

Michael Ludemann und Martin Ernst Kraus

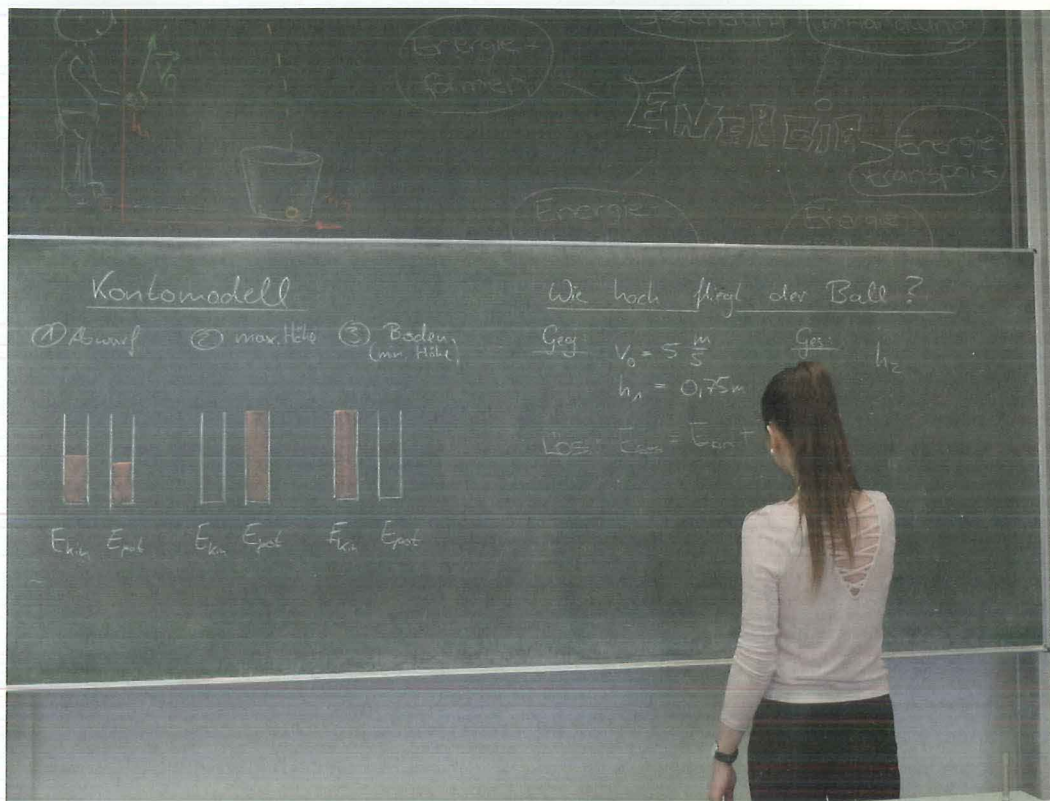
Energieerhaltung anwenden, Energiebilanzen beherrschen

Eine Methode zur Diagnose des Verständnisses der Energieerhaltung bei Schülerinnen und Schülern

KLASSENSTUFE:	10
ZEITUMFANG:	4 Doppelstunden
THEMEN:	Energiebilanzen, Kontomodell
KOMPETENZEN:	Erkenntnisgewinnung, Mathematisierung
METHODEN:	mathematisches Modellieren mit dem Kontomodell

Welcher Lehrkraft ist nicht der folgende Schülerdialog bekannt: „Ich weiß den Ansatz nicht.“ – „Du musst einfach nur $E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$!“. Obwohl das Prinzip der Energieerhaltung auch in dieser verkürzten Form Potenzial hat, reicht es gerade bei komplexeren Problemen nicht aus. So wäre dieser Ansatz bei der Beispielaufgabe in **Kasten 2** auf S. 40 nicht zielführend. Wenn die Schülerinnen und Schüler den Energieansatz nicht detailliert hergeleitet haben (wie z. B. in **Kasten 1** dargestellt), kann man als Lehrkraft nicht davon ausgehen, dass das Prinzip der Energieerhaltung verstanden wurde. Es fehlt oft an heuristischen Strategien, die es den Schülerinnen und Schülern erlauben würden, für unterschiedlich geartete Probleme Lösungen zu finden.

