1 Einige Begriffe der theoretischen Mechanik

Bevor etwas monoton sämtliche 76 Aufgaben folgen, sollen für den Anfänger als Einstieg einige Aspekte der theoretischen Mechanik skizziert werden. Es könnte ja sein, dass der Leser sich gerade erst mit theoretischer Physik auseinanderzusetzen beginnt, die erste Vorlesung soeben gehört hat, aber vor der Lösung von Aufgaben sich (zur ersten Orientierung) etwas mit dem *Begriffssystem* befassen möchte.

Der etwas fortgeschrittene oder sehr eilige Leser kann dieses Kapitel überspringen. Vielleicht wirft er dann aber kurz vorher einen Blick auf die Behauptungen und Fragen im Abschnitt 1.4.

1.1 *Massenpunkt, Systeme von Massenpunkten* und *Wechselwirkungen*

Das einfachste System der theoretischen Mechanik ist der einzelne *Massenpunkt*, oft auch als *Punktmasse*, *Teilchen* oder *Punktteilchen* bezeichnet. Er zeigt gegenüber dem geometrischen Begriff *Punkt* eine zusätzliche Eigenschaft: er besitzt *Masse*. Seine „Koordinaten" (im weiteren Sinn) sind also die „echten" (räumlichen) Koordinaten, die im Ortsvektor $\vec{r}$ enthalten sind, die Zeitkoordinate t und ein Parameter m, seine *Masse*.

Zunächst versteht wohl jeder Schüler unter dem für die Mechanik wichtigen Begriff *Masse* nur ein Objekt, das aus irgendeiner *Substanz* besteht. Es ist klar, dass es das punktförmige und massebehaftete *Teilchen* in unserer realen Umgebung (der Natur) nicht gibt. Das *Denkmodell Massenpunkt* ist aber eine nützliche Projektion wesentlicher Eigenschaften der Objekte der Realität in einen „Raum von Begriffen", in dem die Methoden der Mathematik anwendbar sind. Die mathematischen Begriffe und Aussagen existieren jedoch auch für sich allein (Begriffe per definitionem) und benötigen selbst keinen Objektbereich als Ziel der Anwendung.

Wenn die Entfernungen, die das zu beschreibende Objekt zurücklegt, groß sind gegenüber den Abmessungen des mechanischen Objektes selbst (Beispiel: ein Planet auf seiner Bahn um die Sonne), dann ist das Modell eines Punktes recht gut zur Beschreibung dieses Systems geeignet.

Das *System von (diskreten) Massenpunkten* ist schon ein komplizierteres System der theoretischen Mechanik, da mit der Zahl der Massenpunkte auch die Zahl der Koordinaten und die Zahl der Wechselwirkungen wächst. Es zeigt sich, dass bereits die Lösung des Bewegungsproblems von nur drei wechselwirkenden Massenpunkten (9 Ortskoordinaten im Raum $\mathbb{R}^3$ und

Theoretische Mechanik in Aufgaben. Reinhard Tiebel

ISBN: 3-527-40603-4

3 Paare von Punkten mit Wechselwirkung) ein gewisses mathematisches Problem darstellt (wenn man nach den analytischen Lösungen der Bewegungsgleichungen fragt).

Was ist das Ziel der theoretischen Betrachtung? Meist ist aus der Kenntnis des „Zustandes“ des mechanischen Systems zu einem Anfangszeitpunkt t_0 der „Zustand“ zu einem späteren Zeitpunkt t mit $t > t_0$ zu bestimmen: dann wird die *Dynamik* des mechanischen Systems betrachtet.

Verschiedene physikalische Gebiete fassen den Begriff *Zustand des Systems* sehr unterschiedlich. Überlegen Sie, was man wissen muss, um den „Zustand“ eines mechanischen Systems zu einem Zeitpunkt t_0 zu kennen.

Dabei unterliegt das System im Intervall $t_0 < t$ bestimmten äußeren Wechselwirkungen („Kräften“) oder auch im Fall von Massenpunktsystemen inneren Wechselwirkungen. Diese Kräfte „steuern“ die Bewegung des Systems.

