \omega^2 x_1^2 + \frac{m}{2} \dot{x}_2^2 - \frac{m}{2} \omega^2 x_2^2 + \frac{m}{2} \dot{x}_2^2 - \frac{m}{2} \omega^2 x_2^2 \quad (4.38)$$

sind the **ELG** entkoppelt

$$\forall i = 1, 2, 3 : \ddot{x}_i + \omega^2 x_i = 0 \quad (4.39)$$

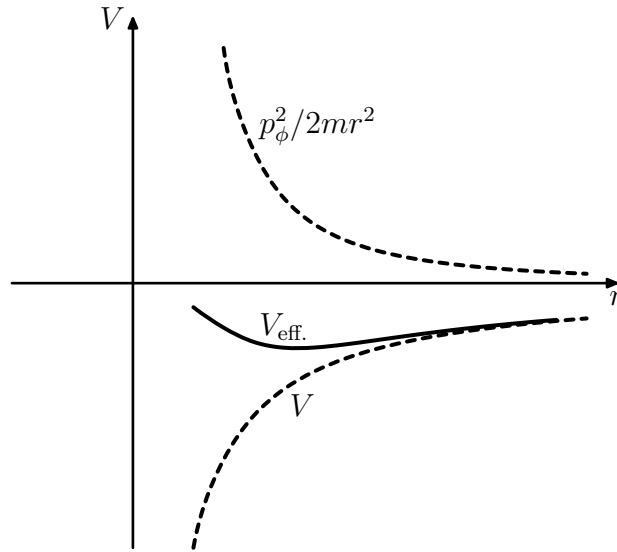
und wir finden unabhängige Lösungen durch Exponentialansatz

$$x_i(t) = x_i(0) \cos(\omega t) + \frac{\dot{x}_i(0)}{\omega} \sin(\omega t) \quad (4.40)$$

oder durch Integration mittels Energieerhaltung für jede Richtung unabhängig von den anderen

$$\forall i = 1, 2, 3 : H_i = \frac{m}{2} \dot{x}_i^2 + \frac{m}{2} \omega^2 x_i^2 = \text{const.} \quad (4.41)$$

wie in (2.66).

Abbildung 4.2: Effektives Potential für $V(r) = -\alpha/r$.

Sphärische Polarkoordinaten

Wegen der Rotationsinvarianz von

$$V(r) = \frac{m}{2}\omega^2 r^2 \quad (4.42)$$

haben wir Drehimpulserhaltung und wir können Polarkoordinaten in der Ebene orthogonal zu \vec{L} wählen. (4.42) in die Gleichung für die Bahnkurve (4.35) eingesetzt ergibt

$$\frac{dr}{d\phi} = \pm r \sqrt{2mr^2(E - m\omega^2 r^2/2)/p_\phi^2 - 1} \quad (4.43)$$

und nach Trennung der Variablen

$$\int d\phi = \pm \int \frac{dr/r}{\sqrt{2mr^2(E - m\omega^2 r^2/2)/p_\phi^2 - 1}} \quad (4.44)$$

und Substitution $u = 1/r^2$, $dr/r = -1/2 \cdot du/u$

$$\int d\phi = \mp \frac{1}{2} \int \frac{du}{\sqrt{m(2Eu - m\omega^2)/p_\phi^2 - u^2}} \quad (4.45)$$

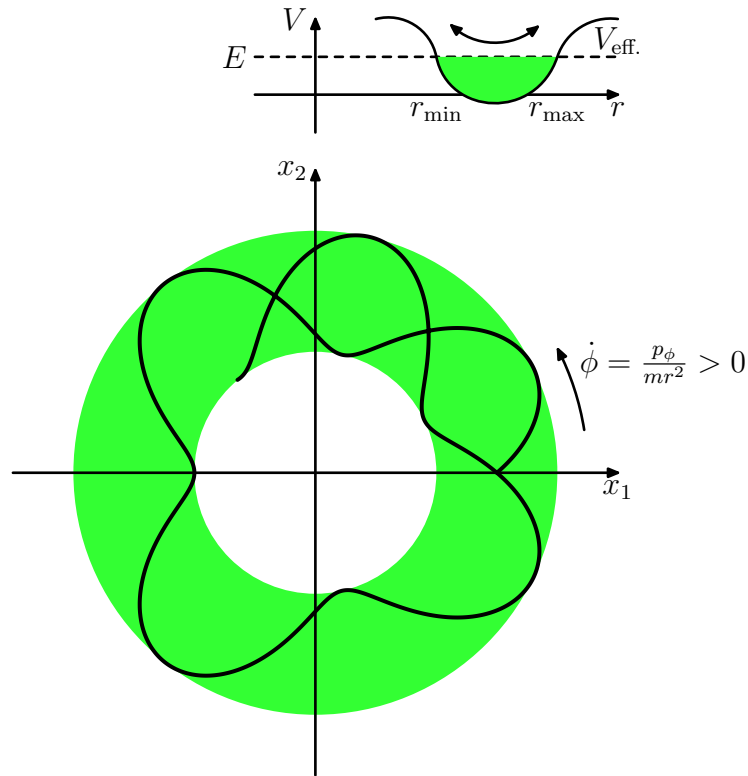


Abbildung 4.3: Periodische Bahn, die nicht geschlossen ist.

kann man die Integralformel

$$\int \frac{du}{\sqrt{au^2 + bu + c}} = -\frac{1}{\sqrt{-a}} \arcsin \frac{2au + b}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \quad \text{für } a < 0, b^2 > 4ac \quad (4.46)$$

mit

$$a = -1 \quad (4.47a)$$

$$b = \frac{2mE}{p_\phi^2} \quad (4.47b)$$

$$c = -\frac{m^2\omega^2}{p_\phi^2} \quad (4.47c)$$

$$b^2 - 4ac = \frac{4m^2E^2}{p_\phi^4} - \frac{4m^2\omega^2}{p_\phi^2} = \frac{4m^2}{p_\phi^4} (E^2 - \omega^2 p_\phi^2) > 0 \quad (4.47d)$$

verwenden:

$$\tilde{\phi}(u) = \phi_0 \pm \frac{1}{2} \arcsin \frac{-2u + 2mE/p_\phi^2}{\frac{2m}{p_\phi^2} \sqrt{E^2 - \omega^2 p_\phi^2}}. \quad (4.48)$$

Zusatzmaterial (nicht in der Vorlesung besprochen):

Die Gesamtenergie ist nach unten durch das Minimum des effektiven Potentials beschränkt

$$E = \frac{m}{2} \dot{r}^2 + V_{\text{eff.}, p_\phi}(r) \geq V_{\text{eff.}, p_\phi}(r_{\min}) = \frac{p_\phi^2}{2mr_{\min}^2} + V(r_{\min}), \quad (4.49)$$

wobei r_{\min} durch

$$0 = \left. \frac{dV_{\text{eff.}, p_\phi}(r)}{dr} \right|_{r=r_{\min}} = -\frac{p_\phi^2}{mr_{\min}^3} + m\omega^2 r_{\min} \quad (4.50)$$

festgelegt ist. Also

$$r_{\min}^2 = \frac{p_\phi}{m\omega} \quad (4.51)$$

und damit

$$V_{\text{eff.}, p_\phi}(r_{\min}) = \omega p_\phi, \quad (4.52)$$

also

$$E \geq \omega p_\phi. \quad (4.53)$$

Anschließende Rücksubstitution

$$\phi(r) = \tilde{\phi}(u(r)) = \phi_0 \pm \frac{1}{2} \arcsin \frac{1 - p_\phi^2/(mEr^2)}{\sqrt{1 - \omega^2 p_\phi^2/E^2}} \quad (4.54)$$

und Umkehrung

$$\pm \sqrt{1 - \omega^2 p_\phi^2/E^2} \sin(2(\phi - \phi_0)) = 1 - \frac{p_\phi^2}{mEr^2} \quad (4.55)$$

ergibt

$$r(\phi) = \frac{p_\phi}{\sqrt{mE}} \frac{1}{\sqrt{1 \mp \sqrt{1 - \omega^2 p_\phi^2/E^2} \sin(2(\phi - \phi_0))}}, \quad (4.56)$$

also eine Ellipse mit Exzentrizität $\sqrt{1 - \omega^2 p_\phi^2/E^2}$!

Zusatzmaterial (nicht in der Vorlesung besprochen):

Die Ellipsengleichung in kartesischen Koordinaten

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (4.57)$$

liefert in Polarkoordinaten

$$\left(\frac{r \cos \phi}{a}\right)^2 + \left(\frac{r \sin \phi}{b}\right)^2 = 1, \quad (4.58)$$

bzw.

$$r^2 b^2 \cos^2 \phi + r^2 a^2 \sin^2 \phi = a^2 b^2 \quad (4.59)$$

oder

$$r(\phi) = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi}}. \quad (4.60)$$

Mit

$$\begin{aligned} b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi &= b^2 + (a^2 - b^2) \sin^2 \phi \\ &= b^2 + \frac{a^2 - b^2}{2} (1 - \cos 2\phi) = \frac{a^2 + b^2}{2} - \frac{a^2 - b^2}{2} \cos 2\phi \end{aligned} \quad (4.61)$$

folgt dann die Form (4.56)

$$r(\phi) = \frac{\sqrt{2}ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} \cos 2\phi}} \quad (4.62)$$

mit geeigneten a und b .