Deswegen sollte die Herleitung der Energiebilanz für verschiedene Probleme im Unterricht besprochen (s. **Abb. 1**) und gleichzeitig aufmerksam verfolgt werden, wie sich das Verständnis der Energieerhaltung entwickelt. Der vorliegende Beitrag ist im Rahmen einer Examensarbeit entstanden. Die vorgestellte Unterrichtssequenz beinhaltet eine Methode zur formativen Diagnostik, die die Entwicklung eben dieses Verständnisses der Energieerhaltung (kontinuierlich) überprüft.



1 | Eine Schülerin hat die Vorarbeit zur Bilanzierung des Wurfproblems bewältigt und steht nun an der Schlüsselstelle – einen Lösungsansatz zu finden.

INFORMATIONEN 1

Vollständige Herleitung der Energieerhaltung

Die vollständig formalisierte Herleitung zeigt den Umfang der Argumentation und die Fülle an physikalisch zu begründenden Zusatzannahmen. Zustand (1) entspricht dem Zeitpunkt des Abwurfes in der Beispielaufgabe (**Kasten 2**) und Zustand (2) dem höchsten Punkt der Wurfparabel.

$$E_{\text{ges}}^{(1)} = E_{\text{kin}}^{(1)} + E_{\text{pot}}^{(1)} + E_{\text{spann}}^{(1)} + E_{\text{therm}}^{(1)} \quad \text{mit } E_{\text{spann}}^{(1)} = E_{\text{therm}}^{(1)} = 0$$

$$E_{\text{ges}}^{(2)} = E_{\text{kin}}^{(2)} + E_{\text{pot}}^{(2)} + E_{\text{spann}}^{(2)} + E_{\text{therm}}^{(2)} \quad \text{mit } E_{\text{kin}}^{(2)} = E_{\text{spann}}^{(2)} = 0 \text{ und } E_{\text{therm}}^{(2)} \approx 0$$

$$E_{\text{ges}}^{(1)} \stackrel{\text{def}}{=} E_{\text{ges}}^{(2)}$$

$$E_{\text{kin}}^{(1)} + E_{\text{pot}}^{(1)} = E_{\text{pot}}^{(2)}$$

Zettelabfrage: Wie hoch wirft Paul den Ball?

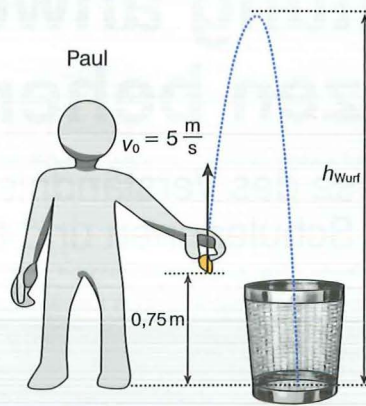
Aufgaben

a) Erstelle eine grafische Energiebilanz des Vorgangs (Kontomodell).

b) Berechne die maximale Wurfhöhe h_{Wurf}
 $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, m = 1 \text{ kg}$$



Unterrichtssequenz

Das Ziel der Unterrichtssequenz besteht darin, dass Schülerinnen und Schülern der Klassenstufe 10 (in einer Sequenz aus drei Doppelstunden) ihre Kenntnisse und Fähigkeiten zum Energiekonzept anwenden können. Dabei sollen sie den Anfangs- und Endzustand (und ggf. günstige Zwischenzustände) eines Systems innerhalb eines konkreten Prozessablaufs analysieren und durch Ausnutzung einer entsprechenden Energiebilanz quantitative Größen dieses Prozesses berechnen können (s. Beispiel in **Kasten 2**). Um Unterschiede in den individuellen Vorkenntnissen auszugleichen, werden die Aspekte Energieformen und Energieumwandlung zu Beginn der Sequenz wiederholt.

