

# **Förderung konzeptuellen Wissens über Energie durch den Einsatz von Repräsentationen**



Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von  
Ulrike Wernecke

Kiel, 2017

Erste Gutachterin:

Prof. Dr. Ute Harms

Zweiter Gutachter:

Prof. Dr. Knut Neumann

Tag der mündlichen Prüfung:

13. Oktober 2017

Zum Druck genehmigt:

13. Oktober 2017

---

gez. Prof. Dr. Natascha Oppelt, Dekanin

*Für meinen Opa Harald Kieb*



## ZUSAMMENFASSUNG

Da Energie die Grundlage aller Lebensvorgänge ist, ist das Energiekonzept für das Lernen zahlreicher biologischer Themen zentral. Aufgabe des Biologieunterrichts ist es, Schülerinnen und Schülern Wissen über dieses abstrakte Konzept zu vermitteln und sie so zu befähigen, es zur Erklärung von Phänomenen heranzuziehen. Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass das konzeptuelle Wissen über Energie von Schülerinnen und Schülern aller Klassenstufen nur gering ausgeprägt ist und zahlreiche Alternativvorstellungen existieren. Bisher gibt es kaum Erkenntnisse darüber, wie Energie in biologischen Kontexten gelehrt und gelernt werden kann. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit dem Einsatz ausgewählter bildlicher und sprachlicher Repräsentationen zur Förderung des konzeptuellen Wissens über Energie im biologischen Kontext, die in Bezug auf abstrakte Konzepte lernförderliches Potenzial besitzen können.

Diese Dissertation umfasst drei Studien. Die erste geht der Frage nach, wie Energie zurzeit in Unterrichtsmaterialien für den Biologieunterricht repräsentiert wird. Hierzu wurde ein Kategoriensystem erarbeitet und auf Abbildungen, Texte und Aufgaben einer Biologieschulbuchreihe der Sekundarstufe I und II angewandt. Dadurch konnten Erkenntnisse über die inhaltliche und formale Darstellung von Energie gewonnen werden. Unter Berücksichtigung der festgestellten Defizite wurde eine Instruktionsmaßnahme entwickelt, deren Wirksamkeit durch die zweite Studie der vorliegenden Arbeit untersucht wird. Die Instruktion verknüpft zwei Strategien, die sich in Hinblick auf abstrakte Konzepte als lernförderlich erwiesen haben: das Lernen mit bildlichen Repräsentationen und das Lernen aus Fehlern. Die Schülerinnen und Schüler lernen mit einem Energieflussdiagramm, in das gezielt ein Fehler eingefügt wurde, der an Alternativvorstellungen anschließt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Lernen mit einem fehlerhaften Diagramm das konzeptuelle Wissen über Energie stärker fördert als das Lernen mit einem korrekten Diagramm – zumindest, wenn der Fehler selbst erkannt bzw. erklärt wird. Die dritte Studie dieser Arbeit beschäftigt sich mit sprachlichen Repräsentationen desselben biologischen Kontextes: Metaphern, die die Energieweitergabe in Ökosystemen beschreiben. Ihre Verwendung in Biologieschulbüchern und in Texten von Schülerinnen und Schülern wird durch qualitative Inhaltsanalyse untersucht. Aus den Ergebnissen werden Implikationen für die Verwendung der Metaphern im Biologieunterricht abgeleitet. Somit liefert die vorliegende Arbeit unter Verwendung qualitativer und quantitativer Methoden neue Erkenntnisse zum Einsatz von bildlichen und sprachlichen Repräsentationen zum Thema Energie im Biologieunterricht.



## **ABSTRACT**

Since energy provides the basis for all life processes, the energy concept is central for learning biological topics. Biology teaching should impart knowledge about this abstract concept to support students in their explanations of science phenomena. However, research shows that students' conceptual knowledge about energy is low at all class levels and that several alternative conceptions persist. To date, little is known about how energy can be taught and learned effectively in biological contexts. In this regard, this dissertation deals with the use of visual and verbal representations to enhance conceptual knowledge of energy in biological contexts. The selected representations are assumed to have the potential to support the learning of abstract concepts.

This dissertation comprises three studies. The first investigates how energy is currently represented in teaching materials for biology instruction. Therefore, a category system was developed and applied to analyze pictures, texts, and tasks of a biology textbook series for lower and upper secondary school. This provided insight into the depiction of energy with regard to content and design. Taking the identified shortcomings into account, an instructional tool was developed. Its effectiveness is surveyed by the second study of this dissertation. The instructional tool combines two strategies which have been proven beneficial in fostering comprehension of abstract concepts: learning through representations and learning from errors. Students learn with an incorrect energy flow diagram, where an inserted error addresses alternative conceptions. Results indicate that learning with an incorrect diagram potentially supports the acquisition of conceptual knowledge of energy more than learning with a correct diagram: Larger gains in conceptual knowledge were achieved by students who successfully identified and explained the error. The third study of this dissertation deals with verbal representations of the same biological context: metaphors describing energy transfer through ecosystems. Applying qualitative content analysis, their application in biology textbooks and students' texts are analyzed. Implications for the use of the metaphors in biology instruction are derived. Using qualitative and quantitative methods, this dissertation provides new insight into the use of visual and verbal representations of energy in biology education.





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>IX</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretischer Hintergrund und Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
2.1 Fachliche Grundlagen zum Energiekonzept	3
2.1.1 Das Energiekonzept als Erklärungsmodell naturwissenschaftlicher Phänomene	3
2.1.2 Die Bedeutung des Energiekonzepts in der Biologie	4
2.2 Fachdidaktische Grundlagen zum Energiekonzept	6
2.2.1 Strukturierung des Energiekonzepts anhand von vier Aspekten	6
2.2.2 Die Relevanz von Energie als Gegenstand des Biologieunterrichts	7
2.2.3 Der Aufbau konzeptuellen Wissens über Energie als normatives Ziel naturwissenschaftlichen Unterrichts	9
2.2.4 Entwicklung des Energiekonzepts entlang der vier Aspekte	11
2.2.5 Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zum Energiekonzept	12
2.3 Repräsentationen	15
2.3.1 Klassifikation und kognitive Verarbeitung von Repräsentationen	15
2.3.2 Repräsentationen im naturwissenschaftlichen Unterricht	17
2.3.3 Repräsentationen und die Vermittlung abstrakter naturwissenschaftlicher Konzepte	19
2.4 Lernen aus Fehlern	21
2.4.1 Die Theorie des negativen Wissens	21
2.4.2 Empirische Belege für die Lernförderlichkeit des Lernens aus Fehlern	23
2.5 Literaturverzeichnis	25
<b>3 Zielsetzung der Arbeit</b>	<b>37</b>
<b>4 Studie 1:</b>	<b>41</b>
<b>Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt?</b>	
<b>– Entwicklung eines Kategoriensystems und exemplarische Anwendung auf eine Schulbuchreihe</b>	
4.1 Einleitung	43

4.2 Das Energiekonzept und seine Darstellung in Unterrichtsmedien	43
4.3 Lernen mit externen Repräsentationen in Unterrichtsmedien	45
4.4 Fragestellung	48
4.5 Methode	48
4.6 Ergebnisse der Erarbeitung und Überprüfung des Kategoriensystems	51
4.7 Ergebnisse der Anwendung des Kategoriensystems auf die Schulbuchreihe Linder	53
4.7.1 Inhaltliche Befunde	53
4.7.2 Formale Befunde	57
4.8 Diskussion	62
4.8.1 Diskussion der Ergebnisse	62
4.8.2 Implikationen	66
4.8.3 Grenzen der Studie	66
4.9 Literaturverzeichnis	68
4.10 Anhang	74
4.10.1 Onlinematerial 1: Auswahl der Analyseeinheiten	74
4.10.2 Onlinematerial 2: Kategoriensystem mit Erläuterungen	76
4.10.3 Onlinematerial 3: Ergebnisse des Interratings	83
<b>5 Studie 2:</b>	<b>87</b>
<b>Enhancing Conceptual Knowledge of Energy in Biology with Incorrect     Representations</b>	
5.1 Introduction	88
5.2 Theoretical Background	88
5.2.1 The Energy Concept	88
5.2.2 Learning through Representations	90
5.2.3 Learning from Errors	92
5.3 The Error-Based Instructional Tool to Foster Conceptual Knowledge of Energy	94
5.4 Method	95
5.4.1 Procedure and Sample	95
5.4.2 Material and Instruments	96
5.4.3 Data Preparation and Analysis	98

5.5 Results	99
5.6 Discussion	104
5.7 References	109
5.8 Appendix	116
<b>6 Studie 3:</b>	<b>143</b>
<b>Metaphors Describing Energy Transfer through Ecosystems</b>	
<b>– helpful or misleading?</b>	
6.1 Introduction	144
6.2 Theoretical Background	145
6.2.1 Scientific Content: Energy Transfer in Ecosystems	145
6.2.2 The Theory of Conceptual Metaphors	145
6.2.3 Metaphors in Science Education: Potential and Challenges	146
6.2.4 Energy Understanding is Based on Metaphors	147
6.3 Research Aim	148
6.4 Research Questions	149
6.5 Method	149
6.6 Results	152
6.7 Discussion	160
6.7.1 Comparison and Suggestions for Metaphor Use in the Context of Energy Transfer	160
6.7.2 Broader Educational Implications	163
6.7.3 Limitations of the Study and Future Directions	164
6.8 References	165
6.9 Appendix	171
6.9.1 Supplement 1: Data Selection and Coding Manual	171
6.9.2 Supplement 2: Presentation	176
6.9.3 Supplement 3: Diagram and Task	177
6.9.4 Supplement 4: Inter-Rating	178
<b>7 Zusammenfassung der Ergebnisse der drei Studien</b>	<b>181</b>
<b>8 Diskussion und Ausblick</b>	<b>185</b>
8.1 Übergreifende Diskussion	185
8.1.1 Gründe für die Schwierigkeit der Fehleridentifikation und -erklärung	185

8.1.2 Reflexion der Strukturierung des Energiekonzepts	188
8.1.3 Objektivität der Kodierungen	189
8.2 Grenzen der Studien	190
8.3 Implikationen für die Unterrichtspraxis	191
8.4 Implikationen für zukünftige Forschung	193
8.5 Ausblick	194
8.6 Literaturverzeichnis	196

## **DANKSAGUNG**

## **ERKLÄRUNG**

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 4-1</b>	Fließtextanalyse: Prozentuale Anteile der Analyseeinheiten, die die einzelnen Energieaspekte explizit berücksichtigen	55
<b>Abbildung 4-2</b>	Fließtextanalyse: Prozentuale Anteile der Analyseeinheiten, die die einzelnen Energieaspekte implizit berücksichtigen	56
<b>Abbildung 4-3</b>	Aufgabenanalyse: Prozentuale Anteile der Analyseeinheiten, die die einzelnen Energieaspekte explizit berücksichtigen	56
<b>Abbildung 4-4</b>	Fließtextanalyse: Abbildungstypen	58
<b>Abbildung 4-5</b>	Aufgabenanalyse: Abbildungstypen	59
<b>Abbildung 4-6</b>	Fließtextanalyse: Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text	60
<b>Abbildung 4-7</b>	Fließtextanalyse: Relation von Abbildung und Text	61
<b>Figure 5-1</b>	Incorrect diagram with encircled error (provided to Group 2)	97
<b>Figure 6-1</b>	Coding scheme	152



## TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 2-1</b>	Einteilung externer Repräsentationen in Texte und Abbildungen	17
<b>Tabelle 3-1</b>	Übersicht über die Studien	39
<b>Tabelle 4-1</b>	Energieaspekte und Beispiele für Alternativvorstellungen	44
<b>Tabelle 4-2</b>	Grundlegendes Kategoriensystem und Anwendungsbereich der Kategorien	51
<b>Tabelle 4-3</b>	Häufigkeit der Thematisierung von Energie in Kapiteln zu Stoffwechselbiologie und Ökologie	53
<b>Tabelle 4-4</b>	Auszählung der Abbildungen in Kapiteln zu Stoffwechselbiologie und Ökologie	57
<b>Tabelle 4-5</b>	Auswahl der zu analysierenden Kapitel	74
<b>Tabelle 4-6</b>	Kategoriensystem und Anwendungsbereich der Kategorien	76
<b>Tabelle 4-7</b>	Ergebnisse des Interratings	83
<b>Tabelle 4-8</b>	Fließtextanalyse: Definition	85
<b>Tabelle 4-9</b>	Fließtextanalyse: Alternativvorstellung dargestellt	85
<b>Tabelle 4-10</b>	Aufgabenanalyse: Alternativvorstellung dargestellt	85
<b>Tabelle 4-11</b>	Aufgabenanalyse: Energieform	85
<b>Tabelle 4-12</b>	Aufgabenanalyse: Energieumwandlung	86
<b>Tabelle 4-13</b>	Aufgabenanalyse: Energieentwertung	86
<b>Tabelle 4-14</b>	Aufgabenanalyse: Gestaltung der Abbildung – Untertitel	86
<b>Tabelle 4-15</b>	Aufgabenanalyse: Informationsentnahme	86
<b>Table 5-1</b>	Learning materials provided to the three groups	95
<b>Table 5-2</b>	Means (and standard deviations) of control variables	99
<b>Table 5-3</b>	Means and standard deviations of energy test score gain	101
<b>Table 6-1</b>	Analyzed textbooks	150
<b>Table 6-2</b>	Comparison of metaphor usage in textbooks and students' texts	160
<b>Table 6-3</b>	Analyzed textbook sections	171
<b>Table 6-4</b>	Results of the inter-rating, overall sample	178
<b>Table 6-5</b>	Results of the inter-rating, textbook analysis	179
<b>Table 6-6</b>	Results of the inter-rating, students' texts	179









# 1 EINLEITUNG

Die Fähigkeit, in abstrakten Konzepten zu denken, ist eine der hochentwickeltesten kognitiven Fähigkeiten des Menschen (Borghi et al., 2017). Ein zentrales abstraktes Konzept der Naturwissenschaften ist Energie. Es dient der Beschreibung und Erklärung von Phänomenen und Zusammenhängen der belebten und unbelebten Umwelt. Aufgrund seiner fundamentalen Bedeutung für das Erklären naturwissenschaftlicher Sachverhalte ist das Energiekonzept ein wichtiger Gegenstand des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Jedes naturwissenschaftliche Unterrichtsfach trägt mit seinen fachspezifischen Inhalten zur Ausschärfung des Energiekonzepts bei, indem das Konzept zur Erklärung unterschiedlicher naturwissenschaftlicher Phänomene herangezogen wird. In der Biologie ist das Energiekonzept genuin verankert, denn das Vorhandensein eines Energieflusses ist Voraussetzung für die Existenz von Leben auf allen Systemebenen, von der einzelnen Zelle bis zum komplexen Ökosystem. Naturwissenschaftlicher Unterricht soll Schülerinnen und Schüler darin unterstützen, konzeptuelles Wissen über Energie aufzubauen. Zahlreiche empirische Studien haben jedoch gezeigt, dass das Lehren und Lernen des abstrakten Energiekonzepts mit großen Schwierigkeiten verbunden ist (z. B. Opitz, Neumann, Bernholt, & Harms, im Druck) und zahlreiche Alternativvorstellungen bestehen (z. B. Burger, 2001). Um dieser Herausforderung zu begegnen, werden Ansätze zur Unterstützung von Lernenden benötigt. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit dem Einsatz ausgewählter Repräsentationen im Biologieunterricht.

Im einleitenden Kapitel dieser Arbeit wird der theoretische Hintergrund erläutert. Hierbei werden zunächst fachwissenschaftliche Grundlagen zum Energiekonzept im Allgemeinen und zum Energiefluss in Ökosystemen im Speziellen dargelegt (Kapitel 2.1). Im Anschluss an die fachliche Klärung werden diese beiden Bereiche aus fachdidaktischer Sicht beleuchtet, indem die Relevanz von Energie als Gegenstand des Biologieunterrichts begründet wird und Herausforderungen beim Erlernen des Konzepts aufgezeigt werden (Kapitel 2.2). Eine Unterstützungsmöglichkeit beim Erlernen abstrakter Konzepte wie Energie ist der Einsatz geeigneter Repräsentationen. Neben theoretischen Ausführungen zur Klassifikation und kognitiven Verarbeitung von Repräsentationen wird ihre Bedeutung für Lehr-Lernprozesse in den Naturwissenschaften erläutert (Kapitel 2.3). Als zweite Unterstützungsmöglichkeit wird das Lernen aus Fehlern, das im Rahmen dieser Arbeit mit dem Lernen mit Repräsentationen verknüpft wird, vorgestellt (Kapitel 2.4). Anschließend werden die Ziele und Fragestellungen dieser Dissertation herausgearbeitet

## Einleitung

und es wird ein kurzer Überblick über die durchgeführten Studien gegeben (Kapitel 3). Im Anschluss an die Manuskripte (Kapitel 4 bis 6) werden die durchgeführten Studien zusammengefasst (Kapitel 7). Im abschließenden Kapitel erfolgt die studienübergreifende Diskussion. Zudem werden Implikationen für die Unterrichtspraxis und für die zukünftige Forschung abgeleitet (Kapitel 8).

## 2 THEORETISCHER HINTERGRUND UND STAND DER FORSCHUNG

### 2.1 Fachliche Grundlagen zum Energiekonzept

#### 2.1.1 Das Energiekonzept als Erklärungsmodell naturwissenschaftlicher Phänomene

Energie ist ein abstraktes Konzept, das in allen Naturwissenschaften als Grundprinzip verankert ist. Im Gegensatz zu konkreten Konzepten, die sich auf sinnlich wahrnehmbare physikalische Objekte beziehen, besitzen abstrakte Konzepte in der Regel keinen abgegrenzten, identifizierbaren und unmittelbar wahrnehmbaren Referenten (Borghini et al., 2017; Kiefer & Pulvermüller, 2011). Zu den abstrakten Konzepten zählen beispielsweise numerische (z. B. Mittelwert), soziale (z. B. Freiheit) und emotionale Konzepte (z. B. Liebe; Borghini et al., 2017; Kiefer & Pulvermüller, 2011). Die Abstraktheit des Energiekonzepts beschreibt der renommierte Physiker Feynman wie folgt:

Es gibt ein Faktum, oder wenn Sie so wollen, ein *Gesetz*, das alle Naturphänomene beherrscht, welche bis heute bekannt sind. Es gibt keine bekannte Ausnahme zu diesem Gesetz – soweit wir wissen, ist es exakt. Dieses Gesetz wird die *Energieerhaltung* genannt. Es sagt, dass es eine gewisse Größe gibt, welche wir Energie nennen, die sich bei den vielfachen Änderungen, die in der Natur vor sich gehen, nicht ändert. Das ist eine sehr abstrakte Idee, weil es ein mathematisches Prinzip ist; es besagt, dass eine numerische Größe existiert, die sich nicht ändert, wenn sich etwas ereignet. [...]. Es ist wichtig, einzusehen, dass wir in der heutigen Physik nicht wissen, was Energie *ist*. (Feynman, Leighton, & Sands, 2007, S. 45f.)

Die Ereignisse und Änderungen in der Natur, von denen Feynman spricht, unterliegen den Hauptsätzen der Thermodynamik. Das Naturgesetz der Energieerhaltung ist in dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik formuliert. Er besagt, dass die Gesamtenergie des Universums konstant ist. Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt und von einem Ort an einen anderen übertragen, jedoch nicht erzeugt oder vernichtet werden (Tipler & Mosca, 2015). Das Universum bildet ein abgeschlossenes System. In geschlossenen oder offenen Systemen kann sich die Menge der inneren Energie, beispielsweise durch eine Energieübertragung durch Wärme, ändern. Die Zu- oder Abnahme

der Energie eines Systems geht jedoch immer mit der Zu- oder Abnahme der Energie eines anderen Systems einher (Cerbe & Wilhelms, 2011; Tipler & Mosca, 2015). Einer der Wegbereiter der Entdeckung des Gesetzes der Energieerhaltung war der Arzt Julius Robert Mayer, der sich Mitte des 19. Jahrhunderts mit der von Lebewesen abgegebenen Wärmeenergie befasste – die Entdeckung wurde also in einem biologischen Zusammenhang gemacht (Coopersmith, 2010; Feynman et al., 2007). Aufgrund des Energieerhaltungssatzes kann Energie bilanziert werden.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik wurde 1850 von Clausius formuliert. Er erklärte, dass Wärme nie von selbst von einem System niedrigerer Temperatur zu einem System höherer Temperatur übertragen werden kann (Cerbe & Wilhelms, 2011). Allgemeiner gefasst beschreibt der zweite Hauptsatz der Thermodynamik das Prinzip der Irreversibilität, dem alle natürlichen Prozesse unterliegen. Irreversible Prozesse verlaufen von selbst nur in einer Richtung (Cerbe & Wilhelms, 2011). Zur mathematischen Erfassung der Irreversibilität wurde der Begriff Entropie von Clausius eingeführt (Cerbe & Wilhelms, 2011). Entropie ist eine messbare physikalische Größe und dient als Maß für die Unordnung in einem System. Die Entropie ist umso größer, je zufälliger die Moleküle in einem System verteilt sind. Wärme ist Energie in Form von zufälliger molekularer Bewegung und damit die am wenigsten geordnete Energieform. Bei jedem irreversiblen Prozess nimmt die Entropie des Universums zu, da ein Teil der Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Diese Energie ist nicht mehr als Arbeit nutzbar, was als Energieentwertung bezeichnet wird (Tipler & Mosca, 2015).

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Menge der Energie im Universum immer gleich bleibt (erster Hauptsatz der Thermodynamik), die Menge der für Arbeit verfügbaren Energie jedoch stetig abnimmt (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Diese fundamentalen Gesetze gelten für alle naturwissenschaftlichen Phänomene.

### **2.1.2 Die Bedeutung des Energiekonzepts in der Biologie**

Stoff- und Energiewechsel sind ein Kennzeichen des Lebendigen. Ein Lebewesen kann nur leben, wenn es Energie aufnimmt. Folglich ist Energie in allen Bereichen der Biologie von Bedeutung. Doch wie kann Leben existieren, wenn jeder Energieumwandlungsprozess unweigerlich zur Erhöhung der Entropie, also zur größeren Unordnung von Molekülen führt? Lebewesen sind offene Systeme. In einem offenen System kann sowohl Energie als auch Materie über die Systemgrenzen hinweg mit der Umgebung ausge-

tauscht werden. Somit können Lebewesen Wärmeenergie an die Umgebung abgeben und freie Energie aus der Umgebung aufnehmen. Dadurch sinkt die Entropie im System Lebewesen, während sie in der Umgebung steigt. Auf diese Weise ist es Lebewesen möglich, geordnete Strukturen aufzubauen und aufrechtzuerhalten. Folglich steht das Leben nicht mit den physikalischen Gesetzen in Konflikt (Sadava, Hillis, Heller, & Berenbaum, 2011; Schrödinger, 1989). Die thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten gelten auf allen Systemebenen der Biologie. Die Bedeutung der Energie für biologische Inhalte wird im Folgenden am Beispiel des Energieflusses in einem Ökosystem erläutert, da dieser den thematischen Schwerpunkt der Studien 2 und 3 dieser Arbeit bildet.

Energiefluss ist ein zentraler Aspekt der Ökologie und trägt zur Erklärung verschiedener Prozesse und Phänomene (z. B. die Länge von Nahrungsketten) in einem Ökosystem bei. Ein Ökosystem ist eine Lebensgemeinschaft in einem bestimmten Areal mit ihrer abiotischen Umwelt (Sadava et al., 2011). Die Grenzen eines Ökosystems sind willkürlich und werden vom Betrachter gezogen (Stoy, 2010). Da Ökosysteme offene Systeme sind, kann Energie über die Systemgrenzen hinweg übertragen werden: Metaphorisch gesprochen fließt Energie durch ein Ökosystem hindurch. Die ursprüngliche Energiequelle für die meisten Ökosysteme ist die Sonne.<sup>1</sup> Photoautotrophe Organismen, beispielsweise grüne Pflanzen und Cyanobakterien, nutzen die Strahlungsenergie der Sonne für die Photosynthese. Bei der Photosynthese werden energiereiche organische Verbindungen aufgebaut. Organismen, die aus einfachen anorganischen Molekülen komplexe organische Moleküle synthetisieren, werden Primärproduzenten genannt (Sadava et al., 2011).

Organismen werden gemäß der von ihnen genutzten Energiequelle auf Trophiestufen eingeordnet. Primärproduzenten bilden die unterste Trophiestufe. Von ihnen ernähren sich die Primärkonsumenten (Herbivoren), die die nächste Stufe bilden. Es folgen als Sekundärkonsumenten die Karnivore, die sich von den Herbivoren ernähren. Von den Sekundärkonsumenten erhalten die Tertiärkonsumenten ihre Energie. Diese lineare Abfolge, die sich weiter fortsetzen lässt, wird Nahrungskette genannt (Sadava et al., 2011). Die durch Photosynthese fixierte Energie wird also entlang der Nahrungskette übertragen. Allerdings werden von einer trophischen Stufe zur nächsten nur ca. 10 % der Energie weitergegeben (Kozlovsky, 1968; Reece et al., 2016). Hierfür gibt es drei Gründe (Sadava et al., 2011):

---

<sup>1</sup> Chemoautotrophe Organismen erhalten ihre Energie nicht aus dem Licht der Sonne, sondern durch die Oxidation anorganischer Substanzen. Diese sogenannte Chemosynthese bleibt in dieser Arbeit ausgeklammert, da für die überwiegende Zahl der Lebensgemeinschaften Photosynthese der relevantere Prozess ist (Sadava et al., 2011).

(1) Es wird nicht die gesamte aufgenommene Energie zur Produktion von Biomasse genutzt. Ein großer Teil wird bei Stoffwechsel- und Bewegungsprozessen umgesetzt. Bei jedem Energieumwandlungsprozess wird ein Teil der Energie in Wärmeenergie umgewandelt, die an die Umgebung abgegeben wird. Zwar erfüllt die Abgabe von Wärmeenergie lebenswichtige Funktionen wie die Verringerung der Entropie im System Lebewesen (Schrödinger, 1989), doch Wärmeenergie kann von Lebewesen nicht mehr in andere Energieformen umgewandelt werden. Diese Energie ist also nicht mehr für die Lebensgemeinschaft nutzbar.

(2) Es wird nicht die gesamte vorhandene Biomasse von der nächsten Trophiestufe aufgenommen. Beispielsweise entsteht Fraßabfall, wenn nicht der gesamte Organismus gefressen wird. Zudem sterben manche Organismen, ohne gefressen zu werden.

(3) Ein Teil der aufgenommenen Biomasse ist unverdaulich und wird von den Organismen wieder ausgeschieden.

Die unter (2) und (3) genannten Aspekte können Energiequellen für Destruenten bilden. Destruenten ernähren sich von unbelebtem organischen Material, wie toten Organismen und Abfallprodukten anderer Organismen, und bilden somit eine eigene Trophiestufe (Reece et al., 2016; Sadava et al., 2011).

Die Ineffizienz des Energietransfers von einer Trophiestufe zur nächsten hat zur Folge, dass Nahrungsketten selten mehr als fünf Stufen haben (Trussell, Ewanchuk, & Matassa, 2006). Letztendlich wird die gesamte Energie, die in ein Ökosystem eingebracht wird, zu Wärmeenergie. Deshalb ist ein Ökosystem auf eine ständige Energiezufuhr durch die Sonne angewiesen (Reece et al., 2016).

Der beschriebene Prozess des Energieflusses in Ökosystemen illustriert beispielhaft die fundamentale Relevanz des Energiekonzepts in der Biologie. Im Folgenden wird das Energiekonzept aus fachdidaktischer Sicht analysiert und begründet, weshalb Energie und der Energiefluss in Ökosystemen im schulischen Biologieunterricht von Bedeutung sind.

## **2.2 Fachdidaktische Grundlagen zum Energiekonzept**

### **2.2.1 Strukturierung des Energiekonzepts anhand von vier Aspekten**

Bevor die Relevanz des Energiekonzepts für den Biologieunterricht analysiert werden kann, muss die grundlegende Struktur des Konzepts erläutert werden. Konzepte



sind durch Relationen verknüpfte Begriffe, die sich auf Sachverhalte beziehen und damit eine Sachstruktur ergeben. Solche Sachstrukturen sind nicht per se wahr, sondern Rekonstruktionen, die auf dem Konsens von Wissenschaftlern beruhen (Duit, 1995; Duit, Gropengießer, Kattmann, Komorek, & Parchmann, 2012). Dieser Arbeit liegt die Strukturierung des Energiekonzepts anhand von vier Aspekten zugrunde, die in physikalischen Kontexten entwickelt wurde (Neumann, Viering, Boone, & Fischer, 2013). Die vier Aspekte reflektieren die zentralen Charakteristika des naturwissenschaftlichen Energiekonzepts (Neumann et al., 2013) und können als Rahmen für die Forschung zum Lehren und Lernen des Energiekonzepts dienen (Duit, 1984):

- (1) Energieformen und -quellen: Energie tritt in unterschiedlichen Formen auf, z. B. kinetische Energie und potenzielle Energie.
- (2) Energieumwandlung und -übertragung: Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden und zwischen Systemen übertragen werden.
- (3) Energieentwertung: Bei jedem Energieumwandlungsprozess wird ein Teil der Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Wärmeenergie ist die am wenigsten nutzbare Energieform.
- (4) Energieerhaltung: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Die Einteilung in vier Aspekte hat sich auch in biologischen und chemischen Kontexten zur Strukturierung des Wissens über Energie bewährt (z. B. Opitz, Harms, Neumann, Kowalzik, & Frank, 2015; Opitz et al., im Druck).