4.2.3 Kepler Problem

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} \quad (4.63)$$

Die Wechselwirkung ist anziehend für $\alpha > 0$ und abstoßend für $\alpha < 0$ (siehe Abbildung 4.4). Wichtige Beispiele:

- gravitative Anziehung zwischen Punktmassen (Planeten, Monde, etc.):

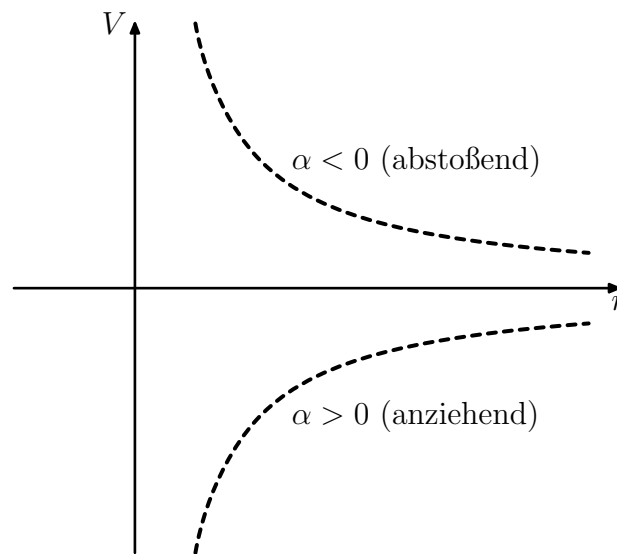
$$\alpha = Gm_1 m_2, \quad (4.64)$$

- elektrostatische Anziehung oder Abstoßung von Punktladungen $Q_{1/2}$:
In geeigneten Einheiten gilt

$$\alpha = -Q_1 Q_2. \quad (4.65)$$

Die zugehörigen ELG in kartesischen Koordinaten sind

$$m\ddot{\vec{x}} + \alpha \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|^3} = 0. \quad (4.66)$$

Abbildung 4.4: Anziehende und abstoßende $1/r$ -Wechselwirkungen.

Kepler-Gesetze

Vorlesung 12: Fr, 24. 11. 2023

Johannes Kepler fand rein *empirisch* (1609, 1619), ohne Betrachtung der Dynamik:

1. *die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht,*
2. *ein von der Sonne zum Planeten gezogener „Fahrstrahl“ überstreicht in gleichen Zeiten gleich große Flächen,*
3. *die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen (Kuben) der großen Bahnhalbachsen.*

Das 2. Gesetz ist die Drehimpulserhaltung und gilt für *alle* Zentralkräfte. Die Fläche zwischen ϕ_0 und $\phi(t)$ ist

$$A(t) = \int_{\phi_0}^{\phi(t)} d\phi' \int_0^{r(\phi')} \rho d\rho = \int_{\phi_0}^{\phi(t)} d\phi' \frac{r^2(\phi')}{2} \quad (4.67)$$

also ist die Flächengeschwindigkeit

$$\frac{dA}{dt}(t) = \frac{r^2(\phi(t))}{2} \frac{d\phi}{dt}(t) = \frac{r^2 \dot{\phi}}{2} = \frac{|\vec{L}|}{2m} = \text{const.} \quad (4.68)$$

Sphärische Polarkoordinaten

Wegen der Rotationsinvarianz von (4.63) haben wir Drehimpulserhaltung und können wieder Polarkoordinaten in der Ebene orthogonal zu \vec{L} wählen. (4.63) in die Gleichung für die Bahnkurve (4.35) eingesetzt ergibt

$$\frac{dr}{d\phi} = \pm r \sqrt{2mr^2(E + \alpha/r)/p_\phi^2 - 1}. \quad (4.69)$$

Nach Trennung der Variablen

$$\int d\phi = \pm \int \frac{dr/r}{\sqrt{2mr^2(E + \alpha/r)/p_\phi^2 - 1}} \quad (4.70)$$

und Substitution $u = 1/r$, $dr/r = -du/u$

$$\begin{aligned} \int d\phi &= \mp \int \frac{du/u}{\sqrt{2m/u^2(E + \alpha u)/p_\phi^2 - 1}} \\ &= \mp \int \frac{du}{\sqrt{2m(E + \alpha u)/p_\phi^2 - u^2}} \end{aligned} \quad (4.71)$$

kann man wieder die Integralformel

$$\int \frac{du}{\sqrt{au^2 + bu + c}} = -\frac{1}{\sqrt{-a}} \arcsin \frac{2au + b}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \quad \text{für } a < 0, b^2 > 4ac \quad (4.72)$$

diesmal mit

$$a = -1 \quad (4.73a)$$

$$b = \frac{2m\alpha}{p_\phi^2} \quad (4.73b)$$

$$c = \frac{2mE}{p_\phi^2} \quad (4.73c)$$

$$b^2 - 4ac = \frac{4m^2\alpha^2}{p_\phi^4} + \frac{8mE}{p_\phi^2} = \frac{4m^2\alpha^2}{p_\phi^4} \left(1 + \frac{2Ep_\phi^2}{m\alpha^2}\right) = \frac{4m^2\alpha^2}{p_\phi^4} e^2 > 0 \quad (4.73d)$$

und der Exzentrizität

$$e = +\sqrt{1 + \frac{2Ep_\phi^2}{m\alpha^2}} \quad (4.74)$$

verwenden:

$$\tilde{\phi}(u) = \phi_0 \mp \arcsin \frac{-2u + 2m\alpha/p_\phi^2}{\frac{2m|\alpha|}{p_\phi^2} e}. \quad (4.75)$$

Zusatzmaterial (nicht in der Vorlesung besprochen):

Die Gesamtenergie ist nach unten wieder durch das Minimum des effektiven Potentials beschränkt

$$E \geq V_{\text{eff.},p_\phi}(r_{\min}), \quad (4.76)$$

wobei r_{\min} für $\alpha > 0$ durch

$$0 = \left. \frac{dV_{\text{eff.},p_\phi}}{dr}(r) \right|_{r=r_{\min}} = -\frac{p_\phi^2}{mr_{\min}^3} + \frac{\alpha}{r_{\min}^2} \quad (4.77)$$

festgelegt ist. Also

$$r_{\min} = \frac{p_\phi^2}{m\alpha} \quad (4.78)$$

und damit

$$V_{\text{eff.},p_\phi}(r_{\min}) = -\frac{m\alpha^2}{2p_\phi^2}, \quad (4.79)$$

also

$$E \geq -\frac{m\alpha^2}{2p_\phi^2}. \quad (4.80)$$

Im Fall $\alpha \leq 0$ gilt natürlich $E \geq 0$.

Anschließende Rücksubstitution

$$\phi(r) = \tilde{\phi}(u(r)) = \phi_0 \mp \arcsin \frac{\text{sgn } \alpha - p_\phi^2/(m|\alpha|r)}{e} \quad (4.81)$$

mit der Vorzeichenfunktion

$$\text{sgn}(x) = \frac{x}{|x|} = \begin{cases} +1 & \text{für } x > 0 \\ -1 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (4.82)$$

und Umkehrung

$$\pm e \sin(\phi - \phi_0) = -e \cos \phi = \text{sgn } \alpha - \frac{p_\phi^2}{m|\alpha|r}, \quad (4.83)$$

mit $\phi_0 = \pm\pi/2$, ergibt

$$r(\phi) = \frac{p_\phi^2}{m|\alpha|} \frac{1}{\text{sgn } \alpha + e \cos \phi}. \quad (4.84)$$

Kegelschnitte

Gleichung (4.84) beschreibt Kegelschnitte in Polarkoordinaten, wie in Abbildung 4.5 dargestellt.

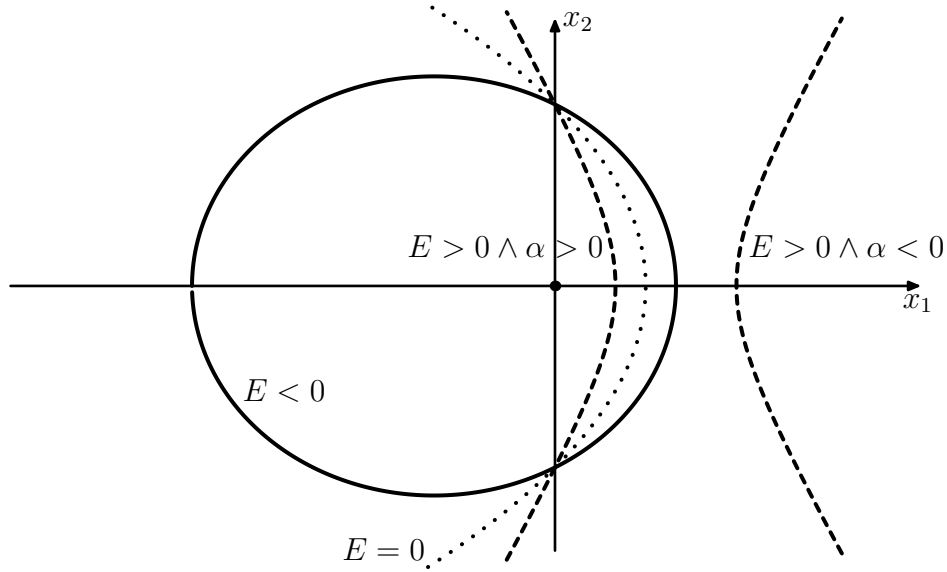


Abbildung 4.5: Kegelschnitte.