Vor der Lösung eines physikalischen Problems muss man klären, welche Objekte zum betrachteten *System* gerechnet werden und damit auch, welche Objekte jenseits der Systemgrenzen ein externes (anderes) System bilden und auf das Verhalten des eigentlich interessierenden (ersten) Systems Einfluss nehmen.

Einfach zu finden ist die Antwort auf die Frage: Wie bewegt sich ein *freier* Massenpunkt? Gemeint ist damit ein Punkt, der keiner Wechselwirkung (und damit auch keiner Dämpfung) unterliegt. Die Erfahrung zeigt: Ein freier Massenpunkt bewegt sich in einem *Inertialsystem* geradlinig gleichförmig. Es gibt unendlich viele solcher Systeme, die sich zueinander mit konstanter Geschwindigkeit („gleichförmig“) bewegen.

Jede Änderung dieser Bewegungsform des Punktes wird durch eine *äußere Kraft* hervorgerufen (Wechselwirkung mit einem anderen mechanischen System).

Beobachtungen zeigen: die äußere Kraft beschleunigt einen Massenpunkt. Welche Rolle spielt dabei die Größe *Masse*? Sie ist die Proportionalitätskonstante zwischen der Beschleunigung, die am Massenpunkt selbst (als dessen Eigenschaft) gemessen wird, und der extern vorgegebenen Kraft, die unabhängig vom aktuell betrachteten mechanischen System existiert (Beispiel: ein Körper fällt im Erdgravitationsfeld). Die Reibungskraft, der ein Massenpunkt unterliegt, beschreibt man durch Parameter, die von einem äußeren System stammen.

Wenn aber das System passend erweitert wird, werden die ursprünglich externen Kräfte zu inneren Kräften (Beispiel: Kräfte zwischen den Partnern in einem Doppelsternsystem).

Die Größe *Masse* ist für jedes mechanische Objekt (einzelner Massenpunkt oder System von Punkten) ein Maß für die Wechselwirkung mit einem zweiten mechanischen Objekt. Die Masse beschreibt die Wechselwirkung mit einem externen System *quantitativ*: zwei Massenpunkte können sich unter dem Einfluss eines *äußeren Kraftfeldes* unterschiedlich verhalten; besitzen sie verschiedene Masse, so werden sie unterschiedlich beschleunigt. Ein Beispiel: Punkte verschiedener Masse laufen im gleichen Kraftfeld auf gleichen Bahnen mit unterschiedlichen Zeiten; das Verhältnis dieser Zeiten wird bestimmt durch das Verhältnis der beiden Massen (siehe Aufgabe 48).

1.2 Zwei ungewohnte Erhaltungssätze

Die Suche nach *Konstanten der Bewegung*, nach *Erhaltungssätzen*, ist in allen physikalischen Disziplinen von großer Bedeutung. Im Lauf der Wechselwirkung ändert diese Größe ihren Zahlenwert (im Fall einer vektoriellen Größe Betrag und Richtung) nicht. Wichtig ist die Beantwortung der Frage: Welche und wie viele voneinander unabhängige Erhaltungssätze gibt es für ein bestimmtes wechselwirkendes System?

Das folgende Beispiel zeigt vier Sachverhalte:

1. In den physikalischen Disziplinen spielen für die Vorhersage von Bewegungsabläufen *Erhaltungssätze* eine entscheidende Rolle.

2. Jeder Erhaltungssatz ist an Voraussetzungen gekoppelt. Er besitzt nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich.

3. Unter schwächeren Voraussetzungen gilt meist ein Erhaltungssatz für eine neue Größe. Es ist damit möglich, zusammen mit der Formulierung von Erhaltungssätzen neue physikalische Größen geeignet zu definieren.

4. Deterministische Gesetze schränken die (ursprünglich naiv denkbare) Bewegungsvielfalt nur geringfügig ein, wenn außerdem vom Zufall abhängige (deterministisch unvorhersagbare) Ereignisse vorliegen.