### **2.2.2 Die Relevanz von Energie als Gegenstand des Biologieunterrichts**

Die Relevanzüberprüfung von Unterrichtsthemen ist elementarer Bestandteil verschiedener didaktischer Theorien, beispielsweise der kritisch-konstruktiven Didaktik (Klafki, 1991). Die Relevanz eines Unterrichtsthemas kann an seiner exemplarischen Bedeutung sowie an seiner Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung festgemacht werden (Klafki, 1991). Bezüglich der exemplarischen Bedeutung ist das Energiekonzept als naturwissenschaftliches Grundprinzip auf einer übergeordneten Ebene zu beurteilen. Da Energie erklärt, ob und in welcher Form natürliche Prozesse ablaufen, ist Energie vielen Themen des Biologieunterrichts, wie Ernährung, Bewegung, Photosynthese und Ökosystemen, inhärent (Harms, 2016; Needham, 2014). An diesen Themen kann wiederum

exemplarisch das Energiekonzept erarbeitet werden. Bezüglich der Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung eines Unterrichtsthemas fordert Klafki, dass sich die allgemeine Bildung auf *epochale Schlüsselprobleme* der Gegenwart und der vermuteten Zukunft konzentrieren solle. Ein solches Schlüsselproblem sei die Umweltfrage, „d. h., die in globalem Maßstab zu durchdenkende Frage nach der Zerstörung und Erhaltung der natürlichen Grundlagen menschlicher Existenz und damit nach der Verantwortbarkeit und Kontrollierbarkeit der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung“ (Klafki, 1991, S. 58). Die Umweltfrage ist nach wie vor aktuell (z. B. KMK & BMZ, 2016). Energie ist ein wesentlicher Teil der Umweltfrage, beispielsweise in Bezug auf den Klimawandel und die nachhaltige Energieversorgung. Wissen über Energie kann dabei helfen, energiebezogene Entscheidungen und Maßnahmen nachvollziehen, bewerten und selbst treffen zu können. “Although many people make energy-related decisions without a sophisticated scientific conception of energy, a deep understanding of energy can help us know the right questions to ask as we make energy-related decisions or evaluate energy-related claims.”, erläutert Nordine (2016, S. 5).<sup>2</sup>

Als thematischer Fokus für die zweite und dritte Studie dieser Arbeit wurde der Energiefluss in Ökosystemen ausgewählt. Alle lebendigen Systeme, also alle Gegenstände, mit denen die Biologie sich auseinandersetzt, sind offene Systeme. Sie tauschen kontinuierlich Stoffe und Energie untereinander und mit der Umgebung aus. Hieraus ergibt sich, dass die Energieweitergabe durch lebendige Systeme auf unterschiedlichen Systemebenen für das Lernen über Energie bedeutsam ist. Anhand des Energieflusses in einem Ökosystem lassen sich alle vier Aspekte des Energiekonzepts nachvollziehen: Energie wird als Lichtenergie in das Ökosystem eingebracht und in Form von chemischer Energie zwischen den Trophiestufen übertragen, indem die Organismen einer Trophiestufe die Organismen der vorherigen Trophiestufe fressen. Bei jeder Trophiestufe wird ein Teil der Energie entwertet und verlässt das Ökosystem in Form von Wärme, die in die Atmosphäre gelangt. Der Aspekt der Energieerhaltung ist im offenen System zwar nicht beobachtbar, doch befindet sich letztendlich die gesamte Energie als Wärmeenergie in dem größten denkbaren System, dem Universum. Diesen Endpunkt des Energietransfers ziehen wir bei der Behandlung des Energieflusses im Ökosystem mit hinzu. Damit lässt sich das Energiekonzept in allen seinen Aspekten exemplarisch am Thema Energiefluss in Öko-

---

<sup>2</sup> Der Zusammenhang zwischen Wissen über Energie und der Fähigkeit zur Teilhabe an energiebezogenen gesellschaftspolitischen Herausforderungen wurde allerdings noch nicht empirisch erforscht, vgl. Kapitel 8.5.

systemen erfassen. Opitz, Blankenstein und Harms (2016) sehen das Thema Energiefluss als geeignet an, das Wissen der Schülerinnen und Schüler über Energieumwandlung und -übertragung, Energieentwertung und Energieerhaltung zu vernetzen. Die Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung des Themas zeigt sich beispielsweise an dem Problem der Welternährung, also der Frage, wie die Ernährung der wachsenden Bevölkerung ermöglicht und gesichert werden kann. Wissen über Energie und speziell über Energiefluss kann zur Erklärung, wie eine nachhaltige Ernährungsweise gestaltet werden kann, herangezogen werden. Aufgrund der geringen Effizienz des Energieflusses in einem Ökosystem steht nur ein geringer Teil der Energie, die im Tierfutter enthalten ist, in Form von Fleisch oder anderen tierischen Produkten dem Menschen zur Verfügung. Die Berechnungen von Cassidy, West, Gerber und Foley (2013) weisen darauf hin, dass die globale Kalorienverfügbarkeit um 70 % gesteigert werden könnte, wenn Getreide nicht mehr als Tierfutter oder Biokraftstoff, sondern zum direkten Verzehr verwendet werden würde. Gleichzeitig betonen die Autorinnen und Autoren, dass auch kleinere Veränderungen Auswirkungen auf die weltweite Nahrungsverfügbarkeit haben. Eine vorwiegend vegetarische Ernährungsweise, bei der die Energie der unteren Trophiestufe direkt genutzt wird, ist somit nachhaltiger als eine fleischbasierte Ernährung (Pimentel & Pimentel, 2003).

### **2.2.3 Der Aufbau konzeptuellen Wissens über Energie als normatives Ziel naturwissenschaftlichen Unterrichts**

Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Relevanz des Energiekonzepts spiegelt sich in den normativen Vorgaben des deutschen Bildungssystems wider: Naturwissenschaftliche Lerninhalte im schulischen Kontext sollen unter dem Gesichtspunkt der Energie strukturiert werden. Mit Beginn des Schuljahres 2005/2006 wurden Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss in den Fächern Biologie, Chemie und Physik länderübergreifend eingeführt (KMK, 2004a, 2004b, 2004c). Hierin sind die Kompetenzen festgelegt, über die die Schülerinnen und Schüler in dem jeweiligen Fach mit dem Erwerb des Mittleren Schulabschlusses verfügen sollen. Die inhaltliche Dimension der zu erwerbenden Kompetenzen wird durch den Bereich Fachwissen, der durch Basiskonzepte abgebildet wird, beschrieben. Anhand der Basiskonzepte sollen Schülerinnen und Schüler Kontexte analysieren sowie Inhalte strukturieren und systematisieren. Es wird davon ausgegangen, dass der Bezug zu Basiskonzepten den Aufbau von vernetztem Wissen begünstigt (z. B. KMK, 2004a).

Im Rahmen dieser Arbeit wird anstatt von vernetztem von konzeptuellem Wissen gesprochen, wofür die Wissenstaxonomie von Anderson und Krathwohl (2001) herangezogen wird. Darin werden vier verschiedene Wissensarten unterschieden, von denen zwei das inhaltliche Wissen beschreiben: das Faktenwissen und das konzeptuelle Wissen. “Factual knowledge [means] the basic elements that students must know to be acquainted with a discipline or solve problems in it. Conceptual knowledge [means] the interrelationships among the basic elements within a larger structure that enable them to function together” (Anderson & Krathwohl, 2001, S. 46). Während Faktenwissen also einzelne, isolierte Wissenseinheiten bezeichnet, bezieht sich konzeptuelles Wissen auf komplexe, vernetzte Wissensformen.<sup>3</sup> Zu jedem Themenbereich gehört Faktenwissen notwendigerweise dazu (Anderson & Krathwohl, 2001). Doch anstatt den Fokus auf Faktenwissen zu legen, sollte Unterricht auf Grundlage der Basiskonzepte vor allem den Aufbau von vernetztem, also konzeptuellem, Wissen fördern (KMK, 2004a).

Die Bildungsstandards im Fach Biologie nennen drei Basiskonzepte: System, Struktur/Funktion und Entwicklung. Als Kennzeichen des Lebendigen ist Energie Grundlage aller drei Basiskonzepte. Explizit aufgeführt wird es bei der Erläuterung der Basiskonzepte System und Struktur/Funktion: Stoff- und Energieumwandlungen sind Eigenschaften lebendiger Systeme; Energiefluss stellt eine Eigenschaft von Ökosystemen dar. Die Systemeigenschaften Stoff- und Energieumwandlung sind gekennzeichnet durch Struktur und Funktion (KMK, 2004a, S. 8 f.). In den Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Biologie werden acht Basiskonzepte aufgeführt (KMK, 2004, S. 11 f.). Hier stellen Stoff- und Energieumwandlung, die in den Bildungsstandards vor allem unter System gefasst wurden, ein eigenes Basiskonzept dar. Energiefluss gehört, zusammen mit dem Stoffkreislauf, zum Themenbereich Ökologie und Nachhaltigkeit und ist Grundlage der Abiturprüfung (KMK, 2004, S. 11).

Da die inhaltlichen Dimensionen der Fächer Physik und Chemie ebenfalls durch Basiskonzepte strukturiert werden, die zum Teil Überschneidungen untereinander und mit denen der Biologie aufweisen, werden Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den Fächern aufgezeigt. In der Chemie ist *die energetische Betrachtung bei Stoffumwandlungen* und in der Physik *Energie* ein eigenes Basiskonzept (KMK, 2004b, 2004c). Es ist anzunehmen, dass die Strukturierung von Wissen anhand grundlegender Prinzipien wie Energie den Aufbau interdisziplinären Wissens erleichtern und kumulative Lernprozesse för-

---

<sup>3</sup> Einschränkung anzumerken ist, dass die Unterscheidung zwischen Faktenwissen und konzeptuellem Wissen nicht immer eindeutig ist (Anderson & Krathwohl, 2001).

dem kann. Die hohe Bedeutung von Energie für die naturwissenschaftlichen Fächer zeigt sich auch in internationalen Standards. Die US-amerikanischen *Next Generation Science Standards* (NGSS) definieren *Energy and matter: Flows, cycles, and conservation* als eines von sieben *crosscutting concepts*, das sind fächerübergreifende Konzepte, die als fundamental für das Verständnis<sup>4</sup> der Naturwissenschaften angesehen werden (National Research Council, 2012).

### 2.2.4 Entwicklung des Energiekonzepts entlang der vier Aspekte

Empirische Studien haben gezeigt, dass sich das Wissen der Schülerinnen und Schüler sinnvoll in die unter 2.2.1 beschriebene Sachstruktur des Energiekonzepts mit ihren vier Aspekten (1) Energieformen und -quellen, (2) Energieumwandlung und -übertragung, (3) Energieentwertung und (4) Energieerhaltung einordnen lässt. Neumann et al. (2013) stellten ein Kompetenzentwicklungsmodell auf, das sich in die vier Energieaspekte und vier kognitive Komplexitätsstufen (Fakten, Zuordnungen, Zusammenhänge, Konzepte) aufgliedert. Aus den Ergebnissen der empirischen Prüfung des Modells in physikalischen Kontexten in den Klassenstufen 6, 8 und 10 kann gefolgert werden, dass sich das Energieverständnis von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I entlang der Energieaspekte entwickelt. Schülerinnen und Schüler der sechsten Klassenstufe verfügen über ein Verständnis der Energieformen und -quellen. In der achten Klassenstufe kann auch ein Verständnis von Energieumwandlung und -transport sowie von Energieentwertung nachgewiesen werden. Ein adäquates Verständnis der Energieerhaltung zeigt sich lediglich bei einem Teil der Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 10. Das Verständnis der Energieaspekte entwickelt sich jedoch nicht strikt nacheinander, sondern zum Teil parallel. Eine fortschreitende Entwicklung entlang der vier Komplexitätsstufen konnte nicht beobachtet werden, die Komplexitätsstufen eignen sich jedoch zur Entwicklung von Items unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade (Neumann et al., 2013). Das Modell stellt die Grundlage für die Studien von Opitz et al. (2015) und Opitz et al. (im Druck) zur Modellierung des Wissens über Energie innerhalb der drei naturwissenschaftlichen Fächer und fächerübergreifend dar. Hierbei zeigte sich, dass das Wissen über Energie mit steigender Klassenstufe zunimmt, die Struktur jedoch gleich bleibt: Wissen über Energieformen ist in allen Klassenstufen am höchsten, über Energie-

---

<sup>4</sup> In der vorliegenden Arbeit wird der unscharfe Begriff *Verständnis* vermieden und stattdessen vom kognitionspsychologisch definierten Begriff *konzeptuelles Wissen* gesprochen (vgl. Kapitel 2.2.3). Wird sich jedoch auf eine Quelle bezogen, die vorrangig das Wort *Verständnis* (engl. *understanding*) verwendet, wird diese Formulierung beibehalten.

entwertung am niedrigsten. Insgesamt ist das Wissen über Energie jedoch gering ausgeprägt und fachlich kaum ausdifferenziert (Opitz et al., im Druck).

In biologischen Kontexten zeigte sich, dass der Aspekt der Energieentwertung für Schülerinnen und Schüler ähnlich schwierig wie der Aspekt der Energieerhaltung ist. Ein Grund hierfür könnte sein, dass Biologielehrpläne und -schulbücher eher Energieformen und -umwandlungen thematisieren (Opitz et al., 2015). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass in biologischen Kontexten Wissen über Energieformen und -umwandlungen in der Primarstufe bereits vor der expliziten Einführung des Energiekonzepts im Physikunterricht vorhanden ist. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass vor allem die Aspekte Energieentwertung und -erhaltung eine Herausforderung darstellen.

### 2.2.5 Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zum Energiekonzept

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, dass naturwissenschaftlicher Unterricht Schülerinnen und Schüler darin unterstützen soll, konzeptuelles Wissen über Energie aufzubauen. In diesem Zusammenhang wurde auch geschildert, dass dieses Ziel zurzeit nicht erreicht wird, da Defizite beim konzeptuellen Wissen über Energie von Schülerinnen und Schülern festgestellt wurden. In qualitativen Studien hat sich gezeigt, dass das Energiekonzept der Schülerinnen und Schüler in engem Zusammenhang mit Alternativvorstellungen steht (Opitz et al., 2016). Diese Alternativvorstellungen stellen Herausforderungen beim Lehren und Lernen des Energiekonzepts dar, bieten aber oft auch Möglichkeiten der Anknüpfung.

In der vorliegenden Arbeit wird eine konstruktivistische Lernauffassung vertreten. Diese in der naturwissenschaftlichen Lehr-Lernforschung etablierte Sichtweise bedeutet im Wesentlichen, dass der Lernende Wissen nicht passiv aufnimmt, sondern es aktiv auf Basis seiner individuellen Vorstellungen konstruiert (Duit, 1995). Somit macht der konstruktivistische Ansatz die Berücksichtigung von Vorstellungen der Lernenden, vor allem zu den Inhalten, notwendig (Duit, 1995). Vorstellungen, die sich von der wissenschaftlichen Vorstellung unterscheiden, werden in dieser Arbeit *Alternativvorstellungen* (engl.: *alternative conceptions*) genannt. Zu diesem Begriff existieren mehrere Synonyme (z. B. Ross et al., 2010). Für den Begriff *Alternativvorstellung* spricht erstens, dass er, verglichen mit *Fehlvorstellung*, neutral ist. Zweitens wird sich, anders als mit dem Begriff *Alltagsvorstellung*, nicht auf eine Quelle der Vorstellung festlegt. Drittens impliziert der Begriff anders als *vorunterrichtliche Vorstellung* nicht, dass die Vorstellung nach dem

Unterricht zwingend eine andere ist. Alternativvorstellungen sind häufig stabil und resistent gegenüber Veränderungen, da sie sich in anderen Kontexten, beispielsweise im Alltag, bewähren (Smith, DiSessa, & Roschelle, 1993; Strike & Posner, 1992). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der Aufbau eines wissenschaftlichen Konzepts oft nicht zur Auslöschung der Alternativvorstellung führt, sondern dass beide Vorstellungen zusammen weiter existieren können (in Bezug auf Energie z. B. Liu & Tang, 2004; Simpson & Arnold, 1982) und im besten Fall kontextspezifisch ausgewählt werden (Solomon, 1983).

Die Kontextspezifität gilt auch für das Wort *Energie*. Ursprünglich ein Wort der Alltagssprache, wurde es in die naturwissenschaftliche Fachsprache eingebracht und seine Bedeutung fachlich spezifiziert (Nordine, 2016). Beide Gebrauchsweisen des Wortes dienen der Verständigung und haben ihre Berechtigung. Die unterschiedlichen Bedeutungen von Energie in Alltags- und Fachsprache können allerdings ein Hindernis für fachliches Lernen darstellen, da sie mit unterschiedlichen Vorstellungen verknüpft sind (z. B. Jin & Anderson, 2012; Jin & Wei, 2014; Trumper, 1993).

Die Vorstellungen von Lernenden zum Thema Energie wurden – zunächst vor allem in physikalischen Kontexten – seit den 1980er Jahren umfangreich erforscht. Eine der ersten Analysen hat Watts (1983) durchgeführt: Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe erhielten Strichzeichnungen und sollten entscheiden, ob die dargestellten Situationen (z. B. eine chemische Reaktion, ein Kraftwerk, ein essender Mensch) ihre Vorstellung von Energie widerspiegeln. Anhand der Interviews identifizierte Watts sieben Vorstellungsrahmen (sogenannte *frameworks*). Sie können als Kategorien genutzt werden, um Vorstellungen einzuordnen. Mit denselben oder ähnlichen Zeichnungen wurden weitere Studien durchgeführt, die das Vorhandensein der Vorstellungsrahmen bestätigten (z. B. Bliss & Ogborn, 1985; Lijnse, 1990; Trumper, 1990, 1993). Besonders oft treten die Vorstellungsrahmen *Energie als die Ursache für Prozesse* und *Energie als Produkt von Prozessen* auf (Trumper, 1990). Ebenfalls häufig auftretend und für die Biologie relevant ist der anthropomorphe Vorstellungsrahmen, bei dem Energie (ausschließlich) mit Menschen assoziiert wird oder unbelebten Dingen menschliche Eigenschaften zugeschrieben werden. Dieser Vorstellungsrahmen weist damit Gemeinsamkeiten mit der – bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts auch in der Wissenschaft verbreiteten – Theorie des Vitalismus auf. Gemäß dieser wird die Existenz einer Lebenskraft angenommen, die in lebenden Organismen wirkt. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass in der belebten und unbelebten Welt unterschiedliche Gesetze

gelten und damit biologische Phänomene nicht immer den physikalischen Gesetzmäßigkeiten folgen müssen (Barak, Gorodetsky, & Chipman, 1997; Langlet, 2002). In der Fragebogenstudie von Barak, Gorodetsky und Chipman (1997) weisen nicht nur Schülerinnen und Schüler der High School, sondern auch Biologielehrkräfte solche vitalistischen Vorstellungen auf (vgl. auch Chabalengula, Sanders, & Mumba, 2012). Ein geringes Verständnis von Energie in biologischen Kontexten ist mit der vitalistischen Sichtweise korreliert (Barak et al., 1997). Ein Grund für die Verbreitung und Resistenz der vitalistischen Sichtweise besteht darin, dass Energie in der Alltagssprache mit (Lebens-)kraft, Elan und Gesundheit assoziiert ist (z. B. für Französisch: Bächtold & Guedj, 2014; für Deutsch: Burger, 2001; für Englisch: Jin & Wei, 2014).

Alternativvorstellungen wurden auch in Bezug auf das Thema Energiefluss in Ökosystemen gezeigt. Eine Alternativvorstellung zu dem Aspekt Energiequellen ist, dass Pflanzen Energie aus dem Boden beziehen. Diese Vorstellung, die vor der Entdeckung der Photosynthese auch unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern verbreitet war (Métoui, Matoussi, & Trudel, 2016), wurde sowohl bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I und II (Burger, 2001; Simpson & Arnold, 1982) als auch bei Lehrkräften (Beals, McNall Krall, & Wymer, 2012) nachgewiesen. In der Fragebogenstudie von Boyes und Stanisstreet (1991) gaben die meisten Studienanfängerinnen und -anfänger mit naturwissenschaftlichem Hauptfach zwar an, dass Pflanzen Energie von der Sonne bekommen, doch Wasser und Erde wurden als zusätzliche Energiequellen betrachtet. Als Energiequellen für Tiere (bzw. spezifisch für den Menschen) werden von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I neben Nahrung auch Wasser, Vitamine und Sauerstoff bzw. Luft angegeben (Barak, Sheva, Gorodetsky, & Gurion, 1999; Burger, 2001), wobei die Vorstellung von Luft als Energiequelle auch noch unter Studienanfängerinnen und -anfängern auftritt (Boyes & Stanisstreet, 1991). Es liegt die Vermutung nahe, dass nicht zwischen Stoffen, die lebensnotwendig sind, und solchen, die auch Energie bereitstellen, unterschieden wird (Boyes & Stanisstreet, 1991). Dieselbe Schlussfolgerung zogen Özay und Öztaş (2003) aus ihrer Fragebogenstudie mit Neuntklässlerinnen und Neuntklässlern. Leach, Driver, Scott und Woo-Robinson (1996) stellten fest, dass 16-jährige Schülerinnen und Schüler die Begriffe Energie, Stoff, Nahrung und Nährstoffe im Kontext von Ökosystemen als Synonyme benutzen.

Eine Alternativvorstellung im Bereich Energieübertragung bzw. -entwertung ist, dass Energie nicht entwertet wird, sondern von Destruenten recycelt und anschließend



von Pflanzen wieder aufgenommen werden kann (Beals et al., 2012; Burger, 2001). Damit würde Energie ebenso wie ein Stoff in einem Kreislauf fließen.

Bezüglich des Aspekts der Energieerhaltung existiert die Vorstellung, dass das Gesetz der Energieerhaltung bei biologischen Phänomenen nicht gültig ist (Barak et al., 1997) bzw. dass Energie verloren gehen oder zerstört werden kann (Opitz et al., 2016). Diese Vorstellung ist in der Biologie vermutlich deshalb so verbreitet, weil das Prinzip der Energieerhaltung in offenen Systemen wie einem Ökosystem nicht beobachtet werden kann. Lancor (2014) forderte College- und Universitätsstudierende auf, Analogien zu Energie in verschiedenen naturwissenschaftlichen Kontexten (Ökosystemen, chemischen Reaktionen, mechanischen Systemen, Stromkreis) zu schreiben. Dabei äußerten nur die Studierenden, die sich auf das Ökosystem bezogen, die Vorstellung, dass Energie verloren gehen kann. Darüber hinaus steht der alltägliche Gebrauch des Wortes *Energie* der Erhaltung von Energie entgegen: Beispielsweise wird Energie *verbraucht* oder der Mensch hat *keine Energie mehr*, eine Aufgabe zu erledigen (Duit, 1981, 1987; Jin & Wei, 2014).

Es gibt also bereits umfangreiche Erkenntnisse darüber, welche Alternativvorstellungen im Bereich Energie und, spezifischer, zum Energiefluss in Ökosystemen existent sind. Zudem wurde das Wissen über Energie von Schülerinnen und Schülern innerhalb der Biologie und fächerübergreifend erhoben, wobei sich gezeigt hat, dass nennenswerte Wissensdefizite bestehen. Es stellt sich die Frage, welche instruktionalen Maßnahmen zur Entwicklung und Förderung eines naturwissenschaftlich adäquaten Wissens über Energie im Schulunterricht eingesetzt werden können. Die Studien der vorliegenden Arbeit beschäftigen sich in diesem Zusammenhang mit Möglichkeiten des Einsatzes ausgewählter Repräsentationen sowie des Lehr-Lernprinzips Lernen aus Fehlern. Diese Bereiche werden in den nächsten beiden Kapiteln erläutert.

## 2.3 Repräsentationen

### 2.3.1 Klassifikation und kognitive Verarbeitung von Repräsentationen

Eine Repräsentation ist nach Peirce die Darstellung eines Prozesses oder Objekts durch Zeichen (Lewandowski, 1994a). Ein Zeichen ist „ein Etwas, das eine ‚Bedeutung‘ hat, das für etwas (einen anderen Gegenstand, eine Bedeutung, eine Nachricht bzw. Information) steht oder diese enthält“ (Lewandowski, 1994b). Zeichen erfüllen also eine

Stellvertreterfunktion. Grundsätzlich kann alles, was Gegenstand menschlicher Wahrnehmung oder Vorstellung werden kann, durch Zeichen bezeichnet werden, also auch abstrakte Konzepte (Linke, Nussbaumer, & Portmann, 2004). Eine der bekanntesten Zeichenklassifikationen ist die Trichotomie des Objektbezugs von Peirce (Lewandowski, 1994b). Peirce (1973) unterscheidet drei verschiedene Zeichenarten: Index, Ikon und Symbol. Ein Index hat eine faktische Verbindung mit dem, was es bezeichnet, zum Beispiel ist Rauch ein Zeichen für Feuer. Bei einem Ikon besteht eine Ähnlichkeit zwischen dem Zeichen und dem Abgebildeten, wie es beispielsweise bei einem Piktogramm der Fall ist. Ein Symbol hat eine arbiträre Struktur. Im Gegensatz zu Index und Ikon besitzt es keine faktische Verbindung oder Ähnlichkeit mit dem Bezeichneten. Als Beispiel hierfür nennt Peirce Wörter oder Sätze (Peirce, 1973). Die Grenze zwischen Ikon und Symbol ist allerdings fließend. Beispielsweise beruhen die chinesischen Schriftzeichen, die zu den Symbolen zählen, ursprünglich auf ikonischen Zeichen (Linke et al., 2004). Wissenschaftliche Repräsentationen wie Diagramme weisen in der Regel keine Ähnlichkeit zwischen dem Zeichen und dem Abgebildeten auf, sie werden aber in der Bildtheorie trotzdem zu Ikonen gezählt (Heßler, 2006; Linke et al., 2004).

Das Verstehen einer externen Repräsentation ist ein aktiver Informationsverarbeitungsprozess und führt dazu, dass das Individuum eine interne Repräsentation aufbaut. Interne Repräsentationen sind mentale Abbilder der Wirklichkeit. Sie sind individuell und können nicht unmittelbar erfasst werden. Externe Repräsentationen treten außerhalb des Individuums in verschiedenen Modalitäten (auditiv, visuell) auf. Wie in Tabelle 2-1 dargestellt, werden sie in deskriptive Repräsentationen (basierend auf Symbolen, z. B. Texte, Gleichungen) und depiktive Repräsentationen (basierend auf ikonischen Zeichen, z. B. Piktogramme, Diagramme) unterteilt (Schnotz, 2002, 2014). Der Begriff *Visualisierung* wird in der Literatur uneinheitlich verwendet: für alle depiktiven Repräsentationen (Mayer, 2011), nur für die Unterkategorie Animationen (Ryoo & Linn, 2012) oder als *verbale Visualisierung* für die deskriptive Repräsentationsform Metaphern (Tibell & Rundgren, 2008). In der vorliegenden Arbeit wird von deskriptiven und depiktiven Repräsentationen bzw. vereinfachend von Texten und Abbildungen gesprochen. Bei Bezugnahme auf interne Repräsentationen wird das Wort *intern* explizit hinzugefügt.

Tabelle 2-1

*Einteilung externer Repräsentationen in Texte und Abbildungen (verändert nach Mayer, 2011, S. 427)*

Repräsentationstyp	Beispiel	Umsetzung
Deskriptive Repräsentationen: Wörter / Texte	Gedruckte Wörter	Wörter (gedruckt oder auf einem Bildschirm)
	Gesprochene Wörter	Gesprochene Sprache, live, aufgenommen oder künstlich hergestellt
Depiktive Repräsentationen: Abbildungen	Statische Abbildungen	Zeichnungen, Fotos, Tabellen, Diagramme usw. (gedruckt oder auf einem Bildschirm)
	Dynamische Abbildungen	Animationen, Videos (auf einem Bildschirm)

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass das Lernen mit Kombinationen aus Abbildungen und Texten zu größeren Lerneffekten führt als Lernen mit Texten allein (*Multimedia principle*, Mayer, 2014). Die theoretische Basis für erfolgreiches Lernen mit verschiedenen Repräsentationsformen bildet die *Dual Coding Theory* (Paivio, 1986), die annimmt, dass verbale und nonverbale Informationen in separaten, aber miteinander verbundenen kognitiven Systemen verarbeitet werden. Aufbauend auf Paivios Theorie wurden die *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (Mayer, 2014) und das detailliertere *Integrative Model of Text and Picture Comprehension* (Schnotz, 2014) entwickelt. Beide Modelle gehen davon aus, dass Informationen entsprechend ihrer Modalität auditiv oder visuell aufgenommen werden. Im Arbeitsgedächtnis werden sie gemäß ihrer Repräsentationsklasse (deskriptiv oder depiktiv) in zwei Systemen kognitiv verarbeitet. Dabei werden deskriptive bzw. depiktive mentale Repräsentationen aufgebaut. Wird sowohl ein Text als auch eine Abbildung verarbeitet, erfolgt die Integration der deskriptiven und der depiktiven mentalen Repräsentationen zu einer gemeinsamen mentalen Repräsentation. Das im Langzeitgedächtnis gespeicherte Vorwissen beeinflusst die Informationsselektion und -organisation und damit die Ausgestaltung der mentalen Repräsentationen (Mayer, 2014; Schnotz, 2014; Schnotz & Bannert, 2003).

### 2.3.2 Repräsentationen im naturwissenschaftlichen Unterricht

In den Naturwissenschaften dienen Repräsentationen dazu, Wissen zu gewinnen, zu fixieren und zu kommunizieren (Heßler, 2006). Dabei wird häufig eine Kombination verschiedener Repräsentationsformen verwendet. Eine synergetische Integration deskriptiver und depiktiver Repräsentationen ist nach Lemke (1998) die natürliche Sprache der

Wissenschaft, die sich beispielsweise in Fachpublikationen niederschlägt. Nicht zuletzt wegen ihrer Unabdingbarkeit in naturwissenschaftlichen Erkenntnis- und Kommunikationsprozessen haben Repräsentationen auch in Lehr-Lernkontexten eine immense Bedeutung. Die Fähigkeit, Informationen aus Repräsentationen erschließen zu können, stellt eine wichtige Ressource für das Lernen dar (z. B. in biologischen Kontexten: Schönborn & Bögeholz, 2013). Der Umgang mit Repräsentationen ist Teil der *Scientific Literacy*. *Scientific Literacy* im engeren Sinne meint die Fähigkeit zum Lesen und Schreiben im Zusammenhang mit naturwissenschaftlichen Inhalten (Norris & Phillips, 2003) – also die Fähigkeit zur Interpretation, Produktion und Bewertung naturwissenschaftlicher Repräsentationen (Nitz, Ainsworth, Nerdel, & Prechtel, 2014). *Scientific Literacy* im weiteren Sinne geht darüber hinaus, indem das grundlegende Verständnis der Naturwissenschaften (z. B. das Wissen über epistemologische Aspekte) einbezogen wird (Norris & Phillips, 2003; Yore, Pimm, & Tuan, 2007). Das übergeordnete Ziel naturwissenschaftlicher Bildung im Sinne von *Scientific Literacy* ist, dass Menschen am naturwissenschaftlichen Diskurs, also zum Beispiel an Debatten zu naturwissenschaftlichen Themen, teilnehmen können (Hand, Lawrence, & Yore, 1999; Laugksch, 2000).

Die Bedeutung von Repräsentationen für die naturwissenschaftliche Bildung spiegelt sich in den normativen Vorgaben des Bildungssystems wider. Die inhaltliche Dimension der Bildungsstandards Biologie für den Mittleren Schulabschluss wurde bereits in Bezug auf das Energiekonzept vorgestellt. Die Handlungsdimension der Bildungsstandards fächert sich in die Kompetenzbereiche Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung auf. Der fachgerechte Umgang mit Repräsentationen gehört zur Kommunikationskompetenz. Kommunikation erfordert, dass Schülerinnen und Schüler Informationen erschließen und an andere Personen vermitteln können (Harms & Kattmann, 2016; KMK, 2004a). Die Bildungsstandards verlangen sowohl die Fähigkeit zum Umgang mit fachsprachlichen und alltagssprachlichen Texten und Abbildungen als auch die angemessene Verwendung von Fachsprache (KMK, 2004a).