Mit dem *semi-latus rectum*

$$l = \frac{p_\phi^2}{m|\alpha|} \quad (4.85)$$

können wir

$$r = \frac{l}{\operatorname{sgn} \alpha + e \cos \phi} \quad (4.86)$$

oder

$$r \operatorname{sgn} \alpha = l - er \cos \phi \quad (4.87)$$

schreiben und in kartesischen Koordinaten

$$\sqrt{x^2 + y^2} \operatorname{sgn} \alpha = l - ex, \quad (4.88)$$

bzw.

$$(1 - e^2) x^2 + y^2 = l^2 - 2lex. \quad (4.89)$$

Für $e = 1$ finden wir daraus eine Parabel

$$y^2 = l^2 - 2lx. \quad (4.90)$$

Mit den Definitionen

$$a = \frac{l}{1 - e^2} \quad (4.91a)$$

$$b^2 = \frac{l^2}{1 - e^2} \quad (4.91b)$$

$$c = ea \quad (4.91c)$$

finden wir für $e \neq 1$ mit $b^2 > 0$ eine Ellipse (bzw. Kreis) oder mit $b^2 < 0$ eine Hyperbel

$$1 \stackrel{!}{=} \frac{(x+c)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{(1-e^2)^2}{l^2} (x+ea)^2 + \frac{1-e^2}{l^2} y^2. \quad (4.92)$$

In der Tat gilt

$$\begin{aligned} \frac{l^2}{1-e^2} &\stackrel{!}{=} (1-e^2) (x+ea)^2 + y^2 \\ &\stackrel{(4.89)}{=} (1-e^2) (x^2 + 2eax + e^2a^2) - (1-e^2) x^2 + l^2 - 2lex \\ &\stackrel{(4.91a)}{=} (2lex + le^2a) + l^2 - 2lex = le^2a + l^2 \stackrel{(4.91a)}{=} l^2 \frac{e^2}{1-e^2} + l^2 = \frac{l^2}{1-e^2}. \end{aligned} \quad (4.93)$$

Die Form der Kegelschnitte hängt also von der konstanten Gesamtenergie E ab (vgl. (4.74)):

- $E < 0 \Rightarrow e < 1$: Ellipse, also gebundene periodische Bahn, nur für Anziehung $\alpha > 0$ möglich, weil sonst $E > 0$,
- $E = 0 \Rightarrow e = 1$: Parabel, also ungebundene Bahn, ebenfalls nur für Anziehung $\alpha > 0$ möglich, weil sonst $E > 0$,
- $E > 0 \Rightarrow e > 1$: Hyperbel, ebenfalls ungebunden, für *beide Vorzeichen* von α , also anziehendes und abstoßendes Potential.

Wir finden das 1. Kepler'sche Gesetz, weil die einzigen gebundenen Bahnen Ellipsen sind.

Deren Fläche ist

$$A = \pi ab = \pi \sqrt{a^3 l} = a^{\frac{3}{2}} \frac{\pi p_\phi}{\sqrt{m|\alpha|}} \quad (4.94)$$

und aufgrund der konstanten Flächengeschwindigkeit (4.68) gilt für die Umlaufzeit

$$T = \frac{A}{\frac{dA}{dt}} = a^{\frac{3}{2}} \frac{\pi p_\phi}{\sqrt{m|\alpha|}} \frac{2m}{p_\phi} = a^{\frac{3}{2}} 2\pi \sqrt{\frac{m}{|\alpha|}}. \quad (4.95)$$

also das 3. Kepler'sche Gesetz

$$T^2 \propto a^3. \quad (4.96)$$

Bemerkung 4.1. Im Grenzfall $\alpha \rightarrow 0$ findet man

$$r(\phi) = \frac{p_\phi}{\sqrt{2mE}} \frac{1}{\cos \phi}, \quad (4.97)$$

was natürlich eine Gerade mit $x = r \cos \phi = \text{const.}$ beschreibt. Diese hat den Abstand

$$r(0) = \frac{p_\phi}{\sqrt{2mE}} = \frac{|\vec{L}|}{|\vec{p}|} = r_{\min} \quad (4.98)$$

vom Zentrum.

4.2.4 Existenz von geschlossenen Bahnen

Für *alle* anziehenden Zentralpotentiale, die für $r \rightarrow 0$ nicht schneller als $-1/r^2$ abfallen, kann $p_\phi = |\vec{L}|$ so eingestellt werden, daß wegen

$$\left. \frac{dV_{\text{eff}, p_\phi}}{dr} \right|_{r=r_0} = 0 \quad (4.99)$$

Kreisbahnen mit Radius r_0 eine Lösung sind. Unter kleinen Störungen der Anfangsbedingungen entstehen periodische Bewegungen in r , die im allgemeinen *nicht* zu geschlossenen Bahnen führen, weil die Perioden in r und ϕ nicht zueinander passen.

Theorem 4.2 (Bertrand, 1873). *Das Kepler-Problem und der harmonische Oszillator sind die beiden einzigen Zentralpotentiale im \mathbf{R}^3 für die alle beschränkten Bahnen geschlossen sind.*

4.2.5 Geometrische Lösung für den harmonischen Oszillator und das Keplerproblem

Fradkin-Tensor

Der Phasenraum des isotropen harmonischen Oszillators $TQ = \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3$ hat 6 Dimensionen und mit 4 Erhaltungsgrößen aus der Galilei-Gruppe

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0 \Rightarrow H = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 + \frac{m}{2} \omega^2 \vec{x}^2 = \text{const.} \quad (4.100a)$$

$$\delta_{\vec{p}} L = 0 \Rightarrow \vec{L} = m \vec{x} \times \dot{\vec{x}} = \text{const.} \quad (4.100b)$$

Es gibt aber weitere Noether-Symmetrien, die durch einen konstanten und symmetrischen Tensor $\phi_{ij} = \phi_{ji}$ parameterisiert sind

$$\delta_\varphi \vec{x} = \varphi \dot{\vec{x}} \quad (4.101a)$$

und damit

$$\delta_\varphi \dot{\vec{x}} = \varphi \ddot{\vec{x}}, \quad (4.101b)$$

bzw. komponentenweise

$$\delta_\varphi x_i = \sum_{j=1}^3 \varphi_{ij} \dot{x}_j \quad (4.102a)$$

$$\delta_\varphi \dot{x}_i = \sum_{j=1}^3 \varphi_{ij} \ddot{x}_j. \quad (4.102b)$$

In den Übungsgruppen, nicht in der Vorlesung besprochen:

Daraus folgt

$$\begin{aligned} \delta_\varphi L &= \sum_i \frac{\partial L}{\partial x_i} \delta_\varphi x_i + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \delta_\varphi \dot{x}_i = - \sum_{ij} m \omega^2 x_i \varphi_{ij} \dot{x}_j + \sum_{ij} m \dot{x}_i \varphi_{ij} \ddot{x}_j \\ &= \sum_{ij} \varphi_{ij} m (\dot{x}_i \ddot{x}_j - \omega^2 x_i \dot{x}_j) = \underbrace{\frac{d}{dt} \sum_{ij} \varphi_{ij} \frac{m}{2} (\dot{x}_i \dot{x}_j - \omega^2 x_i x_j)}_{\Lambda_\varphi(\vec{x}, \dot{\vec{x}})} \quad (4.103) \end{aligned}$$

und die zugehörigen Integrale¹

$$\begin{aligned} I_\varphi &= \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \delta_\varphi x_i - \Lambda_\varphi(\vec{x}, \dot{\vec{x}}) = \sum_{ij} m \dot{x}_i \varphi_{ij} \dot{x}_j - \sum_{ij} \varphi_{ij} \frac{m}{2} (\dot{x}_i \dot{x}_j - \omega^2 x_i x_j) \\ &= \sum_{ij} \varphi_{ij} \frac{m}{2} (\dot{x}_i \dot{x}_j + \omega^2 x_i x_j) = \sum_{ij} \varphi_{ij} F_{ij} \quad (4.104) \end{aligned}$$

mit den

Komponenten des *Fradkin-Tensor*

$$F_{ij} = \frac{m}{2} (\dot{x}_i \dot{x}_j + \omega^2 x_i x_j) = F_{ji}, \quad (4.105)$$

Vorlesung 13: Mo, 27. 11. 2023

deren Konstanz entlang von Lösungen auch direkt nachgewiesen werden kann

$$\begin{aligned} \frac{dF_{ij}}{dt} &= \frac{m}{2} (\ddot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_i \ddot{x}_j + \omega^2 \dot{x}_i x_j + \omega^2 x_i \dot{x}_j) \\ &= \frac{m}{2} (\ddot{x}_i + \omega^2 x_i) \dot{x}_j + \frac{m}{2} \dot{x}_i (\ddot{x}_j + \omega^2 x_j) = 0. \quad (4.106) \end{aligned}$$