Dazu betrachten wir den elastischen Stoß zweier Punkte. Im real ablaufenden Prozess sollen zwei Billardkugeln dieser sehr kurzzeitigen Wechselwirkung unterworfen sein. Eine Kugel Nr. 1 stoße (in einem *Bezugssystem*, das durch Ortskoordinaten und die Zeit beschrieben ist) mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_1$ auf eine völlig (in allen mechanischen Eigenschaften) gleichartige *ruhende* Kugel Nr. 2 mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_2 = \vec{0}$.

Ein Beobachter sieht sofort, dass der Ausgang dieses simplen Experiments erheblich vom Zufall abhängt; eine Wiederholung des Billardstoßes führt zu einem neuen Ergebnis. Er wird zunächst naiv die folgende Situation nach dem Stoß erwarten:

Die Kugel Nr. 1 kann irgendeinen beliebigen Bruchteil ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit besitzen, und die Geschwindigkeitsrichtungen der beiden Kugeln könnten einen beliebigen Winkel α einschließen.

Alle (durch mehrfache Wiederholung des gleichen Experiments erzielten) genaueren Beobachtungen aber liefern ein gegenüber den ersten Erwartungen stark eingeschränktes Ergebnis (ungestrichene Größen sind die vor dem Stoß, gestrichene Größen nach dem Stoß).

Nach dem Stoß tritt einer der zwei Fälle auf:

$a)$ Die Geschwindigkeit der Kugel Nr. 2 ist parallel der Geschwindigkeit der stoßenden Kugel (gerader, zentraler Stoß), dabei gilt $\vec{v}_1\,' = \vec{0}, \vec{v}_2\,' = \vec{v}_1$.

$b)$ Die Geschwindigkeiten der beiden Kugeln bilden nach dem Stoß einen von null verschiedenen Winkel: er beträgt stets $\alpha = 90°$, der Vektor $\vec{v}_1\,'$ ist orthogonal zum Vektor $\vec{v}_2\,'$.

Dem (physikalisch unvoreingenommenen) Beobachter wird man den Ausgang der Experimente wie folgt erklären können: bei dieser Wechselwirkung gelten zwei Erhaltungssätze (die Billardkugeln werden im *Massenpunkt*-Modell beschrieben):

1. Es gibt den ***Satz von der Erhaltung der Geschwindigkeit*** (eine Gleichung zwischen Vektoren): $\vec{v}_1 + \vec{v}_2 = \vec{v}_1{}' + \vec{v}_2{}'$, wegen $\vec{v}_2 = \vec{0}$ einfach

   $$\vec{v}_1 = \vec{v}_1{}' + \vec{v}_2{}',$$

   der allein zur Erklärung aber nicht ausreicht.

2. Es gibt den ***Satz von der Erhaltung des Geschwindigkeitsquadrates*** (eine Gleichung zwischen Skalaren): $v_1^2 + v_2^2 = v_1'^2 + v_2'^2$, im Fall der (vor dem Stoß) ruhenden zweiten Kugel einfach

   $$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2.$$

   Aus beiden Gleichungen folgt im Fall $v_1' \neq 0, v_2' \neq 0$ die Orthogonalität der Geschwindigkeitsvektoren nach dem Stoß (Satz des *Thales*).

Erst beide Erhaltungssätze erklären das Beobachtungsergebnis. Es gibt wegen des Zufallscharakters des Stoßprozesses unendlich viele Bewegungszustände der Kugeln nach dem Stoß, aber nicht alle denkbaren Erwartungen werden realisiert. Es tritt z. B. beim geraden Stoß der Fall $v_1' \neq 0$ nicht auf, da wegen $v_1 = v_1' + v_2'$ oder $v_1 = v_1' - v_2'$ (die Vektorgleichung lässt beide Möglichkeiten, $\vec{v}_1$ parallel oder antiparallel zu $\vec{v}_2{}'$, zu) der binomische Satz $v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 \pm 2v_1'v_2'$ zusammen mit der Bedingung über das Geschwindigkeitsprodukt $v_1'v_2' \neq 0$ einen Widerspruch zum skalaren Erhaltungssatz der Geschwindigkeitsquadrate liefert (der Sonderfall $\vec{v}_2{}' = \vec{0}$ wird nicht beobachtet). Der Punkt Nr. 1 besitzt nur dann eine von null verschiedene Geschwindigkeit, wenn durch den Stoß eine Richtungsänderung eintritt.