Das Wissen um den adäquaten Einsatz von Repräsentationen ist ein Teil des fachdidaktischen Wissens von Lehrkräften (Magnusson, Krajcik, & Borko, 1999; Shulman, 1986). Lehrkräfte müssen Repräsentationen zielgerichtet auswählen und einsetzen, um die Lernenden darin zu unterstützen, ein Thema in einer bestimmten Lernsituation besser zu verstehen (Magnusson et al., 1999). Im naturwissenschaftlichen Unterricht greifen Lehrkräfte häufig auf das Medium Schulbuch zurück (McDonald, 2016), das deskriptive und depiktive Repräsentationen enthält. Trotz der zunehmenden Bedeutung digitaler

Kommunikationsformen nimmt das Schulbuch nach wie vor eine wichtige Stellung unter den Medien in der Schule ein. In den USA durchgeführte Studien zeigen, dass elektronische Lehrbücher für Schule und Universität an Bedeutung gewinnen, gedruckte Bücher aber nach wie vor häufiger genutzt und positiver wahrgenommen werden (Baglione & Sullivan, 2016; Fike, Fike, & St. Clair, 2016). Lehrende nutzen Schulbücher unter anderem bei der Auswahl von Inhalten im Rahmen der Unterrichtsplanung und als Grundlage für Hausaufgaben (Härtig, Kauertz, & Fischer, 2012). Neben der instrumentellen Funktion haben Schulbücher immer auch eine normierende Funktion, da sie Inhalte auf eine bestimmte Weise präsentieren und so (bildungs-)politische Auffassungen transportieren. Laut Heitzmann und Niggli (2010, S. 15) sind Lehrmittel wie zum Beispiel Schulbücher „vorstrukturierte Umsetzungsbeispiele des Lehrplans“ und können für Lehrende als „Referenz zur Überprüfung der Stoffplanung und Zielerreichung dienen.“ Angesichts der Bedeutung und Nutzungshäufigkeit von Schulbüchern kann angenommen werden, dass die darin enthaltenen deskriptiven und depiktiven Repräsentationen den naturwissenschaftlichen Unterricht beeinflussen.

### **2.3.3 Repräsentationen und die Vermittlung abstrakter naturwissenschaftlicher Konzepte**

Zahlreiche zentrale naturwissenschaftliche Phänomene sind abstrakt, da sie keinen abgegrenzten, identifizierbaren Referenten in der Realität besitzen oder dieser nicht mit den menschlichen Sinnen wahrnehmbar ist. Letzteres trifft auf alle naturwissenschaftlichen Prozesse und Phänomene zu, die nicht auf einer mittleren Dimensionsebene (dem *Mesokosmos*, vgl. Niebert & Gropengießer, 2015) angesiedelt sind, sondern die sich zum Beispiel auf molekularer oder globaler Ebene abspielen oder innerhalb besonders langer oder kurzer Zeiträume stattfinden (Kozma, 2000; Niebert & Gropengießer, 2015; Tsui & Treagust, 2013). Wie bereits dargestellt hat Energie keinen wahrnehmbaren Referenten in der Realität. Energieträger und Energieumwandlungsprozesse sind nur zum Teil sinnlich wahrnehmbar: Beispielsweise kann der Energiefluss in einem Ökosystem aufgrund seiner räumlichen und zeitlichen Dimensionen nicht unmittelbar erfasst werden.

Die Kommunikation über abstrakte Konzepte wird durch Repräsentationen ermöglicht. In der Wissenschaft häufig verwendete depiktive Repräsentationen sind nicht im engeren, sondern im weiteren Sinne Ikone: Sie weisen keine visuelle Ähnlichkeit mit dem Bezeichneten auf. Stattdessen konstruieren sie das, was sie bezeichnen, und machen

das Bezeichnete erst sichtbar (Heßler, 2006). Somit besteht ein wesentliches Potenzial von Abbildungen darin, dass sie etwas visualisieren können, das für den Menschen nicht direkt wahrnehmbar ist. Abbildungen können das Verständnis abstrakter Konzepte in den Naturwissenschaften unterstützen (z. B. Kozma & Russell, 2005; Tsui & Treagust, 2013). Es gibt bereits einige Studien, die die Lernförderlichkeit von Abbildungen in Bezug auf das Energiekonzept belegen. Ryoo und Linn (2012) stellten fest, dass vor allem dynamische, aber auch statische Abbildungen das Schülerverständnis von Energieumwandlungen bei der Photosynthese verbessern können. Auch die Interventionsstudie mit Universitätsstudierenden von Van Heuvelen und Zou (2001) stützt die Annahme, dass Abbildungen das Lernen des Energiekonzepts fördern können. Beispielsweise seien Säulendiagramme dazu geeignet, den Energieerhaltungssatz in der Physik zu veranschaulichen.

Wie abstrakte Konzepte im kognitiven System repräsentiert sind, wird in der psychologischen Forschung nach wie vor intensiv diskutiert (Borghini et al., 2017). Es gibt Hinweise darauf, dass abstrakte Konzepte ebenso wie konkrete Konzepte ihre Bedeutung durch Wahrnehmung der Umwelt, motorische Erfahrungen und Emotionen erhalten (*embodied cognition*, z. B. Borghini et al., 2017; Kiefer & Pulvermüller, 2011). Diese These liegt auch der kognitiven Metapherntheorie nach Lakoff und Johnson (1980, 2003) zugrunde. Gemäß dieser Theorie ist das menschliche Denken im Kern metaphorisch – ohne Metaphern kann sich der Mensch nichts vorstellen, was über die persönlichen physischen Erfahrungen hinausgeht. Dies spiegelt sich in der Sprache wider. Deshalb haben im Bereich der deskriptiven Repräsentationen insbesondere Metaphern<sup>5</sup> das Potenzial, Konzepte fassbar zu machen. Metaphern bestehen aus einzelnen Wörtern bis hin zu Textpassagen (Schmitt, 2007). Mit einer Metapher werden Aspekte eines Bereichs, der sogenannten Quelldomäne, auf einen anderen Bereich, die Zieldomäne, übertragen. Die Quelldomäne liegt in der Regel im Bereich des Mesokosmos, das heißt, sie ist direkt für den Menschen erfahrbar (Niebert & Gropengießer, 2015). Die Zieldomäne ist abstrakt. In der naturwissenschaftlichen Bildungsforschung werden Metaphern als potenziell lernförderliches Instrument in Lehr-Lernprozessen angesehen. Metaphern machen abstrakte Phänomene anschaulich und zugänglich, indem sie Schülerinnen und Schüler dabei unterstützen, Wissen über neue (abstrakte) Inhalte durch bereits vorhandenes Wissen oder gemachte Erfahrungen aufzubauen (Duit, 1991; Kattmann, 2015b; Niebert et al., 2012; Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982). Die Studien von Amin (2009), Amin, Jeppson, Haglund und

---

<sup>5</sup> Der Begriff Metapher wird in dieser Arbeit als Sammelbezeichnung für sprachliche Wendungen mit übertragener Bedeutung verwendet und schließt damit Analogien ein (vgl. Niebert, Marsch, & Treagust, 2012).

Strömdahl (2012) und Lancor (2014, 2015) belegen, dass das Energiekonzept mithilfe von Metaphern beschrieben wird. Trotz ihrer Bedeutung für das menschliche Denken und ihres lernförderlichen Potenzials ist jedoch noch weitestgehend offen, welche energiebezogenen Metaphern in Lehr-Lernkontexten verwendet werden sollten.

Eine Herausforderung für die Bildungsforschung besteht darin, dass Repräsentationen und ihr adäquater Einsatz disziplin- oder sogar themenspezifisch sind (Heßler, 2006; Magnusson et al., 1999). Wie Repräsentationen für den Unterricht effektiv gestaltet und eingesetzt werden können, muss deshalb fach- bzw. themenspezifisch untersucht werden. In Bezug auf abstrakte Konzepte der Mathematik hat sich die Verknüpfung von deskriptiven Repräsentationen (Gleichungen) mit der Strategie des Lernens aus Fehlern bewährt, die im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

## **2.4 Lernen aus Fehlern**

### **2.4.1 Die Theorie des negativen Wissens**

Aus konstruktivistischer Sicht sind Fehler ein unvermeidbarer und zugleich notwendiger Bestandteil von Lernprozessen (Dalehefte, Seidel, & Prenzel, 2012). Dass Fehler konstruktiv für den Lernprozess genutzt werden können, haben Fritz Oser und seine Forschungsgruppe theoretisch erklärt (Oser, Hascher, & Spychiger, 1999). Allgemein werden unter Fehlern „von einer Norm abweichende Sachverhalte oder von einer Norm abweichende Prozesse“ (Oser et al., 1999, S. 11) verstanden. Im schulischen Kontext stellen die Sachverhalte in der Regel fachliche Inhalte dar. Die Unterscheidung verschiedener Fehlertypen erfolgt deshalb fachspezifisch. Normen fungieren als Bezugssystem, um Richtiges von Falschem zu unterscheiden (Oser et al., 1999). Im naturwissenschaftlichen Unterricht stellt die mit Evidenz untermauerte wissenschaftliche Sichtweise die Norm dar. Es gibt Fehlerarten, die weniger im Sinne der Theorie für das Lernen fruchtbar gemacht werden können (z. B. Fehler bei der Rechtschreibung), während Fehler im Konzepterwerb eher dafür geeignet sind (Oser & Spychiger, 2005). Fruchtbare Fehler treten nicht zufällig auf, sondern sind Zeichen für die zugrunde liegenden Alternativvorstellungen (Nesher, 1987). Deshalb sollte das Ziel des Unterrichts nicht die Korrektur des Fehlers selbst sein, sondern die Veränderung der zugrunde liegenden Vorstellung bzw. ihre kontextabhängige Anwendung. Im Rahmen ihrer Theorie zum Lernen aus Fehlern haben Oser und seine Kolleginnen und Kollegen das Konstrukt des negativen Wissens beschrie-

ben. Negatives Wissen ist Wissen darüber, „wie etwas nicht ist (deklarativ) oder nicht funktioniert (prozedural)“ (Oser et al., 1999, S. 17). Es bedarf einer kognitiven Auseinandersetzung mit dem Fehler, um negatives Wissen aufzubauen. Zunächst muss das Fehlerhafte als solches erkannt werden und reflektiert werden, auf welchen Vorstellungen es beruht. Darauf aufbauend muss das negative Wissen dem positiven (richtigen) Wissen kontrastierend gegenübergestellt werden, wodurch Prozesse des Umlernens initiiert werden können (Oser & Spychiger, 2005). Negatives Wissen fungiert als Abgrenzungs- und Absicherungswissen, da korrekte und nicht korrekte Vorstellungen voneinander abgegrenzt werden. Die Bewusstheit über die falschen Alternativen macht das positive Wissen sicherer. Zudem kann negatives Wissen davor schützen, denselben Fehler erneut zu begehen (Oser et al., 1999; Oser & Spychiger, 2005). Negatives Wissen ist jedem Konzept inhärent: „Wenn Negatives Wissen das Gegenteil von dem ist, was eine Sache konstituiert, dann muss die Erkenntnis von jedem Begriff und jedem Konzept, die im Lernprozess erworben werden, genau dieses Negative Wissen als Konstituente mit einbeziehen.“ (Oser & Spychiger, 2005, S. 11).

Der Umgang mit Fehlern im Unterricht ist abhängig von der Lehr-Lernkultur. Anders als beispielsweise im Mathematikunterricht in Japan wird im deutschen Unterricht das Lernpotenzial von Fehlern bislang wenig ausgeschöpft (Dalehefte et al., 2012). Eine Ursache besteht darin, dass in deutschen Klassenräumen häufig Lern- und Leistungssituationen vermischt werden, sodass Schülerinnen und Schüler nicht einschätzen können, wann Fehler als Lerngelegenheit willkommen sind und wann nicht (Dalehefte et al., 2012). Darüber hinaus gehen Fehler oft mit negativen Emotionen wie Angst einher, die den Lernprozess blockieren können (Hascher & Hagenauer, 2010; Oser & Spychiger, 2005). Schülerinnen und Schüler bemühen sich deshalb in der Regel, Fehler zu vermeiden oder zu vertuschen. Es wird angenommen, dass zum erfolgreichen Lernen aus Fehlern eine positive Fehlerkultur notwendig ist. Hierfür wird es unter anderem als wichtig erachtet, Lern- und Leistungssituation zu trennen (Dalehefte et al., 2012; Stadler, 2009). Ferner sollten sich Lehrkraft und Mitschülerinnen und Mitschüler tolerant gegenüber Fehlern verhalten (Steuer & Dresel, 2015). Eine solche positive Fehlerkultur ist in deutschen Klassenräumen bisher nicht ausgeprägt (Dalehefte et al., 2012; Oser & Spychiger, 2005; Steuer & Dresel, 2015).

Die beschriebenen Schwierigkeiten treffen vor allem auf das Lernen aus eigenen Fehlern zu. Negatives Wissen kann aber auch durch das Lernen aus fremden bzw. konstruierten Fehlern aufgebaut werden, wodurch das Falsche stellvertretend (advokatorisch)



erlebt wird (Oser & Spsychiger, 2005). Während eigene Fehler der Schülerinnen und Schüler spontan und individuell auftreten, kann der Einsatz konstruierter Fehler von der Lehrkraft vor dem Unterricht geplant werden. Es wird angenommen, dass das Suchen fremder Fehler motivierend auf Schülerinnen und Schüler wirkt (Schmiemann, 2010). Konstruierte Fehler können zum Beispiel durch (Lösungs-)Beispiele präsentiert werden, die häufig gemachte Fehler abbilden und damit die zugrunde liegenden bekannten Alternativvorstellungen ansprechen. Ferner wird angenommen, dass das Lernen aus konstruierten Fehlern zur Entwicklung einer positiven Fehlerkultur beitragen kann, da erfahren wird, dass Fehler konstruktiv für den Lernprozess genutzt werden können und somit eine lernorientierte Haltung gegenüber Fehlern gefördert wird (Schmiemann, 2010).

### **2.4.2 Empirische Belege für die Lernförderlichkeit des Lernens aus Fehlern**

Empirische Studien in unterschiedlichen Domänen haben gezeigt, dass Lernen aus fremden Fehlern das Erlernen von Wissen und Fähigkeiten positiv beeinflussen kann (z. B. Joung, Hesketh, & Neal, 2006 zur Förderung der professionellen Kompetenz von Feuerwehrmännern). Im Rahmen der schulischen Bildungsforschung wurde der Ansatz vor allem in der Mathematikdidaktik erforscht. Lernen mit fehlerhaften Beispielen fördert das Verständnis mathematischer Konzepte wie Algebra (Booth, Lange, Koedinger, & Newton, 2013), Wahrscheinlichkeit (Große & Renkl, 2007), Dezimalrechnung (Durkin & Rittle-Johnson, 2012) und Bruchrechnung (Heemsoth & Heinze, 2014). Die Befunde weisen darauf hin, dass die Effektivität dieser Instruktionsweise vom Vorwissen der Lernenden abhängt. Während Schülerinnen und Schüler mit niedrigem Vorwissen eher vom Lernen mit korrekten Beispielen profitieren, ist für Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen das Lernen mit fehlerhaften Beispielen effektiver (Heemsoth & Heinze, 2014). Da Wissen zur Identifizierung des Fehlers notwendig ist, hilft es Lernenden mit niedrigem Vorwissen, wenn Fehler bereits markiert sind (Große & Renkl, 2007).

Anders als in der Mathematikdidaktik hat der Ansatz des Lernens aus Fehlern in der Biologiedidaktik bislang nur wenig Aufmerksamkeit erhalten. In Hand- und Lehrbüchern der Fachdidaktik Biologie finden sich zwar kurze Abschnitte zum Lernen aus Fehlern (Gropengießer, 2016; Schmiemann, 2010), empirische Forschungsarbeiten zur Effektivität des Lernens aus Fehlern für den Erwerb naturwissenschaftlichen Wissens liegen jedoch nur wenige vor. In einer Fachzeitschrift für den Biologieunterricht veröffentlichte Hammann (2003) zwei Aufgabenblätter, die das Lernen aus Fehlern initiieren sollen. Da-

rauf sind fehlerhafte Zeichnungen des menschlichen Blutkreislaufs zu sehen. Die Fehler stellen Alternativvorstellungen dar. Aufgabe der Schülerinnen und Schüler ist es unter anderem, die den Zeichnungen zugrunde liegenden Denkfehler zu erläutern. Die Effektivität von Hammanns Ansatz wurde von Ehmer (2008) im Rahmen einer Interventionsstudie mit  $N = 44$  Schülerinnen und Schülern der 6. Klassenstufe überprüft. In der Experimentalgruppe wurde das advokatorische Fehlerlernen unter Einsatz der von Hammann (2003) entwickelten Materialien angeregt. Die Kontrollgruppe nahm an fragend-entwickelnden Unterricht zum menschlichen Blutkreislauf ohne Bezugnahme auf negatives Wissen teil. Es zeigte sich, dass die Experimentalgruppe ein signifikant höheres Verständnis von zentralen, komplexen Aspekten des menschlichen Blutkreislaufs aufwies als die Kontrollgruppe. Die Überlegenheit konnte auf den Erwerb negativen Wissens zurückgeführt werden. Ehmer (2008) schränkt jedoch ein, dass die Ergebnisse der Studie aufgrund des geringen Stichprobenumfangs nur bedingt generalisierbar sind.

Im Zusammenhang mit der Theorie des negativen Wissens können Texte gesehen werden, die explizit Alternativvorstellungen aufgreifen und negieren (sogenannte *refutation texts*). Diese aktivieren gleichzeitig die fachlich korrekte und die fachlich inkorrekte Vorstellung, wodurch sich Lernende der Inkonsistenz dieser beiden Vorstellungen bewusst werden. Solche Texte können den Lernzuwachs erhöhen (Tippett, 2010) und wurden bereits erfolgreich im Kontext Energie eingesetzt (Diakidoy, Kendeou, & Ioannides, 2003). Alles in allem gibt es deutliche empirische Evidenz dafür, dass das Lernen aus Fehlern den Lernzuwachs fördern kann.

## 2.5 Literaturverzeichnis

- Amin, T. G. (2009). Conceptual metaphor meets conceptual change. *Human Development, 52*, 165-197. doi: 10.1159/000213891
- Amin, T. G., Jeppsson, F., Haglund, J., & Strömdahl, H. (2012). Arrow of time: metaphorical construals of entropy and the second law of thermodynamics. *Science Education, 96*, 818-848. doi: 10.1002/sce.21015
- Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (Hrsg.). (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. New York, NY: Longman.
- Bächtold, M., & Guedj, M. (2014). Teaching energy informed by the history and epistemology of the concept with implications for teacher education. In M. R. Matthews (Hrsg.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (Band I, S. 211-243). Dordrecht: Springer.
- Baglione, S. L., & Sullivan, K. (2016). Technology and textbooks: the future. *American Journal of Distance Education, 30*, 145-155. doi: 10.1080/08923647.2016.1186466
- Barak, J., Gorodetsky, M., & Chipman, D. (1997). Understanding of energy in biology and vitalistic conceptions. *International Journal of Science Education, 19*, 21-30. doi: 10.1080/0950069970190102
- Barak, J., Sheva, B., Gorodetsky, M., & Gurion, B. (1999). As 'process' as it can get: students' understanding of biological processes. *International Journal of Science Education, 21*, 1281-1292. doi: 10.1080/095006999290075
- Beals, A. M., McNall Krall, R., & Wymer, C. L. (2012). Energy flow through an ecosystem: conceptions of in-service elementary and middle school teachers. *International Journal of Biology Education, 2*, 1-18.
- Bliss, J., & Ogborn, J. (1985). Children's choices of uses of energy. *European Journal of Science Education, 7*, 195-203. doi: 10.1080/0140528850070210
- Booth, J. L., Lange, K. E., Koedinger, K. R., & Newton, K. J. (2013). Using example problems to improve student learning in algebra: differentiating between correct and incorrect examples. *Learning and Instruction, 25*, 24-34. doi: 10.1016/j.learninstruc.2012.11.002

- Borghi, A. M., Binkofski, F., Castelfranchi, C., Cimatti, F., Scorolli, C., & Tummolini, L. (2017). The challenge of abstract concepts. *Psychological Bulletin*, *143*, 263-292. doi: 10.1037/bul0000089
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1991). Misconceptions in first-year undergraduate science students about energy sources for living organisms. *Journal of Biological Education*, *25*, 209-213. doi: 10.1080/00219266.1991.9655208
- Burger, J. (2001). *Schülervorstellungen zu "Energie im biologischen Kontext". Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen*. Dissertation, Universität Bielefeld, Bielefeld.
- Cassidy, E. S., West, P. C., Gerber, J. S., & Foley, J. A. (2013). Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environmental Research Letters*, *8*, 034015. doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034015
- Cerbe, G., & Wilhelms, G. (2011). *Technische Thermodynamik*. München: Hanser.
- Chabalengula, V. M., Sanders, M., & Mumba, F. (2012). Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological contexts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *10*, 241-266. doi: 10.1007/s10763-011-9291-2
- Coopersmith, J. (2010). *Energy, the subtle concept. The discovery of Feynman's blocks from Leibniz to Einstein*. New York, NY: Oxford University Press.
- Dalehefte, I. M., Seidel, T., & Prenzel, M. (2012). Reflecting on learning from errors at school instruction: findings and suggestions from a Swiss-German video study. In J. Bauer & C. Harteis (Hrsg.), *Human fallibility. the ambiguity of errors for work and learning* (S. 197-213). Dordrecht: Springer.
- Diakidoy, I.-A. N., Kendeou, P., & Ioannides, C. (2003). Reading about energy: the effects of text structure in science learning and conceptual change. *Contemporary Educational Psychology*, *28*, 335-356. doi: 10.1016/s0361-476x(02)00039-5
- Duit, R. (1981). Understanding energy as a conserved quantity – remarks on the article by R. U. Sexl. *European Journal of Science Education*, *3*, 291-301. doi: 10.1080/0140528810030306
- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school – Empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education*, *19*, 59-66. doi: 10.1088/0031-9120/19/2/306

- Duit, R. (1987). Unterricht über Energie – Ziele, Lernschwierigkeiten, Wege. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, 36, 41-44.
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75, 649-672. doi: 10.1002/sce.3730750606
- Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41, 905-923.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). The model of educational reconstruction – A framework for improving teaching and learning science. In D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science education research and practice in europe. Retrospective and prospective* (S. 13-38). Rotterdam: Sense Publishers.
- Durkin, K., & Rittle-Johnson, B. (2012). The effectiveness of using incorrect examples to support learning about decimal magnitude. *Learning and Instruction*, 22, 206-214. doi: 10.1016/j.learninstruc.2011.11.001
- Ehmer, M. (2008). *Förderung von kognitiven Fähigkeiten beim Experimentieren im Biologieunterricht der 6. Klasse: Eine Untersuchung zur Wirksamkeit von methodischem, epistemologischem und negativem Wissen*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2007). *Feynman-Vorlesungen über Physik. Band 1: Mechanik, Strahlung, Wärme*. München: Oldenbourg.
- Fike, D., Fike, R., & St. Clair, N. (2016). Do e-textbooks impact learning outcomes? *International Journal on E-Learning*, 15, 313-325.
- Gropengießer, H. (2016). Lernaufgaben entwickeln. In H. Gropengießer, U. Harms & U. Kattmann (Hrsg.), *Fachdidaktik Biologie* (10., durchgesehene Auflage, S. 243-250). Hallbergmoos: Aulis.
- Große, C. S., & Renkl, A. (2007). Finding and fixing errors in worked examples: Can this foster learning outcomes? *Learning and Instruction*, 17, 612-634. doi: 10.1016/j.learninstruc.2007.09.008
- Hamann, M. (2003). Aus Fehlern lernen. *Unterricht Biologie*, 27, 31-35.
- Hand, B., Lawrence, C., & Yore, L. D. (1999). A writing in science framework designed to enhance science literacy. *International Journal of Science Education*, 21, 1021-1035. doi: 10.1080/095006999290165

- Harms, U. (2016). Ohne Energie geht nichts! *Unterricht Biologie*, 411, 2-11.
- Harms, U., & Kattmann, U. (2016). Kommunikation biologischer Phänomene und Erkenntnisse. In H. Gropengießer, U. Harms & U. Kattmann (Hrsg.), *Fachdidaktik Biologie* (10., durchgesehene Auflage, S. 62-70). Hallbergmoos: Aulis.
- Härtig, H., Kauertz, A., & Fischer, H. E. (2012). Das Schulbuch im Physikunterricht. Nutzung von Schulbüchern zur Unterrichtsvorbereitung in Physik. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 65, 197-200.
- Hascher, T., & Hagenauer, G. (2010). Lernen aus Fehlern. In C. Spiel, B. Schober, P. Wagner & R. Reimann (Hrsg.), *Bildungspsychologie* (S. 377-381). Göttingen: Hogrefe.
- Heemsoth, T., & Heinze, A. (2014). The impact of incorrect examples on learning fractions: A field experiment with 6th grade students. *Instructional Science*, 42, 639-657. doi: 10.1007/s11251-013-9302-5
- Heitzmann, A., & Niggli, A. (2010). Lehrmittel – ihre Bedeutung für Bildungsprozesse und die Lehrerbildung. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 28, 6-19.
- Heßler, M. (2006). Annäherungen an Wissenschaftsbilder. In M. Heßler (Hrsg.), *Konstruierte Sichtbarkeiten. Wissenschafts- und Technikbilder seit der Frühen Neuzeit* (S. 11-37). München: Wilhelm Fink Verlag.
- Jin, H., & Anderson, C. W. (2012). A learning progression for energy in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 1149-1180. doi: 10.1002/tea.21051
- Jin, H., & Wei, X. (2014). Using ideas from the history of science and linguistics to develop a learning progression for energy in socio-ecological systems. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (S. 157-173). New York, NY: Springer.
- Joung, W., Hesketh, B., & Neal, A. (2006). Using "War stories" to train for adaptive performance: Is it better to learn from error or success? *Applied Psychology: An International Review*, 55, 282-302. doi: 10.1111/j.1464-0597.2006.00244.x
- Kattmann, U. (2015). *Schüler besser verstehen. Alltagsvorstellungen im Biologieunterricht*. Hallbergmoos: Aulis Verlag.

- Kiefer, M., & Pulvermüller, F. (2011). Conceptual representations in mind and brain: theoretical developments, current evidence and future directions. *Cortex*, 48, 805-825. doi: 10.1016/j.cortex.2011.04.006
- Klafki, W. (1991). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (2., erweiterte Auflage). Weinheim und Basel: Beltz.
- KMK. (2004). *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Biologie. Beschluss vom 1.12.1989 i. d. F. vom 5.2.2004.*  
[http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1989/1989\\_12\\_01-EPA-Biologie.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1989/1989_12_01-EPA-Biologie.pdf). Zugegriffen: 09. Jul 2014.
- KMK. (2004a). *Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004.*  
[https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf). Zugegriffen: 15. Mai 2014.
- KMK. (2004b). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004.*  
[https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf). Zugegriffen: 07. Apr 2015.
- KMK. (2004c). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004.*  
[http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf). Zugegriffen: 03. Jan 2017.
- KMK, & BMZ (Hrsg.). (2016). *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Bonn: Cornelsen.
- Kozlovsky, D. (1968). A critical evaluation of the trophic level concept. I. Ecological efficiencies. *Ecology*, 49, 48-60. doi: 10.2307/1933560
- Kozma, R. (2000). The use of multiple representations and the social construction of understanding in chemistry In M. Jacobsen & R. Kozma (Hrsg.), *Innovations in science and mathematics education: Advanced designs for technologies of learning* (S. 11-46). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Kozma, R., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: developing representational competence. In J. K. Gilbert (Hrsg.), *Visualization in science education* (S. 121-146). Dordrecht: Springer.

- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). The metaphorical structure of the human conceptual system. *Cognitive Science*, 4, 195-208. doi: 10.1207/s15516709cog0402\_4
- Lakoff, G., & Johnson, M. (2003). *Metaphors we live by*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Lancor, R. (2014). Using student-generated analogies to investigate conceptions of energy: a multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, 36, 1-23. doi: 10.1080/09500693.2012.714512
- Lancor, R. (2015). An analysis of metaphors used by students to describe energy in an interdisciplinary general science course. *International Journal of Science Education*, 37, 876-902. doi: 10.1080/09500693.2015.1025309
- Langlet, J. (2002). "Biologie muss man verstehen!" Zum wissenschaftstheoretischen und bildenden Gehalt der Biologie. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 55, 481-485.
- Laugksch, R. C. (2000). Scientific literacy: a conceptual overview. *Science Education*, 84, 71-94. doi: 10.1002/(SICI)1098-237X(200001)84:1<71::AID-SCE6>3.0.CO;2-C
- Leach, J., Driver, R., Scott, P., & Woo-Robinson, C. (1996). Children's ideas about ecology 2: ideas found in children aged 5-16 about the cycling of matter. *International Journal of Science Education*, 18, 19-34. doi: 10.1080/0950069960180102
- Lemke, J. L. (1998). *Teaching all the languages of science: words, symbols, images, and actions*. Paper presented at the International Conference on Ideas for a Scientific Culture, Barcelona, Spain.  
<http://academic.brooklyn.cuny.edu/education/jlemke/papers/barcelon.htm>  
Zugegriffen: 21 Apr 2017.
- Lewandowski, T. (1994a). Repräsentation. In ders., *Linguistisches Wörterbuch* (S. 873-876). Heidelberg: Quelle und Meyer.
- Lewandowski, T. (1994b). Zeichen. In ders., *Linguistisches Wörterbuch* (S. 1274-1277). Heidelberg: Quelle und Meyer.
- Lijnse, P. (1990). Energy between the life-world of pupils and the world of physics. *Science Education*, 74, 571-583.
- Linke, A., Nussbaumer, M., & Portmann, P. R. (2004). *Studienbuch Linguistik* (5., erweiterte Auflage). Tübingen: Max Niemeyer Verlag.



- Liu, X., & Tang, L. (2004). The progression of students' conceptions of energy: A cross-grade, cross-cultural study. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 4, 43-57. doi: 10.1080/14926150409556596
- Magnusson, S., Krajcik, J., & Borko, H. (1999). Nature, sources and development of pedagogical content knowledge for science teaching. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Hrsg.), *Examining pedagogical content knowledge* (S. 95-132). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Mayer, R. E. (2011). Instruction based on visualizations. In R. E. Mayer & P. A. Alexander (Hrsg.), *Handbook of research on learning and instruction* (S. 427-445). New York, NY: Routledge Chapman & Hall.
- Mayer, R. E. (2014). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 43-71). Cambridge: Cambridge University Press.
- McDonald, C. V. (2016). Evaluating junior secondary science textbook usage in Australian schools. *Research in Science Education*, 46, 481-509. doi: 10.1007/s11165-015-9468-8
- Métioui, A., Matoussi, F., & Trudel, L. (2016). The teaching of photosynthesis in secondary school: A history of the science approach. *Journal of Biological Education*, 50, 275-289. doi: 10.1080/00219266.2015.1085427
- National Research Council (Hrsg.). (2012). *A framework for K-12 science education. Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Needham, R. (2014). Using 'energy ideas' in the teaching of biology. *School Science Review*, 96, 74-77.
- Nesher, P. (1987). Towards an instructional theory: the role of student's misconceptions. *For the Learning of Mathematics*, 7, 33-40.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50, 162-188. doi: 10.1002/tea.21061
- Niebert, K., & Gropengießer, H. (2015). Understanding starts in the mesocosm: conceptual metaphor as a framework for external representations in science teaching. *International Journal of Science Education*, 37, 903-933. doi: 10.1080/09500693.2015.1025310

- Niebert, K., Marsch, S., & Treagust, D. F. (2012). Understanding needs embodiment: a theory-guided reanalysis of the role of metaphors and analogies in understanding science. *Science Education*, *96*, 849-877. doi: 10.1002/sce.21026
- Nitz, S., Ainsworth, S. E., Nerdel, C., & Prechtel, H. (2014). Do student perceptions of teaching predict the development of representational competence and biological knowledge? *Learning and Instruction*, *31*, 13-22. doi: 10.1016/j.learninstruc.2013.12.003
- Nordine, J. (2016). Talking about energy. In J. Nordine (Hrsg.), *Teaching energy across the sciences K-12* (S. 61-78). Arlington, VA: NSTA.
- Norris, S. P., & Phillips, L. M. (2003). How literacy in its fundamental sense is central to scientific literacy. *Science Education*, *87*, 224-240. doi: 10.1002/sce.10066
- Opitz, S. T., Blankenstein, A., & Harms, U. (2016). Student conceptions about energy in biological contexts. *Journal of Biological Education*. doi: 10.1080/00219266.2016.1257504
- Opitz, S. T., Harms, U., Neumann, K., Kowalzik, K., & Frank, A. (2015). Students' energy concepts at the transition between primary and secondary school. *Research in Science Education*, *45*, 691-715. doi: 10.1007/s11165-014-9444-8
- Opitz, S. T., Neumann, K., Bernholt, S., & Harms, U. (im Druck). Students' energy understanding across biology, chemistry, and physics contexts. *Research in Science Education*.
- Oser, F., Hascher, T., & Spychiger, M. (1999). Lernen aus Fehlern. Zur Psychologie des "negativen" Wissens. In W. Althof (Hrsg.), *Fehlerwelten. Vom Fehlermachen und Lernen aus Fehlern* (S. 11-41). Opladen: Leske & Budrich.
- Oser, F., & Spychiger, M. (2005). *Lernen ist schmerzhaft. Zur Theorie des negativen Wissens und zur Praxis der Fehlerkultur*. Weinheim: Beltz.
- Özay, E., & Öztaş, H. (2003). Secondary students' interpretations of photosynthesis and plant nutrition. *Journal of Biological Education*, *37*, 68-70. doi: 10.1080/00219266.2003.9655853
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford: Oxford University Press.
- Peirce, C. S. (1973). *Lectures on Pragmatism. Vorlesungen über Pragmatismus*. Hamburg: Felix Meiner.
- Pimentel, D., & Pimentel, M. (2003). Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *78*, 660-663.

- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wassermann, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2016). *Campbell Biologie* (10. Auflage). Hallbergmoos: Pearson.
- Ross, P. M., Taylor, C. E., Hughes, C., Kofod, M., Whitaker, N., Lutze-Mann, L., & Tzioumis, V. (2010). Threshold concepts: Challenging the way we think, teach and learn in Biology. In J. H. F. Meyer, R. Land & C. Bailie (Hrsg.), *Threshold concepts and transformational learning* (S. 165-177). Rotterdam: Sense Publishers.
- Ryoo, K., & Linn, M. C. (2012). Can dynamic visualizations improve middle school students' understanding of energy in photosynthesis? *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 218-243. doi: 10.1002/tea.21003
- Sadava, D., Hillis, D. M., Heller, C. H., & Berenbaum, M. R. (2011). *Purves Biologie* (9. Auflage). Heidelberg: Spektrum.
- Schmiemann, P. (2010). Lernen aus Fehlern. In U. Spörhase & W. Ruppert (Hrsg.), *Biologie Methodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 223-227). Berlin: Cornelsen.
- Schmitt, R. (2007). Versuch, die Ergebnisse von Metaphernanalysen nicht unzulässig zu generalisieren. *Zeitschrift für qualitative Forschung*, 8, 137-156.
- Schnotz, W. (2002). Commentary: Towards an integrated view of learning from text and visual displays. *Educational Psychology Review*, 14, 101-120. doi: 10.1023/A:1013136727916
- Schnotz, W. (2014). An integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Auflage, S. 72-103). Cambridge: Cambridge University Press.
- Schnotz, W., & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13, 141-156. doi: 10.1016/s0959-4752(02)00017-8
- Schönborn, K. J., & Bögeholz, S. (2013). Experts' views on translation across multiple external representations in acquiring biological knowledge about ecology, genetics, and evolution. In D. F. Treagust & C.-Y. Tsui (Hrsg.), *Multiple representations in science education* (S. 111-128). Dordrecht: Springer.
- Schrödinger, E. (1989). *Was ist Leben?* München: Piper.

- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15, 4-14.
- Simpson, M., & Arnold, B. (1982). The inappropriate use of subsumers in biology learning. *European Journal of Science Education*, 4, 173-182.
- Smith, J. P., DiSessa, A. A., & Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: a constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences*, 3, 115-163.
- Solomon, J. (1983). Messy, contradictory and obstinately persistent: a study of children's out-of-school ideas about energy. *The School Science Review*, 65, 225-229.
- Stadler, M. (2009). Modul 3: Aus Fehlern lernen. In M. Prenzel, A. Friedrich & M. Stadler (Hrsg.), *Von SINUS lernen – Wie Unterrichtsentwicklung gelingt* (S. 27-30). Seelze-Velber: Kallmeyer Verlag in Verbindung mit Klett.
- Steuer, G., & Dresel, M. (2015). A constructive error climate as an element of effective learning environments. *Psychological Test and Assessment Modeling*, 57, 262-275.
- Stoy, P. C. (2010). Thermodynamic approaches to ecosystem behaviour: fundamental principles with case studies from forest succession and management. In D. G. Raffaelli & C. L. J. Frid (Hrsg.), *Ecosystem ecology. A new synthesis* (S. 40-64). New York, NY: Cambridge University Press.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Hrsg.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (S. 147-176). Albany, NY: State University of New York Press.
- Tibell, L. A., & Rundgren, C.-J. (2008). Educational challenges of molecular life science – Characteristics and implications for education and research. In C.-J. Rundgren (Hrsg.), *Visual thinking, visual speech – a semiotic perspective on meaning-making in molecular life science* (S. 1-32). Norrköping: FontD.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure* (7. deutsche Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- Tippett, C. D. (2010). Refutation text in science education: a review of two decades of research. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8, 951-970. doi: 10.1007/s10763010-9203-x

- Trumper, R. (1990). Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept – part one. *International Journal of Science Education*, 12, 343-354. doi: 10.1080/0950069900120402
- Trumper, R. (1993). Children's energy concepts: a cross-age study. *International Journal of Science Education*, 15, 139-148. doi: 10.1080/0950069930150203
- Trussell, G. C., Ewanchuk, P. J., & Matassa, C. M. (2006). The fear of being eaten reduces energy transfer in a simple food chain. *Ecology*, 87, 2979-2984. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2979:TFOBER]2.0.CO;2
- Tsui, C.-Y., & Treagust, D. F. (2013). Introduction to multiple representations: their importance in biology and biological education. In D. F. Treagust & C.-Y. Tsui (Hrsg.), *Multiple representations in science education* (S. 3-18). Dordrecht: Springer.
- Van Heuvelen, A., & Zou, X. (2001). Multiple representations of work-energy processes. *American Journal of Physics*, 69, 184-194. doi: 10.1119/1.1286662
- Watts, M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18, 213-217.
- Yore, L. D., Pimm, D., & Tuan, H.-L. (2007). The literacy component of mathematical and scientific literacy. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 5, 559-589. doi: 10.1007/s10763-007-9089-4



### 3 ZIELSETZUNG DER ARBEIT

Energie ist ein fundamentales, abstraktes Konzept der Naturwissenschaften und zentrales Thema im naturwissenschaftlichen Unterricht. Durch empirische Studien wurden fundierte Erkenntnisse zur Struktur des Wissens von Schülerinnen und Schülern bezogen auf die vier Aspekte des Energiekonzepts erlangt. Außerdem wurden Wissensdefizite festgestellt und die Existenz von Alternativvorstellungen belegt. Im nächsten Schritt sollten die vorhandenen Erkenntnisse genutzt werden, um wirksame Unterrichtsstrategien zu entwickeln und geeignete Lehr-Lernmittel zu gestalten, sodass Schülerinnen und Schüler beim Aufbau eines naturwissenschaftlichen Energiekonzepts bestmöglich unterstützt werden. Hierbei besteht insbesondere im Bereich des Biologieunterrichts noch ein großer Forschungsbedarf. Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, Erkenntnisse über Möglichkeiten des Einsatzes externer depiktiver und deskriptiver Repräsentationen zur Förderung des konzeptuellen Energieverständnisses zu gewinnen. Im Folgenden werden die drei für diese Dissertation durchgeführten Studien kurz vorgestellt. Eine Übersicht über die Studien bietet die sich anschließende Tabelle 3-1.

#### **Studie 1 (Kapitel 4): Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt? – Erarbeitung eines Kategoriensystems und exemplarische Analyse einer Lehrwerkreihe**

Bislang wurde noch nicht systematisch analysiert, wie das Thema Energie in aktuellen naturwissenschaftlichen Lehr-Lernmitteln dargestellt wird. Ferner fehlt ein Kategoriensystem, anhand dessen die Darstellung systematisch erfasst werden kann. Indem die fachliche Korrektheit und das lernförderliche Potenzial der verwendeten Repräsentationen theoriebezogen abgeschätzt wird, können konkrete Empfehlungen für Schulbuchautorinnen und -autoren sowie für Lehrkräfte abgeleitet werden. Die erste Studie dieser Arbeit legt die Grundlage für eine systematische Analyse, indem ein Kategoriensystem erstellt und erprobt wird, anhand dessen die Darstellung von Energie in Biologieschulbüchern beschrieben werden kann. Die Kategorien decken sowohl inhaltliche als auch formale Aspekte der Darstellung ab. Um die Anwendbarkeit des Kategoriensystems zu überprüfen und Erkenntnisse über die Darstellung von Energie zu gewinnen, werden die energiebezogenen Texte, Abbildungen und Aufgaben ( $N = 525$  Analyseeinheiten) in den stoffwechsel- und ökologiebezogenen Kapiteln einer Schulbuchreihe der Sekundarstufe I und II (drei Lehrwerke und ein Arbeitsbuch) analysiert.

### **Studie 2 (Kapitel 5): Enhancing Conceptual Knowledge of Energy in Biology with Incorrect Representations**

Die Ergebnisse der ersten Studie deuten darauf hin, dass Flussdiagramme häufig verwendet werden, um energiebezogene Aspekte in der Biologie darzustellen. Außerdem wurde ein Verbesserungspotenzial bei den verwendeten Aufgaben festgestellt: Beispielsweise wird nur selten auf energiebezogene Alternativvorstellungen von Schülerinnen und Schülern eingegangen. Die zweite Studie der vorliegenden Dissertation überprüft die Wirksamkeit einer neu entwickelten Instruktionsmaßnahme zur Förderung des konzeptuellen Wissens über Energie, die die Lehr-Lernstrategien Lernen mit Repräsentationen und Lernen aus Fehlern verknüpft. In einer Interventionsstudie mit  $N = 304$  Schülerinnen und Schülern der 9. Klassenstufe wird der Frage nachgegangen, ob durch das Lernen mit einem gezielt fehlerhaften Energieflussdiagramm der Aufbau eines konzeptuellen Wissens über Energie gefördert werden kann. Der eingearbeitete Fehler schließt an Alternativvorstellungen von Schülerinnen und Schülern an.

### **Studie 3 (Kapitel 6): Metaphors Describing Energy Transfer through Ecosystems – helpful or misleading?**

Die Forderung, im Biologieunterricht lernförderliche Repräsentationen zu verwenden, bezieht sich nicht nur auf depiktive, sondern auch auf deskriptive Repräsentationen. In Bezug auf abstrakte naturwissenschaftliche Konzepte ist die Verwendung von Metaphern zentral. Während über konzeptuelle Metaphern im Bereich Energie bereits fundierte Erkenntnisse vorliegen, ist die Struktur und Verwendung von themenspezifischen Metaphern weitestgehend unerforscht. Die dritte Studie beschäftigt sich mit der Analyse von Metaphern, die im Kontext der Energieweitergabe in einem Ökosystem angewendet werden. Im Zentrum der Untersuchung stehen vier Metaphern, die unterschiedliche Aspekte der Energieweitergabe beleuchten: (1) Energiefluss, (2) kein Kreislauf, (3) Einbahnstraße und (4) Energieverlust. Um zu klären, welche Eigenschaften diese Metaphern haben und wie sie im Lehr-Lernkontext verwendet werden, werden  $N = 13$  Biologieschulbücher und  $N = 50$  Beschreibungen eines Energieflussdiagramms von Schülerinnen und Schülern der 9. Klassenstufe einer qualitativen Inhaltsanalyse unterzogen.



Tabelle 3-1

*Übersicht über die Studien*

	Studie 1: Lehrbuchanalyse	Studie 2: Lernen aus Fehlern	Studie 3: Metaphernanalyse
Veröffentlichung / Manuskript	Wernecke, U., Schwanewedel, J., Schütte, K., & Harms, U. (2016). Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt? – Entwicklung eines Kategoriensystems und exemplarische Anwendung auf eine Schulbuchreihe. <i>Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften</i> , 22, 215-229.	Wernecke, U., Schütte, K., Schwanewedel, J. & Harms, U. (eingereicht, 07/2017). Enhancing Conceptual Knowledge of Energy in Biology with Incorrect Representations. <i>CBE – Life Sciences Education</i> .	Wernecke, U., Schwanewedel, J. & Harms, U. (eingereicht, 05/2017). Metaphors Describing Energy Transfer through Ecosystems – helpful or misleading? <i>Science Education</i> .
Biologischer Themenbereich	Stoffwechsel und Ökologie	Ökologie (Energiefluss)	Ökologie (Energiefluss)
fokussierter Repräsentationstyp	deskriptiv und depiktiv	depiktiv	deskriptiv
Zielsetzung	Entwicklung und Erprobung eines Kategoriensystems zur Beschreibung von energiebezogenen Repräsentationen und Aufgaben; Gewinn von Erkenntnissen über die Darstellung von Energie	Überprüfung der Wirksamkeit einer Instruktionsmaßnahme zur Förderung des konzeptuellen Wissens über Energie	Untersuchung der Struktur und Verwendung ausgewählter Metaphern zur Energieweitergabe
Forschungsfragen	(1) Wie sind die energiebezogenen Texte, Abbildungen und Aufgaben in einer Biologieschulbuchreihe inhaltlich und formal gestaltet?  (2) Welche Unterschiede zeigen sich bei der Darstellung des Energiekonzepts in der Sekundarstufe I im Vergleich zur Sekundarstufe II?	(1) Unterstützt das Lernen mit einer fehlerhaften Abbildung das konzeptuelle Wissen über Energie mehr als das Lernen mit einer korrekten Abbildung?  (2) Beeinflussen Vorwissen und Markierung des Fehlers den Wissenszuwachs?  (3) Wird der Fehler im Diagramm gefunden bzw. erklärt?	(1) Welche Eigenschaften besitzen ausgewählte Metaphern zur Energieweitergabe?  (2) Wie werden die Metaphern in Biologieschulbüchern verwendet?  (3) Wie werden die Metaphern von Schülerinnen und Schülern zur Beschreibung eines Energieflussdiagramms genutzt?
Methode	Entwicklung eines Kategoriensystems, Auswahl einer Schulbuchreihe, Auswahl und Analyse von $N = 103$ Texten, $N = 182$ Abbildungen sowie $N = 127$ Aufgaben mit $N = 113$ Abbildungen	Interventionsstudie mit $N = 304$ Schülerinnen und Schülern der 9. Klassenstufe von Gymnasien	Entwicklung eines Kategoriensystems, Analyse von $N = 13$ Biologieschulbüchern und $N = 50$ Texten von Schülerinnen und Schülern der 9. Klassenstufe von Gymnasien



## 4 STUDIE 1

### Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt?

#### – Entwicklung eines Kategoriensystems und exemplarische Anwendung auf eine Schulbuchreihe<sup>6</sup>

##### Zusammenfassung

Energie ist ein abstraktes Konzept, das in den Naturwissenschaften eine zentrale Rolle spielt. Zahlreiche Studien zeigen, dass Lernende große Probleme mit dem Verständnis von Energie haben. Deshalb ist fachlich korrektes und potenziell lernförderlich gestaltetes Unterrichtsmaterial zum Thema Energie besonders wichtig. Um die Darstellung von Energie in Medien für den Biologieunterricht inhaltlich und formal zu beschreiben, wurde unter Rückgriff sowohl auf die Repräsentationsforschung als auch auf die Vorstellungsforschung zum Energiekonzept ein Kategoriensystem entwickelt. Anhand dieses Kategoriensystems wurden exemplarisch die energiebezogenen Texte, Abbildungen und Aufgaben in den stoffwechsel- und ökologiebezogenen Kapiteln einer Schulbuchreihe der Sekundarstufe I und II (drei Schulbücher und ein Arbeitsbuch) untersucht. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass Energieformen und -umwandlungen in den untersuchten Biologieschulbüchern häufig, Energieerhaltung und -entwertung hingegen sehr selten thematisiert werden. Die Abbildungen weisen potenziell lernförderliche Eigenschaften auf. Die Aufgaben könnten durch eine größere Variation in den Anforderungen verbessert werden. Abschließend werden sich aus den Ergebnissen ergebende Forschungsdesiderata aufgezeigt.

**Schlüsselwörter:** Biologie, Energiekonzept, Schulbuchanalyse, Kategoriensystem, Repräsentationen

---

<sup>6</sup> Wernecke, U., Schwanewedel, J., Schütte, K., & Harms, U. (2016). Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt? – Entwicklung eines Kategoriensystems und exemplarische Anwendung auf eine Schulbuchreihe. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22, 215-229.

Verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s40573-016-0051-2>

## **How is energy represented in biology textbooks?**

### **– Development of a category system and its application to a textbook series**

#### **Abstract**

Energy is an abstract concept which plays a crucial role in science. Numerous studies have shown that students have significant problems understanding energy. Hence, correct and suitable teaching material is especially important. A coding scheme was compiled on the basis of theoretical frameworks of both research on energy conceptions and cognitive psychology to describe the representation of energy in teaching material for biology with regard to content and design. Based on this coding scheme the energy-related texts, pictures and tasks in the metabolism- and ecology-related chapters of a textbook series for lower and upper secondary levels (three textbooks and a workbook) were studied as examples. The results show that whereas forms and transformation of energy are frequently addressed, degradation and conservation are rarely addressed. Pictures in the textbook series were found to employ design features considered beneficial for learning. Tasks could be improved by using a higher variation in the requirements. Based on the results we identify research desiderata.

**Keywords:** Biology, Category System, Energy Concept, Representations, Textbook Analysis

## 4.1 Einleitung

Energiewechsel gehört zu den Kennzeichen des Lebendigen. Ohne Energie wäre Leben auf der Erde unmöglich. Folglich spielt Energie als fundamentales Konzept der Biologie für das Verständnis zahlreicher biologischer Themen wie Ernährung, Wachstum oder Bewegung eine zentrale Rolle. Ergebnisse der Vorstellungsforschung zeigen allerdings, dass Schülerinnen und Schüler nur mangelhaftes Wissen über Energie besitzen. Probleme mit dem Verständnis des Energiekonzepts werden seit den 1980er Jahren immer wieder empirisch belegt (Burger, 2001; Duit, 1984; Opitz et al., 2015).

Traditionell sind Schulbücher ein zentrales Lehr-Lernmittel im naturwissenschaftlichen Unterricht. Obwohl neue Medien Einzug in den Unterricht gehalten haben, stützen sich Lehrkräfte weiterhin in erheblichem Maße auf das Schulbuch (McDonald, 2016). Aus Sicht der Fachdidaktik Biologie ist ein Bedeutungsverlust der Biologieschulbücher zunächst nicht zu erwarten: „Die Bedeutung des Biologie-Schulbuchs dürfte allein aufgrund seiner Verfügbarkeit größer sein als die jedes anderen im Biologieunterricht eingesetzten Mediums.“ (Gropengießer, 2013, S. 390). Physiklehrkräfte verschiedener Schulformen und Bundesländer gaben in einer Befragung an, Schulbücher häufig zur Unterrichtsvorbereitung heranzuziehen. Sie dienen unter anderem zur Auswahl von Inhalten, als Grundlage für Hausaufgaben und als Quelle für Abbildungen (Härtig et al., 2012). In dem Maße, in dem Lehrkräfte Schulbücher für derartige Zwecke heranziehen, werden inhaltliche und didaktische Aspekte des Unterrichts durch das Schulbuch mitbestimmt. Offen ist, inwieweit die Darstellung von Energie in Unterrichtsmedien und speziell in Schulbüchern für das Fach Biologie das Potenzial hat, den Aufbau eines korrekten Energieverständnisses zu unterstützen. Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, ein Kategoriensystem bereit zu stellen, das zur Analyse von Darstellungen des abstrakten Konzepts Energie in Unterrichtsmedien für das Fach Biologie genutzt werden kann und es exemplarisch auf eine vielfach genutzte Schulbuchreihe anzuwenden.

## 4.2 Das Energiekonzept und seine Darstellung in Unterrichtsmedien

Die Einführung des Energiekonzepts erfolgt traditionell im Physikunterricht (KMK, 2004b). In der Physik herrscht Konsens darüber, dass es keine Definition von Energie gibt, die in allen Kontexten gültig ist. Zu fassen ist lediglich eine abstrakte Größe, die berechnet werden kann (Feynman et al., 2007). Eine Empfehlung aus der Physik-

didaktik lautet daher, in Lehr-Lern-Kontexten keine Definition von Energie zu geben (Nordine et al., 2011; Trumper, 1991). Das physikalische Energiekonzept wird anhand von vier Aspekten strukturiert (Duit, 1984; Neumann et al., 2013) und lässt sich auch auf biologische Themen anwenden (Opitz et al., 2015; vgl. Tab. 4-1). Zwar stellt Energie in den Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss – anders als in den Bildungsstandards der Fächer Chemie und Physik – kein eigenes Basiskonzept dar, es wird jedoch maßgeblich zur Beschreibung des Basiskonzepts System herangezogen: Stoff- und Energieumwandlungen sind Eigenschaften lebendiger Systeme auf Zell- und Organismusebene, Energiefluss wird als eine Eigenschaft des Ökosystems und der Biosphäre beschrieben (KMK, 2004a). Ein Verständnis der Themenbereiche Stoffwechsel und Ökologie erfordert eine Betrachtung des Energiekonzepts auf unterschiedlichen biologischen Systemebenen.

Tabelle 4-1

*Energieaspekte und Beispiele für Alternativvorstellungen*

Energieaspekt	Fachliches Beispiel	Beispiel für eine analoge Alternativvorstellung von Schülerinnen und Schülern in der Biologie (Burger, 2001)
Energieformen und -quellen	Energie tritt in verschiedenen Formen auf. Die ursprüngliche Energiequelle für die meisten Ökosysteme ist die Sonne.	Pflanzen nehmen Energie aus dem Boden auf.
Energieumwandlung und -übertragung	Bei Stoffwechselprozessen wird eine Energieform in eine oder mehrere andere Energieformen umgewandelt. Energie kann von einem System auf ein anderes übertragen werden.	Energie kann direkt in „etwas“ umgewandelt werden, z. B. in Muskeln oder Fett.
Energieentwertung	Bei jedem Energieumwandlungsprozess wird Wärmeenergie frei, die an die Umgebung abgegeben wird. Diese Wärmeenergie kann von Lebewesen nicht mehr in andere Energieformen umgewandelt werden.	Lebewesen nehmen Energie für bestimmte (genannte) Lebensvorgänge in Form von Wärme auf.
Energieerhaltung	Die Gesamtenergie im Universum ist immer gleich, denn Energie kann nicht erzeugt oder zerstört werden.	Energie kann hergestellt (z. B. aus Nahrung) und (z. B. für Lebensvorgänge) verbraucht werden.

Duit (2014) argumentiert, dass jeder der vier Energieaspekte nur im Zusammenhang mit den jeweils anderen dreien verstanden werden kann. Deshalb sollte der naturwissenschaftliche Unterricht alle vier Aspekte des Energiekonzepts berücksichtigen (Lacy et al., 2014). Zahlreiche Studien der Vorstellungsforschung haben gezeigt, dass Schüle-

rinnen und Schüler aller Klassenstufen und Schulformen Probleme mit dem Verständnis des Energiekonzepts haben. Vor allem das Verständnis der Aspekte Energieerhaltung und -entwertung ist gering (Duit, 1984; Jin und Anderson, 2012; Neumann et al., 2013). Zudem konnte die Existenz von zahlreichen Alternativvorstellungen nachgewiesen werden (für die Biologie Burger, 2001; vgl. Tab. 1). Umgangssprachlich wird das Wort Energie anders verwendet als in der Fachsprache. Beispielsweise wird in der Alltagssprache Energie mit Leben und Vitalität assoziiert: So hat man etwa nach einer erholsamen Nacht besonders viel Energie für den nächsten Tag (Jin und Wie, 2014). Im Sinne einer konstruktivistischen Auffassung von Lernen sollten Alternativvorstellungen der Schülerinnen und Schüler als Ausgangspunkt des Lernens berücksichtigt werden, indem beispielsweise an sie angeknüpft wird oder ein Kontrast zur wissenschaftlich korrekten Vorstellung aufgebaut wird (z. B. Özkan et al., 2004; Trumper, 1991).

Trotz der bekannten Verständnisprobleme gibt es bislang nur wenige Analysen, die sich mit der inhaltlichen oder formalen Darstellung von Energie im Unterrichtsmedium Schulbuch beschäftigen. Ein Großteil davon ist in der Physik verortet und fokussiert auf ein bestimmtes energiebezogenes Thema (z. B. Ibáñez und Ramos, 2004). Im Fach Biologie existiert unseres Wissens nach nur eine Arbeit von Opitz et al. (2015), in der die Häufigkeit der Thematisierung von Energie in neun Biologieschulbüchern von der Grundschule bis zur Sekundarstufe II untersucht wurde. Insgesamt nahm die Anzahl der Nennungen der Energieaspekte mit steigender Klassenstufe zu. Die Aspekte Energieerhaltung und -entwertung machten nur 10-16 % der Thematisierungen aus.

### **4.3 Lernen mit externen Repräsentationen in Unterrichtsmedien**

Welche Bedeutung haben Repräsentationen für den Erwerb eines angemessenen Energiekonzepts? Repräsentationen sind Zeichen, sie stehen also stellvertretend für etwas Bezeichnetes. Zu unterscheiden sind interne (mentale) und externe Repräsentationen. Letztere werden in deskriptive (basierend auf Symbolen, z. B. Texte) und depiktive (basierend auf ikonischen Zeichen, z. B. Piktogramme) Repräsentationen unterteilt (nach Schnotz, 2002). Im Folgenden sprechen wir zur Verbesserung der Anschaulichkeit vereinfachend von Texten bzw. Abbildungen. Das Verstehen einer externen Repräsentation ist ein aktiver Informationsverarbeitungsprozess. Dabei baut das Individuum eine interne, mentale Repräsentation des sprachlich beschriebenen oder bildlich gezeigten Gegenstands auf, die in bereits vorhandene Vorstellungen integriert wird (Schnotz und Bannert, 2003).

Anders als in der holistischen Betrachtungsweise, die Repräsentationen als Fachsprache ansieht (vgl. u. a. Nitz et al., 2012), wird Fachsprache hier umgekehrt als fachspezifische Ausprägung der Unterrichtssprache (Härtig et al., 2015) und somit als ein Teil von Repräsentationen verstanden. Die Fähigkeit, Informationen aus Repräsentationen zu erschließen und diese auszutauschen, kann als integraler Teil fachspezifischer Kommunikationskompetenz im Sinne einer erweiterten Lese- und Verstehenskompetenz aufgefasst werden, welche durch die Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss gefordert wird (KMK, 2004a).

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass das Lernen mit Bild-Text-Kombinationen zu größeren Lerneffekten führt als Lernen mit Texten allein (*Multimedia principle*, Mayer, 2011). Abbildungen können das Verständnis abstrakter Konzepte unterstützen, indem sie für das menschliche Auge nicht wahrnehmbare Phänomene visualisieren (Tsui und Treagust, 2013). Fotos und realistische Zeichnungen sind *darstellende*, Graphen und Diagramme hingegen *logisch-analytische* Abbildungen (Weidenmann, 2004). Auszählungen bei naturwissenschaftlichen Schulbüchern verschiedener Klassenstufen und Länder haben ergeben, dass pro Seite durchschnittlich eineinhalb bis zwei Abbildungen vorhanden sind (z. B. Liu und Treagust, 2013; Mayer, 1993), wobei die Bild-dichte mit steigender Klassenstufe abnimmt (Dimopoulos et al., 2003).

Die Lernwirksamkeit von Abbildungen ist von deren Gestaltungsmerkmalen und der kognitiven Auseinandersetzung der Lernenden mit der Abbildung abhängig (Ainsworth, 2006; Cromley et al., 2010). Logisch-analytische Abbildungen stellen höhere kognitive Anforderungen an Lernende als darstellende Bilder, da sie keine Ähnlichkeit mit dem abzubildenden Objekt besitzen (Schnotz, 1994). Der Großteil der verwendeten Abbildungen in naturwissenschaftlichen Schulbüchern ist darstellenden Typs (Roth et al., 1999; Slough et al., 2010), wobei der Anteil logisch-analytischer Abbildungen mit steigender Klassenstufe zunimmt (Dimopoulos et al., 2003; Liu und Treagust, 2013). Vielfach wurde auf die lernförderliche Wirkung von Untertiteln und Beschriftungen bei logisch-analytischen naturwissenschaftlichen Abbildungen hingewiesen (für das Thema Energie: Ametller und Pintó, 2002).

Für die Bewertung von Schulbüchern ist neben der Art der Abbildung auch deren Funktion essentiell (Slough und McTigue, 2013). Die funktionale Taxonomie von Levin et al. (1987) stellt hierfür bis heute das gängigste Klassifikationssystem dar (Slough und McTigue, 2013). Sie unterscheidet vier Funktionen von Abbildungen für Schulbücher: (1) Dekoration, (2) Repräsentation, (3) Organisation und (4) Interpretation. Eine dekorative



Abbildung dient lediglich dazu, die Attraktivität eines Textes zu erhöhen. Repräsentative Abbildungen konkretisieren den Text, indem sie ein wesentliches Element aus diesem darstellen. Abbildungen mit Organisationsfunktion zeigen die logische Organisation des Textinhalts und machen den Text stimmiger, indem sie z. B. Verbindungen zwischen Objekten zeigen. Eine Abbildung mit Interpretationsfunktion geht darüber hinaus, indem sie besonders schwierige Textpassagen verdeutlicht und den Text verständlicher macht. Levin et al. (1987) schränken ein, dass sich die Funktionen gegenseitig nicht zwingend ausschließen und vor allem die Interpretationsfunktion vom Wissensstand der Lernenden abhängig ist. Zwischen Organisations- und Interpretationsfunktion wird in Schulbuchanalysen nicht immer getrennt (Slough et al., 2010). In einer Metaanalyse mit 150 Studien zeigte sich, dass dekorative Bilder leicht negativ auf den Lernerfolg wirken, während die Funktionen (2) bis (4) zunehmend große positive Effekte auf den Lernerfolg aufweisen (Levin et al., 1987). Nichtsdestoweniger sind keine pauschalen Aussagen über die Lernwirksamkeit möglich. Untersuchungen von naturwissenschaftlichen Schulbüchern haben ergeben, dass Abbildungen mit repräsentativer Funktion mit über 50 % am häufigsten auftreten, gefolgt von dekorativen Abbildungen, während organisierende Abbildungen mit unter 10 % am wenigsten vorkommen (Mayer, 1993; Slough et al., 2010).

Das Verhältnis zwischen Text und Abbildung sollte nicht nur funktional, sondern auch inhaltlich betrachtet werden. Die Informationen mehrerer Repräsentationen können sich mehr oder weniger stark überlappen. Die Relation ist dabei eng verknüpft mit der Funktion der Abbildung: In der Regel sind dekorative und repräsentative Abbildungen in einem höheren Maße redundant als Abbildungen mit organisatorischer oder interpretativer Funktion. Überlappungen zwischen Text- und Bildinformationen können für Lernende hilfreich sein, zum Beispiel wenn die Interpretation eines neuen Abbildungstyps gelernt werden soll (Ainsworth, 1999; Kalyuga et al., 1998). Redundanzen erhöhen allerdings die Belastung des Arbeitsgedächtnisses (Sweller, 2005).