Allerdings sind höchstens 5 der 6 unabhängigen Komponenten neu

$$H = \text{tr } F = F_{11} + F_{22} + F_{33}. \quad (4.107)$$

Man kann nun zeigen, daß F die zugehörige Bahn vollständig festlegt. Mit

$$\sum_{ij} x_i F_{ij} x_j = \frac{m}{2} \left(\left(\vec{x} \dot{\vec{x}} \right)^2 + \omega^2 (\vec{x}^2)^2 \right) \quad (4.108)$$

und

$$\sum_i x_i H x_i = \frac{m}{2} \left(\vec{x}^2 \dot{\vec{x}}^2 + \omega^2 (\vec{x}^2)^2 \right) \quad (4.109)$$

sowie

$$\vec{L}^2 = \sum_i L_i L_i = m^2 \sum_{jkj'k'} \underbrace{\sum_i \epsilon_{ijk} \epsilon_{ij'k'}}_{\delta_{jj'} \delta_{kk'} - \delta_{jk'} \delta_{kj'}} x_j \dot{x}_k x_{j'} \dot{x}_{k'} = m^2 \vec{x}^2 \dot{\vec{x}}^2 - m^2 \left(\vec{x} \dot{\vec{x}} \right)^2 \quad (4.110)$$

folgt

$$\sum_{ij} x_i (H \delta_{ij} - F_{ij}) x_j = \frac{1}{2m} \vec{L}^2 > 0. \quad (4.111)$$

Dies bedeutet, daß die Matrix

$$E = H \mathbf{1} - F \quad (4.112)$$

positiv ist. Deshalb ist (4.111) die Gleichung für ein Ellipsoid mit den Halbachsen

$$a_i = \sqrt{\frac{\vec{L}^2}{2m\kappa_i}}, \quad (4.113)$$

wobei $\kappa_{1,2,3}$ die Eigenwerte von E bezeichnen.

Sowohl F als auch E sind symmetrische Matrizen und haben einen vollständigen Satz von orthogonalen Eigenvektoren. Wegen

$$\sum_j F_{ij} L_j = 0 \quad (4.114)$$

ist \vec{L} Eigenvektor zum Eigenwert 0. Wir wählen nun o. B. d. A. ein Koordinatensystem mit

$$\vec{L} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L_3 \end{pmatrix} \quad (4.115a)$$

$$F = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 \\ F_{21} & F_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.115b)$$

und finden die verbleibenden Eigenwerte mit

$$\det(f - \lambda \mathbf{1}) = (f_{11} - \lambda)(f_{22} - \lambda) - f_{12}^2 = \lambda^2 - \lambda \operatorname{tr} f + \det f \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.116)$$

wobei

$$f = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}. \quad (4.117)$$

Das Ergebnis ist

$$\lambda_{1/2} = \frac{1}{2} \operatorname{tr} f \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\operatorname{tr} f)^2 - 4 \det f} = \frac{1}{2} \operatorname{tr} f \pm \frac{1}{2} \Delta \quad (4.118a)$$

$$\lambda_3 = 0. \quad (4.118b)$$

Daraus erhalten wir die Eigenwerte von E als $\kappa_{1,2,3} = H - \lambda_{1,2,3}$, bzw.

$$\kappa_{1/2} = \frac{1}{2} H \mp \frac{1}{2} \Delta \quad (4.119a)$$

$$\kappa_3 = H. \quad (4.119b)$$

Hieraus kann man nicht direkt ablesen, ob alle κ_i positiv sind. Aber aus

$$F_{12}^2 = \frac{m^2}{4} (\dot{x}_1^2 \dot{x}_2^2 + 2\omega^2 x_1 x_2 \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \omega^4 x_1^2 x_2^2) \quad (4.120a)$$

$$F_{11} F_{22} = \frac{m^2}{4} (\dot{x}_1^2 \dot{x}_2^2 + \omega^2 x_1^2 \dot{x}_2^2 + \omega^2 x_2^2 \dot{x}_1^2 + \omega^4 x_1^2 x_2^2) \quad (4.120b)$$

folgt

$$\begin{aligned} \det f = F_{11} F_{22} - F_{12}^2 &= \frac{m^2 \omega^2}{4} (x_1^2 \dot{x}_2^2 + x_2^2 \dot{x}_1^2 - 2x_1 x_2 \dot{x}_1 \dot{x}_2) \\ &= \frac{m^2 \omega^2}{4} (x_1 \dot{x}_2 - x_2 \dot{x}_1)^2 = \frac{\omega^2}{4} L_3^2 \end{aligned} \quad (4.121)$$

und damit

$$\Delta^2 = (\operatorname{tr} f)^2 - 4 \det f = H^2 - \omega^2 L_3^2. \quad (4.122)$$

Unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems gilt somit

$$\Delta^2 = H^2 - \omega^2 \vec{L}^2 \quad (4.123)$$

weil wir ein System mit $F_{33} = 0$ und $L_1 = L_2 = 0$ ausgewählt haben, die Eigenwerte aber unabhängig vom Koordinatensystem sein müssen. Damit finden wir

$$\kappa_{1/2} = \frac{1}{2} (H \mp \Delta) = \frac{H}{2} \left(1 \mp \sqrt{1 - \frac{\omega^2 \vec{L}^2}{H^2}} \right) \geq 0 \quad (4.124a)$$

$$\kappa_3 = H > 0. \quad (4.124b)$$

Außerdem können wir

$$\omega^2 \vec{L}^2 \leq H^2 \quad (4.125)$$

schließen, vgl. (4.53), weil es sonst imaginäre Eigenwerte gäbe.

Die Bahnen sind also Ellipsen, die sich aus dem Schnitt des Ellipsoids (4.111) mit der zu \vec{L} orthogonalen Ebene mit den Halbachsen

$$a_{1,2}^2 = \frac{\vec{L}^2}{m \left(H \mp \sqrt{H^2 - \omega^2 \vec{L}^2} \right)} \quad (4.126)$$

ergeben. Extremfälle:

- $\omega^2 \vec{L}^2 = H^2$: Kreis mit $\kappa_1 = \kappa_2 = H/2$ und $a_1^2 = a_2^2 = \vec{L}^2/(mH)$,
- $\omega^2 \vec{L}^2 \rightarrow 0$: entartete Ellipse mit $\kappa_1 \rightarrow 0$, $\kappa_2 \rightarrow H$ und $a_1^2 \rightarrow 2H/(m\omega^2)$, $a_2^2 \rightarrow \vec{L}^2/(2mH) \rightarrow 0$

Die Geschwindigkeiten \dot{x}_i sind komponentenweise durch die Konstanz der Diagonalelemente

$$F_{ii} = \frac{m}{2} (\dot{x}_i^2 + \omega^2 x_i^2) \quad (4.127)$$

aus den Orten x_i festgelegt.

Runge-Lenz-Vektor

Der Phasenraum des Keplerproblems $TQ = \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^3$ hat wieder 6 Dimensionen und 4 Erhaltungsgrößen aus der Galilei-Gruppe

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0 \Rightarrow H = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 - \frac{\alpha}{|\vec{x}|} = \text{const.} \quad (4.128a)$$

$$\delta_{\vec{\theta}} L = 0 \Rightarrow \vec{L} = m \vec{x} \times \dot{\vec{x}} = \text{const.} \quad (4.128b)$$

Es gibt wieder weitere Noether-Symmetrien, die in diesem Fall durch einen dreikomponentigen Vektor $\vec{\rho}$ parametrisiert sind

$$\delta_{\rho} \vec{x} = 2(\vec{\rho} \vec{x}) \dot{\vec{x}} - (\vec{\rho} \dot{\vec{x}}) \vec{x} - (\vec{x} \dot{\vec{x}}) \vec{\rho} \quad (4.129a)$$

und damit

$$\begin{aligned}\delta_\rho \dot{\vec{x}} &= 2(\vec{\rho}\vec{x})\ddot{\vec{x}} + 2(\vec{\rho}\dot{\vec{x}})\dot{\vec{x}} - (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})\dot{\vec{x}} - (\vec{\rho}\ddot{\vec{x}})\vec{x} - \dot{\vec{x}}^2 \vec{\rho} - (\vec{x}\ddot{\vec{x}})\vec{\rho} \\ &= 2(\vec{\rho}\vec{x})\ddot{\vec{x}} - (\vec{\rho}\ddot{\vec{x}})\vec{x} + (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})\dot{\vec{x}} - \dot{\vec{x}}^2 \vec{\rho} - (\vec{x}\ddot{\vec{x}})\vec{\rho}. \quad (4.129b)\end{aligned}$$

In den Übungsgruppen, nicht in der Vorlesung besprochen:

Daraus

$$\begin{aligned}\delta_\rho L &= \sum_i \frac{\partial L}{\partial x_i} \delta_\rho x_i + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \delta_\rho \dot{x}_i \\ &= \sum_i \alpha \frac{x_i}{|\vec{x}|^3} \left(2(\vec{\rho}\vec{x})\dot{x}_i - (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})x_i - (\vec{x}\dot{\vec{x}})\rho_i \right) \\ &\quad + \sum_i m\dot{x}_i \left(2(\vec{\rho}\vec{x})\ddot{x}_i - (\vec{\rho}\ddot{\vec{x}})x_i + (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})\dot{x}_i - \dot{\vec{x}}^2 \rho_i - (\vec{x}\ddot{\vec{x}})\rho_i \right) \\ &= \alpha \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|^3} \left(2(\vec{\rho}\vec{x})\dot{\vec{x}} - (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})\vec{x} - (\vec{x}\dot{\vec{x}})\vec{\rho} \right) \\ &\quad + m\dot{\vec{x}} \left(2(\vec{\rho}\vec{x})\ddot{\vec{x}} - (\vec{\rho}\ddot{\vec{x}})\vec{x} + (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})\dot{\vec{x}} - \dot{\vec{x}}^2 \vec{\rho} - (\vec{x}\ddot{\vec{x}})\vec{\rho} \right) \\ &= \alpha \frac{(\vec{x}\dot{\vec{x}})(\vec{\rho}\vec{x}) - \vec{x}^2(\vec{\rho}\dot{\vec{x}})}{|\vec{x}|^3} + m \left(2(\vec{\rho}\vec{x})(\dot{\vec{x}}\ddot{\vec{x}}) - (\vec{\rho}\ddot{\vec{x}})(\vec{x}\dot{\vec{x}}) - (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})(\vec{x}\ddot{\vec{x}}) \right) \\ &= \underbrace{\frac{d}{dt} \left(\alpha \frac{\vec{\rho}\vec{x}}{|\vec{x}|} + m\dot{\vec{x}}^2(\vec{\rho}\vec{x}) - m(\vec{x}\dot{\vec{x}})(\vec{\rho}\dot{\vec{x}}) \right)}_{\Lambda_\rho(\vec{x}, \dot{\vec{x}})} \quad (4.130)\end{aligned}$$

und den zugehörigen Integralen

$$\begin{aligned}I_\rho^{RL} &= \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \delta_\rho x_i - \Lambda_\rho(\vec{x}, \dot{\vec{x}}) \\ &= \sum_i m\dot{x}_i \left(2(\vec{\rho}\vec{x})\dot{x}_i - (\vec{\rho}\dot{\vec{x}})x_i - (\vec{x}\dot{\vec{x}})\rho_i \right) - \alpha \frac{\vec{\rho}\vec{x}}{|\vec{x}|} - m\dot{\vec{x}}^2(\vec{\rho}\vec{x}) + m(\vec{x}\dot{\vec{x}})(\vec{\rho}\dot{\vec{x}}) \\ &= 2m \left(\dot{\vec{x}}^2(\vec{\rho}\vec{x}) - (\vec{x}\dot{\vec{x}})(\vec{\rho}\dot{\vec{x}}) \right) - \alpha \frac{\vec{\rho}\vec{x}}{|\vec{x}|} - m\dot{\vec{x}}^2(\vec{\rho}\vec{x}) + m(\vec{x}\dot{\vec{x}})(\vec{\rho}\dot{\vec{x}}) \\ &= m \left(\dot{\vec{x}}^2(\vec{\rho}\vec{x}) - (\vec{x}\dot{\vec{x}})(\vec{\rho}\dot{\vec{x}}) \right) - \alpha \frac{\vec{\rho}\vec{x}}{|\vec{x}|} = \vec{\rho}\vec{R}. \quad (4.131)\end{aligned}$$

Also ist der *Runge-Lenz-Vektor*

$$\begin{aligned}\vec{R} &= m \left(\dot{\vec{x}}^2 \vec{x} - (\vec{x}\dot{\vec{x}})\dot{\vec{x}} \right) - \alpha \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|} = m\dot{\vec{x}} \times \left(\vec{x} \times \frac{\dot{\vec{x}}}{|\vec{x}|} \right) - \alpha \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|} \\ &= \frac{\vec{p} \times \vec{L}}{m} - \alpha \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|} = \text{const.} \quad (4.132)\end{aligned}$$

im Keplerproblem erhalten, was man auch durch explizite Rechnung mit den **ELG** (4.66) überprüfen kann.

Der gleichzeitige Erhaltung der Energie, des Drehimpulses und des Runge-Lenz-Vektors genügen, um die Bahnen eindeutig festzulegen. Offensichtlich steht \vec{R} orthogonal auf \vec{L}

$$\vec{L}\vec{R} = 0, \quad (4.133a)$$

liegt also in der Bahnebene. Außerdem hängt das Skalarprodukt von \vec{x} und \vec{R} nur vom Betrag des Drehimpulses und vom Betrag von \vec{x} ab

$$\vec{x}\vec{R} = \frac{\vec{x}(\vec{p} \times \vec{L})}{m} - \alpha|\vec{x}| = \frac{\vec{L}^2}{m} - \alpha|\vec{x}|. \quad (4.133b)$$

Schließlich hängt die Länge von \vec{R} nur von der Energie H und vom Betrag des Drehimpulses ab

$$\begin{aligned} \vec{R}^2 &= \frac{(\vec{p} \times \vec{L})^2}{m^2} - \frac{2\alpha\vec{L}^2}{m|\vec{x}|} + \alpha^2 = \frac{\vec{p}^2\vec{L}^2 - (\vec{p}\vec{L})^2}{m^2} - \frac{2\alpha\vec{L}^2}{m|\vec{x}|} + \alpha^2 \\ &= \left(\frac{\vec{p}^2}{2m} - \frac{\alpha}{|\vec{x}|} \right) \frac{2\vec{L}^2}{m} + \alpha^2 = \frac{2H\vec{L}^2}{m} + \alpha^2. \end{aligned} \quad (4.133c)$$

Mit $\vec{x}\vec{R} = r|\vec{R}|\cos\phi$ in Polarkoordinaten folgt aus (4.133b)

$$r|\vec{R}|\cos\phi = \frac{1}{m}\vec{L}^2 - \alpha r \quad (4.134)$$

oder

$$r = \frac{\vec{L}^2}{\alpha m} \frac{1}{1 + \frac{|\vec{R}|}{\alpha} \cos\phi} = \frac{\vec{L}^2}{|\alpha|m} \frac{1}{\operatorname{sgn}\alpha + \frac{|\vec{R}|}{|\alpha|} \cos\phi}, \quad (4.135)$$

wobei

$$\frac{|\vec{R}|}{|\alpha|} = \sqrt{1 + \frac{2H\vec{L}^2}{m\alpha^2}} = e. \quad (4.136)$$

Gleichung (4.135) beschreibt wieder Kegelschnitte in Polarkoordinaten, wie in Abbildung 4.5 dargestellt.

Der Runge-Lenz-Vektor liegt in der Symmetrieachse der Kegelschnitte, die einen Brennpunkt mit dem Punkt nächster Annäherung verbindet.

4.3 Planeten und Monde

Im allgemeinen hat man es nicht nur mit zwei Körpern zu tun, die miteinander wechselwirken. Leider werden die Gleichungen sehr schnell unlösbar und das Verhalten des Systems chaotisch. Der Grund hierfür ist, daß die Anzahl der Freiheitsgrade wächst und die Anzahl der Symmetrien nicht mehr ausreicht, genügend viele Erhaltungsgrößen zu bewirken.

4.3.1 Ausgedehnte Körper

Bislang wurden nur Punktmassen betrachtet. Realistische Körper sind aber ausgedehnt und ihr Potential ist eine mit der Dichte ρ gewichtete Superposition

$$V_\rho(\vec{x}) = \int d^3y \rho(\vec{y}) V(\vec{x} - \vec{y}) \quad (4.137)$$

mit

$$\int d^3x \rho(\vec{x}) = 1 \quad (4.138a)$$

$$\rho(\vec{x}) = 0 \quad (\text{für } |\vec{x}| > R). \quad (4.138b)$$

Annahme: Kugelsymmetrische Massenverteilung und $1/r$ -Potential

$$\rho(\vec{x}) = \rho_0(|\vec{x}|) \quad (4.139a)$$

$$V(\vec{x}) = -\frac{\alpha}{|\vec{x}|}. \quad (4.139b)$$

Wenn man die y_3 -Achse der Kugelkoordinaten für \vec{y} in \vec{x} -Richtung legt

$$|\vec{x} - \vec{y}| = \sqrt{\vec{x}^2 + \vec{y}^2 - 2\vec{x}\vec{y}} = \sqrt{|\vec{x}|^2 + r^2 - 2|\vec{x}|r \cos \theta} \quad (4.140)$$

und (mit $z = \cos \theta$)