Kontomodell

Zur Visualisierung der Energieumwandlung dient das Kontomodell. In

Abbildung 2 ist es beispielhaft für die Aufgabe aus **Kasten 2** dargestellt. Man betrachtet bei diesem Modell einen physikalischen Prozess zu bestimmten Zeitpunkten und ordnet Energieformen und deren relativen Füllstand einander zu. Dabei müssen die Schülerinnen und Schüler zunächst die Zeitpunkte innerhalb des Prozesses bestimmen, bei denen jeweils ein Konto vollständig gefüllt ist. Dies stellt einen eigenen Erkenntnisschritt dar.

Die Visualisierung einzelner Energieformen als Konten dient der kognitiven Vorbereitung auf die quantitative Bilanzierung. Als differenzierendes Hilfsmittel kann zusätzlich das Konto der Gesamtenergie verwendet werden, das im verlustfreien physikalischen Ideal stets vollständig gefüllt bleibt und so an die Energieerhaltung in geschlossenen Systemen erinnert.

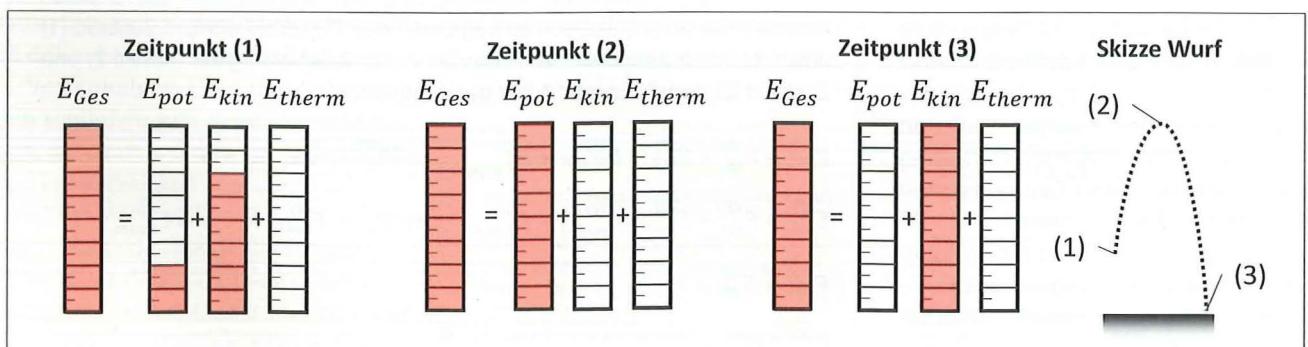
Das Modell beruht implizit auf der Energieerhaltung und ist gut geeignet, das Verständnis der Energieerhal-

tung zu vertiefen. Zum einen fördert es das erforderliche Kompensationsdenken: „Eine Energieform nimmt zu, eine andere entsprechend ab“ [1]. Außerdem unterstützt es den Umgang mit der „Eigentümlichkeit [der Energie] eines situationalen Moments“ [2]. Ausgehend von den ausgefüllten Konten soll der Betrag der Gesamtenergie des betrachteten Systems bestimmt und anschließend dazu genutzt werden, Größen zu den unterschiedlichen Zeitpunkten zu berechnen.

