

Entwicklung von digital unterstützten Maßnahmen zur Förderung des fachspezifischen Problemlösens

Experimentelle und Theoretische Mechanik



Stiftung
Innovation in der
Hochschullehre

Anna B. Bauer
Nilab Abbas
Dirk Reuter

Mitarbeit: Adriana Bocchini, Moritz Borchardt, Paul Budde, Isabelle Dollmann, Theresa Keuter, Lena Kronshage, Yves Sean Köppeler, Janik Kramer, Jörg Benedikt Kramer, Annika Kuhn, André Schäfer, Anna Wilke

Entstanden im Teilprojekt AP1a des Projektes Digitalisierung als Herausforderung und Innovation in der Hochschullehre (DigiSelf) gefördert durch die Stiftung Innovation in der Hochschullehre (STiL), <https://stiftung-hochschullehre.de>

Einleitende Worte

Sehr geehrte Dozierende,

die vorliegenden Lehr-Lern-Materialien zur Experimentellen und Theoretischen Physik der Mechanik und sind in Zusammenarbeit von Physikdidaktiker:innen mit Physiker:innen und Studierenden an der Universität Paderborn entstanden. Im Folgenden stellen wir die Materialien kurz vor und skizzieren Ihnen mögliche Einsatzszenarien.

Didaktische Überlegungen zu den Materialien

Studienanfänger:innen scheitern zu Beginn des Physikstudiums häufig an inhaltlichen Anforderungen, zu denen u. a. das Bearbeiten von Übungsaufgaben gehört. Empirische Forschungsarbeiten zeigen, dass beim Lösen von physikalischen Problemstellungen vor allem das Auswählen eines geeigneten Ansatzes zu Beginn des Studiums sehr herausfordernd ist. Hier müssen die Studierenden zunächst Problemlösefähigkeiten entwickeln, um solche Aufgaben in unterschiedlichen Themenfeldern routiniert lösen zu können.

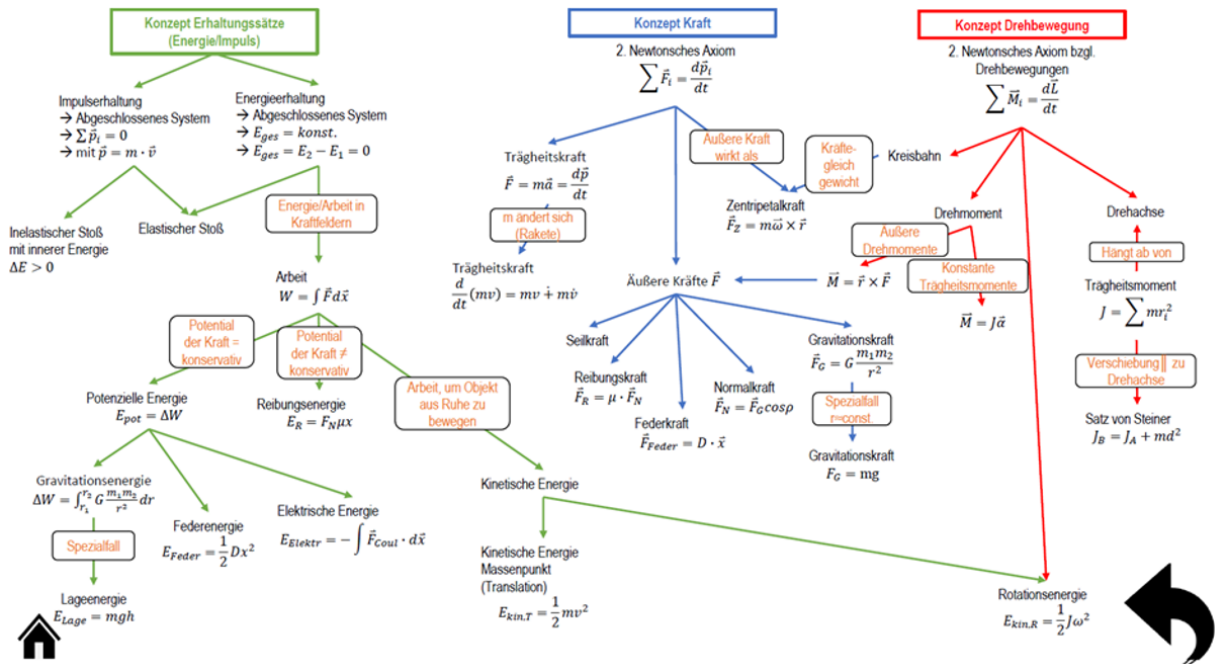
Für die Materialentwicklung für die Experimentelle und Theoretische Physik haben wir uns zum Ziel gesetzt, den Studierenden zeit- und ortsunabhängiges, selbstständiges Lernen abgestimmt auf ihre individuellen Fähigkeiten zu ermöglichen.