Etwas kompakter formuliert können die beiden Erhaltungssätze mit Hilfe des Skalarprodukts zusammengefasst werden: $v_1^2 = \vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1 = (\vec{v}_1{}' + \vec{v}_2{}') \cdot (\vec{v}_1{}' + \vec{v}_2{}') = v_1'^2 + v_2'^2 + 2\vec{v}_1{}' \cdot \vec{v}_2{}'$, und der skalare Erhaltungssatz zeigt uns, dass das Skalarprodukt $\vec{v}_1{}' \cdot \vec{v}_2{}'$ in jedem Fall verschwindet. Damit sind beide Ergebnisse $a)$ und $b)$ einheitlich beschrieben (der Sonderfall $\vec{v}_1{}' \neq \vec{0}$ und $\vec{v}_2{}' = \vec{0}$ tritt physikalisch nicht ein).

In der Physik sucht man stets nach Erhaltungssätzen, die eng mit Symmetrieeigenschaften des betrachteten Systems gegenüber gewissen Transformationen zusammenhängen. Das System erweist sich diesen Transformationen gegenüber in bestimmter Weise als invariant (die Größe *Wirkung* bleibt ungeändert).

Mit den beiden eben genannten Sätzen lassen sich die Beobachtungen erklären. Die hierzu gehörenden Transformationen sind Translationen (Verschiebungen) der räumlichen Koordinaten und der Zeitkoordinate des betreffenden mechanischen Systems.

Ein Leser kann jetzt einwenden: von diesen Sätzen der ***Geschwindigkeitserhaltung*** und der ***Geschwindigkeitsquadraterhaltung*** habe ich noch nie etwas gehört, und sie führen mich eventuell auf einen falschen Weg. Der unvoreingenommene Betrachter wird aber zugeben müssen, dass sie zutreffen, denn sie erklären die Beobachtungen dieses einfachen Experiments richtig und vollständig. Tatsächlich sind sie in den Lehrbüchern der Mechanik in dieser Form nicht zu finden: ihr Gültigkeitsbereich ist sehr eingeschränkt. Sobald der elastische Stoß zwischen Kugeln erfolgt, die sich in ihren mechanischen Eigenschaften (bezüglich ihrer *Trägheit*, der *Schwere*) unterscheiden, sind beide Sätze durch die natürlich gut bekannten ***Erhaltungssätze von Impuls und Energie*** zu ersetzen. Impuls und Geschwindigkeit eines massebehafteten Punktes sind zueinander parallele Vektoren, und seine kinetische Energie ist dem Geschwindigkeitsquadrat proportional.

Gäbe es im *Denkmodell Massenpunkt* nur mechanisch völlig gleichartige Punkte, dann würden die beiden erstgenannten Sätze eine wesentliche Rolle spielen.

Zurück zum Beispiel: Falls eine Kugel *träger* als die andere ist, dann unterscheiden sich beide Kugeln in ihrer *Masse*: $m_1 \neq m_2$. Dabei zeigt sich, dass die charakteristischen Größen der Kugeln nach dem Stoß nur durch das Massenverhältnis m_1/m_2 bestimmt werden, so dass auch mit Hilfe dieses Prozesses eine Definition der Größe *Masse* möglich ist.

Im einfachen Fall gleicher Massen und zueinander paralleler Geschwindigkeiten $\vec{v}_1, \vec{v}_1{}'$ sind die so genannten *Geschwindigkeitsüberträge* vollständig: $\vec{v}_1{}' - \vec{v}_1 = -\vec{v}_2{}' = -\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2{}' - \vec{v}_2 = \vec{v}_2{}' = \vec{v}_1$; die Kugel Nr. 1 „verliert“ im Stoßprozess ihre gesamte Geschwindigkeit, die Kugel Nr. 2 „gewinnt“ diese.