Das adäquate Design des Unterrichtsmaterials ist für effektives Lernen mit Texten und Abbildungen notwendig, aber nicht hinreichend, denn auch die Aufforderung zum Lernen (kognitive Aktivierung) muss angemessen sein. Aufgaben können Schülerinnen und Schüler dazu anregen, Abbildungen und Texte zu verarbeiten und eigene mentale Modelle des dargestellten Inhalts zu generieren (Bodemer und Faust, 2006). Am deutschsprachigen Biologieunterricht wird aber die Dominanz von Aufgaben mit geringen kognitiven Anforderungen kritisiert (z. B. Maier et al., 2010).

Das Lernen mit Repräsentationen kann durch Informationsentnahme, Konstruktion und Integration erfolgen (für Diagramme: Lachmayer et al., 2007). Bei der Informationsentnahme erschließen Lernende Informationen aus einem Text oder einer Abbildung. Bei der Konstruktion müssen Lernende einen Text oder eine Abbildung ergänzen oder vollständig neu erstellen. Das Verknüpfen von Informationen aus mehreren Repräsentationen wird als Integration bezeichnet (Maier et al., 2010). Integrationsaufgaben können den Lernerfolg erhöhen, sind aber besonders für Lernende mit geringem Vorwissen schwierig (Ainsworth, 1999; Bodemer und Faust, 2006).

### 4.4 Fragestellung

Biologieschulbücher müssen fachlich korrekte Repräsentationen enthalten, die Schülerinnen und Schüler unterstützen können, ein Verständnis des naturwissenschaftlichen Basiskonzepts Energie aufzubauen. Abgesehen von der Auszählung, wie häufig Energieaspekte thematisiert wurden (Opitz et al., 2015), gibt es unseres Wissens bislang keine systematische Analyse zur Darstellung des Energiekonzepts in Biologieschulbüchern. Auch fehlt hierfür ein geeignetes, energiespezifisches Kategoriensystem. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, zunächst ein Kategoriensystem zur Analyse der Darstellung von Energie in Medien für den Biologieunterricht zu entwickeln. Im zweiten Schritt wurde dieses Kategoriensystem genutzt, um exemplarische Erkenntnisse über die inhaltliche und die formale Gestaltung energiebezogener Texte, Abbildungen und Aufgaben in Medien für den Biologieunterricht zu erarbeiten. Durch die Analyse einer Schulbuchreihe sollen Informationen darüber gewonnen werden, welche Unterschiede in der inhaltlichen und formalen Darstellung des Energiekonzepts in Schulbüchern der Sekundarstufe I und II bestehen.

### 4.5 Methode

In der Regel unterliegen Schulbücher einem staatlichen Genehmigungsverfahren.<sup>7</sup> Für die Repräsentationsanalyse wurde die *Linder*-Reihe des Schroedel-Verlags ausgewählt, von der in jedem Bundesland mindestens zwei Bände zugelassen sind

---

<sup>7</sup> In fünf Bundesländern (Berlin, Brandenburg, Hamburg, Saarland und Schleswig-Holstein) gibt es kein zentrales Zulassungsverfahren für (Biologie-)Schulbücher und Lernmittel. Quellen siehe KMK (2015).

(Stand: 2015). In der Sekundarstufe I darf der Linder in dreizehn Bundesländern<sup>8</sup> verwendet werden, in der Sekundarstufe II in allen sechzehn Bundesländern.<sup>9</sup> In der Studie wurden drei Bände analysiert, die von unterschiedlichen Autorengruppen verfasst wurden: *Linder Biologie 1* für die 5. und 6. Klassenstufe (Erdmann et al., 2008), *Linder Biologie 2* für die 7. bis 10. Klassenstufe (Konopka et al., 2009) und der *Linder Biologie Gesamtband* für die Sekundarstufe II (Bayrhuber et al., 2010). Es wurde jeweils die länderübergreifende Ausgabe verwendet. Um die Stichprobe der Aufgaben zu erhöhen, wurde das *Linder Biologie Arbeitsbuch*<sup>10</sup> (Feldermann, 2005) für die Sekundarstufe II hinzugezogen.

Schulbuchanalysen folgen den Grundsätzen der Inhaltsanalyse (Wang, 1998): Grundlegendes Element ist die theoretisch fundierte Erarbeitung eines Kategoriensystems und die Erstellung eines Kodierleitfadens. Zur Überprüfung der Interraterreliabilität sollten mindestens zwei unabhängige Rater eingesetzt und ein Übereinstimmungskoeffizient berechnet werden. Dies dient der Qualitätsüberprüfung der gewonnenen Daten und des Codierleitfadens. Im Rahmen dieser Anforderungen sind unterschiedliche methodische Umsetzungen möglich (vgl. z. B. Stern und Roseman, 2004 zur Schulbuchbewertung anhand einer Ordinalskala und Slough & McTigue, 2013 zur Erstellung eines hauptsächlich nominalskalierten Kategoriensystems zur Beschreibung von Texten und Abbildungen).

Um die Texte, Abbildungen und Aufgaben auszuwählen, welche als energiebezogen anzusehen sind, wurde in vier Schritten vorgegangen (vgl. auch Onlinematerial 1). Die Analyse beschränkte sich auf die Themenbereiche Stoffwechsel und Ökologie, in denen das Thema Energie auf verschiedenen biologischen Systemebenen betrachtet wird. Entsprechend wurden in einem ersten Schritt die dazugehörigen Kapitel ausgewählt. Die Kapitel bestehen aus Unterkapiteln, die durchschnittlich 1,6 bis 1,8 Seiten umfassen. Der Text eines Unterkapitels wurde als eine Analyseeinheit betrachtet. In einem zweiten Schritt wurden die Unterkapitel ausgewählt, in denen das Wort *Energie* oder ein dazugehöriges Kompositum in Text oder Abbildung mindestens einmal vorhanden ist. Innerhalb dieser Unterkapitel wurden in einem dritten Schritt die energiebezogenen Texte und Abbildungen ausgewählt. Der vierte Schritt stellte die Auswahl der energiebezogenen Aufgaben dar. Innerhalb der ökologischen bzw. stoffwechselbiologischen Kapitel wurden nur

---

<sup>8</sup> In fünf Bundesländern (Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Thüringen) sind für die Sekundarstufe I nur die bundeslandspezifischen Ausgaben zugelassen.

<sup>9</sup> In Bayern sind nur die bundeslandspezifischen Bände für die Sekundarstufe II zugelassen.

<sup>10</sup> Das Linder Arbeitsbuch bezieht sich auf die 22. Auflage des Linder Gesamtbandes, da zur aktuellen 23. Auflage keines erschienen ist.

die Aufgaben analysiert, in denen das Wort Energie oder ein dazugehöriges Kompositum in Aufgabenstamm und/oder in der Musterlösung der Lösungsbände vorkommt. Das Auswahlverfahren ergab  $N = 525$  Analyseeinheiten: 103 Texte, 182 Abbildungen für die Fließtextanalyse und 127 Aufgaben mit 113 Abbildungen für die Aufgabenanalyse.

Im Rahmen der Fließtextanalyse wurden Texte und Abbildungen der Unterkapitel einer inhaltlichen und formalen Analyse unterzogen. In einem deduktiven Verfahren wurden Kategorien aus der Literatur abgeleitet. Als Grundlage für die inhaltliche Analyse dienten Studien zur Vorstellungsforschung (z. B. Burger, 2001; Duit, 1984) und die theoretische Beschreibung des Energiekonzepts (z. B. Duit, 2014). Ausgangspunkt für die formale Analyse waren v. a. die im Theorieteil genannten konzeptuellen und empirischen Forschungsarbeiten zur Gestaltung von Abbildungen. Bei der Aufgabenanalyse wurden die Aufgabenstellungen sowie die Texte und Abbildungen, auf die sich die Aufgaben beziehen, inhaltlich und formal betrachtet. Die Lösungsbände wurden verwendet, um die fachlichen und kognitiven Anforderungen, die die jeweilige Aufgabe stellt, einzuschätzen. Im Linder 1 befinden sich 40,0 % und im Linder 2 69,0 % der energiebezogenen Aufgaben in Unterkapiteln und nicht auf gesonderten Aufgabenseiten. Deshalb sind einige Abbildungen, die schon bei der Fließtextanalyse untersucht wurden, auch in die Aufgabenanalyse eingeflossen. Im Linder Gesamtband hingegen befinden sich Aufgaben und die dazugehörigen Abbildungen auf Aufgabenseiten. Das Arbeitsbuch besteht ausschließlich aus Aufgaben. Deshalb gab es bei diesen beiden Bänden keine Überlappungen von Fließtext- und Aufgabenanalyse.

Um die Güte des Auswahlverfahrens der energiebezogenen Repräsentationen sicherzustellen, wurden von den stoffwechsel- und ökologiebezogenen Unterkapiteln ( $N = 291$ ) 25 % jedes Bandes zufällig ausgewählt. Sie bestanden aus  $N = 385$  Texten und Abbildungen, die von dem zweiten Rater hinsichtlich der Existenz eines Energiebezugs bewertet wurden. Die Berechnung des Kappa-Koeffizienten nach Cohen (1960) als Maß für die Interraterreliabilität ergab  $\kappa = 0,72$ <sup>11</sup>. Laut Landis und Koch (1977) zeigt dieser Wert eine substanzielle Übereinstimmung zwischen den Ratern an. Bei der Auswahl der energiebezogenen Aufgaben wurde ein eindeutiges Kriterium angelegt (Nennung des Wortes *Energie* oder Komposita im Aufgabenstamm und/oder in der Musterlösung), sodass auf eine Überprüfung der Interraterreliabilität verzichtet werden konnte.

---

<sup>11</sup> Nicht-Übereinstimmungen zwischen den Ratern bei dem Auswahlverfahren der energiebezogenen Repräsentationen liegen vermutlich darin begründet, dass es sich bei dem Energiebezug um ein Kontinuum handelt, da Energie als abstraktes Konzept unterschiedlich deutlich im Material angesprochen wird. In die Analyse sind auch Materialien eingeflossen, die einen geringen Energiebezug aufweisen.

## 4.6 Ergebnisse der Erarbeitung und Überprüfung des Kategoriensystems

Das Kategoriensystem wird in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2

### *Grundlegendes Kategoriensystem und Anwendungsbereich der Kategorien*

	Kategorie	Beschreibung	Anwendung
Inhaltlich	Definition von Energie	Gegeben oder nicht gegeben	F
	Alternativvorstellungen	Darstellung oder Aufgreifen von Alternativvorstellungen	F, A
	Thematisierte Aspekte des Energiekonzepts	Form/Speicher, Umwandlung/Übertragung, Entwertung, Erhaltung	F, A
Formal	Abbildungstyp	Tabelle, Foto usw	F, A
	Gestaltung der Abbildungen	Beschriftung, Untertitel	F, A
	Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text	Dekoration, Repräsentation, Organisation/Interpretation, Zusatz	F
	Relation von Abbildung und Text	Schwach redundant, stark redundant oder ergänzend	F
	Funktion der Abbildung für die Aufgabe	Dekoration, Vorlage, Informationsbereitstellung	A
	Anforderungen der Aufgabe	Informationsentnahme, Konstruktion, Integration, Fachsprache	A

*F* Anwendung der Kategorien bei der Analyse des Fließtextes einschließlich seiner Abbildungen, *A* Anwendung der Kategorie bei der Aufgabenanalyse

Die Kriterien für die einzelnen Kategorien sind im Detail im Kodierleitfaden (Onlinematerial 2) beschrieben. An dieser Stelle sollen nur die für die Interpretation der gewonnenen Ergebnisse wichtigsten Kriterien aufgeführt werden:

(1) Bei der Zuordnung zu der Kategorie „Thematisierte Aspekte des Energiekonzepts“ sind Mehrfachzuordnungen möglich. Es wird zwischen expliziten und impliziten Thematisierungen unterschieden:

Die Thematisierung der *Energieform* gilt als explizit, wenn eine Energieform oder ein Energieträger/-speicher/-quelle als solche/r benannt wird. Bei einer impliziten Thematisierung wird kein direkter Zusammenhang zu Energie hergestellt, sondern nur ein Energieträger, -speicher oder -quelle genannt oder dargestellt, z. B. die Sonne.

*Energieumwandlung/-übertragung* ist explizit, wenn der Begriff Energie oder Komposita in Zusammenhang mit einem Wort aus dem Bereich Übertragung, Umwand-

lung, Transport, Aufbau, Abbau o.ä. steht. Eine implizite Thematisierung liegt vor, wenn das Wort Energie oder Komposita nicht genannt oder dargestellt werden, es sich aber trotzdem um Energieumwandlungs- oder Übertragungsprozesse handelt. Schlagworte wie *Energieeinsatz* oder *Energiegewinnung* sind lediglich implizite Thematisierungen von Energieumwandlung, solange sie nicht näher erläutert werden.

*Energieentwertung* wird nur dann explizit thematisiert, wenn deutlich gemacht wird, dass Energie in Form von (Ab-)Wärme für das System verloren geht bzw. sich der Nutzen der Energie verringert. Wärmeabgabe stellt lediglich eine implizite Thematisierung dar.

*Energieerhaltung* gilt als explizit, wenn erklärt wird, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann bzw. dass der Betrag der Energie vor und nach einer Energieumwandlung gleich ist. Bei der impliziten Thematisierung wird dies umschrieben.

Die Thematisierung in Abbildungen wird mit Blick auf den dazugehörigen Textabschnitt bewertet. Sobald eine explizite Nennung auftritt, wird der gesamte Text bzw. die gesamte Abbildung in diesem Aspekt explizit, sodass implizite Nennungen dieses Aspektes nicht mehr gezählt werden.

(2) Hinsichtlich der Funktionen von Abbildungen nach Levin et al. (1987) konnten Organisation und Interpretation empirisch nicht getrennt werden (keine ausreichende Interraterübereinstimmung) und wurden deshalb zusammengefasst. Über die Funktionen von Levin et al. (1987) hinausgehend wurde für diese Studie die Funktion *Zusatz* definiert. Bei dieser Funktion dient die Abbildung in erster Linie dazu, Zusatzinformationen oder Beispiele darzustellen, die nicht im Text genannt werden.

(3) Die Kategorie Relation zeigt den Grad der inhaltlichen Redundanz von Abbildungs- und Textinformation und steht damit im engen Zusammenhang zu der Funktion der Abbildung. Die stark redundante Relation liegt vor, wenn alle Informationen, die in der Abbildung dargestellt sind, auch im Text vorhanden sind. Bei einer schwach redundanten Relation beinhalten Text und Abbildung zum Teil dieselben und zum Teil nur einmal auftretende Informationen. Die Relation ergänzend bedeutet, dass keine substantielle Überlappung zwischen den präsentierten Informationen besteht.

Der zweite Rater kategorisierte je zufällig ausgewählte 25 % der energiebezogenen Texte, Abbildungen und Aufgaben. Bei der Fließtextanalyse bewegen sich die Werte der Interraterübereinstimmung für die einzelnen Kategorien zwischen  $\kappa = 0,57$  (moderate Übereinstimmung) und  $\kappa = 1$  (perfekte Übereinstimmung), bei der Aufgabenanalyse zwischen  $\kappa = 0,64$  (substantielle Übereinstimmung) und  $\kappa = 1$  (Beurteilung der Werte nach

Landis und Koch, 1977). Nicht mit einbezogen sind dabei die Kategorien, die ein sogenanntes Kappa-Paradox, also sehr niedrige Kappa-Werte trotz einer hohen prozentualen Übereinstimmung beider Rater ( $\geq 75\%$ ), aufweisen. Es tritt auf, wenn die Verteilung der Beobachtungen auf die möglichen Kategorien stark ungleich ist (vgl. Onlinematerial 3), die Kappa-Koeffizienten sind dann nicht sinnvoll interpretierbar (Feinstein und Cicchetti, 1990).

## 4.7 Ergebnisse der Anwendung des Kategoriensystems auf die Schulbuchreihe Linder

### 4.7.1 Inhaltliche Befunde

#### *Häufigkeit der Thematisierung von Energie*

Die Auszählung der Texte, Abbildungen und Aufgaben mit und ohne Energiebezug in stoffwechsel- und ökologiebezogenen Kapiteln zeigt, dass mit zunehmender Klassenstufe häufiger Energie thematisiert wird (vgl. Tab. 4-3). Allerdings wird Energie oft nur am Rande behandelt. In 38,8 % ( $n = 40$ ) der analysierten Texte wird nicht mehr als einmal der Begriff Energie verwendet. In 68,5 % der Aufgaben wird Energie nur in der Musterlösung und nicht im Aufgabenstamm genannt.

Tabelle 4-3

#### *Häufigkeit der Thematisierung von Energie in Kapiteln zu Stoffwechselbiologie und Ökologie*

	Linder 1	Linder 2	Linder Gesamtband	Linder Arbeitsbuch
Anteil der Unterkapitel, die einen Energiebezug aufweisen	17,6 % (34 Seiten)	33,6 % (64 Seiten)	63,2 % (79 Seiten)	-
Explizite Nennungen des Begriffs Energie oder Komposita (Fließtextanalyse)	104	243	319	-
Durchschnittliche Anzahl der Nennungen von Energie oder Komposita pro Text/Abbildung	$M = 1,86$ $SD = 4,81$	$M = 2,51$ $SD = 5,64$	$M = 2,42$ $SD = 5,48$	-
Anteil der Aufgaben mit Energiebezug	4,8 % $N = 20$	8,0 % $N = 42$	16,4 % $N = 18$	13,7 % $N = 47$

### *Definition von Energie*

Der Linder verzichtet in den untersuchten Kapiteln aller drei Bände und im Glossar des Gesamtbandes auf eine Definition von Energie.<sup>12</sup>

### *Alternativvorstellungen*

Die Kategorie Alternativvorstellungen deckt zwei Aspekte ab. Erstens wurde die fachliche Korrektheit der dargestellten Inhalte überprüft. Besonderes Augenmerk lag auf der fachlich falschen Verwendung von Fachtermini und Aussagen oder Darstellungen, die Alternativvorstellungen der Schülerinnen und Schüler stützen oder erzeugen könnten, zum Beispiel die Verwendung des Begriffs Energie im Sinne der Alltagssprache. Als problematisch angesehen wurden 4,6 % der Texte/Abbildungen und 3,9 % der Aufgaben. Fachlich falsch ist beispielsweise die Darstellung des Energieflusses als Kreislauf. Indem Pfeile von den Destruenten und der Atmung zurück zu den Produzenten führen, werden energetische und stoffliche Aspekte vermischt (Linder Gesamtband, Abb. 389.3). Daneben wurden einige fachlich falsche Formulierungen festgestellt, z. B. „Wie gelingt es Pflanzen, Energie zu erzeugen?“ (Linder 2, S. 100). Zweitens wurde untersucht, ob aus der Forschung bekannte Alternativvorstellungen von Schülerinnen und Schülern aufgegriffen werden. Dies ist bei 1,8 % der Texte/Abbildungen und 3,1 % der Aufgaben der Fall, indem Alltags- und Fachsprache explizit unterschieden werden. Ein Beispiel ist die folgende Aufgabe aus dem Linder Gesamtband (S. 76): „In der Werbung für einen „Energie-Drink“ wird der folgende Slogan verwendet: „X bringt verbrauchte Energie sofort zurück!“ Nehmen Sie unter Verwendung der Fachsprache begründet Stellung.“ (vgl. auch Alternativvorstellung in Tab. 4-1).

### *Thematisierte Aspekte des Energiekonzepts*

Jede Repräsentation wurde dahingehend untersucht, welcher Aspekt des Energiekonzepts angesprochen wird, wobei Mehrfachzuordnungen möglich waren. Bei der Fließtextanalyse wurde zwischen expliziten und impliziten Thematisierungen unterschieden. Die Ergebnisse zeigen, dass Energieformen und -umwandlungen häufig, Energieentwertung und -erhaltung hingegen selten thematisiert werden. Dies gilt in allen Bänden (vgl. Abb. 4-1). Zusätzlich werden alle Energieaspekte implizit angesprochen (vgl. Abb. 4-2). Bei der Aufgabenanalyse wurden ausschließlich explizite Thematisierungen erfasst. Es

---

<sup>12</sup> Linder Biologie 1 und Linder Biologie 2 besitzen keine Glossare. Im Linder Gesamtband werden Komposita wie „Aktivierungsenergie“, „Freie Energie“ (als Synonym zur freien Enthalpie) und „Stoff- und Energieumwandlung“ erläutert.



ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Fließtextanalyse: Energieentwertung und -erhaltung sind deutlich unterrepräsentiert (vgl. Abb. 4-3). Aufgrund des strengen Kriteriums für eine explizite Thematisierung der Energieentwertung wurden, wie bei der Fließtextanalyse, zusätzlich implizite Thematisierungen erfasst: 14,2 % der Aufgaben behandeln Energieentwertung implizit, indem von einer Wärmeabgabe gesprochen wird.

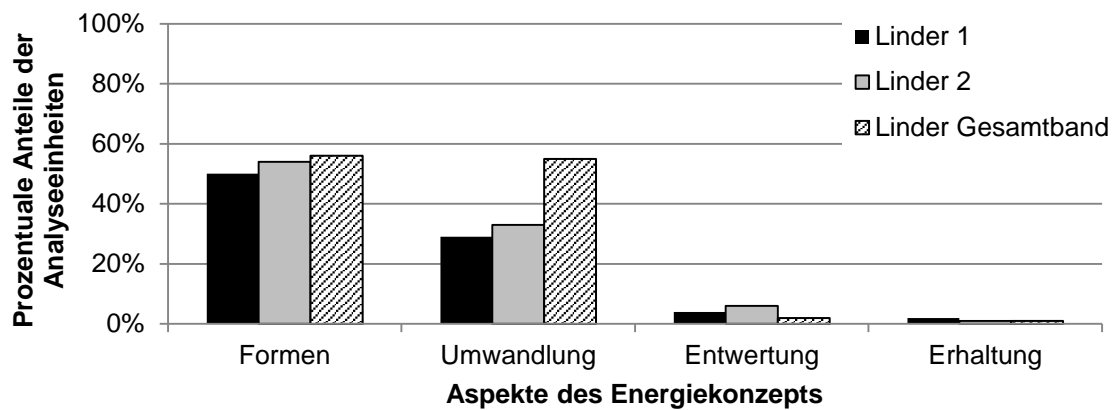


Abbildung 4-1. Fließtextanalyse: Prozentuale Anteile der Analyseeinheiten, die die einzelnen Energieaspekte explizit berücksichtigen, Mehrfachzuordnungen waren möglich.

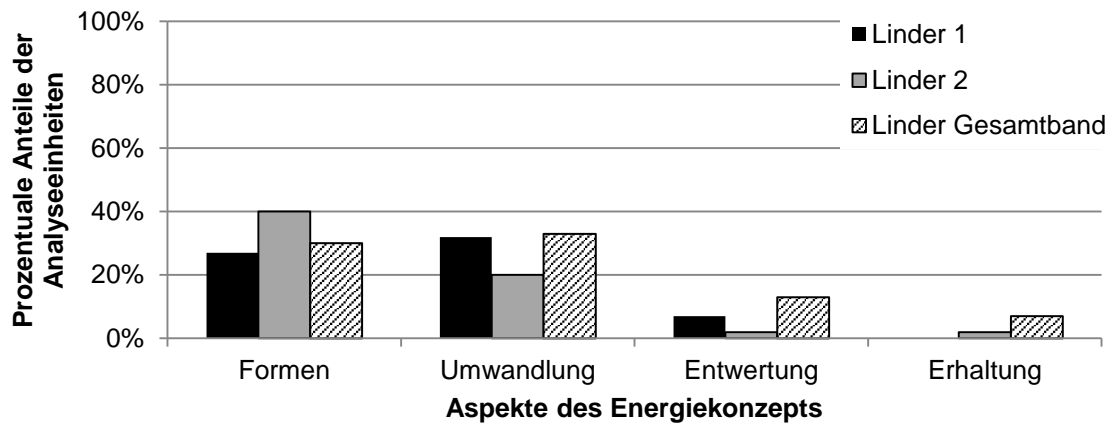


Abbildung 4-2. Fließtextanalyse: Prozentuale Anteile der Analyseeinheiten, die die einzelnen Energieaspekte implizit berücksichtigen, Mehrfachzuordnungen waren möglich.

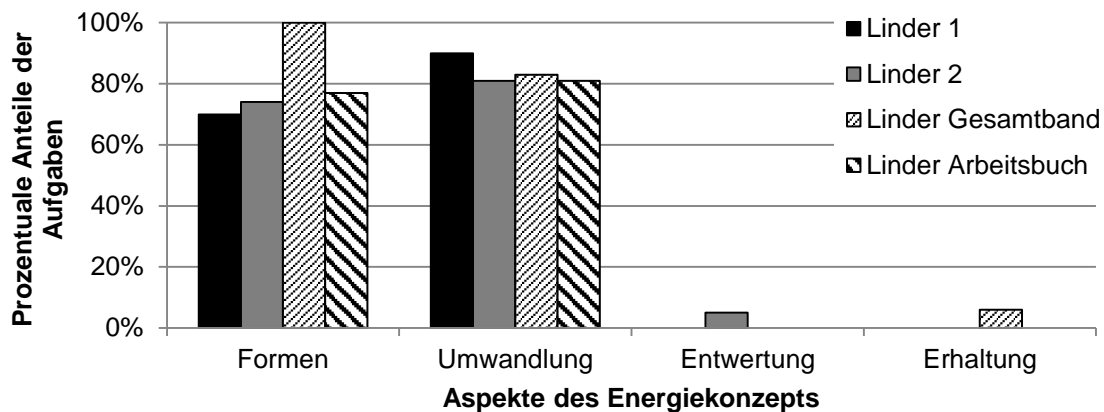


Abbildung 4-3. Aufgabenanalyse: Prozentuale Anteile der Analyseeinheiten, die die einzelnen Energieaspekte explizit berücksichtigen, Mehrfachzuordnungen waren möglich.

Damit geht einher, dass das Energiekonzept selten in seiner Gesamtheit dargestellt wird. Nur 4,6 % ( $n = 13$ ) der Texte und Abbildungen der Fließtextanalyse sprechen gleichzeitig alle vier Energieaspekte explizit oder implizit an. Werden nur die expliziten Thematisierungen berücksichtigt, verringert sich der Anteil auf 0,7 % ( $n = 2$  Texte). Es gibt keine Aufgabe, die eine Auseinandersetzung mit allen vier Aspekten fordert.

#### 4.7.2 Formale Befunde

##### *Auszählung der Abbildungen*

Während die Anzahl der Abbildungen pro Seite geringer wird, steigt der Anteil der Abbildungen mit Energiebezug vom Linder 1 zu 2 bis zu dem Gesamtband (vgl. Tab. 4-4).

Tabelle 4-4

##### *Auszählung der Abbildungen in Kapiteln zu Stoffwechselbiologie und Ökologie*

	Linder 1	Linder 2	Linder Gesamtband	Linder Arbeitsbuch
Ø Anzahl Abbildungen pro Seite	3,22	2,49	2,45	-
Ø Anzahl Abbildungen mit Energiebezug pro Seite	0,22	0,34	0,70	-
Ø Anzahl Abbildungen pro Aufgabe	0,70	0,64	0,72	1,26

##### *Abbildungstyp*

Der Linder verwendet eine große Bandbreite unterschiedlicher Abbildungstypen (vgl. Abb. 4-4). Einige Abbildungen sind Mischformen, das heißt, sie bestehen aus mehr als einem Typ, indem beispielsweise ein Flussdiagramm mit realistischen Zeichnungen innerhalb einer Abbildung kombiniert wird (vgl. z. B. Linder 2, S. 141, Weg der Energie).

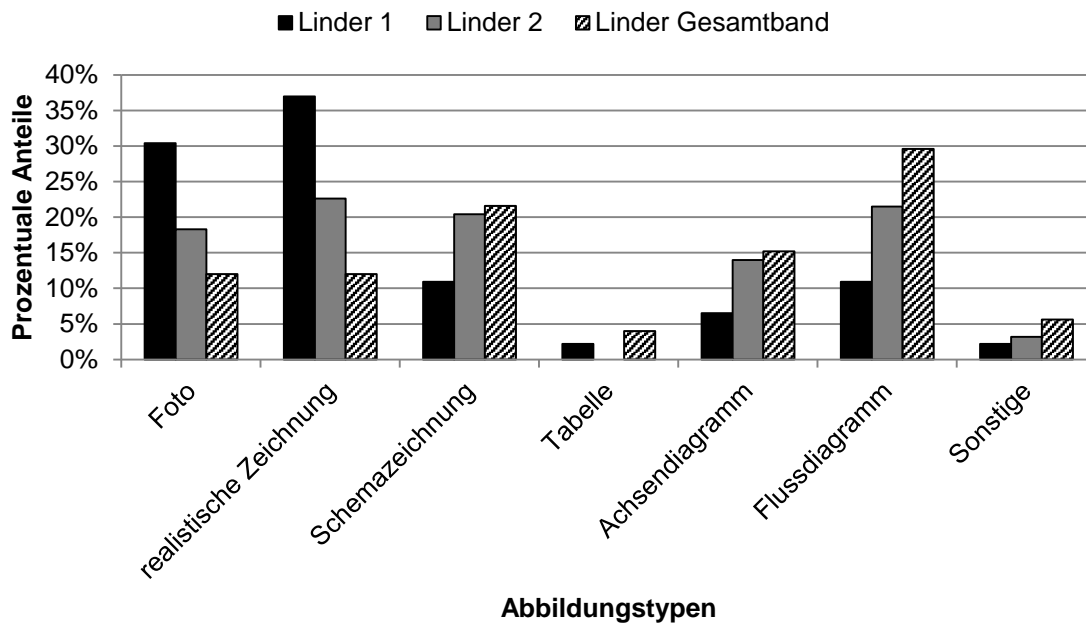


Abbildung 4-4. Fließtextanalyse: Abbildungstypen, Mehrfachnennungen waren bei Mischformen möglich. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden in der Kategorie Achsendiagramme Punktdiagramme, Kurven- oder Liniendiagramme und Säulendiagramme zusammengefasst. Flussdiagramme umfassen sowohl Sequenzen als auch Kreisläufe. Die Kategorie Sonstige beinhaltet Kreisdiagramme und spezielle biologische Diagramme wie z. B. Energiepyramiden.

Die Verteilung der verschiedenen Abbildungstypen unterscheidet sich jedoch zwischen Fließtext und Aufgaben. Während in den Unterkapiteln zahlreiche Fotos und realistische Zeichnungen vorkommen, werden bei Aufgaben mehr Tabellen und Achsendiagramme verwendet (vgl. Abb. 4-5).