Experimentelle Physik

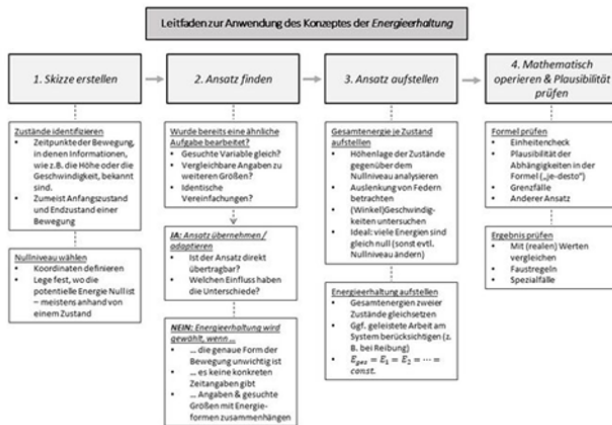
Wir haben uns inhaltlich auf die drei elementarsten Konzepte, Erhaltungssätze, Kraft und Drehbewegungen konzentriert. Hier in Paderborn machen diese Themenfelder rund 80% der Aufgaben im ersten Semester aus. Die Materialien bestehen je Themenblock aus drei aufeinander abgestimmten Bausteinen:

1. **Interaktive Lernlandkarte zum Finden eines Ansatzes:** Studierenden fällt es zu Beginn schwer anhand der gegebenen und gesuchten Variablen passende physikalische Konzepte auszuwählen und einen geeigneten Ansatz aufzustellen. In der interaktiven Lernlandkarte werden die physikalischen Konzepte miteinander in Beziehung gesetzt und in Form eines Entscheidungsbaums zur Verfügung gestellt. Die Datei kann interaktiv genutzt werden, d. h. man kann die pptx starten und sich dann durch Anklicken der Felder strukturiert durch diese hindurch navigieren.
2. **Leitfäden für die typischen Prozessschritte:** Hier wird jeder Schritt, den die Studierenden beim Lösen von Aufgaben in den drei Konzepten machen müssen, begründet und komprimiert dargestellt.
3. **Worked-Examples:** Zu jedem Themenkomplex sind unterschiedlich komplexe Beispiellösungen entstanden, anhand derer die Studierenden die Schritte des Leitfadens nachvollziehen können und sehen, wie diese angewendet werden. Weiterhin werden ihnen Hinweise dazu gegeben, welcher Ansatz sich aus welchen Gründen am besten eignet.

Interaktive Lernlandkarte



Leitfäden



Worked-Examples

2. Physikalisches Konzept auswählen

Für das **Konzept Kraft** spricht:

- Bremsen führt zu einer Bewegungsänderung, also zu einer (negativen) Beschleunigung a .
- Es liegt Reibung vor.

Für das **Konzept Erhaltungssätze** spricht:

- Es ist eine Geschwindigkeit gegeben.
- Es wird eine Strecke gesucht.