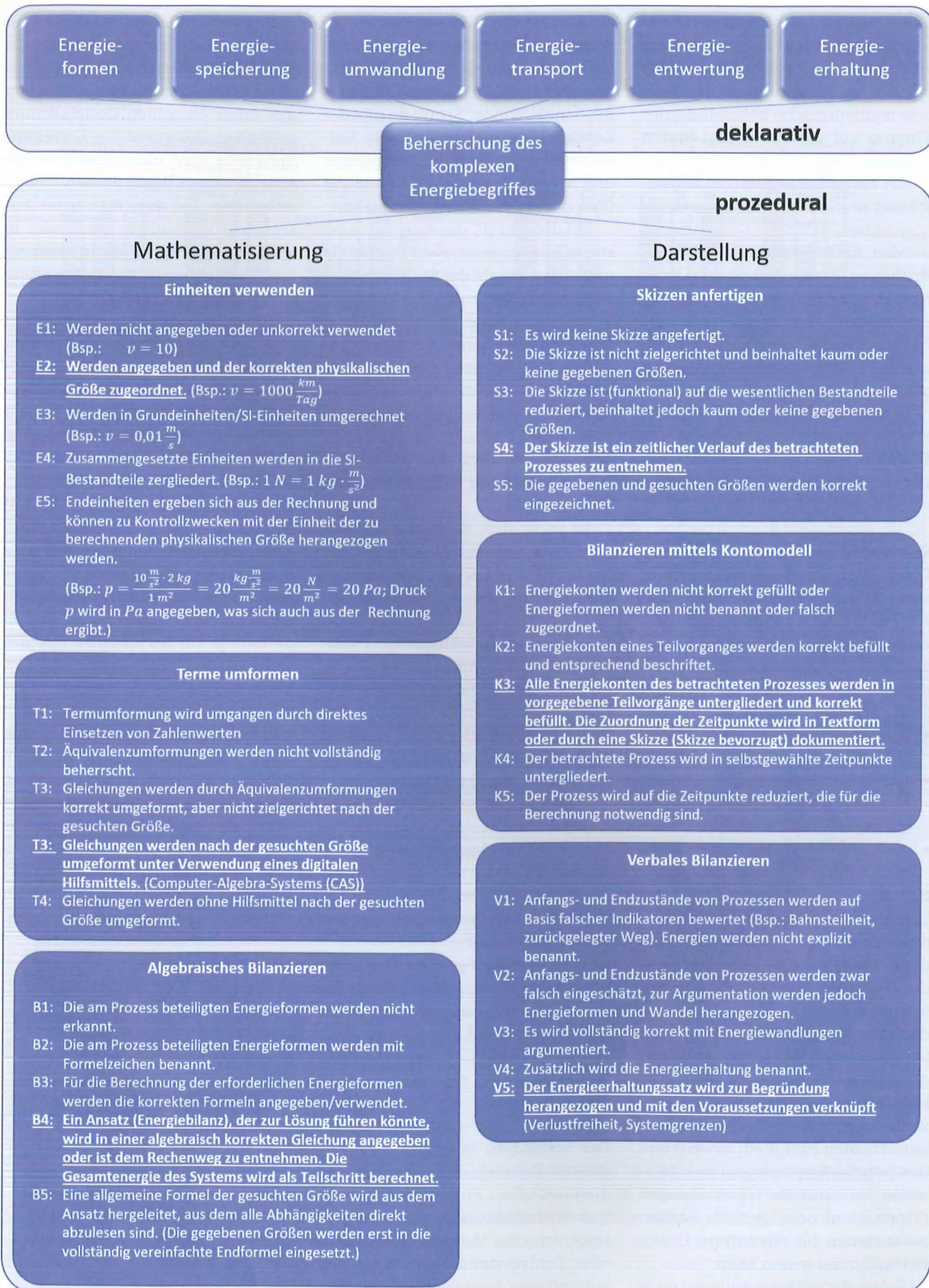
Diagnostik

Begleitend zur Unterrichtssequenz soll untersucht und beobachtet werden, wie sich das Verständnis der Energieerhaltung bei den Schülerinnen und Schülern entwickelt. Dazu wird das Verfahren der Zettelabfrage [3] im Vorfeld jeder Doppelstunde durchgeführt. Hierbei werden zu Unterrichtsbeginn leere DIN-A6-Blätter ausgeteilt. Eine kurze Aufgabe zur Energieerhaltung wird projiziert. Die Bearbeitungszeit beträgt fünf Minuten. Die Abgabe erfolgt nicht anonym.