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 \frac{dz}{\sqrt{|\vec{x}|^2 + r^2 - 2|\vec{x}|rz}} &= -\frac{\sqrt{|\vec{x}|^2 + r^2 - 2|\vec{x}|rz}}{|\vec{x}|r} \Big|_{-1}^1 \\ &= \frac{\sqrt{|\vec{x}|^2 + r^2 + 2|\vec{x}|r} - \sqrt{|\vec{x}|^2 + r^2 - 2|\vec{x}|r}}{|\vec{x}|r} \\ &= \frac{||\vec{x}| + r| - ||\vec{x}| - r||}{|\vec{x}|r} = \begin{cases} \frac{|\vec{x}| + r - (|\vec{x}| - r)}{|\vec{x}|r} = \frac{2}{|\vec{x}|} & \text{für } |\vec{x}| > r \\ \frac{|\vec{x}| + r + (|\vec{x}| - r)}{|\vec{x}|r} = \frac{2}{r} & \text{für } |\vec{x}| < r \end{cases} \\ &= \Theta(|\vec{x}| - r) \frac{2}{|\vec{x}|} + \Theta(r - |\vec{x}|) \frac{2}{r} \quad (4.141) \end{aligned}$$

mit der Stufenfunktion

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases}. \quad (4.142)$$

Damit

$$\begin{aligned} V_\rho(\vec{x}) &= - \int_0^R dr \int_{-1}^1 d\cos\theta \int_0^{2\pi} d\phi r^2 \rho_0(r) \frac{\alpha}{\sqrt{|\vec{x}|^2 + r^2 - 2|\vec{x}|r\cos\theta}} \\ &= -2\pi \int_0^R dr r^2 \rho_0(r) \left(\Theta(|\vec{x}| - r) \frac{2\alpha}{|\vec{x}|} + \Theta(r - |\vec{x}|) \frac{2\alpha}{r} \right) \end{aligned} \quad (4.143)$$

und außerhalb der Massenverteilung ist $|\vec{x}| > r$

$$V_\rho(\vec{x}) \Big|_{|\vec{x}| > R} = -\frac{\alpha}{|\vec{x}|} \underbrace{4\pi \int_0^R dr r^2 \rho_0(r)}_{=\int d^3x \rho(\vec{x})=1} = -\frac{\alpha}{|\vec{x}|}. \quad (4.144)$$

Kugelsymmetrische Massenverteilungen können *außerhalb* ihrer Grenze also durch eine Punktmasse beschrieben werden.

4.3.2 Zweizentrenproblem

Die Bewegungsgleichungen für eine Masse m im Schwerfeld zweier fester Massen M_1 und M_2

$$L = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 + \frac{\alpha_1}{|\vec{x} - \vec{x}_1|} + \frac{\alpha_2}{|\vec{x} - \vec{x}_2|} \quad (4.145)$$

können durch die Wahl geeigneter krummliniger Koordinaten noch exakt gelöst werden.

4.3.3 Restringsiertes Dreikörperproblem

Die Bewegungsgleichungen für eine Masse m im Schwerfeld zweier Massen $M_1 \gg m$ und $M_2 \gg m$, die einander anziehen, aber die kleine Masse m nicht spüren

$$L_2 = \frac{M_1}{2} \dot{\vec{x}}_1^2 + \frac{M_2}{2} \dot{\vec{x}}_2^2 + \frac{\alpha}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|} \quad (4.146a)$$

$$L_3(\vec{x}, \dot{\vec{x}}, t) = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 + \frac{\alpha_1}{|\vec{x} - \vec{x}_1(t)|} + \frac{\alpha_2}{|\vec{x} - \vec{x}_2(t)|} \quad (4.146b)$$

können schon nicht mehr allgemein gelöst werden.

Lagrangepunkte

Es gibt im restringierten Zweikörperproblem allerdings 5 Gleichgewichtspunkte

- 2 gleichseitige Dreiecke L_4 und L_5 : lokale Maxima des effektiven Potentials, aber für $M_1/M_2 > (25 + 3\sqrt{69})/2 \approx 24.96$ durch Corioliskraft stabilisiert; im Sonnensystem annähernd durch Sonne, Jupiter und eine Gruppe von Asterioden, die „Trojaner“, realisiert,
- 3 kollineare Punkte L_1 , L_2 und L_3 . Diese sind instabil, aber trotzdem nützlich als Parkposition für Satelliten, weil vergleichsweise wenig Kurskorrekturen nötig. Eine aktuelle Mission zu L_2 ist das JWST (siehe <https://webbtelescope.org/>).

Details zur Stabilität von L_4 und L_5 finden sich unter <http://wmap.gsfc.nasa.gov/media/ContentMedia/lagrange.pdf>. Die Wikipedia hat eine lange Liste von künstlichen Satelliten und natürlichen Objekten an Lagrangepunkten im Sonnensystem: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_objects_at_Lagrange_points.

—A— NOTATION

In der Vorlesung und in diesem Skript verwende ich eine Notation, die weitgehend den Konventionen der modernen Mathematischen Physik folgt. So unterscheide ich z. B. zwischen dem Phasenraum T^*Q der von Koordinaten und Impulsen (q, p) aufgespannt wird und dem Raum TQ der von Koordinaten und Geschwindigkeiten (q, \dot{q}) aufgespannt wird (Geschwindigkeits-Phasenraum), obwohl sowohl p als auch q in zu \mathbf{R}^n isomorphen Vektorräumen leben. Zunächst mögen solche Unterscheidungen als unnötige Pedanterie erscheinen, die von „der Physik“ ablenken, aber ich bin sicher, daß sie später Verwirrungen verhindern.

H Hamiltonfunktion, entweder zeitunabhängig

$$\begin{aligned} H : T^*Q &\rightarrow \mathbf{R} \\ (q, p) &\mapsto H(q, p) \end{aligned} \tag{A.1}$$

oder zeitabhängig

$$\begin{aligned} H : T^*Q \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (q, p, t) &\mapsto H(q, p, t) \end{aligned} \tag{A.2}$$

(vgl. Abschnitt ??, Seite ??).

L Lagrangefunktion, entweder zeitunabhängig

$$\begin{aligned} L : TQ &\rightarrow \mathbf{R} \\ (q, \dot{q}) &\mapsto L(q, \dot{q}) \end{aligned} \tag{A.3}$$

oder zeitabhängig

$$\begin{aligned} L : TQ \times \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (q, \dot{q}, t) &\mapsto L(q, \dot{q}, t) \end{aligned} \tag{A.4}$$

(vgl. Abschnitt 3.24, Seite 27).

- q Ein Punkt im Konfigurationsraum Q , d. h. $q \in Q$.
- \vec{q} Der Vektor der Koordinaten des Punkts $q \in Q$, d. h. $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n) \in \mathbf{R}^n$. Oft auch als *verallgemeinerte Koordinaten* bezeichnet.
- q_i Die i -te Komponente von \vec{q} .
- Q Konfigurationsraum des betrachteten Systems. Für ein Punktteilchen ohne Nebenbedingung im Anschauungsraum gilt $Q \cong \mathbf{R}^3$. (vgl. Abschnitt 2, Seite 5).
- \mathbf{R} Der Körper der reellen Zahlen oder der eindimensionale Vektorraum über dem Körper der reellen Zahlen.
- \mathbf{R}^n Der n -dimensionale Vektorraum über dem Körper der reellen Zahlen.
- $T_q Q$ mathematisch: Tangentialvektorraum an Q am Punkt $q \in Q$ ($T_q Q \cong \mathbf{R}^n$).
- TQ Geschwindigkeits-Phasenraum, d. h. Raum der Koordinaten und Geschwindigkeiten. Falls der Konfigurationsraum Q topologisch einfach ist, gilt $TQ \cong Q \times \mathbf{R}^n$. Die mathematische Bezeichnung und Motivation der Notation ist Tangentialbündel (oder auch Tangentialvektorraumbündel) an Q .
- $T_q^* Q$ mathematisch: Kotangentialvektorraum an Q am Punkt $q \in Q$ ($T_q^* Q \cong \mathbf{R}^n$) (vgl. Abschnitt ??, Seite ??).
- $T^* Q$ Phasenraum, d. h. Raum der Koordinaten und Impulse. Falls der Konfigurationsraum Q topologisch einfach ist, gilt $T^* Q = Q \times \mathbf{R}^n$. Die mathematische Bezeichnung und Motivation der Notation ist Kotangentialbündel (oder auch Kotangentialvektorraumbündel) an Q . (vgl. Abschnitt ??, Seite ??).
- x Punkt in den *kartesischen* Anschauungsräumen \mathbf{R} , \mathbf{R}^2 , \mathbf{R}^3 oder entsprechender Produkte für Mehrteilchensysteme. Mit $x : Q \rightarrow \mathbf{R}^n$ wird die Einbettung von Q in einen Anschauungsraum bezeichnet.
- \vec{x} Die Koordinaten von x . Die kartesischen Koordinaten \vec{x} bilden einen Vektorraum der auf natürliche Weise isomorph zum Konfigurationsraum ist.
- x_i Die i -te Komponente von \vec{x} .
- x Kurzschreibweise $x = (q, p) = (q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n)$ für einen Punkt im Phasenraum $T^* Q$. (vgl. Abschnitt ??, Seite ??).