Wir wollen hier zeigen, dass sowohl das **Konzept Kraft** als auch das **Konzept Erhaltungssätze** zielführend ist. Jedoch liefert das Konzept Erhaltungssätze das Ergebnis zügiger als das Konzept Kraft. Viele Aufgaben lassen sich mit beiden Konzepten lösen. Erfahrungsgemäß sollte das Konzept Erhaltungssätze gewählt werden, da die Lösung schneller und einfacher zu erreichen ist.

Mögliche Einsatzszenarien

Der Einsatz der Materialien in der Physik der Universität Paderborn zeigte, dass die Studierenden diese in der Vorlesungszeit nur in seltenen Fällen selbstständig nutzen, wenn sie nicht in die Lehre eingebunden werden. Im Folgenden skizzieren wir Ihnen kurz mögliche Einsatzszenarien:

1. *Verwendung der Materialien als Diskussionsgrundlage:*

Die Lernlandkarte oder auch die Worked-Examples, bei denen nicht direkt klar ist, welcher Ansatz am besten funktioniert (WA1-5), bieten sich für Vorlesungen und Übungen als Diskussionsgrundlage für die grundsätzliche Vermittlung von Problemlösestrategien (insb. Ansatz finden) an. Dadurch könnte ein Teil der Vorlesung aktivierender gestaltet werden und durch die Nutzung unterschiedlicher Sozialformen (Einzel- bis Gruppenarbeit) auch die Fähigkeiten der Studierenden im Bereich des kooperativen, selbstständigen Lernens gefördert werden.

2. *Verwendung als Materialien zum Erlernen von Problemlösefähigkeiten:*

Die Worked-Examples können in Vorlesungen und Übungen gezielt zu Beginn eines neuen Themenkomplexes eingesetzt werden, damit die Studierenden einen strukturierten Einstieg in die typischen Ansätze zum Lösen von Problemen in dem Themenfeld erlernen können. Durch das Vorhandensein von Lösungen kann den Studierenden ein hohes Maß an Selbstständigkeit beim Lernen ermöglicht werden.

3. *Verwendung als zusätzliches Material zur Klausurvorbereitung:*

Durch die vielfältigen Kontexte der Aufgaben, haben die Studierenden eine breite Auswahl, um die unterschiedlichen physikalischen Konzepte zu vertiefen und sich so strukturiert auf die Klausur vorzubereiten. Durch die Musterlösungen eignet sich das Material besonders zum selbstständigen Lernen.

Theoretische Physik

Wir haben uns bei der Materialentwicklung zunächst auf Problemlösungen in den Themengebieten Lagrange I & II und Hamilton fokussiert. Die Materialien bestehen je Themenblock aus vier aufeinander abgestimmten Bausteinen:

1. **Leitfäden für die typischen Prozessschritte:** Hier wird jeder Schritt, den die Studierenden beim Lösen von Aufgaben machen müssen, begründet und komprimiert dargestellt.
2. **Worked-Examples:** Zu jedem Themenkomplex sind unterschiedlich komplexe Beispiellösungen entstanden, anhand derer die Studierenden die Schritte des Leitfadens nachvollziehen können und sehen, wie diese angewendet werden.
3. **Beispielaufgaben mit gestuften Hilfestellungen und Lösungen:** Anhand der unterschiedlich komplexen Beispielaufgaben können die Studierenden ihre Fähigkeiten selbst anwenden und sich bei Bedarf Hilfestellungen holen. Anhand der Lösungen können sie ihren Erfolg überprüfen.
4. **Selbsttests mit ausführlichem Feedback:** Hier können die Studierenden ihr Wissen testen und erhalten bei falschen Antworten ein Feedback, warum die Antwort nicht korrekt war.