Im Anschluss an den Unterricht werden die Antworten gesichtet. Aus der Qualität der Lösung wird auf Basis verschiedener Indikatoren (Tiefgang der Begründung, korrekte Verwendung der Fachsprache ...) auf das Verständnis der Schülerinnen und Schüler geschlossen und einer Verständnisstufe der jeweilig betrachteten Fähigkeit zugeordnet. Diese Verständnisstufen werden anhand des Schemas eingeteilt, das in **Abbildung 3** dargestellt ist. Die Verständnisstufen werden darin auf der Basis verschie-



2 | Kontomodell: Ausgefülltes Kontomodell zur Aufgabe in **Kasten 2** mit Skizze des zeitlichen Wurfverlaufs und Zuordnung geeigneter Zeitpunkte



3 | Aspekte bei der Beherrschung des Energiekonzepts, zurückgeführt auf notwendige Verständnisstufen. Die markierten Stufen sollten erreicht werden, um die Bilanzierung von Energien zu beherrschen.

dener prozeduraler Teilaspekte untergliedert. Je nach Aufgabenstellung wird nur eine verbale Bilanzierung der Energieflüsse, eine Skizze oder eine mathematische Behandlung des Themas auf verschiedenen Stufen gefordert.

Um einem Lernenden die Beherrschung des Energiebilanzierens anzusprechen, sollte die Stufe erreicht werden, die fett gedruckt und unterstrichen ist. Wird zum Beispiel in einer Aufgabe lediglich verbales Bilanzieren gefragt, so muss die maximale Fähigkeitsstufe V5 erreicht werden, um die Beherrschung der Anwendung des Energiekonzepts zu zeigen.

In **Kasten 3** sind exemplarisch zwei Schülerantworten zur Aufgabe aus **Kasten 2** zu sehen, zusammen mit einer kurzen Beurteilung anhand des hier verwendeten Schemas.

Auswertung

Direkt bei der Auswertung einer einzelnen Zettelabfrage werden die Antworten einer Verständnisstufe zugeordnet. In einem ersten Schritt können die Antworten mit Begründungen und Rechenwegen in drei Stapel aufgeteilt werden:

- Aufgabe korrekt oder weitgehend beantwortet,
- Aufgabe zwar nicht korrekt beantwortet, jedoch gute Ansätze vorhanden,
- Aufgabe im Wesentlichen nicht beantwortet.

Bei einer ausreichenden Größe der Lerngruppe kann jeder Stapel in Unterkategorien aufgeteilt werden. An dieser Stelle ist genau zu prüfen, was die Güte der einzelnen Kategorien voneinander unterscheidet. Dazu dient die Fragestellung: An welcher Stelle/welcher Hürde ist der Lerner gescheitert? Sie ist hier besonders hilfreich, weil sie zum einen die jeweils erreichte Ausprägungsstufe (der untersuchten Fähigkeit) zuweist und der Lehrperson zum anderen Hinweise auf sinnvolle Hilfestellungen (Tippkarten) oder gezielte Fördermaßnahmen für zukünftige Unterrichtsplanung geben kann.

Sofern der zeitliche Aufwand einer individuellen Analyse des Lernprozesses gerechtfertigt ist, kann

die Schüler-Verständnisstufen-Zuordnung jeder Zettelabfrage tabellarisch festgehalten werden. Die Änderung der erreichten Ausprägungsstufe jedes Schülers/jeder Schülerin gibt der Lehrkraft Aufschluss über die Entwicklung der geförderten Fähigkeiten und liefert somit eine Rückmeldung über die eigene Unterrichtsqualität.

Bei der Anzahl der Ausprägungsstufen konkurrieren zwei Effekte. Je größer die Anzahl der Stufen und damit die Zergliederung der jeweiligen Verständnisstufen ist, desto besser lässt sich eine Lernentwicklung abbilden. Im Gegenzug passt sich eine vielfältige Zergliederung zunehmend an die konkrete Aufgabenstellung an und verliert damit an Allgemeingültigkeit und folglich auch an Alltags-tauglichkeit (und Vergleichbarkeit untereinander).