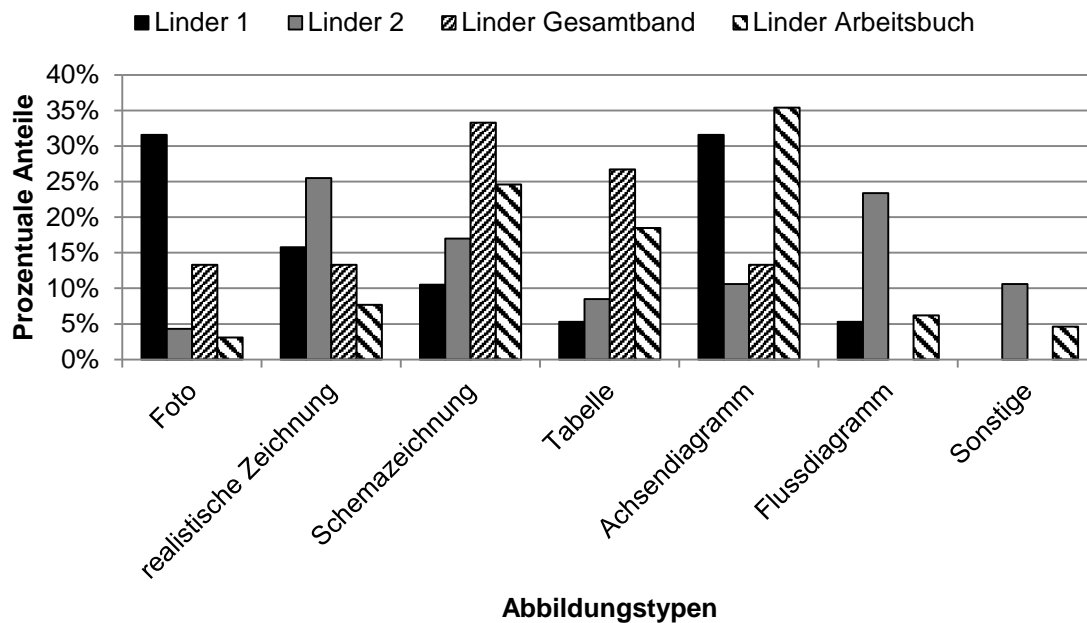


Abbildung 4-5. Aufgabenanalyse: Abbildungstypen, auf die Bezug genommen wird, Mehrfachzuordnungen waren bei Mischformen möglich.

Grundsätzlich lässt sich beschreiben, dass mit steigender Klassenstufe der Anteil an darstellenden Abbildungen (Fotos, realistische Zeichnungen) geringer und der Anteil an logisch-analytischen Abbildungen (Schemazeichnungen, Tabellen, Diagramme) höher ausfällt. Bei der Fließtextanalyse verringerte sich der Anteil darstellender Abbildungen von 67,4 % in Linder 1 auf 24,0 % im Linder Gesamtband, bei der Aufgabenanalyse von 47,4 % in Linder 1 auf durchschnittlich 18,7 % im Linder Gesamtband/Arbeitsbuch.

#### *Gestaltung der Abbildungen*

In dieser Kategorie wurden zwei zentrale Aspekte der Bildgestaltung erfasst: Die Verwendung von Untertiteln und Beschriftungen. Die Fließtextanalyse zeigt, dass 22,8 % der darstellenden und 97,5 % der logisch-analytischen Abbildungen eine Beschriftung aufweisen. Darüber hinaus sind 97,8 % der Abbildungen mit einem Untertitel versehen. Die Aufgabenanalyse ergab einen vergleichbaren Wert (95,5 % der Abbildungen mit Untertitel). Der Anteil an Abbildungen mit Beschriftung beträgt bei den Aufgaben 86,8 %. Dies hängt damit zusammen, dass sich Aufgaben wie bereits erläutert seltener auf darstellende Abbildungen beziehen.

*Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text*

Es zeigt sich, dass die Abbildungen mit Organisations-/Interpretationsfunktion in jeder Klassenstufe den größten Anteil ausmachen. Dieser Anteil wird mit steigender Klassenstufe größer (vgl. Abb. 4-6).

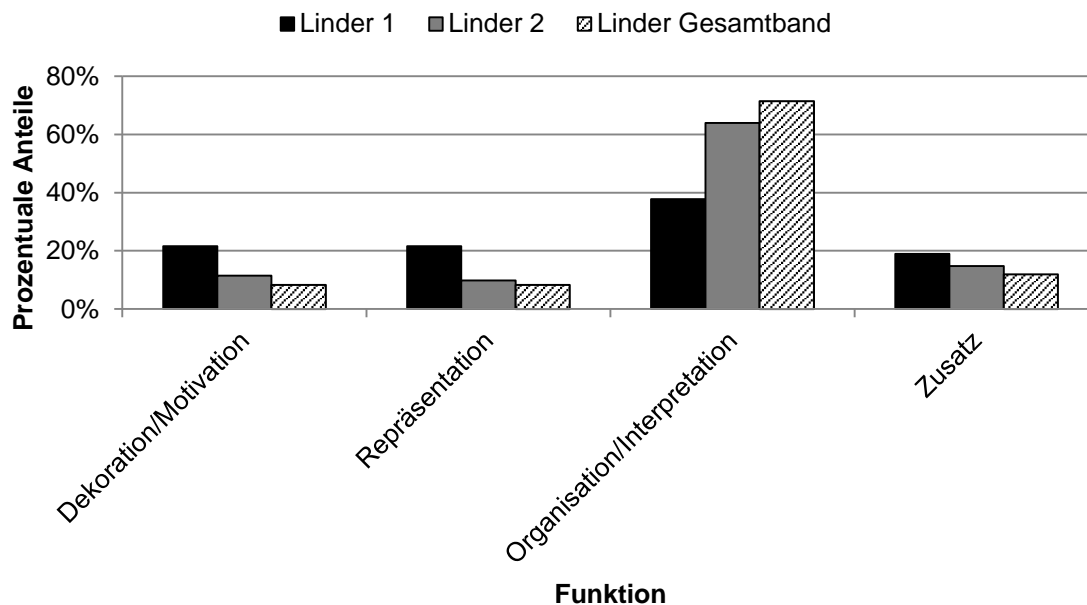


Abbildung 4-6. Fließtextanalyse: Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text, Organisations- und Interpretationsfunktion wurden zusammengefasst, Mehrfachzuordnungen waren nicht zugelassen.

*Relation von Abbildung und Text*

Die Kategorie Relation zeigt den Grad der Redundanz von Bild- und Textinformation. Die Ergebnisse zeigen, dass schwach redundante Abbildungen mit steigender Klassenstufe häufiger vorkommen, während die stark redundanten und ergänzenden Abbildungen seltener vorkommen. Ergänzende Relationen sind selten (vgl. Abb. 4-7).

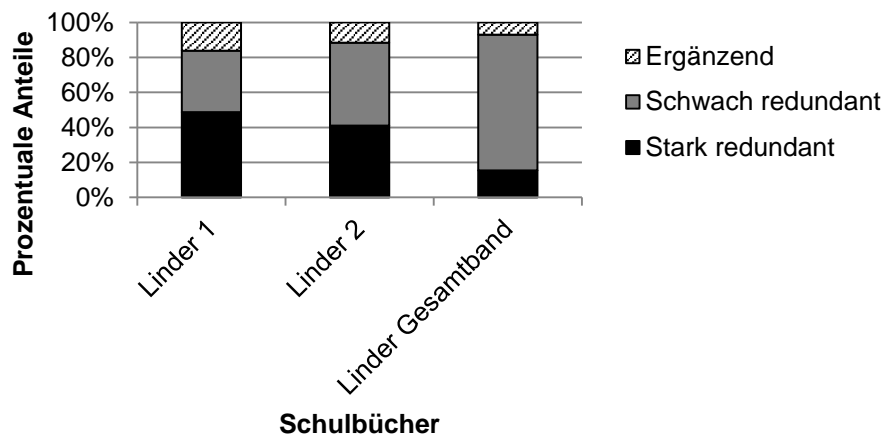


Abbildung 4-7. Fließtextanalyse: Relation von Abbildung und Text.

Die Relation ist eng verknüpft mit der Funktion der Abbildung: 77,3 % aller dekorativen und 61,9 % aller repräsentativen Abbildungen sind stark redundant; 75,2 % der Abbildungen mit Organisations-/Interpretationsfunktion sind schwach redundant. Abbildungen mit Zusatzfunktion sind in der Regel schwach redundant (50 %) oder ergänzend (46,2 %).

#### *Funktion der Abbildung für die Aufgabe*

Es zeigt sich, dass die meisten Abbildungen, die zu einer Aufgabe gehören, essenziell für deren Lösung sind: Die Funktion *Informationsbereitstellung* ist die häufigste in allen Bänden. Insgesamt erfüllen 86,7 % der Abbildungen diese Funktion. Dekorative Abbildungen nehmen insgesamt einen Anteil von 9,7 % ein, wobei sie im Linder 1 mit 28,6 % deutlich häufiger eingesetzt werden. In seltenen Fällen dienen Abbildungen als Vorlage für das Erstellen einer eigenen Abbildung (3,5 %; z. B. Linder 2, S. 184, V1).<sup>13</sup>

#### *Anforderungen der Aufgabe*

*Informationsentnahme:* Die Informationsentnahme aus einem Text und/oder aus einer Abbildung wird in 69,3 % der Aufgaben explizit gefordert.

*Konstruktion:* Die Konstruktion einer Repräsentation wird in 11,0 % der Aufgaben verlangt. Der Großteil davon (9,4 %) erfordert das Erstellen einer neuen Abbildung

<sup>13</sup> Rundungsbedingt ergeben sich 99,9 % anstatt 100 %.

oder eines neuen Textes. Die übrigen 1,6 % der Aufgaben ( $n = 2$ , beide im Linder 2) erfordern das Ergänzen einer vorhandenen Abbildung (Tabelle).

*Integration:* Bei 22,8 % aller Aufgaben müssen Informationen aus mehreren Repräsentationen miteinander verknüpft werden, um die Aufgabe zu lösen. Dies wird mit steigender Klassenstufe häufiger gefordert (von 10,0 % der Aufgaben in Linder 1 auf durchschnittlich 35,4 % in Linder Gesamtband und Arbeitsbuch). Vierzehn Aufgaben (11,0 %) verlangen die Verknüpfung von Informationen aus mehreren Abbildungen, zwei Aufgaben (1,6 %) aus mehreren Texten und dreizehn Aufgaben (10,2 %) aus Text und Abbildung.

*Aufgaben zur Fachsprache:* Alle Bände beinhalten Aufgaben, die die Lernenden zur Reflexion oder zur bewussten Verwendung von Fachsprache anhalten – ein Beispiel hierfür ist die Aufgabe zum Energie-Drink (vgl. 4.7.1). Insgesamt betrifft dies 7,1 % der Aufgaben.

## 4.8 Diskussion

### 4.8.1 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der Studie war es, ein Kategoriensystem zu erstellen und exemplarisch anzuwenden, anhand dessen die Darstellung von Energie in Lehr-Lernmedien beschrieben werden kann. Das vorgestellte Kategoriensystem ist theoretisch fundiert und deckt sowohl inhaltliche als auch formale Aspekte der Darstellung ab. Im Rahmen des Inter-ratings wurde eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den beiden Ratern erzielt, weshalb die Beschreibung der Kategorien als ausreichend ausgeschärft angesehen werden kann. Zu beachten ist, dass die angegebenen Kappa-Werte stichprobenspezifisch sind und in Folgestudien neu bestimmt werden müssen (Wirtz und Caspar, 2002). Insbesondere die Kategorien, die nur sehr selten im Material beobachtet werden konnten, sollten dann kritisch überprüft werden. Neben der Anwendung des Kategoriensystems auf Biologieschulbücher ist auch eine Anwendung auf Chemie- und Physikschulbücher sowie auf andere Unterrichtsmedien denkbar.

Durch die Analyse der Schulbuchreihe Linder wurden exemplarisch erste Erkenntnisse über die Darstellung von Energie in deutschsprachigen Unterrichtsmedien gewonnen. Die Ergebnisse der inhaltsbezogenen Kategorien haben gezeigt, dass Energie mit steigender Klassenstufe häufiger thematisiert wird. Dieser Trend ist insofern erwar-



tungskonform, als eine schrittweise Entwicklung des abstrakten Energiekonzeptes im Laufe der Klassenstufen sowohl empirisch belegt ist als auch normativ empfohlen wird (Neumann et al., 2013; Nordine, 2016). Mit zunehmender Klassenstufe werden vermutlich häufiger komplexe energiebezogene Prozesse unterrichtet, während in der Unterstufe eher makroskopische Phänomene betrachtet werden. Beispielsweise zeigt sich im Biologielehrplan des bevölkerungsreichsten Bundeslandes Nordrhein-Westfalen, dass sich die basiskonzeptbezogenen Kompetenzen, die bis Ende der Klassenstufe 9 erreicht werden sollen, häufiger explizit auf Energie beziehen als die Kompetenzen, die bis Ende der Klassenstufe 6 erreicht werden sollen (LP, 2008). In Hinblick auf das Ergebnis des steigenden Energiebezugs muss jedoch berücksichtigt werden, dass oft nur implizit auf Energie eingegangen wird oder der Begriff Energie singularär auftritt. Dies ist nicht verwunderlich, da auch Abbildungen und Texte mit geringem Energiebezug in die Stichprobe aufgenommen wurden. Energie auch am Rande aufzugreifen kann die Relevanz und die Omnipräsenz des Konzeptes deutlich machen. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die tatsächliche Behandlung des Themas im Unterricht deutlich geringer ausfällt, als die Zahlen auf den ersten Blick vermuten lassen. Wird Energie beispielsweise nur in der Musterlösung und nicht im Aufgabenstamm genannt, wie es in fast 70 % der untersuchten Aufgaben der Fall ist, ist fraglich, ob Lehrende und Lernende den Energiebezug erkennen und somit diese Lerngelegenheiten nutzen. Wie hoch der Energiebezug in der Praxis tatsächlich ausfällt, lässt sich nicht allein durch Schulbuchanalysen ermitteln, sondern würde Unterrichtsanalysen erfordern.

Ob es sinnvoll ist, Lernende mit einer Definition von Energie zu konfrontieren, ist umstritten, der Linder verzichtet in den untersuchten Kapiteln und im Glossar darauf. Positiv anzumerken ist, dass nur wenige fachliche Fehler festgestellt wurden. Auffallend war, dass Formulierungen wie „Energieverlust“ oder „Energie geht verloren“ im Linder häufig in Anführungsstriche gesetzt werden, ohne den Grund hierfür zu erklären. Dass Energie tatsächlich verloren gehen kann, stellt eine weit verbreitete Alternativvorstellung unter Schülerinnen und Schülern dar (Burger, 2001), die möglicherweise durch die Formulierung in Schulbüchern – trotz der Verwendung von Anführungsstrichen – begünstigt wird. Alternativvorstellungen über Energie werden nur in 2 % der Texte und Abbildungen und in 3 % der Aufgaben im Linder aufgegriffen. Gemäß der konstruktivistischen Lerntheorie sollten Alternativvorstellungen stärker explizit berücksichtigt werden. Konkrete Vorschläge, wie energiebezogene Alternativvorstellungen als Möglichkeit zum Umlernen genutzt werden können, bietet Kattmann (2015).

Die Analyse der Thematisierung der vier Aspekte des Energiekonzepts hat gezeigt, dass Energieerhaltung und Energieentwertung nur sehr selten thematisiert werden. Gerade bei diesen beiden Aspekten weisen Lernende die größten Verständnisschwierigkeiten auf (Jin und Anderson, 2012). Vor allem der Aspekt Energieentwertung sollte häufiger explizit dargestellt werden, denn die bloße Schilderung einer Abgabe von Energie macht den Kern des Aspekts, nämlich den Verlust der Wertigkeit der Energie, für die Lernenden nicht deutlich. Nur mit einem Verständnis von Energieentwertung ist beispielsweise umweltbewusstes Handeln wie das „Sparen“ von Energie trotz des Grundsatzes der Energieerhaltung einsichtig (Lacy et al., 2014). Eine Darstellung aller vier Facetten in einer Repräsentation muss nicht wünschenswert sein, da sich eine inhaltliche Überfrachtung der einzelnen Repräsentation ergeben kann. Stattdessen können die Informationen aus verschiedenen Repräsentationen in einem gemeinsamen mentalen Modell integriert werden (Schnotz und Bannert, 2003). Dieser Prozess kann durch Aufgaben, die die Lernenden zur Integration auffordern, unterstützt werden – vorausgesetzt, das Vorwissen der Lernenden ist ausreichend (Bodemer und Faust, 2006). Detailliertere Analysen, beispielsweise in Hinblick auf das themenspezifisch notwendige Vorwissen oder die sachlogische Abhängigkeit einzelner Inhalte, könnten in Form von Sachstrukturanalysen erfolgen (z. B. Brückmann, 2009; Wüsten et al., 2010).

Die Ergebnisse der formalen Kategorien sind weitestgehend positiv zu beurteilen. Ebenso wie in anderen Analysen zu Abbildungen in naturwissenschaftlichen bzw. biologischen Schulbüchern (Grundschule bis Sekundarstufe I: Dimopoulos et al., 2003; Sekundarstufe I bis II: Liu und Treagust, 2013) konnte beobachtet werden, dass darstellende Abbildungen mit steigender Klassenstufe seltener und logisch-analytische Abbildungen häufiger verwendet werden. Energie selbst ist nicht sichtbar, lediglich Energieträger und Umwandlungsprozesse können betrachtet werden. Deshalb sind logisch-analytische Abbildungen wie Graphen und Diagramme vermutlich eher dazu geeignet, das abstrakte Thema Energie darzustellen, könnten aber junge Lernende überfordern (Liu und Treagust, 2013). Auffällig ist der vermehrte Gebrauch von Flussdiagrammen mit steigender Klassenstufe. Flussdiagramme werden vor allem zur Darstellung von Stoffwechselprozessen wie der Photosynthese und zur Darstellung von Energieflüssen und Stoffkreisläufen eingesetzt, die vornehmlich in höheren Klassenstufen thematisiert werden. Die Beobachtung, dass bei Aufgaben vor allem auf Tabellen und Achsendiagramme Bezug genommen wird, könnte damit zusammenhängen, dass aus diesen Abbildungsfor-

men komplexere Informationen entnommen werden können als aus darstellenden Abbildungen.

Eine hohe Redundanz von Text und Abbildung zeigt sich vor allem in unteren Klassenstufen. Dies entspricht den Empfehlungen der kognitionspsychologischen Forschung (Ainsworth, 2006; Carney und Levin, 2002). Dass Organisations- und Interpretationsfunktion von Abbildungen empirisch nicht getrennt werden konnten, liegt vermutlich an der nicht trennscharfen Definition der Funktionen und der Abhängigkeit vom Vorwissen der Lernenden (Levin et al., 1987). Nichtsdestoweniger konnte festgestellt werden, dass die Abbildungen größtenteils potenziell lernförderliche Funktionen besitzen und essentielle Informationen zum Lösen von Aufgaben bereitstellen. Die häufige Verwendung von Untertiteln ist positiv zu werten, ebenso wie die Verwendung von Beschriftungen, die vor allem bei logisch-analytischen Abbildungen die Inhalte konkretisieren und den Fokus der Lernenden auf die wesentlichen Aspekte lenken.

Die Aufgaben könnten durch eine größere Variation in den Anforderungen verbessert werden. Positiv ist, dass die Informationsentnahme aus Texten und Abbildungen häufig gefordert wird. Integrationsaufgaben nehmen mit steigender Klassenstufe zu, was als sinnvoll erachtet werden kann, da bei dieser Fähigkeit eine Abhängigkeit vom Vorwissen und von der Vertrautheit mit den Abbildungstypen angenommen wird (Bodemer und Faust, 2006). Dennoch könnte der Anteil solcher Aufgaben noch deutlich höher ausfallen. Darüber hinaus sollte die Konstruktion von Repräsentationen häufiger gefordert werden. Die Studie von Nitz et al. (2014) deutet darauf hin, dass sich die häufige Interpretation und seltene Eigenkonstruktion von Abbildungen, wie sie sich in der exemplarisch analysierten Schulbuchreihe zeigt, auch in der Unterrichtspraxis niederschlägt. Nichtsdestoweniger wird am Ende der Mittelstufe die Kompetenz gefordert, Informationen mit bildlichen Gestaltungsmitteln darzustellen. Ebenso wird die Anwendung fachbezogener Sprache erwartet (KMK, 2004a). Im Linder ist der Anteil energiebezogener Aufgaben, die ausdrücklich auf die Verwendung von Fachsprache abzielen, jedoch gering. Gerade beim Thema Energie sollte die Differenz zwischen Alltags- und Fachsprache explizit gemacht werden, um sprachbedingte Alternativvorstellungen bewusst zu machen und so ein Verständnis des wissenschaftlich anerkannten Energiekonzepts zu fördern.

Dass die Schulbuchbände von unterschiedlichen Autorengruppen verfasst wurden, könnte eine alternative Erklärung für die beobachteten Unterschiede in der Darstellung sein.

### **4.8.2 Implikationen**

Lehrkräfte sollten in der Lage sein, das Unterrichtsmaterial vor dem Einsatz im Klassenraum selbstständig kritisch zu prüfen (Heitzmann und Niggli, 2010). Bezüglich des Themas Energie können ihnen die hier vorgestellten Kriterien dafür Anhaltspunkte bieten. Die Ergebnisse der exemplarisch analysierten Schulbuchreihe zeigen potenzielle formale und inhaltliche Problembereiche von Unterrichtsmedien auf, denen in zukünftigen Untersuchungen besondere Beachtung geschenkt werden sollte. Wenn Lehrende ihren Unterricht auf Medien mit entsprechenden Problembereichen stützen, sollten sie diese durch didaktische Maßnahmen ausgleichen, indem sie beispielsweise Zusatzmaterialien hinzuziehen oder im Unterrichtsgespräch auf die vernachlässigten Aspekte des Energiekonzepts eingehen.

Zukünftige Forschungen sollten die Generalisierbarkeit der Ergebnisse anhand von Analysen weiterer Biologieschulbücher der Sekundarstufe I und II überprüfen. Interessant wäre zudem eine Überprüfung von Medien für die Hochschule. Angesichts der fächerübergreifenden Bedeutung des Energiekonzepts sollten außerdem Schulbücher der Chemie und Physik vergleichend betrachtet werden. Das hier vorgelegte Kategoriensystem könnte als Grundlage hierfür dienen und auf die jeweiligen Fächer adaptiert dafür herangezogen werden.

### **4.8.3 Grenzen der Studie**

Ein Schwerpunkt wurde auf die Analyse von Abbildungen gelegt. Deshalb wurden weitere Eigenschaften der Darstellung, zum Beispiel die Textkohärenz, nicht berücksichtigt.

Offen bleibt, inwieweit die Ergebnisse für die Schulbuchreihe Linder auf andere Biologieschulbücher übertragbar sind. Außerdem wurde die Untersuchung auf Texte, Abbildungen und Aufgaben mit stoffwechselbiologischem bzw. ökologischem Bezug beschränkt.

In der durchgeführten Schulbuchanalyse wird ausschließlich der Angebotscharakter des Mediums betrachtet. Inwieweit dieses Angebot von den Lernenden erfolgreich genutzt wird, ist u.a. von den individuellen Fähigkeiten und von den kognitiven Anstrengungen der Lernenden in der konkreten Lernsituation abhängig (Helmke und Schrader, 2014). Um die Nutzung der angebotenen Medien und den hieraus resultierenden Lernerfolg zu analysieren, werden entsprechende Lernstudien benötigt. Nichtsdestoweni-

ger sollten Unterrichtsmedien so gut wie möglich gestaltet werden, um Lehrkräften qualitativ hochwertiges Lehr-Lern-Material für den Unterricht zur Verfügung zu stellen. Das entwickelte Kategoriensystem kann hierzu einen Beitrag leisten.

## 4.9 Literaturverzeichnis

Die mit \* gekennzeichneten Quellen sind Gegenstand der Schulbuchanalyse.

Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33, 131-152. doi:10.1016/S0360-1315(99)00029-9

Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16, 183-198. doi:10.1016/j.learninstruc.2006.03.001

Amettler, J. & Pintó, R. (2002). Students' reading of innovative images of energy at secondary school level. *International Journal of Science Education*, 24, 285-312. doi:10.1080/09500690110078914

\* Bayrhuber, H., Hauber, W., Kull, U. (Hrsg) (2010). *Linder Biologie Gesamtband*. Braunschweig: Schroedel.

Bodemer, D. & Faust, U. (2006). External and mental referencing of multiple representations. *Computers in Human Behavior*, 22, 27-42. doi:10.1016/j.chb.2005.01.005

Brückmann, M. (2009). Sachstrukturen im Physikunterricht. Ergebnisse einer Videostudie. Berlin: Logos.

Burger, J. (2001). Schülervorstellungen zu "Energie im biologischen Kontext". Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen. Dissertation, Universität Bielefeld, Bielefeld.

Carney, R. N. & Levin, J. R. (2002). Pictorial illustrations *still* improve students' learning from text. *Educational Psychology Review*, 14, 5-26. doi:10.1023/A:1013176309260

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46.

Cromley, J. G., Snyder-Hogan, L. E., Luciw-Dubas, U. A. (2010). Cognitive activities in complex science text and diagrams. *Contemporary Educational Psychology*, 35, 59-74. doi:10.1016/j.cedpsych.2009.10.002

Dimopoulos, K., Koulaidis, V., Sklaveniti, S. (2003). Towards an analysis of visual images in school science textbooks and press articles about science and technology. *Research in Science Education*, 33, 189-216. doi:10.1023/A:1025006310503

- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school - Empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19, 59-66. doi:10.1088/0031-9120/19/2/306
- Duit, R. (2014). Teaching and learning the physics energy concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (S. 67-85). New York, NY: Springer.
- \* Erdmann, U., Jungbauer, W., Müller, M. (Hrsg.) (2008). *Linder Biologie 1*. Braunschweig: Schroedel.
- Feinstein, A. R. & Cicchetti, D. V. (1990). High agreement but low kappa: I. The problems of two paradoxes. *Journal of Clinical Epidemiology*, 43, 543-549. doi:10.1016/0895-4356(90)90158-L
- \* Feldermann, D. (Hrsg.) (2005). *Linder Biologie Arbeitsbuch*. Braunschweig: Schroedel.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M. (2007). *Feynman-Vorlesungen über Physik. Band 1: Mechanik, Strahlung, Wärme*. München: Oldenbourg.
- Gropengießer, H. (2013). Schulbücher. In H. Gropengießer, U. Harms, U. Kattmann (Hrsg.), *Fachdidaktik Biologie* (S. 390-394). Hallbergmoos: Aulis.
- Härtig, H., Bernholt, S., Prechtel, H., Retelsdorf, J. (2015). Unterrichtssprache im Fachunterricht – Stand der Forschung und Forschungsperspektiven am Beispiel des Textverständnisses. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21, 55-67. doi:10.1007/s40573-015-0027-7
- Härtig, H., Kauertz, A., Fischer, H. E. (2012). Das Schulbuch im Physikunterricht. Nutzung von Schulbüchern zur Unterrichtsvorbereitung in Physik. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 65, 197-200.
- Heitzmann, A. & Niggli, A. (2010). Lehrmittel - ihre Bedeutung für Bildungsprozesse und die Lehrerbildung. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 28, 6-19.
- Helmke, A. & Schrader, F.-W. (2014). Angebot-Nutzungs-Modell der Wirkfaktoren pädagogischer Leistungen. In M. A. Wirtz (Hrsg.), *Dorsch – Lexikon der Psychologie* (S. 149-150). Bern: Huber.
- Ibáñez, M. & Ramos, M. C. (2004). Physics textbooks presentation of the energy-conservation principle in hydrodynamics. *Journal of Science Education and Technology*, 13, 267-276.

- Jin, H. & Anderson, C. W. (2012). A learning progression for energy in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 1149-1180. doi:10.1002/tea.21051
- Jin, H. & Wei, X. (2014). Using ideas from the history of science and linguistics to develop a learning progression for energy in socio-ecological systems. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (S. 157-173). New York, NY: Springer.
- Kalyuga, S., Chandler, P., Sweller, J. (1998). Levels of expertise and instructional design. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40, 1-17. doi:10.1518/001872098779480587
- Kattmann, U. (2015). *Schüler besser verstehen. Alltagsvorstellungen im Biologieunterricht*. Hallbergmoos: Aulis.
- KMK. (2004a). *Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004.*  
[https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf). Zugegriffen: 15. Mai 2014.
- KMK. (2004b). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004.*  
[https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf). Zugegriffen: 07. Apr 2015.
- KMK. (2015). *Übersicht zu Internetinformationen der Länder über zugelassene Lehr- und Lernmittel.* <http://www.kmk.org/fileadmin/pdf/Bildung/AllgBildung/2015-04-14-Fu-Pf-Abfrage-Lernmittel-Anlage.pdf>. Zugegriffen: 09. Dez 2015.
- \* Konopka, H.-P., Paul, A., Starke, A. (Hrsg.) (2009). *Linder Biologie 2*. Braunschweig: Schroedel.
- Lachmayer, S., Nerdel, C., Prechtel, H. (2007). Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 145-160.
- Lacy, S., Tobin, R. G., Wiser, M., Crissman, S. (2014). Looking through the energy lens: A proposed learning progression for energy in grades 3-5. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (S. 241-265). New York, NY: Springer.