Handlungsorientierte Leitfäden

Typischer Verfahrensablauf beim Lösen von Lagrangeaufgaben 1. Art

In diesem Verfahrensablauf wird erläutert wie du mithilfe der Lagrange-Gleichungen 1. Art die Bewegungsgleichungen für ein System mit Zwangsbedingungen bestimmst. Die Lagrange-Gleichungen 1. Art sind eine Erweiterung der newtonschen Bewegungsgleichungen und erlauben es unbekannte Zwangskräfte zu berücksichtigen und zu bestimmen.

Info: Wann werden die Lagrange-Gleichungen 1. Art und wann die Gleichungen 2. Art benutzt?

In beiden Verfahren ermitteln wir die Bewegungsgleichungen eines Systems, das Zwangsbedingungen unterliegt, und lösen diese schließlich. Die Lagrange-Gleichungen 1. Art erlauben es uns die wirkenden Zwangskräfte zu bestimmen, während die Zwangskräfte in den Lagrange-Gleichungen 2. Art nicht vorkommen. Die Verwendung der Lagrange-Gleichungen 1. Art ist aufwendiger und die genaue Form der Zwangskräfte ist aber meistens gar nicht von Interesse, sodass die Verwendung der Lagrange-Gleichungen 2. Art meistens deutlich vorteilhafter ist. Die Lagrange-Gleichungen 1. Art sollten daher nur verwendet werden, wenn die Zwangskräfte bestimmt werden sollen.

Für ein System aus N Punktmassen, das j unabhängigen holonomen Zwangsbedingungen unterliegen (d.h. sie lassen sich als Gleichung $f_k(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N, t) = 0$ schreiben), kannst du nach folgendem Schema vorgehen:

0. Skizze anfertigen

Fertige eine Skizze an, falls in der Aufgabenstellung nicht schon eine vorhanden ist. Veranschauliche dir anhand dieser die wirkenden Kräfte und Bewegungseinschränkungen, denen die Punktmassen unterliegen.

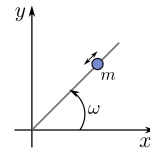
1. Lagrange-Gleichungen 1. Art bestimmen

Im ersten Schritt müssen für jedes der N Teilchen die Lagrange-Gleichungen 1. Art bestimmt werden. Diese lauten:

Worked-Examples

Perle auf rotierender Stange - Einfach

Eine Punktmasse befindet sich auf einer Stange und kann sich nur entlang der Stange reibungsfrei bewegen. Die Stange befindet sich in der xy -Ebene und rotiert mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω entgegen den Uhrzeigersinn um den Ursprung. Abgesehen von den Zwangskräften wirken keine weiteren Kräfte.



Gib die Zwangsbedingungen an und bestimme mithilfe des Lagrange-Formalismus die Bewegungsgleichung, die das System beschreibt. Löse die Gleichung unter den folgenden Anfangsbedingungen: Der Abstand der Masse zum Ursprung betrage r_0 für $t = 0$ und die Masse hat für $t = 0$ keine Geschwindigkeit in Richtung des Stabes.

1. Zwangsbedingungen analysieren & Anzahl der Freiheitsgrade bestimmen

Die Bewegung findet nur in der xy -Ebene statt, deshalb rechnen wir direkt in zwei Dimensionen und lassen die z -Koordinaten der Einfachheit halber weg. Die Rotation mit Winkelgeschwindigkeit ω ist ein Zwang, den das System unterliegt. Diese Rotation ist genau vorgeschrieben und der Stab kann nicht rotieren wie er will, deswegen wird dadurch die Bewegungsfreiheit der Punktmasse eingeschränkt. Wenn wir den Winkel des Stabes zur x -Achse φ nennen, können wir diese rheonome Zwangsbedingung schreiben als:

$$\varphi - \omega t = 0$$

Insgesamt haben wir also $r = 1$ Zwangsbedingung, der das System aus $N = 1$ Teilchen unterliegt. Die Anzahl der Freiheitsgrade ist damit $f = 2N - r = 2 - 1 = 1$.