Im Fall $m_1 \neq m_2$ hängt der *Impulsübertrag* $\vec{p}_1{}' - \vec{p}_1 = -\vec{p}_2{}'$ vom Massenverhältnis ab.

Einzelheiten zum elastischen Stoß folgen in den Aufgaben 19, 20 und 21.

Im Fall eines unelastischen Stoßes kann der Winkel α zwischen den Impulsvektoren jeden Wert annehmen, es gilt nur der Impulserhaltungssatz.

Die Erhaltungssätze der Physik gelten nicht uneingeschränkt: jeder Satz ist an die Erfüllung spezieller Voraussetzungen geknüpft. Erweitert man den Gültigkeitsbereich einer Disziplin, so sind oft Erhaltungsgrößen passend neu zu definieren (das obige Beispiel des elastischen Stoßes vermittelt dazu nur einen ganz elementaren Eindruck). In der relativistischen Mechanik zum Beispiel gilt der Impulserhaltungssatz erst nach einer Definition des relativistischen Impulses; es werden dabei Impuls und Energie eines relativistischen Teilchens in der sogenannten *relativistischen Energie-Impuls-Relation* neu zusammengefasst. In den Zerfallsreaktionen der Elementarteilchen ist selbst die Masse (gegenüber den Stoßprozessen der klassischen Mechanik) keine Erhaltungsgröße mehr.

1.3 Weitere Untersuchungsgegenstände der Mechanik

Besonders interessant ist das Bewegungsverhalten des *starren Körpers*; die Abstände eines jeden Paars von Punkten ist hier nach Voraussetzung konstant. Dieses *Denkmodell* ist den Eigenschaften der ausgedehnten Körper unserer Umwelt eher angepasst als das Denkmodell eines Punktes.

Schließlich befasst sich die theoretische Mechanik auch mit „kontinuierlichen“ Systemen: Jedem Punkt P eines Gebietes des $\mathbb{R}^3$ wird die *Dichte* ρ einer bestimmten Größe zugeordnet, z. B. die *Massendichte* als Funktion der Zeit t. Die Kontinuumsmechanik arbeitet mit dem *Denkmodell des Feldes* einer physikalischen Größe. Das Bewegungsverhalten verformbarer fester Körper („weiche“ Materie) ist Gegenstand der Elastizitätstheorie, das Bewegungsverhalten von strömenden Flüssigkeiten und Gasen ist Gegenstand der Hydrodynamik.

Bei komplizierten Systemen der Mechanik interessiert neben der Dynamik (besonders im Hinsicht auf Anwendungen), ob Gleichgewichtslagen auftreten können und welche von diesen stabil sind (die Untersuchung der Stabilität von Fixpunkten des Bewegungsverhaltens selbst ist ein komplexes Problem). Neben Gleichgewichtslagen besitzen nichtlineare Systeme weitere sehr interessante reguläre und irreguläre Bewegungsformen.

Die *relativistische Mechanik* beschäftigt sich mit Objekten, die sich in einem Bezugssystem mit großen Geschwindigkeiten (die bis an die Vakuumlichtgeschwindigkeit heranreichen) bewegen. Hierfür gelten neue Bewegungsgleichungen, die *lorentz-invariant* sind, während das *Newton*’sche Bewegungsgesetz (und weitere daraus folgende Bewegungsgleichungen) *galilei-invariant* ist.

In der *Newton’schen Mechanik* gilt das so genannte *Galilei’sche Relativitätsprinzip*, während die relativistische Mechanik das *Einstein’sche Relativitätsprinzip* beinhaltet. Dabei geht es darum, dass die Grundgleichungen in allen relativ zueinander gleichförmig bewegten Bezugssystemen die gleiche Form besitzen.

Die so genannte *Erfahrung* lehrt uns:

Die Gleichungen, in denen die Naturgesetze formuliert werden, sind invariant gegenüber einer Transformation der Koordinaten und (auch) der Zeit von einem Inertialsystem zu einem zweiten Inertialsystem. Zwar werden Orts- und Zeitkoordinaten transformiert, die *Form der Bewegungsgleichungen* bleibt jedoch ungeändert (*Forminvarianz der Grundgleichungen*).