—B—

MATHEMATISCHER WERKZEUGKASTEN

B.1 Funktionen

Eine *Funktion* f ist eine Abbildung, die *jedem* Element x des *Definitionsreichs* (bzw. des *Urbildes*) A *genau ein* Element der *Bildmenge* B zuordnet

$$\begin{aligned} f : A &\rightarrow B \\ x &\mapsto y = f(x) . \end{aligned} \tag{B.1}$$

In der physikalischen und der älteren mathematischen Literatur wird die Funktion f oft mit $f(x)$ bezeichnet. Diese Notation ist aber mißverständlich, weil sie es unmöglich macht, zwischen der *Funktion* $f : A \rightarrow B$ und ihrem *Wert* $f(x) \in B$ an der Stelle $x \in A$ zu unterscheiden. Spätestens, wenn wir in Abschnitt 3.1 Funktionen von Funktionen betrachten, müssen wir zwischen

$$S_1(f) \tag{B.2}$$

und

$$S_2(f(x)) \tag{B.3}$$

unterscheiden. Wenn $F_{A,B}$ die Menge der Funktionen $f : A \rightarrow B$ bezeichnet, dann ist

$$\begin{aligned} S_1 : F_{A,B} &\rightarrow C \\ f &\mapsto z = S_1(f) , \end{aligned} \tag{B.4}$$

aber

$$\begin{aligned} S_2 : B &\rightarrow C \\ y &\mapsto z = S_2(y) \end{aligned} \tag{B.5}$$

oder

$$\begin{aligned} S_2 \circ f : A &\rightarrow C \\ x &\mapsto z = S_2(f(x)) . \end{aligned} \tag{B.6}$$

Die beiden Funktionen haben also nichts miteinander zu tun! Typische Beispiele für Funktionen von $F_{\mathbf{R},\mathbf{R}}$ nach \mathbf{R} sind z. B. bestimmte Integrale

$$I_{a,b} : F_{\mathbf{R},\mathbf{R}} \rightarrow \mathbf{R}$$

$$f \mapsto I_{a,b}(f) = \int_a^b dx f(x). \quad (\text{B.7})$$

Wir werden die Notation $f(x)$ für die Funktion nur dort benutzen, wo eine Verwechslung mit dem Funktionswert $f(x)$ ausgeschlossen ist und die präzise Notation unnötig umständlich wäre.

An manchen Stellen muß nicht gefordert werden oder kann nicht garantiert werden, daß eine Funktion

$$f : \mathbf{R} \rightarrow A$$

$$x \rightarrow f(x) \quad (\text{B.8})$$

für *alle* reellen Zahlen definiert ist¹, sondern nur für eine Teilmenge $I \in \mathbf{R}$

$$f : I \rightarrow A$$

$$x \rightarrow f(x). \quad (\text{B.9})$$

Oft handelt es sich bei I um eine offene Umgebung eines Punktes. Analoges gilt für Teilmengen von \mathbf{R}^n .

B.2 Lineare Algebra

B.2.1 Rechnen mit Indices

Summationsindices vs. freie Indices

Kronecker- δ

ϵ -Tensor

Forderung: total antisymmetrisch

$$\forall i, j, k = 1, 2, 3 : \epsilon_{ijk} = \epsilon_{jki} = \epsilon_{kij} = -\epsilon_{jik} = -\epsilon_{kji} = -\epsilon_{ikj} \quad (\text{B.10})$$

und

$$\epsilon_{123} = 1, \quad (\text{B.11})$$

¹In der ersten Version des Skriptes wurde auch in diesen Fällen oft $f : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ anstelle von $f : I \rightarrow A$ geschrieben, wenn es wichtiger war, zu betonen, daß $I \in \mathbf{R}$, als daß f nicht notwendig auf ganz \mathbf{R} definiert ist. Bei der Überarbeitung soll möglichst konsequent $f : I \in \mathbf{R} \rightarrow A$ geschrieben werden.

dann

$$\epsilon_{123} = \epsilon_{231} = \epsilon_{312} = 1 = -\epsilon_{213} = -\epsilon_{132} = -\epsilon_{321}. \quad (\text{B.12})$$

Summationen

$$\sum_{m=1}^3 \epsilon_{ijm} \epsilon_{klm} = \delta_{ik} \delta_{jl} - \delta_{il} \delta_{jk} \quad (\text{B.13a})$$

$$\sum_{k,l=1}^3 \epsilon_{ikl} \epsilon_{jkl} = 2\delta_{ij} \quad (\text{B.13b})$$

B.3 Ableitungen

Our presentation [...] aims at keeping as close as possible to the fundamental idea of calculus, namely the local approximation of functions by linear functions. In the classical teaching of calculus, this idea is immediately obscured by the accidental fact that, on a one dimensional vector space, there is a one-to-one correspondence between linear forms and numbers, and therefore the derivative at a point is defined as a number instead of a linear form. This slavish subservience to the shibboleth of numerical interpretation at any cost becomes much worse when dealing with functions of several variables.

J. Dieudonne, *Treatise on Analysis* (1960) [9]

Die Darstellung orientiert sich an den Abschnitten 8.1-8.4 von [9].

Definition B.1. Ein *Banachraum* ist ein vollständiger normierter Vektorraum.

Banachräume sind die Abstraktion der in der Physik überall verwendeten vollständigen normierten Vektorräume \mathbf{R}^n , \mathbf{C}^n , was die reellen Zahlen \mathbf{R} und die komplexen Zahlen \mathbf{C} einschließt.

Definition B.2. Zwei Funktionen $f : E \rightarrow F$ und $g : E \rightarrow F$ berühren einander, $f \stackrel{x_0}{\sim} g$ im Punkt $x_0 \in E$ wenn

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\|f(x) - g(x)\|_F}{\|x - x_0\|_E} = 0. \quad (\text{B.14})$$

Dies definiert wegen

$$\|f(x) - h(x)\|_F \leq \|f(x) - g(x)\|_F + \|g(x) - h(x)\|_F \quad (\text{B.15})$$

eine Äquivalenzrelation

$$f \stackrel{x_0}{\sim} g \wedge g \stackrel{x_0}{\sim} h \implies f \stackrel{x_0}{\sim} h. \quad (\text{B.16})$$

Unter allen Funktionen $g : E \rightarrow F$, die eine gegebene Funktion $f : E \rightarrow F$ an einem Punkt $x_0 \in E$ berühren, gibt es *höchstens* eine lineare Approximation der Form

$$E \ni x \mapsto f(x_0) + Df|_{x_0}(x - x_0) \in F \quad (\text{B.17})$$

wobei $Df|_{x_0} : E \rightarrow F$ eine *lineare* Funktion ist, d. h. $Df|_{x_0} \in \mathcal{L}(E, F)$.

Definition B.3. Wenn $Df|_{x_0} \in \mathcal{L}(E, F)$ aus (B.17) existiert, nennt man es die *Ableitung* der Funktion $f : E \rightarrow F$ am Punkt $x_0 \in E$.

Diese Definition der Ableitung wird auch mit *Frechet-Ableitung* bezeichnet. Ihr großer Vorteil ist, daß die völlig unabhängig von den betrachteten Banachräumen ist und im ein-, im mehr- und im unendlichdimensionalen Fall verwendet werden kann.

Beispiel B.4. Sei

$$\begin{aligned} f : \mathbf{R} &\rightarrow \mathbf{R} \\ x &\mapsto y = f(x) \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

dann wirkt $Df|_{x_0}$ durch Multiplikation und kann durch eine Zahl $f'(x_0) \in \mathbf{R}$ repräsentiert werden

$$Df|_{x_0}(x) = x \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} = x f'(x_0). \quad (\text{B.19})$$

Beispiel B.5. Sei

$$\begin{aligned} f : \mathbf{R}^n &\rightarrow \mathbf{R} \\ x &\mapsto y = f(x) \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

dann ist die lineare Transformation $Df|_{x_0}$ eine Form $\mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$, die ihrerseits durch einen Vektor $\nabla f|_{x_0} \in \mathbf{R}^n \cong \mathcal{L}(\mathbf{R}^n, \mathbf{R})$, den *Gradienten*, repräsentiert werden kann

$$Df|_{x_0}(x) = \sum_{i=1}^n [Df|_{x_0}]_i x_i = \sum_{i=1}^n \nabla_i f|_{x_0} x_i = \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{x_0} x_i, \quad (\text{B.21})$$

bzw.

$$[Df|_{x_0}]_i = \nabla_i f|_{x_0} = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_0}. \quad (\text{B.22})$$

Beispiel B.6. Sei

$$\begin{aligned} f : \mathbf{R}^n &\rightarrow \mathbf{R}^m \\ x &\mapsto y = f(x) \end{aligned} \quad (\text{B.23})$$

dann kann die lineare Transformation $Df|_{x_0}$ durch eine reelle $m \times n$ -Matrix repräsentiert werden

$$\forall i = 1, \dots, m [Df|_{x_0}(x)]_i = \sum_{j=1}^n [Df|_{x_0}]_{ij} x_j = \sum_{j=1}^n \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \Big|_{x_0} x_j, \quad (\text{B.24})$$

bzw.

$$[Df|_{x_0}]_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \Big|_{x_0}. \quad (\text{B.25})$$

B.3.1 Kettenregel

$$\phi : E \rightarrow F \quad (\text{B.26a})$$

$$\psi : F \rightarrow G \quad (\text{B.26b})$$

und

$$\begin{aligned} \psi \circ \phi : E &\rightarrow G \\ x &\mapsto \psi(\phi(x)) \end{aligned} \quad (\text{B.27})$$