- Landis, R. J. & Koch, G. K. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-174. doi:10.2307/2529310
- Levin, J. R., Anglin, G. J., Carney, R. N. (1987). On empirically validating functions of pictures in prose. In D. M. Willows, H. A. Houghton (Hrsg.), *The psychology of illustration: Basic research* (S. 51-85). New York, NY: Springer.
- Liu, Y. & Treagust, D. F. (2013). Content analysis of diagrams in secondary school science textbooks. In M. S. Khine (Hrsg.), *Critical analysis of science textbooks. Evaluating instructional effectiveness* (S. 287-300). Dordrecht: Springer.
- LP 2008: Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Biologie*.  
[http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/lehrplaene\\_download/gymnasium\\_g8/gym8\\_biologie.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/lehrplaene_download/gymnasium_g8/gym8_biologie.pdf). Zugegriffen: 06. Sep 2016.
- Maier, U., Kleinknecht, M., Metz, K., Bohl, T. (2010). Ein allgemeindidaktisches Kategoriensystem zur Analyse des kognitiven Potentials von Aufgaben. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 28, 84-96.
- Mayer, R. E. (1993). Illustrations that instruct. In R. Glaser (Hrsg.), *Advances in instructional psychology* (Bd. 4, S. 253-284). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mayer, R. E. (2011). Instruction based on visualizations. In R. E. Mayer, P. A. Alexander (Hrsg.), *Handbook of research on learning and instruction* (S. 427-445). New York, NY: Routledge Chapman & Hall.
- McDonald, C. V. (2016). Evaluating junior secondary science textbook usage in Australian schools. *Research in Science Education*, 46, 481-509. doi:10.1007/s11165-015-9468-8
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50, 162-188. doi:10.1002/tea.21061
- Nitz, S., Ainsworth, S. E., Nerdel, C., Prechtel, H. (2014). Do student perceptions of teaching predict the development of representational competence and biological knowledge? *Learning and Instruction*, 31, 13-22. doi:10.1016/j.learninstruc.2013.12.003

## Studie 1

- Nitz, S., Nerdel, C., Prechtel, H. (2012). Entwicklung eines Erhebungsinstruments zur Erfassung der Verwendung von Fachsprache im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 117-139.
- Nordine, J. (2016). What should students know about energy? In J. Nordine (Hrsg.), *Teaching energy across the sciences K-12* (S.17-38). Arlington, VA: National Science Teachers Association.
- Nordine, J., Krajcik, J., Fortus, D. (2011). Transforming energy instruction in middle school to support integrated understanding and future learning. *Science Education*, 95, 670-699. doi:10.1002/sce.20423
- Opitz, S. T., Harms, U., Neumann, K., Kowalzik, K., Frank, A. (2015). Students' energy concepts at the transition between primary and secondary school. *Research in Science Education*, 45, 691-715. doi:10.1007/s11165-014-9444-8
- Özkan, Ö., Tekkaya, C., Geban, Ö. (2004). Facilitating conceptual change in students' understanding of ecological concepts. *Journal of Science Education and Technology*, 13, 95-105. doi:10.1023/B:JOST.0000019642.15673.a3
- Roth, W.-M., Bowen, G. M., McGinn, M. K. (1999). Differences in graph-related practices between high school biology textbooks and scientific ecology journals. *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 977-1019. doi:10.1002/(SICI)1098-2736(199911)36:9<977::AID-TEA3>3.0.CO;2-V
- Schnotz, W. (1994). Wissenserwerb mit logischen Bildern. In B. Weidenmann (Hrsg.), *Wissenserwerb mit Bildern* (S. 95-147). Bern: Verlag Hans Huber.
- Schnotz, W. (2002). Commentary: Towards an integrated view of learning from text and visual displays. *Educational Psychology Review*, 14, 101-120. doi:10.1023/A:1013136727916
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13, 141-156. doi:10.1016/s0959-4752(02)00017-8
- Slough, S. W. & McTigue, E. (2013). Development of the graphical analysis protocol (GAP) for eliciting the graphical demands of science textbooks. In M. S. Khine (Hrsg.), *Critical analysis of science textbooks. Evaluating instructional effectiveness* (S. 17-30). Dordrecht: Springer.
- Slough, S. W., McTigue, E. M., Kim, S., Jennings, S. K. (2010). Science textbooks' use of graphical representation: A descriptive analysis of four sixth grade science texts. *Reading Psychology*, 31, 301-325. doi:10.1080/02702710903256502

- Stern, L. & Roseman, J. E. (2004). Can middle-school science textbooks help students learn important ideas? Findings from project 2061's curriculum evaluation study: Life science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41, 538-568. doi:10.1002/tea.20019
- Sweller, J. (2005). The Redundancy Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 159-167). New York, NY: Cambridge University Press.
- Trumper, R. (1991). Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept – part two. *International Journal of Science Education*, 13, 1-10. doi:10.1080/0950069910130101
- Tsui, C.-Y. & Treagust, D. F. (2013). Introduction to multiple representations: their importance in biology and biological education. In D. F. Treagust, C.-Y. Tsui (Hrsg.), *Multiple representations in science education* (S. 3-18). Dordrecht: Springer.
- Wang, H. A. (1998). *Science textbook studies reanalysis: Teachers "friendly" content analysis methods?* Paper presented at the annual meeting of the National Association for Research In Science Teaching, San Diego, CA. <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED423142.pdf>. Zugegriffen: 01. Sep 2016.
- Weidenmann, B. (2004). Bilder zur Wissenskommunikation. In G. Reinmann, H. Mandl (Hrsg.), *Psychologie des Wissensmanagements. Perspektiven, Theorien und Methoden* (S. 300-309). Göttingen: Hogrefe.
- Wirtz, M. & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität*. Göttingen: Hogrefe.
- Wüsten, S., Schmelzing, S., Sandmann, A., Neuhaus, B. (2010). Sachstrukturdiagramme – Eine Methode zur Erfassung inhaltspezifischer Merkmale der Unterrichtsqualität im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 23-39.

## 4.10 Anhang

### 4.10.1 Onlinematerial 1: Auswahl der Analyseeinheiten

Die Untersuchung wurde in eine Fließtextanalyse und in eine Aufgabenanalyse gegliedert. Im Rahmen der Fließtextanalyse wurden Texte und Abbildungen der Unterkapitel einer inhaltlichen und formalen Analyse unterzogen. Bei der Aufgabenanalyse wurden die Aufgabenstellungen sowie die Texte und Abbildungen, auf die sich die Aufgaben bezogen, inhaltlich und formal betrachtet.

Die Auswahl der zu analysierenden energiebezogenen Texte, Abbildungen und Aufgaben erfolgte in vier Schritten. Zunächst wurde festgelegt, dass nur solche Kapitel in der Lehrbuchanalyse betrachtet werden, in denen (1) ökologische oder stoffwechselbezogene Inhalte im Vordergrund stehen und (2) Energie explizit erwähnt wird. In diesen Themenbereichen wird Energie als zentrales Konzept auf verschiedenen Systemebenen betrachtet. Tabelle 4-5 zeigt die entsprechende Kapitelauswahl.

Tabelle 4-5

*Auswahl der zu analysierenden Kapitel*

Lehrbuch	Kapitel	Analyse
Linder Biologie 1	Grundlagen der Biologie	
	Körperbau und Lebensweise von Säugetieren	
	Wildlebende Säugetiere in ihrem Lebensraum	x
	Bau und Leistungen des menschlichen Körpers	x
	Sexualität des Menschen	
	Wirbeltiere in ihrem Lebensraum	x
Linder Biologie 2	Blütenpflanzen: Bau und Funktion	x
	Grundlagen der Biologie	
	Lebewesen bestehen aus Zellen	x
	Wirbellose Tiere	
	Bau und Leistungen von Pflanzen	x
	Ökosysteme	x
	Natur- und Umweltschutz	x
	Bau und Leistungen des menschlichen Körpers	x
	Infektionseinheiten und Immunsystem	
	Sexualität, Fortpflanzung und Entwicklung des Menschen	
	Grundlagen der Vererbung	
Linder Biologie Gesamtband	Verhalten	
	Evolution	
	Biosysteme und ihre Erforschung	
	Zellbiologie	
	Stoffwechselbiologie	x
	Genetik	
Immunbiologie		

*Auswahl der zu analysierenden Kapitel*

Lehrbuch	Kapitel	Analyse
	Neurobiologie	
	Ökologie	x
	Evolution	

*Anmerkung.* x = Kapitel wurde analysiert.

Die Kapitel bestehen aus Unterkapiteln, die durchschnittlich 1,6 bis 1,8 Seiten umfassen. In einem zweiten Schritt wurden die Unterkapitel ausgewählt, in denen das Wort *Energie* oder ein dazugehöriges Kompositum in Text oder Abbildung mindestens einmal vorhanden ist.

Hinweis: Linder Biologie 1 und Linder Biologie 2: „Zusammenfassung“, „Wissen kompakt“ „Streifzüge“ wurden als Unterkapitel behandelt und in der Fließtextanalyse analysiert. „Wissen vernetzt“, „Methode“ und „Aufgaben und Versuche“ wurden als Aufgabenkapitel behandelt und nur bei der Aufgabenanalyse berücksichtigt.

Linder Biologie Gesamtband: „Wissen vernetzt“ wird zur „Zusammenfassung“ gezählt. „Wissen vernetzt / Zusammenfassung“, „Wie Wissen entsteht“, „Wie Wissen angewendet wird“ wurden als Unterkapitel behandelt. „Aufgaben“ und „Praktische Aufgaben“ wurden als Aufgabenkapitel behandelt und nur bei der Aufgabenanalyse berücksichtigt.

Innerhalb der Unterkapitel wurden in einem dritten Schritt die energiebezogenen Texte und Abbildungen für die Fließtextanalyse ausgewählt. Es wurden nur die Repräsentationen analysiert, in denen das Wort *Energie* oder verwandte Wörter vorkommen (explizite Thematisierung) oder Energie implizit thematisiert wird, indem einer der vier Energieaspekte benannt, beschrieben oder bildlich dargestellt wird. Der Energiebezug einer Abbildung kann sich aus dem Zusammenhang mit einer Textstelle, die Energie thematisiert, ergeben. Abbildungen, auf die verwiesen wird, die sich aber nicht in dem ausgewählten Unterkapitel befinden, wurden nicht in der Fließtextanalyse analysiert. Wenn Unterabbildungen mit eigenen Nummern oder Buchstaben ausgewiesen sind, wurden diese einzeln analysiert.

Der vierte Schritt stellte die Auswahl der energiebezogenen Aufgaben für die Aufgabenanalyse dar. Innerhalb der ökologischen bzw. stoffwechselbiologischen Kapitel wurden nur die Aufgaben analysiert, in denen das Wort *Energie* oder ein dazugehöriges Kompositum in Aufgabenstamm und/oder in der Musterlösung der Lösungsbände vor-

kommt. Nennungen in der Überschrift der Aufgaben oder in zu der Aufgabe gehörenden Abbildungen wurden berücksichtigt.

#### 4.10.2 Onlinematerial 2: Kategoriensystem mit Erläuterungen

Tabelle 4-6

##### *Kategoriensystem und Anwendungsbereich der Kategorien*

	Kategorie	Beschreibung	Anwendung
Inhaltlich	Definition von Energie	gegeben oder nicht gegeben	F
	Alternativvorstellungen	Darstellung oder Aufgreifen von Alternativvorstellungen	F, A
	Thematisierte Aspekte des Energiekonzepts	Form/Speicher, Umwandlung/Übertragung, Entwertung, Erhaltung	F, A
Formal	Abbildungstyp	Tabelle, Foto usw.	F, A
	Gestaltung der Abbildungen	Beschriftung, Untertitel	F, A
	Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text	Dekoration, Repräsentation, Organisation/Interpretation, Zusatz	F
	Relation von Abbildung und Text	Schwach redundant, stark redundant oder ergänzend	F
	Funktion der Abbildung für die Aufgabe	Dekoration, Vorlage, Informationsbereitstellung	A
	Anforderungen der Aufgabe	Informationsentnahme, Konstruktion, Integration, Fachsprache	A

*Anmerkung.* F = Anwendung der Kategorie bei der Analyse des Fließtextes einschließlich seiner Abbildungen, A = Anwendung der Kategorie bei der Aufgabenanalyse.

#### **Erläuterung der Kategorien**

##### **Kategorie: Definition von Energie**

Unter einer Definition von Energie werden prägnante Aussagesätze über die generelle Konzeptualisierung verstanden, z. B. „Energie ist ein berechenbares Maß für die Ordnung in einem System.“, „Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.“ „Energie ist die Fähigkeit, Veränderungen zu erzeugen.“, „Energie ist ein Stoff, den man speichern kann.“

### **Kategorie: Alternativvorstellungen**

Die Texte und Abbildungen werden auf fachliche Fehler und die Darstellung von Alternativvorstellungen überprüft. „Energieverbrauch“ stellt keine Alternativvorstellung dar (beschrieben wird hier eher die Wertigkeit von Energie; dies kennen die Schülerinnen und Schüler vom „Wasserverbrauch“). „Energieverlust“ ist eine Alternativvorstellung, es sei denn, es wird ein Systembezug hergestellt.

Bei dem Aufgreifen einer Alternativvorstellung wird diese beschrieben und negiert. Bsp.: „Viele Menschen glauben, dass die im Körper aus der Nahrung aufgebaute organische Substanz genauso viel Energie enthält, wie in der Nahrung enthalten war. Allerdings ist es so, dass bei jeder Energieumwandlung Wärme abgegeben wird...“.

### **Kategorie: Thematisierte Aspekte des Energiekonzepts**

Bei der Zuordnung zu der Kategorie *Thematisierte Aspekte des Energiekonzepts* sind Mehrfachzuordnungen möglich. Es wird zwischen expliziten und impliziten Thematisierungen unterschieden.

#### **(1) Energieform**

Die Thematisierung der Energieform gilt als **explizit**, wenn eine Energieform oder ein Energieträger/-speicher/-quelle als solche/r benannt wird. Bei Abbildungen handelt es sich um eine explizite Thematisierung, wenn

- a) eine Energieform oder ein Energieträger/-speicher/-quelle als solche/r benannt wird
- oder
- b) das Dargestellte durch den Text einen expliziten Energiebezug erhält (z. B. wenn Sonnenenergie im Text beschrieben wird, in der Abbildung wird diese durch einen Pfeil dargestellt; Glucose wird als Energieträger im Text benannt und dann in einer Abbildung dargestellt).

Beispiele: „chemische Energie“  
 „energiereiche Stoffe“  
 „Aus Nahrung bezieht der Mensch Energie.“  
 Angabe von kcal oder kJ

Bei einer **impliziten** Thematisierung wird kein direkter Zusammenhang zu Energie hergestellt, sondern nur Energieträger/-speicher/-quellen genannt oder dargestellt, z. B. „Sonne“, „Nahrung“, „Temperatur“, „Fett“ o.ä.

Beispiel: „Der Mensch braucht Nahrung zum Wachsen.“

## (2) Energieumwandlung/-übertragung

Die Thematisierung von Energieumwandlung/ -übertragung gilt als **explizit**, wenn das Wort Energie oder Komposita in Zusammenhang mit einem Wort aus dem Bereich Übertragung, Umwandlung, Transport, Gewinn, Aufbau/Synthese, Abbau, Aufwand, Umsatz o.ä. steht. Der Zusammenhang kann sich über mehrere Sätze erstrecken. In Abbildungen können solche expliziten Thematisierungen dann z. B. durch Pfeile dargestellt werden.

Beispiele: „Energiereiche Stoffe werden an den Muskel weitergegeben.“

„Chemische Energie wird zu Bewegungsenergie.“

„Wärmeenergie wird abgegeben“

Grenzwertig explizit: „Energie wird für Bewegungen genutzt.“

Eine **implizite** Thematisierung liegt vor, wenn das Wort *Energie* oder Komposita nicht genannt oder dargestellt werden, es sich aber trotzdem um Energieumwandlungs- oder Übertragungsprozesse handelt.

Beispiele: „Wärme wird abgegeben.“

„Konsumenten“, „Produzenten“, „Isolierung“, „Biogasanlage“, „Photosynthese“, „Zellatmung“ (aber z. B. „Zellatmung liefert Energie für Bewegungen“ = explizit)

Bei Abbildungen: z. B. Foto eines Läufers oder einer Biogasanlage

Schlagworte wie „Energieeinsatz“, „Energiekosten“, „Energiegewinnung“ und „Energieverbrauch“ sind lediglich implizite Thematisierungen, solange sie nicht näher erläutert werden.

Beispiele: „Der Stoff wird unter Energieeinsatz transportiert.“

„Mais wird zur Energiegewinnung genutzt.“

„Zellen benötigen Glucose zur Energiegewinnung.“

Aber: „Zellen betreiben Zellatmung zur Energiegewinnung“ ist eine explizite Thematisierung, da „Energie“ zusammen mit einem Energieumwandlungsprozess (Zellatmung) genannt wird.



### (3) Energieentwertung

Die Thematisierung von Energieentwertung gilt als **explizit**, wenn deutlich gemacht wird, dass Energie in Form von (Ab-)Wärme für das System verloren geht bzw. sich der Nutzen der Energie verringert.

Beispiele: „Die Energie geht als Wärme für den Organismus verloren.“  
 „Wärmeenergie kann nicht mehr für weitere Energieumwandlungen genutzt werden.“

Bloße Wärmeabgabe stellt eine **implizite** Thematisierung dar (ist aber oft gleichzeitig explizit oder implizit Energieübertragung, s.o.).

Beispiele: „Die Wärmeenergie wird über die Haut abgegeben.“  
 „Die Wärme wird über die Haut abgegeben.“  
 „Durch Wärmeabgabe nimmt die Entropie in der Umgebung zu.“

Wenn der Text eine explizite Nennung aufweist, genügt bei einer Abbildung ein abgehender Wärmepfeil für die explizite Darstellung, ansonsten zeigt auch das Bild nur eine implizite Darstellung.

### (4) Energieerhaltung

Die Thematisierung von Energieerhaltung ist **explizit**, wenn erklärt wird, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann bzw. dass der Betrag der Energie vor und nach einer Energieumwandlung gleich ist.

Beispiele: „Es gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik.“  
 „Es gilt der Energieerhaltungssatz.“  
 „Energie kann nicht vernichtet werden.“

**Implizit** wird Energieerhaltung thematisiert, wenn sie umschrieben wird:

Beispiel: „[...] , also muss die Energiedifferenz in Form von Wärme abgegeben worden sein.“ (Dies impliziert, dass die Energie immer noch da ist.)

In Abbildungen kann Energieerhaltung z. B. dadurch verdeutlicht werden, dass abgehende Wärmepfeile in der Atmosphäre enden. Ob Bilder eine explizite oder implizite Thematisierung darstellen, richtet sich nach der Thematisierung in dem dazugehörigen Text.

Darüber hinaus gilt für alle Energieaspekte: Sobald eine explizite Nennung auftritt, ist der gesamte Text bzw. die Abbildung in diesem Aspekt explizit, sodass implizite Nennungen dieses Aspektes nicht mehr berücksichtigt werden. Untertitel und Beschriftungen werden als Teil der Abbildung aufgefasst.

### **Kategorie: Abbildungstyp**

In der Kategorie *Abbildungstyp* sind Mehrfachzuordnungen möglich, z. B. bei einem Flussdiagramm, in das realistische Zeichnungen eingefügt sind. Es wird zwischen folgenden Abbildungstypen unterschieden: Foto, realistische Zeichnung, Schemazeichnung, Achsendiagramm (Punktdiagramm, Kurven- oder Liniendiagramm und Säulendiagramm), Flussdiagramm (Kreislauf und Sequenz), Sonstige (Kreisdiagramme und spezielle biologische Diagramme wie z. B. Energiepyramiden).

### **Kategorie: Gestaltung der Abbildung**

In dieser Kategorie wird erhoben, ob die Abbildungen einen Untertitel und/oder eine Beschriftung aufweisen. Bei Aufgaben kann der Untertitel einer Abbildung ein längerer Text sein, der in den Aufgabenkontext einführt. Als Beschriftung zählt textlicher Inhalt jeder Art außerhalb des Untertitels, also z. B. auch die Beschriftung von Achsen. Auch in die Abbildung eingefügte Zahlen oder Buchstaben, die im Untertitel näher erläutert werden, werden als Beschriftung gewertet.

### **Kategorie: Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text**

**Dekoration:** Abbildungen mit Dekorations- / Motivationsfunktion sind text-irrelevante Abbildungen, die keine entscheidenden Textinformationen darstellen. Sie leisten keinen Beitrag zum Verständnis des Textes, d.h., sie könnten auch weggelassen werden, ohne das Verständnis zu beeinträchtigen.

**Repräsentation:** Abbildungen mit Repräsentationsfunktion konkretisieren den Text, indem sie ein wesentliches Element (z. B. Handelnde, Objekte) aus diesem zeigen.

**Organisation/Interpretation:** Abbildungen mit Organisations-/Interpretationsfunktion dienen dazu, das Verständnis des Textes zu erleichtern, indem sie z. B. die Beziehungen zwischen einzelnen Aspekten des Textes darstellen oder schwierige Textpassagen verbildlichen.

**Zusatz:** Repräsentationen mit Zusatzfunktion dienen dazu, Zusatzinformationen bzw. Beispiele mit Details darzustellen, die nicht im Text genannt werden.

### **Kategorie: Relation von Abbildung und Text**

Die Kategorie Relation zeigt den Grad der inhaltlichen Redundanz von Abbildungs- und Textinformation. Die Informationen der Untertitel werden mit zur Abbildung gezählt.

**Stark redundant:** Eine stark redundante Relation liegt vor, wenn alle Informationen, die in der Abbildung dargestellt sind, auch im Text vorhanden sind.

**Schwach redundant:** Eine schwach redundante Relation liegt vor, wenn Text und Abbildung zum Teil dieselben und zum Teil alleinige Informationen beinhalten.

**Ergänzend:** Die ergänzende Relation bedeutet, dass keine substanzielle Überlappung zwischen den in den beiden Repräsentationen präsentierten Informationen besteht.

### **Kategorie: Funktion der Abbildung für die Aufgabe**

**Dekorativ:** Die Abbildung hat lediglich eine dekorative oder motivationale Funktion für die Aufgabe. Die Aufgabe kann genauso gut ohne die Abbildung gelöst werden.

**Vorlage:** Die Abbildung stellt ein Beispiel für die Erstellung einer eigenen Abbildung dar oder die Ergänzung der Abbildung wird gefordert.

**Informationsbereitstellung:** Die Abbildung dient der Bereitstellung Informationen, die zur Lösung der Aufgabe notwendig sind.

### **Kategorie: Anforderungen der Aufgabe**

**Informationsentnahme:** Die Aufgabe erfordert, dass der Lernende Informationen aus einem bestimmten Text oder einer bestimmten Abbildung entnimmt. Der Text kann auch ein Informationstext sein, der zum Aufgabenstamm gehört (die Aufgabenstellung selbst wird nicht als Text gewertet). Besonderheit im Linder Arbeitsbuch: Es gibt bei jeder Aufgabe Verweise zu den Lehrbuchseiten. Diesen wird aber nicht nachgegangen, d. h., die Kategorie *Informationsentnahme* wird nicht gegeben, auch wenn die benötigte Information im Lehrbuch zu finden ist. In der Regel besitzen die Aufgaben selbst längere Informationstexte.

**Konstruktion:** Diese Kategorie wird in die Teilbereiche *Ergänzen* und *Eigenkonstruktion* gegliedert.

*Ergänzen:* Die Aufgabe erfordert, dass der Lernende eine vorhandene Repräsentation ergänzt. Darunter fällt z. B. das Beschriften einer vorhandenen Abbildung oder das Ausfüllen eines Lückentextes oder einer Tabelle. Es wird erfasst, welcher Repräsentationstyp ergänzt werden soll.

*Eigenkonstruktion:* Die Aufgabe erfordert, dass der Lernende Informationen auf eine definierte Art und Weise darstellt, z. B. indem er eine Tabelle erstellt. Es wird erfasst, welcher Repräsentationstyp konstruiert werden soll.

**Integration:** Die Aufgabe erfordert zwingend die Verknüpfung von Informationen aus zwei oder mehr Repräsentationen. Dabei kann es sich um eine Verknüpfung von

- (1) Text und Text (dabei kann einer der Texte auch ein ausführlicherer Informationstext sein, der zum Aufgabenstamm gehört),
- (2) Abbildung und Abbildung oder
- (3) Text und Abbildung handeln.

Hinweis: Die Aufgabe „Erläutere Abbildung Nummer 1“ bezieht sich auf eine Abbildung. Häufig können Abbildungen nur mit dem Verständnis eines biologischen Phänomens erläutert werden, welches in diesem oder in vorangegangenen Kapiteln erklärt wurde. Die Verwendung des Textes ist aber nicht zwingend notwendig (die benötigten Hintergrund-

informationen könnten auch ohne das Schulbuch erarbeitet worden sein). Deshalb wird diese Aufgabe als *InformationSENTnahme* und nicht als *Integration* gewertet.

**Aufgaben zu Fachsprache:** Über die Kategorien *InformationSENTnahme*, *Konstruktion* und *Integration* hinaus wird untersucht, ob die Aufgabe den Umgang mit Fachsprache konkret thematisiert, indem sie das Definieren / das Erläutern eines Fachbegriffs oder die kritische Betrachtung von Begrifflichkeiten erfordert.

Alle aufgabenbezogenen Kategorien werden unter Berücksichtigung des Erwartungshorizontes der Musterlösung codiert.

### 4.10.3 Onlinematerial 3: Ergebnisse des Interratings

Der zweite Rater kategorisierte je zufällig ausgewählte 25 % der energiebezogenen Texte, Abbildungen und Aufgaben. Die Ergebnisse des Interratings zeigt Tabelle 4-7.

Tabelle 4-7

#### *Ergebnisse des Interratings*

	Kategorie	Prozentuale Übereinstimmung	Cohens Kappa	Bemerkung
Fließtextanalyse	Definition	96 %	$\kappa = -0,02$	Kappa-Paradox
	Alternativvorstellung dargestellt	93 %	$\kappa = -0,03$	Kappa- Paradox
	Alternativvorstellung aufgegriffen und negiert	100 %	$\kappa = 1$	
	Energieform (implizit/explicit/nicht thematisiert)	81 %	$\kappa = 0,70$	
	Energieumwandlung (implizit/explicit/nicht thematisiert)	77 %	$\kappa = 0,66$	
	Energieentwertung (implizit/explicit/nicht thematisiert)	91 %	$\kappa = 0,72$	
	Energieerhaltung (implizit/explicit/nicht thematisiert)	94 %	$\kappa = 0,71$	
	Abbildungstyp	89 %	$\kappa = 0,86$	
	Gestaltung der Abbildung: Untertitel	100 %	$\kappa = 1$	
	Gestaltung der Abbildung: Beschriftung	100 %	$\kappa = 1$	
	Funktion der Abbildung in Bezug auf den Text	88 %	$\kappa = 0,81$	
	Relation von Abbildung und Text	75 %	$\kappa = 0,57$	

## Studie 1

### *Ergebnisse des Interratings*

	Kategorie	Prozentuale Überein- stimmung	Cohens Kappa	Bemerkung
Aufgaben- analyse	Alternativvorstellung dargestellt	97 %	$\kappa = 0$	Kappa- Paradox
	Alternativvorstellung aufgegriffen und negiert	100 %		kommt im unter- suchten Material nicht vor
	Energieform (thematisiert/nicht themati- siert)	81 %	$\kappa = 0,40$	Kappa- Paradox
	Energieumwandlung (thematisiert/nicht thematisiert)	75 %	$\kappa = 0,27$	Kappa- Paradox
	Energieentwertung (implizit/explicit/nicht thematisiert)	88 %	$\kappa = 0,49$	Kappa- Paradox
	Energieerhaltung (thematisiert/nicht the- matisiert)	100 %		kommt im unter- suchten Material nicht vor
	Abbildungstyp	90 %	$\kappa = 0,88$	
	Gestaltung der Abbildung: Untertitel	89 %	$\kappa = 0$	Kappa- Paradox
	Gestaltung der Abbildung: Beschriftung	97 %	$\kappa = 0,91$	
	Funktion der Abbildung für die Aufgabe	100 %	$\kappa = 1$	
	Informationsentnahme	84 %	$\kappa = 0,60$	Kappa- Paradox
	Konstruktion – Ergänzen	100 %		kommt im unter- suchten Material nicht vor
	Konstruktion – Eigenkonstruktion	100 %	$\kappa = 1$	
	Integration	84 %	$\kappa = 0,64$	
	Fachsprache	100 %		kommt im unter- suchten Material nicht vor

Die Tabellen 4-8 bis 4-15 zeigen die Kreuztabellen der Kategorien mit Kappa-Paradox.

Tabelle 4-8

*Fließtextanalyse: Definition*

		Rater 2		
		gegeben	nicht gegeben	$\Sigma$
Rater 1	gegeben	0	1	1
	nicht gegeben	2	67	69
	$\Sigma$	2	68	70

*Anmerkung:* Die positiven Urteile wurden einer erneuten Prüfung unterzogen. Es gibt keine Definition im Sinne einer generellen Konzeptualisierung.

Tabelle 4-9

*Fließtextanalyse: Alternativvorstellung dargestellt*

		Rater 2		
		trifft zu	trifft nicht zu	$\Sigma$
Rater 1	trifft zu	0	3	3
	trifft nicht zu	2	65	67
	$\Sigma$	2	68	70

Tabelle 4-10

*Aufgabenanalyse: Alternativvorstellung dargestellt*

		Rater 2		
		trifft zu	trifft nicht zu	$\Sigma$
Rater 1	trifft zu	0	0	0
	trifft nicht zu	1	31	32
	$\Sigma$	1	31	32

Tabelle 4-11

*Aufgabenanalyse: Energieform*

		Rater 2		
		thematisiert	nicht thematisiert	$\Sigma$
Rater 1	thematisiert	23	5	28
	nicht thematisiert	1	3	4
	$\Sigma$	24	8	32

Studie 1

Tabelle 4-12

*Aufgabenanalyse: Energieumwandlung*

		Rater 2		
		thematisiert	nicht thematisiert	$\Sigma$
Rater 1	thematisiert	21	5	26
	nicht thematisiert	3	3	6
	$\Sigma$	24	8	32

Tabelle 4-13

*Aufgabenanalyse: Energieentwertung*

		Rater 2			
		explizit thematisiert	implizit thematisiert	nicht thematisiert	$\Sigma$
Rater 1	explizit thematisiert	0	0	0	0
	implizit thematisiert	1	2	1	4
	nicht thematisiert	0	2	26	28
	$\Sigma$	1	4	27	32

Tabelle 4-14

*Aufgabenanalyse: Gestaltung der Abbildung – Untertitel*

		Rater 2		
		trifft zu	trifft nicht zu	$\Sigma$
Rater 1	trifft zu	33	4	37
	trifft nicht zu	0	0	0
	$\Sigma$	33	4	37

Tabelle 4-15

*Aufgabenanalyse: Informationsentnahme*

		Rater 2		
		trifft zu	trifft nicht zu	$\Sigma$
Rater 1	trifft zu	21	2	23
	trifft nicht zu	3	6	9
	$\Sigma$	24	8	32



## 5 STUDIE 2

### Enhancing Conceptual Knowledge of Energy in Biology with Incorrect Representations<sup>14</sup>

#### Abstract

Energy is an important concept in all natural sciences, and a challenging one for school science education. Students' conceptual knowledge of energy is often low and misconceptions persist. Educational research in science and mathematics shows that learning through depictive representations and learning from errors, based on the theory of negative knowledge, can potentially foster students' knowledge of abstract concepts such as energy. Thus, here we propose an instructional approach that combines these two strategies to foster conceptual knowledge of energy. It involves inserting an error, in a biological energy flow diagram, that we derived from two prevalent misconceptions about energy: that plants get some of their energy from the soil and energy cycles in an ecosystem. The approach's effect on students' conceptual knowledge of energy was tested in an intervention study with pre-post design and 304 ninth-grade students ( $M = 14.79$  years). The results indicate that learning with an incorrect diagram potentially supports the acquisition of conceptual knowledge of energy more than learning with a correct diagram. Larger gains in conceptual knowledge were achieved by students who successfully identified and explained the error. Thus, the proposed instructional approach holds promise for improving energy teaching.

#### Keywords

learning from errors, representation, energy flow, ecosystem, diagram, secondary

---

<sup>14</sup> Der finale Artikel ist erschienen: Wernecke, U., Schütte, K., Schwanewedel, J. & Harms, U. (2018). Enhancing Conceptual Knowledge of Energy in Biology with Incorrect Representations. *CBE – Life Sciences Education*, 17, 17:ar5. doi:10.1187/cbe.17-07-0133 <http://www.lifescied.org/content/17/1/ar5.full>

## **5.1 Introduction**

Energy is a fundamental conceptual element of all natural phenomena, and thus extremely important in all natural sciences. It also has enormous societal relevance. For example, switching from fossil to renewable energy supplies is crucial for future sustainability, and public acceptance is essential for this transition (World Energy Council, 2015). Therefore, energy is an important topic in both science and general education at school. However, due to its abstractness, teaching and learning the energy concept is highly challenging. In recent decades, various studies have shown that students have limited knowledge of energy (e.g., Duit, 1984; Opitz, Harms, Neumann, Kowalzik, & Frank, 2015; Trumper, 1993) and even advanced students maintain multiple misconceptions (Chabalengula, Sanders, & Mumba, 2012; Liu & Tang, 2004). Thus, there is a clear need for effective instructional tools for fostering development of a sound energy concept.

Such tools could incorporate depictive representations, which can help students to grasp abstract concepts by visualizing phenomena that cannot be seen by the human eye (Ryoo and Linn, 2012). Incorporation of errors could also be potentially beneficial, according to the theory of negative knowledge, which holds that reflecting on errors can lead to a more comprehensive concept of a learning content (Oser, Hascher, & Spychiger, 1999; Oser, Nöpflin, Hofer, & Aerni, 2012). Moreover, educational researchers have demonstrated that reflecting on errors in descriptive representations (i.e., texts and equations) can improve knowledge acquisition (e.g., Booth, Lange, Koedinger, & Newton, 2013). Thus, as reported here, we have developed and tested a tool that is intended to foster conceptual knowledge of the abstract scientific concept energy, based on use of a diagram with a deliberate error rooted in common misconceptions. To elucidate the rationale of our empirical study, in the following section we describe its three central theoretical pillars: the energy concept, learning through representations, and learning from errors.