Es zeigt sich, dass aus den Resultaten der Zettelabfragen bei der Mehrheit der Lerngruppe auf das Abschneiden bei entsprechenden Teilaufgaben einer anschließenden Klassenarbeit geschlussfolgert werden kann. Allerdings gibt es auch Abweichungen. Eine ernsthafte Aussage über den Lernprozess ist daher nur dann möglich, wenn mehrere Zettelabfragen durchgeführt werden. Ferner ist davon abzuraten, die Abfragen am Stundenende durchzuführen, da bei diesem Verfahren ggf. nur das Kurzzeitgedächtnis geprüft wird. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse am Stundenende typisch besser ausfallen als am Anfang der darauffolgenden Unterrichtseinheit.

Viel wichtiger als die Prognose der Schülerleistung sind jedoch die Konsequenzen aus der Diagnostik für den Unterricht.

Fazit

Der besondere Vorzug der vorgestellten Zettelabfragen liegt in der diagnostischen Fülle. Bei der Analyse der individuellen Lösungswege zeigt sich eine Vielzahl von Fehlern oder Fehlvorstellungen, die in der zukünftigen Unterrichtsgestaltung gezielt thematisiert werden können, sei es im Klassengespräch oder in

Form von Hilfestellungen. Hierin liegt das Potenzial dieser Methode für die alltägliche Unterrichtspraxis, denn diese Erkenntnisse lassen sich schon aus einer einzelnen Zettelabfrage gewinnen. Aufgrund des Korrekturaufwands wird man diese Abfrage eher in einem thematischen Gebiet anwenden, bei dem man neue Ansätze zur Vermittlung sucht oder in solchen Lerngruppen, die in bestimmten Themenbereichen unerwartete Schwierigkeiten zeigen.

In Verbindung mit dem formativen Charakter der regelmäßigen Zettelabfragen und der begleitenden Katalogisierung des Schülerverständnisses zeigt sich eine Besonderheit bei der Anwendung des Energiekonzepts in Form des Bilanzierens:

Es wird deutlich, dass selbst die Schülerinnen und Schüler, die mit der deklarativen Seite des Energiekonzepts (obere Hälfte des Schemas in **Abb. 3**) umgehen können, durchaus Schwierigkeiten haben, Energien korrekt quantitativ zu berechnen. Einzelne Teilaspekte des Energiekonzeptes werden also nicht (ausreichend) beherrscht.

Aus dieser Erkenntnis erschließt sich ein wesentlicher Aspekt für die Unterrichtsplanung: Die prozeduralen Fähigkeiten (Einheiten verwenden, Terme umformen ...) sind notwendige Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung der Energieerhaltung in Form des quantitativen (Energien) Bilanzierens und sollten daher im Unterricht gezielt gefördert werden.

Literatur

- [1] Duit, R.: Energievorstellungen. In: NiU Physik/Chemie 34, (1986), Nr. 13, S. 7–9.
- [2] Rincke, K.: (Elektrische) Energie. Unterricht zu einem schwierigen Begriff mit großer Bedeutung. In: NiU Physik 26 (2015), Nr. 146, S. 2–10.
- [3] Kraus, M. E.: Lackmustest. Alltagstaugliche Diagnostik im Physikunterricht mit Hilfe von Kartenabfragen. In: NiU Physik 26 (2015), Nr. 147/148, S. 58–63.

Diagnose von Schülerlösungen: Beispiele

Schülerlösung 1

G = Grundenergie / Gesamtenergie
 B = Bewegungsenergie / kinetische E.
 H = Höhenenergie / potenzielle E.