Dann

$$D(\psi \circ \phi) : E \rightarrow G \quad (\text{B.28a})$$

mit

$$D(\psi \circ \phi)|_x = D\psi|_{\phi(x)} \circ D\phi|_x \quad (\text{B.28b})$$

B.3.2 Produktregel

Für eine bilineare Funktion

$$\begin{aligned} \phi : E \times F &\rightarrow G \\ (x, y) &\mapsto \phi(x, y) \end{aligned} \quad (\text{B.29})$$

gilt

$$\begin{aligned} D\phi|_{x_0, y_0} : E \times F &\rightarrow G \\ (\xi, \eta) &\mapsto D\phi|_{x_0, y_0}(\xi, \eta) = \phi(x_0, \eta) + \phi(\xi, y_0), \end{aligned} \quad (\text{B.30})$$

weil

$$\phi(x_0 + \xi, y_0 + \eta) = \phi(x_0, y_0) + \phi(\xi, y_0) + \phi(x_0, \eta) + \phi(\xi, \eta). \quad (\text{B.31})$$

$$f : E \rightarrow E' \quad (\text{B.32a})$$

$$g : F \rightarrow F' \quad (\text{B.32b})$$

$$(f \times g) : E \times F \rightarrow E' \times F' \quad (\text{B.33})$$

$$(x, y) \mapsto (f(x), g(y))$$

$$\Phi : E \times F \rightarrow G \quad (\text{B.34})$$

$$(x, y) \mapsto \phi(f(x), g(y))$$

oder

$$\Phi = \phi \circ (f \times g) \quad (\text{B.35})$$

also

$$D\Phi_{(x_0, y_0)} : E \times F \rightarrow G \quad (\text{B.36a})$$

mit

$$D\Phi|_{x_0, y_0}(x, y) = \phi|_{(f(x_0), g(x_0))}(Df|_{x_0}(x), Dg|_{y_0}(y))$$

$$= \phi(f(x_0), Dg|_{y_0}(y)) + \phi(Df|_{x_0}(x), g(y_0)). \quad (\text{B.36b})$$

Als kommutatives Diagramm

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \Phi & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 E \times F & \xrightarrow{f \times g} & E' \times F' & \xrightarrow{\phi} & G \\
 & \searrow & & \nearrow & \\
 & Df|_x \times Dg|_y & & D\phi|_{(x', y')} & \\
 & \nwarrow & & \swarrow & \\
 & & D\Phi|_{(x, y)} & &
 \end{array} \quad (\text{B.37})$$

Beispiel B.7. Sei

$$E = E' = F = F' = G \quad (\text{B.38})$$

eine Banach-Algebra mit

$$\phi(x, y) = xy. \quad (\text{B.39})$$

Dann

$$\Phi(x) = f(x)g(x) \quad (\text{B.40})$$

und

$$D\Phi|_{x_0}(x) = f(x_0) Dg|_{x_0}(x) + Df|_{x_0}(x)g(x_0). \quad (\text{B.41})$$

Beispiel B.8. Sei

$$E = E' = F = F' = G = \mathbf{R}, \quad (\text{B.42})$$

dann wirkt Df per Multiplikation, $\mathcal{L}(\mathbf{R}, \mathbf{R}) \cong \mathbf{R}$ und (B.41) kann

$$D(fg) = f(Dg) + (Df)g \quad (\text{B.43})$$

geschrieben werden.

B.3.3 „Vektoranalysis“

Gradient

$$\begin{aligned} \text{grad} : C^k(\mathbf{R}^n, \mathbf{R}) &\rightarrow C^{k-1}(\mathbf{R}^n, \mathbf{R}^n) \\ f &\mapsto g = \text{grad } f \end{aligned} \quad (\text{B.44a})$$

mit

$$g_i(x) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) \quad (\text{B.44b})$$

oder

$$\vec{g}(x) = \vec{\nabla} f(x). \quad (\text{B.44c})$$

Der Gradient kann durch die Frechet-Ableitung

$$Df|_x(v) = \sum_{i=1}^n v_i g_i(x) \quad (\text{B.45})$$

ausgedrückt werden.

Divergenz

$$\begin{aligned} \text{div} : C^k(\mathbf{R}^n, \mathbf{R}^n) &\rightarrow C^{k-1}(\mathbf{R}^n, \mathbf{R}) \\ f &\mapsto \text{div } f \end{aligned} \quad (\text{B.46a})$$

mit

$$(\text{div } f)(x) = \vec{\nabla} \vec{f}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_i}(x). \quad (\text{B.46b})$$

Rotation

Während der Gradient und die Divergenz in beliebigen Dimensionen definiert werden kann, ist die Rotation nur *drei* Dimensionen eine Abbildung von vektorwertigen Funktionen auf vektorwertigen Funktionen

$$\begin{aligned} \text{rot} : C^k(\mathbf{R}^3, \mathbf{R}^3) &\rightarrow C^{k-1}(\mathbf{R}^3, \mathbf{R}^3) \\ f &\mapsto g = \text{rot } f \end{aligned} \quad (\text{B.47a})$$

mit

$$g_i(x) = \sum_{j,k=1}^3 \epsilon_{ijk} \frac{\partial f_k}{\partial x_j}(x) \quad (\text{B.47b})$$

oder

$$\vec{g}(\vec{x}) = \vec{\nabla} \times \vec{f}(\vec{x}). \quad (\text{B.47c})$$

Die Verallgemeinerung auf beliebige Funktionen erfordert mehr Indices

$$\begin{aligned} \text{rot} : C^k(\mathbf{R}^n, \mathbf{R}^n) &\rightarrow C^{k-1}(\mathbf{R}^n, \mathbf{R}^n \otimes_A \mathbf{R}^n) \\ f &\mapsto g = \text{rot } f \end{aligned} \quad (\text{B.48a})$$

mit

$$g_{ij}(x) = -g_{ji}(x) = \frac{\partial f_j}{\partial x_i}(x) - \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x). \quad (\text{B.48b})$$

Den angemessene mathematische Rahmen dafür liefert die *äußere Ableitung* von *Differentialformen*.

—C—
ABKÜRZUNGEN

ELG Euler-Lagrange Gleichung

HJG Hamilton-Jacobi-Gleichung

LT Lorentztransformation

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] GOLDSTEIN, H. ; POOLE, C.P. ; SAFKO, J.L.: *Classical Mechanics*. Addison Wesley, 2002 <https://books.google.de/books?id=tJCuQgAACAAJ>. – ISBN 9780201657029
- [2] LANDAU, L. D. ; LIFSHITZ, E. M.: *Lehrbuch der Theoretischen Physik. Band 1: Mechanik*. Akademie-Verlag Berlin, 1984
- [3] TONG, David: *Lectures on Dynamics and Relativity*. Version: 2013. <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/relativity.html>
- [4] TONG, David: *Lectures on Classical Dynamics*. Version: 2015. <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/dynamics.html>
- [5] SCHECK, F.: *Theoretische Physik 1: Mechanik*. Springer Berlin Heidelberg, 2007 (Springer-Lehrbuch). <https://books.google.de/books?id=AwgjBAAAQBAJ>. – ISBN 9783540713791
- [6] ARNOLD, V. I.: *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Springer-Verlag, 1978
- [7] THIRRING, W.: *Lehrbuch der Mathematischen Physik. Band 1: Klassische Dynamische Systeme*. Springer-Verlag, 1977
- [8] SUSSMAN, Gerald J. ; WISDOM, Jack: *Structure and Interpretation of Classical Mechanics*. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 2001. – ISBN 0-262-19455-4
- [9] DIEUDONNÉ, J.: *Foundations of Modern Analysis*. Academic Press, 1968

INDEX

- äußere Ableitung, 104
- abgeschlossenen System, 64
- Ableitung, 100
- Anholonome, 37
- Banachraum, 99
- berühren einander, 99
- Bildmenge, 97
- Definitionsbereichs, 97
- Differentialformen, 104
- Drehimpuls, 44, 66
- effektive Potential, 44
- erhaltene Energie, 11
- Erhaltungsgrößen, 8
- Exzentrizität, 81
- Feldtheorie (Elektrodynamik), 2
- Funktion, 97
- Gradienten, 100
- Gruppen, 48
- Hamilton'schen Prinzip, 27
- Hamiltonfunktion, 59
- holonom, 33
- Inertialsysteme, 7
- infinitesimale Erzeugende, 50
- Integrale, 8
- Integration, 15
- Kommutator, 54
- konjugierte Impuls, 43
- konservativ, 11
- Kraft, 7
- Lagrangefunktion, 27
- mechanische Eichtransformation, 46
- Newton'schen Gesetze, 7
- nicht-holonome, 37
- orthogonale, 52
- Phasenfluß, 20
- Potential, 11
- potentielle Energie, 11
- Quantenmechanik, 2
- reduzierten Masse, 71
- Rheonome, 37
- semi-latus rectum, 83
- Skeloronome, 37
- Statistischen Physik (Thermodynamik), 2
- Symmetrie, 45, 48
- Systems, 1
- Trägheitsmoment, 37
- Trajektorie, 5
- Urbildes, 97
- verallgemeinerte Koordinaten, 33, 96
- Wirkung, 2

Wirkungsfunktional, 26

Zentralkräfte, 69

Zentripedalkraft, 40

Zustand, 8

Zustands, 1

zyklisch, 43