Die Veranstaltungen zum *Einsteinjahr 2005* erinnerten an das 100-jährige Bestehen der relativistischen Physik.

Die Denkmodelle „Punkt“ und „Feld“ allein reichen nicht aus, um die Objekte der Umwelt theoretisch zu erfassen. In der *Quantenmechanik* wird gezeigt, dass der Begriffsapparat der klassischen Disziplinen *Mechanik*, *Statistische Mechanik* und *Elektrodynamik* zur Beschreibung des Verhaltens von Atomen, Atomkernen, Molekülen, von einzelnen oder wechselwirkenden Elementarteilchen und deren Anregungszuständen, von Plasmen und von Sternen völlig ungeeignet ist.

1.4 Merkwürdige Behauptungen und Fragen

Bitte prüfen Sie, ob die nachfolgenden etwas provokativ aufgestellten Behauptungen und Fragen auf Systeme der klassischen Mechanik zutreffen. Kennzeichnen Sie die Behauptungen mit *wahr* oder *falsch*.

Falls Ihnen einige Aussagen als so trivial selbstverständlich (also *wahr*) erscheinen, dass sie eigentlich nicht erst formuliert werden sollten, so könnten Sie (unter Umständen schon mit gewissen Vorkenntnissen aus der Quantenphysik ausgerüstet) überlegen, ob diese Sätze eventuell nur auf die klassische Physik zutreffen.

Versuchen Sie, auch auf die Fragen eine Antwort zu geben.

Die Behauptungen sollen zum weiteren Nachdenken anregen, daher treffen wir hier die Entscheidung für *wahr* oder *falsch* nicht.

Ein Problem besteht allerdings:

Wir können im Rahmen dieser Darstellung keine Definition des Messprozesses geben; eventuell ist dieser ja bereits in einer Grundvorlesung zur Experimentalphysik ausführlich besprochen worden. Der Messprozess ist gerade für die theoretische Physik von enormer Bedeutung, denn er liefert die Information, die man aus der Wechselwirkung zwischen Messobjekt und Messgerät (beides sind physikalische Systeme) gewinnt.

Die Entwicklung der Quantentheorie machte gerade eine Klärung des Begriffs der *physikalischen Größe* im Rahmen des *Messprozesses* erforderlich.

Die Formulierung von Sätzen ohne scharfe Definition der benutzten Begriffe birgt leicht die Gefahr von Missverständnissen in sich. Auf jeden Fall sollte über die folgenden Behauptungen und Fragen nachgedacht werden (selbst wenn die Antwort zu geben sehr einfach oder zu schwer erscheint).

1. Ein *Massenpunkt* besitzt als mechanisches System zu jedem Zeitpunkt t einen bestimmten Ort. Er besitzt jederzeit Messwerte aller Größen, die für ihn definiert sind.

2. Ein Massenpunkt besitzt erst eine bestimmte Ortskoordinate, wenn an ihm eine Ortsmessung das betreffende Ergebnis geliefert hat.

3. In einem System von Massenpunkten hat jeder Punkt zu jeder Zeit t eine bestimmte Geschwindigkeit unabhängig davon, ob eine Messung der Geschwindigkeitskoordinaten durchgeführt wurde.

4. Besitzen wir durch die Angabe:

   „Ein System von n Massenpunkten besitzt zum Zeitpunkt t die Orte $\vec{r}_j(t), \quad (j = 1, \ldots, n)$“ bereits die maximal mögliche „Information“ über dieses System?

5. Der Begriff *„Zustand“* des Systems ist ein zentraler Begriff in der klassischen Physik und der Quantenphysik. Er beschreibt den Kenntnisstand, also die Information, die wir über das betreffende Objekt besitzen.

   Welche Angaben sind erforderlich, um den Zustand eines Systems von n Massenpunkten $(n = 1, 2, 3, \ldots)$ zu charakterisieren?