Zuordnung der Zeitpunkte!

b) $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ $m = 1 \text{ kg}$
 $E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$ $v_0 = 5 \text{ m/s}$
 $g = 10 \text{ m/s}^2$

$E_{pot} = E_{kin}$
 $m \cdot g \cdot h = \frac{m}{2} \cdot v^2$ $| : m \quad | : g$
 $h = \frac{\frac{m}{2} \cdot v^2}{m \cdot g}$
 $h = \frac{\frac{1}{2} \text{ kg} \cdot 5^2 (\text{m/s})^2}{1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2}$
 $h = \frac{12,5}{10} \text{ m}$ Starthöhe
 $h = 1,25 \text{ m} + (0,75 \text{ m})$
 $h = 0,5 \text{ m}$

Diagnostische Analyse

Werden in den prozeduralen Fähigkeiten die fett gedruckten Kriterien erreicht, ist eine erfolgreiche Bilanzierung möglich.

Kontomodell: nicht korrekt ausgefüllt, keine Zeitpunkte zugeordnet: K1

Einheiten: werden konsequent in Grundeinheiten verwendet, in der Rechnung nicht mit quadriert, Einheit ergibt sich nicht aus dem Rechenweg: E3

Skizze: nicht angefertigt: S1 (Die Skizze der Aufgabenstellung wurde projiziert. Eine Skizze in Verbindung mit dem Kontomodell war daher Teil der Aufgabe.)

Terme umformen: ohne Hilfsmittel korrekt durchgeführt (zumindest für die Variablen, nicht für die Einheiten): trotzdem T4, weil die gesuchte Größe mit einer Endformel berechnet wird

Bilanzieren: Ansatz ist erkennbar, führt aber (vermutlich wegen fehlender Skizze oder falscher Analyse mittels Kontomodell) nicht zur richtigen Lösung (führt zur Abwertung): B3

Ergebnis

Hier scheitert eine mathematisch und (für gewöhnlich) physikalisch gute Schülerin an den mangelhaft ausgeprägten prozeduralen Fähigkeiten: S1, K1 und damit nur B3.

Schülerlösung 2

kurz nach 1. Hand nachwerfen 2. Höchster Punkt 3. Beim runterfallen in der Mitte, kurz vorm Kisteimer

G = Gesamtenergie
 B = Bewegungsenergie
 P = Potenzielle Energie

b) $E_{pot} = E_{kin}$
 $E_{kin} = \frac{1 \text{ kg}}{2} \cdot (5 \text{ m/s})^2 = 1,25 \text{ m} + 0,75 \text{ m} = 5,75 \text{ m}$
 $= \frac{1}{2} \text{ kg} \cdot 5^2 \text{ m}^2/\text{s}^2$
 $\frac{1}{2} \text{ kg} \cdot 25 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot h \quad | : 1 \text{ kg}$
 $\frac{1}{2} \cdot 25 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot h \quad | : 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
 $\frac{2 \cdot 25 \text{ m}^2/\text{s}^2}{10 \text{ m}/\text{s}^2} = h \quad h = 5 \text{ m} \cdot \frac{1}{2}$

Diagnostische Analyse

Werden in den prozeduralen Fähigkeiten die fett gedruckten Kriterien erreicht, ist eine erfolgreiche Bilanzierung möglich.

Kontomodell: selbst gewählte Zeitpunkte (verbal zugeordnet), 1 und 2 hätten ausgereicht: K4

Einheiten: werden konsequent in Grundeinheiten verwendet, Endeneinheit ergibt sich aus dem Rechenweg: E5

Skizze: nicht vorhanden: S1

Terme umformen: ohne Hilfsmittel durchgeführt (Rechenfehler werden als Versehen gewertet): T4

Bilanzieren: Ansatz ist erkennbar, Starthöhe wird berücksichtigt, keine allgemeine Endformel, wird aus Ansatz hergeleitet: B4

Verbales Bilanzieren (V) ist in dieser Aufgabenstellung nicht gefordert.

Ergebnis

Hier schafft es die Schülerin nur wegen eines Rechenfehlers nicht, das korrekte Endergebnis zu ermitteln. Auch ohne Skizze wird hier B4 erreicht.