2. Generalisierte Koordinaten wählen & Ortsvektor aufstellen

Da wir einen Freiheitsgrad haben, brauchen wir eine generalisierte Koordinate. Es bietet sich der Abstand zum Ursprung $q = r$ an. Diese Koordinate können wir als generalisierte Koordinate wählen, da sie den Ort der Punktmasse eindeutig festlegt.

Aufgaben mit gestuften Hilfen

Zylindersymmetrisches Potential - Einfach

Für ein System aus einer Punktmasse m sei folgendes zylindersymmetrisches Potential gegeben:

$$V(\rho) = V_0 \left(\frac{\rho^2}{\rho_0^2} + \frac{\rho^3}{\rho_0^3} \right)$$

Dabei sind V_0 und ρ_0 Konstanten. Bestimme die Hamilton-Funktion und die kanonischen Gleichungen. Gibt es Erhaltungsgrößen?

Hinweis: Es darf ohne Beweis verwendet werden, dass die kinetische Energie einer Punktmasse in Zylinderkoordinaten durch

$$T = \frac{m}{2} (\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2)$$

gegeben ist.

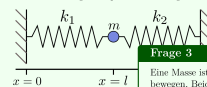
Hilfestellung 1: Das Potential ist zylindersymmetrisch, verwende daher Zylinderkoordinaten (ρ, φ, z) . Es gibt keine Zwangsbedingungen.

Hilfestellung 2: Da es keine Zwangsbedingungen gibt, sind drei generalisierte Koordinaten zu wählen. Es bieten sich die Zylinderkoordinaten an: $q_1 = \rho$, $q_2 = \varphi$, $q_3 = z$. In diesen Koordinaten kann die Lagrange-Funktion direkt hingeschrieben werden, T und V können aus der Aufgabenstellung entnommen werden.

Selbsttest

Frage 3

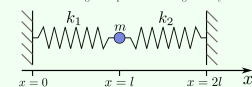
Eine Masse ist zwischen zwei Federn eingespannt und kann sich nur in x -Richtung bewegen. Beide Federn haben eine Ruhelage von l . Die untere Abbildung zeigt das System in seiner Ruhelage. Die potentielle Energie des Systems ist:



1. $V(x) = \frac{1}{2}k_1(x-l)^2 + \frac{1}{2}k_2(x-l)^2$
2. $V(x) = \frac{1}{2}k_1(x+l)^2 + \frac{1}{2}k_2(x+l)^2$
3. $V(x) = \frac{1}{2}k_1x^2 + \frac{1}{2}k_2x^2$

Frage 3

Eine Masse ist zwischen zwei Federn eingespannt und kann sich nur in x -Richtung bewegen. Beide Federn haben eine Ruhelage von l . Die untere Abbildung zeigt das System in seiner Ruhelage. Die potentielle Energie des Systems ist:



1. $V(x) = \frac{1}{2}k_1(x-l)^2 + \frac{1}{2}k_2(x-l)^2$
Richtig
2. $V(x) = \frac{1}{2}k_1(x+l)^2 + \frac{1}{2}k_2(x+l)^2$
Falsch: In der Ruhelage $x = l$ wirkt keine Kraft, d.h. $F(x=l) = 0$. Für den Ausdruck hier würde sich aber folgende Kraft ergeben $F = -dV/dx = -k_1(x+l) - k_2(x+l)$. Damit gilt NICHT $F(x=l) = 0$.
3. $V(x) = \frac{1}{2}k_1x^2 + \frac{1}{2}k_2x^2$
Falsch: In der Ruhelage $x = l$ wirkt keine Kraft, d.h. $F(x=l) = 0$. Für den Ausdruck hier würde sich aber folgende Kraft ergeben $F = -dV/dx = -k_1x - k_2x$. Damit gilt NICHT $F(x=l) = 0$.

Hinweis:

Die hier veröffentlichten Materialien beinhalten lediglich einige „Standardaufgaben“ zum Lagrange- und Hamilton-Formalismus. Die inhaltliche Breite dieser Formalismen wird also keineswegs abgedeckt. Um eine möglichst hohe Passgenauigkeit für Ihre Lerngruppe zu erreichen, ist ggf. an der ein oder anderen Stelle eine Ergänzung bzw. Modifikation vorzunehmen.