6. Jedes mechanische Teilchen beschreibt in dem (für die Bewegung zugelassenen) Raum eine Bahnkurve (Trajektorie).

7. Ein Quantenteilchen (z. B. ein Atomelektron) bewegt sich im Raum $\mathbb{R}^3$ auf einer Trajektorie.
8. Für alle Gebiete der Physik trifft zu: Aus der Messung einiger Größen am System können mit Hilfe von Formeln die Messwerte für bestimmte abgeleitete Größen errechnet werden.

   Zum Beispiel sind aus Messwerten von Impuls und Ort die Messwerte der Gesamtenergie berechenbar.
9. Gibt es Zeitpunkte, zu denen sich ein mechanisches System nicht in einem Zustand befindet, in dem es einen bestimmten Wert des Drehimpulses besitzt?
10. Jedes physikalische System besitzt zu jeder Zeit einen bestimmten Wert der Energie.
11. Zur Gewinnung von Informationen über ein System spielt es keine Rolle, in welcher Reihenfolge zwei Messungen von Größen kurz aufeinander folgend durchgeführt werden.
12. Unabhängig davon, ob das mechanische System „beobachtet“ wird oder nicht, besitzt es in jedem Zeitpunkt Messwerte aller für dieses Objekt definierten Größen.
13. Bei der Beobachtung eines Systems (d. h. bei einer „Messung“ am System) werden grundsätzlich alle Messwerte „verstellt“; es wäre dann also niemals der Zustand des Systems unmittelbar vor Durchführung der Messung feststellbar.
14. Die Feststellung eines bestimmten Zustandes an einem System bedeutet einen deutlichen „Eingriff“ und verändert im Allgemeinen seinen Ausgangszustand.
15. Die Ortskoordinate irgendeines Teilchens der Physik ist entweder $x = 41$ mm oder sie ist $x \neq 41$ mm.
16. Ein Schüler interpretiert das Axiom *actio = reactio* in folgender Art: „Zu jeder an einem Massenpunkt angreifenden Kraft $\vec{F}$ existiert eine ihr entgegengesetzt gerichtete Kraft $-\vec{F}$ von gleichem Betrag“. Er schließt daraus: alle Kräfte kompensieren sich zu null, und jeder Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.

    Was zeigt die Erfahrung? Welche zusätzliche Information braucht der Schüler?
17. Da auf jedes mechanische System stets Kräfte wirken, ist dessen geradlinig gleichförmige Bewegung praktisch niemals zu erreichen.
18. Der Energiezustand eines Systems kann eine Überlagerung aus zwei Energiezuständen mit den beiden Energiewerten E_1 und $E_2 \neq E_1$ sein. Welchen Wert der Energie besitzt das System dann?
19. Es ist möglich, durch fortlaufende Messung von mehreren Größen die Information über ein System ständig zu erhöhen.
20. Ein physikalisches System kann jeden beliebigen Energiewert (oder Drehimpulswert) aus einem Intervall von dem System prinzipiell zugänglichen Werten dieser Größen annehmen.

21. Kann sich ein physikalisches System in einem Zustand befinden, in dem es weder einen bestimmten Energie- noch einen bestimmten Impulswert besitzt?
22. Warum ist jede Messung an einem physikalischen System ein Prozess mit Wechselwirkung?
23. Kann ein Massenpunkt prinzipiell auf eine beliebig hohe Geschwindigkeit beschleunigt werden? Welche Eigenschaft zeigen (in diesem Zusammenhang) ruhmasselose und nahezu ruhmasselose Elementarteilchen? Kennen Sie solche Teilchen?
24. Eine um eine Achse rotierende elektrische Ladung eines Massenpunktes erzeugt ein magnetisches Moment; diese Größe ist ein Vektor und steht im Zusammenhang mit dem Vektor des Bahndrehimpulses des umlaufenden Punktes. Besitzen diese Vektoren für jedes physikalische System beliebige Orientierungen im Raum?
25. Die Elektrodynamik untersucht das Bewegungsverhalten punktförmiger und ladungsbehafteter *Teilchen* unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder. Massenpunkte können eine Ladung besitzen. Gibt es masselose *Ladungspunkte*?
26. Diskutieren Sie über die möglichen *Vorzeichen* der Größen *Masse* und *Ladung* in der Mechanik und der Elektrodynamik.