Mögliche Einsatzszenarien:

Der Einsatz der Materialien in der Physik der Universität Paderborn zeigte, dass die Studierenden diese in der Vorlesungszeit nur in seltenen Fällen selbstständig nutzen, wenn sie nicht in die Lehre eingebunden werden. Im Folgenden skizzieren wir Ihnen kurz mögliche Einsatzszenarien:

1. Verwendung als Materialien zum Bearbeiten in der Übung:

Wenn Sie sicherstellen wollen, dass sich die Studierenden mit den Inhalten auseinandersetzen, könnten Sie die Materialien vor Ort in der Vorlesung oder der Übung einsetzen und von den Studierenden in Einzel- oder Gruppenarbeit bearbeiten lassen. Sie können dann individuell bei Bedarf Hilfestellungen geben. Die Materialien sind so

formatiert, dass sie die gestuften Hilfestellungen oder auch Lösungen unabhängig von den Aufgabenstellungen herausgeben können.

2. *Als zusätzliches Material zur Klausurvorbereitung*

Stellen Sie die Materialien am Ende des Semesters als weitere Übungsgelegenheit zur Klausurvorbereitung bereit. Durch ihre verschiedenen und transparenten Schwierigkeitsgrade helfen die Materialien den Studierenden dabei ihren Lernstand einzuschätzen und somit zu beurteilen, ob sie ein Lösungsverfahren auf ausreichendem Niveau beherrschen.

3. *Verwendung als Selbstlernmaterialien auf einer digitalen Plattform*

Die Materialien sind durch die beschriebene Berücksichtigung der individuellen Fähigkeiten sowie den erhaltenen Feedbackstrukturen so konzipiert, dass sie das selbstständige Lernen unterstützen. Um einer möglichst großen Anzahl von Studierenden und auch anderen Dozierenden die Materialien nachhaltig, ohne die terminliche Bindung an eine Veranstaltung bereitzustellen, können Sie sie als Selbstlernmaterialien auf einer digitalen Lernplattform implementieren.

Lizenzhinweise

Die Inhalte der OER (Open Educational Resources) Lehr-Lernmaterialien zur Theoretischen Physik unterliegen - sofern nicht anders gekennzeichnet - der Lizenz Creative Commons – Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC-BY-SA 4.0).

Die Logos auf der Titelseite (der Universität Paderborn, des Physiktreffs der Universität Paderborn, der Stiftung für Innovation in der Hochschullehre und des Projekts DigiSelf) sind von der Lizenzierung ausgenommen.

Hinweise zum Urheberrecht:

Gestaltung der Materialien und Inhalte:

- Nilab Abbas (Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Dr. Anna B. Bauer (Leitung des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Dr. Adriana Bocchini (Postdoc in der Gruppe Theoretische Materialphysik)
- Moritz Borchardt (Studentischer Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Paul Budde (Studentischer Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Isabelle Dollmann (Studentische Mitarbeiterin des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Theresa Keuter (Studentische Mitarbeiterin des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Lena Kronshage (Studentische Mitarbeiterin des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Yves Sean Köppeler (Studentischer Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Janik Kramer (Studentischer Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Jörg Benedikt Kramer (Studentischer Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Annika Kuhn (Studentin des Departments Physik)
- André Schäfer (Studentischer Mitarbeiter des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Anna Wilke (Studentische Mitarbeiterin des Lehr-Lernzentrums Physiktreff)
- Prof. Dr. Dirk Reuter (Leitung der Gruppe Optoelektronische Materialien und Bauelemente)

Universität Paderborn

Department Physik – Lehr-Lernzentrum Physiktreff

Warburgerstraße 100

33098 Paderborn

Homepage: <https://physik.uni-paderborn.de/physiktreff>