## **5.2 Theoretical Background**

### **5.2.1 The Energy Concept**

As mentioned above, despite being primarily a physical concept, energy is highly important in all natural sciences and many other disciplines (e.g., economics), but here we primarily consider its importance in biological contexts, particularly ecological processes. Diverse biological topics can only be explained by applying the energy concept, for in-

stance energy is frequently considered when teaching nutrition, photosynthesis, muscle movement, and ecosystems (Harms, 2016; Needham, 2014). The discipline of biology deals with open systems, which follow the physical laws of thermodynamics (Stoy, 2010). In an ecosystem, energy can be transferred to and from the surrounding environment, and although energy cannot be directly measured, the energetic changes in a system can. Disregarding chemosynthesis, the sun is the ultimate energy source for any ecosystem. Its radiation is used by plants to synthesize biological molecules by photosynthesis. That is why plants are the basis of food chains, which show sequences of trophic levels (groupings of organisms based on their main source of nutrition). Through feeding relationships, chemical energy is transferred from one trophic level to the next. This transfer of chemical energy, however, accounts for only ca. 10% of the energy (Kozlovsky, 1968), which is regarded as the reason why food chains rarely encompass more than five links (Trussell, Ewanchuk, & Matassa, 2006). The reason for the inefficiency of energy transfer through food chains is that every energy transformation in an organism generates thermal energy, which is released to the environment. Moreover, some chemical energy is passed to decomposers, for example, in faeces and food waste. Energy cannot be recycled, so a continuous energy input from the sun is needed to sustain the system.

Various studies have shown that students have limited knowledge of the energy concept (e.g., Duit, 1984; Opitz et al., 2015; Trumper, 1993), and particularly principles of energy transfer (e.g., Lin & Hu, 2003; Sadler et al., 2013). Moreover, students have been found to maintain misconceptions about the energy sources of an ecosystem. A frequent and resistant misconception is that plants get their food or energy from the soil. This belief, which was also disseminated among philosophers and scientists before photosynthesis was discovered (Métoui, Matoussi, & Trudel, 2016), is frequently entertained by lower and upper secondary school students (e.g., Boyes & Stanisstreet, 1991; Burger, 2001), and even teachers (Beals, McNall Krall, & Wymer, 2012). Boyes and Stanisstreet (1991) found that most first-year undergraduate science students surveyed in the UK knew that plants get energy from the sun, but they often named water, soil, or air as additional sources of energy. Similarly, they often stated that animals get their energy from food, but also from air and water. It seems likely that these students could not distinguish between energy supply and other requirements of plants and animals, which are essential for living, but do not supply energy (Boyes & Stanisstreet, 1991). Özay and Öztaş (2003) drew the same conclusion from a questionnaire-based survey of Turkish ninth graders' ideas. This is consistent with the finding of Leach, Driver, Scott, and Wood-Robinson

(1996) that 16-year old students in England frequently used the terms energy, matter, food, and nutrients interchangeably in the context of ecosystems. DeBoer et al. (2014) found a similar lack of distinction between matter and energy when American students were asked to construct diagrams: some students included the sun in a food web diagram that was supposed to show the transfer of matter, while others did not include the sun in an energy flow diagram (DeBoer et al., 2014). Both students and teachers have been found to believe that energy can be recycled (e.g., by decomposers) and reused (e.g., by plants) in an ecosystem (Beals et al., 2012; Burger, 2001; Lancor, 2014), which also shows confounding of energy flows and matter cycles. Altogether, there is strong evidence that energy is a critical and challenging concept for comprehending fundamental ecological processes. We applied these insights to formulate an error based on common misconceptions to incorporate in our instructional tool (with a depictive representation showing characteristic energy flows through a forest ecosystem) intended to foster conceptual knowledge of energy.

### **5.2.2 Learning through Representations**

Instruction without using representations (signs that stand for something else) is impossible. Language (spoken or written) and pictures are both external representations, but based on different sign systems. Descriptive representations (texts and mathematical equations) consist of symbols, whereas depictive representations consist of iconic signs (Schnotz, 2001). Photographs and drawings are realistic depictive representations, whereas graphs, diagrams, and tables are logical depictive representations (Schnotz, 2001). The specific function of depictive representations in science is to visualize phenomena that cannot be seen by the human eye, especially processes on a molecular or cellular level and abstract concepts (Kozma & Russell, 2005; Tsui & Treagust, 2013; Winn, 1989). For example, logical representations are regarded as helpful for depicting energy transfer in a food chain by making the abstract process more concrete (Winn, 1989). More recently, intervention studies have provided evidence that depictive representations can help students to grasp aspects of the energy concept. For example, Van Heuvelen and Zou (2001) found that bar chart representations of work-energy processes help university students to understand energy conservation in physics. Similarly, Ryoo and Linn (2012) showed that dynamic and static depictive representations promote middle school students' understanding of energy transformations in photosynthesis. However, as yet we have little evidence

about the particular features of representations used in the science classroom that foster understanding of energy.

An analysis of the representation of energy in biology textbooks revealed that flow diagrams with arrows indicating sequences are frequently used to illustrate energetic aspects of photosynthesis, matter cycles, and ecological energy flows (Wernecke, Schwanewedel, Schütte, & Harms, 2016). Their abstractness is often lessened through combination with more concrete elements such as schematic drawings, realistic drawings, or photographs. Moreover, diagrams should include a caption to give an interpretative context (Ametller & Pintó, 2002).

Of course, good representations (of anything) are not sufficient. A requirement for comprehension of a representation is cognitive processing. According to cognitive psychology, the individual builds up an internal, mental representation of the content and connects it with prior knowledge (e.g., Mayer, 2011). Cromley, Snyder-Hogan, and Luciw-Dubas (2010) investigated students' cognitive activities while learning with text and complex biological diagrams. They found that students used a higher proportion of high-level strategies and a lower proportion of low-level strategies when processing diagrams than when processing text. High-level activity is associated with increased comprehension. However, learners often just skim over depictive representations and thus fail to exploit their full potential (Cromley et al., 2010). In order to counteract superficial processing, learners should be given picture-orientated tasks (Weidenmann, 1989).

Kragten, Admiraal, and Rijlaarsdam (2015) found evidence that prior knowledge is crucial for solving tasks related to flow diagrams<sup>15</sup> in biology. Therefore, prior knowledge should be activated when students are supposed to learn with such diagrams. Another requirement for learning from diagrams is sufficient knowledge of diagrammatic conventions, as shown by Cheng & Gilbert (2015) specifically for biological flow diagrams. The American middle school students surveyed by DeBoer et al. (2014) reportedly had little difficulty interpreting basic graphical representations of ecosystems like flow diagrams. However, two groups (Gotwals and Songers, 2010; Barman, Griffiths, and Okebukola, 1995) found that when middle and high school students in the USA, Australia and Canada considered a food chain or web they could describe feeding relationships between the organisms, but did not realize that the arrows represented energy transfer in

---

<sup>15</sup> Kragten, Admiraal and Rijlaarsdam (2015) use the term process diagram.

the system. This corroborates the apparent challenges posed by energy for understanding representations of an ecosystem.

### **5.2.3 Learning from Errors**

Making errors is a natural part of the learning process. A lot of errors do not occur randomly, but originate from misconceptions (Nesher, 1987). Nevertheless, although errors should be eradicated, they can be beneficial for learners when used in a constructive way. According to the theory of negative knowledge, this is because reflecting on errors can lead to the acquisition of so-called negative knowledge, that is knowledge of how something is not in contrast to how it really is (Oser et al., 2012; Oser & Spychiger, 2005). Concerning the internal representation of negative knowledge, it seems that incorrect parts of an initial mental model may be labeled as incorrect or as not belonging to this concept and that correct knowledge may be added, resulting in construction of a more comprehensive mental model. Oser and Spychiger (2005) describe negative knowledge as inherent in every piece of knowledge and claim that it serves various functions, inter alia realizing that what seemed correct is not actually correct helps recognition of what is right. In other words, the scope of a concept is sharpened by clarifying what does not belong to it. Thus, certainty is gained because correct and incorrect conceptions can be more clearly distinguished. Various studies have corroborated the idea that misconceptions may not be extinguished but co-exist with scientific conceptions, notably in the context of energy, studies by Liu & Tang (2004) and Solomon (1983). Negative knowledge is assumed to prevent the learner from using the corresponding misconception (Oser & Spychiger, 2005).

A critical issue in this context is that learners' own errors are likely to arouse negative emotions like shame, which may hinder the learning process, so an error-tolerant classroom culture may be crucial for learning from errors in classroom settings (Oser et al., 1999). However, substantially more research is required to clarify such requirements (Steuer & Dresel, 2015). Therefore, it seems reasonable to use constructed errors as a vicarious rather than personal experience in educational contexts. Moreover, learners' own errors occur individually and spontaneously, while the application of constructed errors can be planned. Several studies that have addressed such issues, in various domains, indicate that reflecting on constructed errors promotes acquisition of skills and knowledge. For example, this approach has been used to improve the professional compe-

tence of fire-fighters (Joung, Hesketh, & Neal, 2006) and medicine students (Stark, Kopp, & Fischer, 2011), highlighting its cross-domain applicability. In school education the utility of the approach has been investigated particularly intensively in the domain of mathematics, e.g., by inserting an error into the solution of an equation and asking students to state which step is incorrect, why it is wrong, and what must be done to solve the equation correctly. Reflecting on incorrect examples has been shown to improve learners' understanding of mathematical topics such as algebra (Booth et al., 2013), probability (Große & Renkl, 2007), decimal magnitude (Durkin & Rittle-Johnson, 2012), and fractions (Heemsoth & Heinze, 2014).

The effectiveness of learning from errors may depend on the learner's prior knowledge. Students with low prior knowledge benefit more from learning with correct examples, while advanced students learn more from incorrect examples, according to Heemsoth and Heinze (2014). Similarly, Große and Renkl (2007) reported that learning with correct and incorrect examples is beneficial for students with high prior knowledge, whereas students with low prior knowledge benefit more from learning with correct examples. Prior knowledge is needed to identify and explain errors. Therefore, highlighting an error lowers the demand on the learner, according to Große and Renkl (2007), who found that students with low prior knowledge profit from support such as highlighted errors. However, in contrast to Große and Renkl (2007), Durkin and Rittle-Johnson (2012) found no indications of an interaction between amount of prior knowledge and either learning with correct examples or learning with correct and incorrect examples.

Students enter the classroom with conceptions resulting from their experience in everyday life. The key feature of learning from errors is that misconceptions can be addressed by errors to achieve a conceptual change (Oser & Spychiger, 2005). Aside from incorrect equations in mathematics, it has been shown that learning from science texts that explicitly address misconceptions (so-called refutation texts) effectively fosters positive learning outcomes (e.g., Özkan, Tekkaya, & Geban, 2004; Tippett, 2010). Refutation texts require simultaneous activation of correct and incorrect conceptions, which helps learners to become aware of the inconsistency between the misconception and the scientific conception. This is a crucial step towards conceptual change (Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982; Van den Broek & Kendeou, 2008). Refutation texts have been successfully applied in the context of energy (Diakidoy, Kendeou, & Ioannides, 2003). A similar approach is the use of concept cartoons: drawings with people expressing different beliefs in the form of textual information in bubbles. Concept cartoons have been shown

to be effective tools in science classroom practice for enhancing students' motivation and challenging misconceptions (Keogh & Naylor, 1999).

To date, descriptive representations (i.e., texts and equations) have been mainly used in material designed to implement this approach. However, given the importance of depictive representations in communicating scientific concepts and facilitating the development of correct mental models of these concepts, a significant challenge for researchers is to “design visualizations that specifically target . . . faulty beliefs.” (Rapp, 2005).

### **5.3 The Error-Based Pictorial Tool to Foster Conceptual Knowledge of Energy**

#### **Combining the Pillars: Learning from Errors in Energy-Related Diagrams**

Depictive representations visualizing abstract science concepts have proven advantages for learning about energy. Moreover, educational research in mathematics has shown that learning from errors in descriptive representations can potentially foster students' knowledge of abstract concepts. We hypothesized that the learning from errors in descriptive representations can potentially foster students' knowledge of abstract concepts. We hypothesized that the learning from errors approach could be combined with learning through depictive representations, thereby boosting effective knowledge acquisition about the abstract concept energy. Thus, deliberately placing errors in diagrams should encourage learners to examine the representations more thoroughly, rather than skimming over them. If so, learning with diagrams incorporating deliberate errors should foster acquisition of conceptual knowledge of energy more effectively than learning with a correct representation. This is because, as previously stated, addressing common errors that are rooted in misconceptions may promote learning by making negative knowledge explicit.

Hence, in the intervention study reported here we inserted an error in an energy-related diagram, showing the energy flow through a simple food chain in a typical ecosystem. This context was chosen for two reasons. First, energy flow is an important topic in biology and comprehending it requires sound understanding of the energy concept. Second, there is well-documented evidence that students possess prevalent and resistant misconceptions regarding this topic. Based on the findings of several studies on learning in mathematics (as described in the previous section), we hypothesize that learning with an incorrect representation would foster acquisition of conceptual knowledge of



energy more effectively than learning with a correct representation. Additionally, our empirical study addressed the following four explorative research questions.

**Research Question 1:** Do students learn more when the error has already been encircled in the diagram when they receive it, or when they have to identify it by themselves? Concerning the underlying mode of action, trying to identify the error may encourage students to examine each part of the diagram thoroughly. However, failing to identify the error may be a barrier for learning as students might continue to believe that the incorrect feature is correct or they might assume that a correct feature is incorrect.

**Research Question 2:** Does students' amount of prior knowledge influence how much conceptual knowledge of energy they gain? According to the results of mathematics education research, the more prior knowledge students have, the more they profit from learning from errors.

**Research Question 3:** What features of the diagram do students consider to be incorrect besides the deliberate error (an energy backflow arrow)?

**Research Question 4:** What explanations do students give for the encircled error?

## 5.4 Method

### 5.4.1 Procedure and Sample

An intervention study with pre-posttest design and three experimental groups of students in 12 classes was conducted. The three groups differed in received learning material, which consisted of three variants of a diagram (one correct, one with an encircled error and one with error, not encircled) showing energy flow through a forest ecosystem and associated tasks (see Table 5-1 and Figure 5-1). Students' conceptual knowledge of energy was assessed in pre- and posttests.

Table 5-1

*Learning materials provided to the three groups*

Group 1	Group 2	Group 3
Incorrect diagram, without the error encircled	Incorrect diagram, with the error encircled	Correct diagram
<ul style="list-style-type: none"> <li>• identify the error</li> <li>• explain the error</li> <li>• explain energy flow</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• explain the error</li> <li>• explain energy flow</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• explain energy flow</li> </ul>

The pretest was administered two weeks before the intervention. Although the topic should already have been treated in biology classes, the intervention started for all groups with a standardized presentation on energy flow in ecosystems to ensure that all students were provided with the essential information to identify and explain the error (see Supplemental Material). Afterwards, students worked independently on the learning material (see Table 5-1). In an effort to minimize class effects, all three variants of the material were distributed almost equally in each class. During the work, students could use printouts of slides of the presentation. After finishing, slides and learning material were collected by the administrator. Students then completed the posttest. In subsequent meetings the students were fully debriefed by the administrator who, *inter alia*, provided information about correct solutions of the tasks.

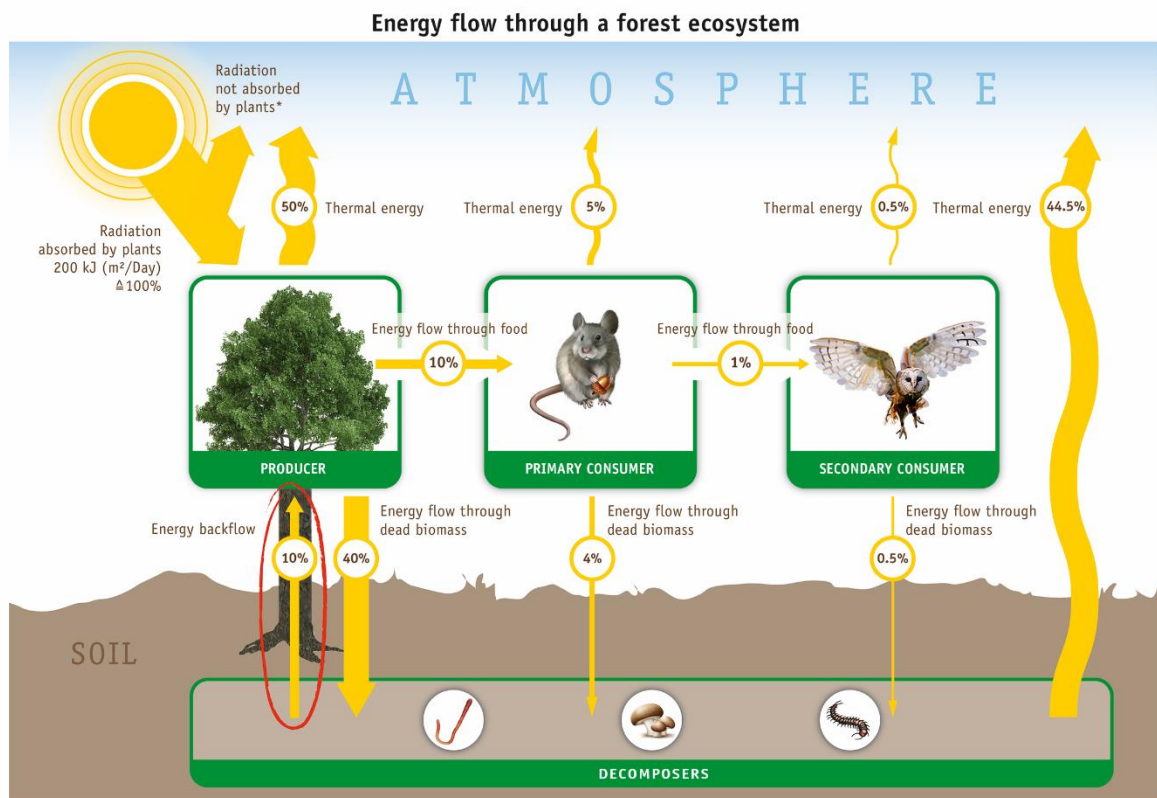
One-way ANOVA implemented in G\*Power 3.1 indicated that for a middle effect size of  $f = 0.25$  a sample of 252 students would be required. To meet this requirement, 325 ninth graders from 12 secondary schools on the highest track of the ability-grouped German school system ('Gymnasium') were recruited to participate in the study. However, 15 students missed the second measurement occasion and were excluded from the sample. Another six students were not compliant as they did not work on the diagram tasks or the posttest. Thus, the remaining sample comprised 304 students (52.2% female;  $M = 14.79$  years,  $SD = 0.48$  years): 102, 100 and 102 in Groups 1, 2 and 3, respectively.

### 5.4.2 Material and Instruments

Based on the energy flow diagrams in textbooks surveyed by Wernecke et al. (2016) and flow diagrams of textbooks not surveyed there (e.g., Beyer, Remé, & Steinert, 2010; Braun, Paul, & Westendorf-Bröring, 2011; Markl, 2010), we designed the energy flow diagram shown in Figure 5-1. The diagram includes realistic drawings of organisms and contains labels, an identifying headline, and a caption concerning the scale. The indicated percentages are approximations. In order to reduce complexity, we applied two simplifications compared to typical energy flow diagrams in textbooks. First, we chose to portray the radiation from the sun as being only split into radiation that is not absorbed by plants (e.g., radiation reflected by the earth's surface, as explained in an additional caption, while some textbooks differentiate between reflected and thermally dissipated energy) and radiation absorbed by plants (set to 100% of the energy entering the system). Second, the chosen food chain tree → mouse → eagle owl only consists of three trophic

levels, whereas many other flow diagrams show four or five trophic levels. However, all energy pathways can be traced in the reduced version and the principles of energy flow are fully delineated.

The error inserted into the incorrect versions of the energy flow diagram targets widespread misconceptions. This is an additional arrow from the decomposers in the soil to the producers, suggesting that plants get some of their energy from the soil (Boyes & Stanisstreet, 1991; Leach et al., 1996) so energy, just like matter, flows in a cycle and can be recycled (Beals et al., 2012; Burger, 2001; Lancor, 2014). Three versions of the diagram were designed and complemented with tasks, as described and shown in Table 5-1, Figure 5-1, and Supplemental Material.



Drawing (including the width of arrows) is not true to scale. \*e.g. radiation reflected by the earth's surface

Figure 5-1. Incorrect diagram with encircled error (provided to Group 2).

The students' conceptual knowledge of energy was assessed by a test with 18 items. These included eight multiple-choice items (regarded as representative in terms of context, difficulty, and discrimination) from the test developed to assess students' general understanding of energy, and validated, by Opitz, Neumann, Bernholt, and Harms (in

press). The other 10 items (eight multiple-choice and two open-ended items) specifically concern energy flow. Three of these items were newly created, while the others were compiled, with some modification, from sources shown in Supplemental Material. The energy instrument (together with the material and diagrams) was tested in a pilot study with 83 ninth-grade students. Slight modifications were made in the diagram and the energy test based on the results of the pilot study. A mite among the decomposers was regarded as a flea, which is not a decomposer, so the mite was removed from the diagram. Despite the caption concerning the scale, students criticized the varying width of the 10% arrows, which were formatted to have the same width thereupon. Since internal consistency was low ( $\alpha = .65$ ), the energy test, consisting originally of 16 items, was extended by two items; one of the open-ended items was rephrased. In our main study, internal consistency was low for the pretest ( $\alpha = .57$ ), but acceptable for the posttest ( $\alpha = .71$ ).

The following control variables were also assessed: cognitive abilities, using the N2 scale (graphic analogies) of the KFT cognitive ability test (Heller & Perleth, 2000); effort appraised on a 10-point scale (OECD, 2010); and time spent on tasks, the pretest, and the posttest. Moreover, students completed a form reporting their sex, age, and their biology mark on their last report card.

### 5.4.3 Data Preparation and Analysis

To address Research Questions 1 and 2, and our hypothesis that learning with an incorrect representation should foster acquisition of conceptual knowledge of energy more effectively than learning with a correct representation, we examined effects of the intervention of students' energy knowledge. All items were coded dichotomously. The objectivity of the ratings concerning the two items with an open-ended answer format was checked by rerating 25% of the posttest answers (72 and 69, respectively). Cohen's kappa was chosen as a chance-corrected coefficient of rater agreement (Cohen, 1960) for these two items, and the obtained values indicated at least substantial agreement ( $\kappa = .96$  and  $\kappa = .76$ , respectively; Landis & Koch, 1977). To analyze the students' energy test results, we applied mixed-model analyses of variance (ANOVA) using SPSS 23, and computed a latent difference score model using *Mplus 7*.

To address Research Questions 3 and 4, we investigated students' performance on the diagram tasks using descriptive statistics, focusing on the identification and explanation of the error by participants in Groups 1 and 2. To check the objectivity of the ratings,

25% (26 in each case) of the explanations of students in Groups 1 and 2 were randomly selected and coded by a second rater. The Cohen's kappa values of the ratings of Groups 1 ( $\kappa = .87$ ) and 2 ( $\kappa = .63$ ) indicated almost perfect and substantial rater agreement, respectively (Landis & Koch, 1977). Differences between means were regarded as significant if  $p < .05$ .

## 5.5 Results

Initially, in evaluation of the acquired data we compared our three groups of participants in terms of potentially significant characteristics. Their pretest scores, indicating their prior knowledge, did not significantly differ between the three groups:  $F(2, 286) = 0.69, p = .500$  (cf. Table 5-2). Moreover, there were no significant differences between the three groups of students in time spent on the pretest, posttest, and working with the diagram ( $F_s < 2.70, p_s > .05$ ). Similarly, no significant differences were observed between the three experimental groups in cognitive abilities, last report mark in biology, or effort ( $F_s < 1.73, p_s > .05$ ).

Table 5-2

*Means (and standard deviations) of control variables*

	Group 1	Group 2	Group 3
Pretest Score (Prior Knowledge)	6.96 (2.69)	6.56 (2.99)	6.99 (2.67)
Working Time: Pretest (min)	22.67 (5.14)	24.07 (5.02)	24.06 (3.91)
Working Time: Posttest (min)	16.47 (4.49)	16.65 (4.47)	16.86 (3.98)
Working Time: Diagram (min)	15.86 (5.27)	15.46 (4.66)	16.01 (5.34)
Cognitive Abilities	18.95 (3.60)	19.13 (3.93)	18.75 (3.96)
Biology Grade <sup>a</sup>	2.35 (0.79)	2.46 (0.71)	2.38 (0.75)
Effort	6.07 (2.00)	6.08 (2.18)	6.55 (2.13)

*Note.* <sup>a</sup> The German grading system has a numerical 1 to 6 format, in which 1 is the best and 6 the poorest grade.

Descriptive statistics showed that only 11 (10.8%) of the students in Group 1 identified the incorrect arrow in the diagram and satisfactorily explained why it was incorrect, while 28 (28%) of the students in Group 2 satisfactorily explained why the encircled arrow was incorrect. We formed two subgroups from the students of both Group 1 and Group 2 who did and did not solve their respective tasks, thereby forming five sets with

## Studie 2

the students of Group 3. One-way ANOVA showed there were significant differences in the pretest scores, indicating prior knowledge, between students of these five sets:  $F(4, 284) = 2.73, p = .029$ . Assessment of pairwise differences between the sets by post-hoc tests with Bonferroni correction revealed one significant difference: the successful students in Group 2 had a higher pre-test score ( $M = 7.89$ ) than students who failed in this group ( $M = 6.00$ ),  $p = .024$ . One-way ANOVA also detected a significant difference between the five sets in effort,  $F(4, 294) = 4.294, p = .020$ , but post-hoc tests with Bonferroni correction detected no significant difference between any pairs of sets in this respect.

To evaluate our hypothesis that learning with an incorrect representation fosters acquisition of conceptual knowledge of energy more effectively than learning with a correct representation, we applied one-way repeated measures ANOVA to compare the energy test results of the three groups. The main effect of measurement occasion shows that test results increased substantially from pre- to posttest,  $F(1, 285) = 233.48, p < .001, \eta_p^2 = .450$ . However, the interaction effect did not indicate differential improvement of students' knowledge of the energy concept between the three groups:  $F(2, 285) = 2.43, p = .090, \eta_p^2 = .017$ . The main effect of group was not significant:  $F(2, 285) = 0.17, p = .842, \eta_p^2 = .001$ . This also implies that encircling the error in the incorrect representation did not result in higher or lower knowledge gain than use of the same learning material without the presumed support offered by encircling it (Research Question 1).

However, one-way repeated measures ANOVA showed that in addition to the significant main effect of measurement occasion [ $F(1, 283) = 199.92, p < .001, \eta_p^2 = .414$ ] there was an interaction effect indicating differential improvement of knowledge of the energy concept among the previously mentioned five sets of students:  $F(4, 283) = 5.94, p < .001, \eta_p^2 = .077$ . Moreover, post-hoc tests with Bonferroni correction revealed that students in Group 2 who provided a sufficient explanation of the error learned significantly more than students who did not ( $p < .001$ ). They also learned more than the students who failed to identify and explain the error in Group 1 and more than students in Group 3 ( $p = .003$  and  $.029$ , respectively). Differences between the other pairs of sets were not significant (Table 5-3).

Table 5-3

*Means and standard deviations of energy test score gains*

Group	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Group 1	96	2.07	0.27
successful	11	4.64	0.74
failed	85	1.74	0.27
Group 2	93	2.82	0.29
successful	28	4.11	0.43
failed	65	2.46	0.36
Group 3	99	2.44	0.28

To assess the relationship (if any) between pretest scores and knowledge gain (Research Question 2) and investigate the robustness of our results across analytical approaches, we also analyzed the data using a latent difference score model in *Mplus*. Like the ANOVA modeling, this showed that posttest scores were significantly higher than pretest scores ( $p < .001$ ). Wald  $\chi^2$  ( $W$ ) tests of parameter equality indicated that there were no significant differences in the improvement of students' knowledge between Groups 1 and 3,  $W(1) = 0.92$ ,  $p = .339$ , or between Groups 2 and 3,  $W(1) = 1.87$ ,  $p = .339$ , but students in Group 2 learned significantly more than students in Group 1:  $W(1) = 5.61$ ,  $p = .018$ .

We then assessed differences between students of Group 1 who did and did not identify and explain the error using a latent difference score model. A Wald test indicated that the successful students improved their conceptual knowledge of energy significantly more than students who failed to identify the error [ $W(1) = 14.83$ ,  $p < .001$ ]. More importantly, students in Group 1 who solved their tasks also gained significantly more knowledge of energy than students in Group 2, who learned with the marked error [ $W(1) = 4.92$ ,  $p = .027$ ], and Group 3, who learned with the correct diagram [ $W(1) = 8.57$ ,  $p = .003$ ]. Similarly, successful students of Group 2 who provided a satisfactory explanation of the error learned significantly more than students who failed [ $W(1) = 8.83$ ,  $p = .003$ ]. They also learned more than the students who failed to identify and explain the error in Group 1 [ $W(1) = 22.85$ ,  $p < .001$ ], and students in Group 3 [ $W(1) = 11.21$ ,  $p = .001$ ]. The knowledge gains of successful students in Groups 1 and 2 were not significantly different [ $W(1) = 0.41$ ,  $p = 0.521$ ]. Moreover, knowledge gains of students who failed in Groups 1 and 2, and students in Group 3, were not significantly different

## Studie 2

( $ps > .05$ ). Hence, our hypothesis that learning with an incorrect representation fosters acquisition of conceptual knowledge of energy more effectively than learning with a correct representation was supported for students who identified and explained the error.

Wald also tests revealed that the successful students of Group 1 self-reportedly put more effort into work with the diagram than students of their group who did not identify and satisfactorily explain the error [ $W(1) = 6.98, p = .008$ ]. However, the difference in effort between corresponding sets in Group 2 was not significant [ $W(1) = 3.10, p = .078$ ].

Regarding Research Question 2, the correlations between pretest scores and knowledge gains in all groups and subgroups were significantly negative ( $rs$  -.215 to -.559,  $ps < .05$ ), except for students who successfully explained the error in Group 2 ( $r = -.253, p = .153$ ). This indicates that the idea that students' amount of prior knowledge may be directly and positively linked to conceptual knowledge of energy gained from learning about errors requires modification.

### **Task performance**

To address Research Questions 3 and 4, we investigated students' performance on the diagram tasks.

#### *Group 1 (n = 102) – incorrect diagram without the error encircled*

Only 11 students (10.8%) in Group 1 correctly identified the incorrect arrow and satisfactorily explained why it was incorrect. Another eight (7.8%) correctly marked it, but gave an inadequate or no explanation. Most of the students in the group (69, 67.6%) marked one of the following features of the diagram.

(1) The arrow indicating energy flow through food from the mouse to the eagle owl (39.3% of the incorrect markings). Most of the students who selected this feature stated that the accompanying percentage should be 10% rather than 1%, failing to grasp that the percentages referred to percentages of the original amount of energy entering the system that are transferred between the trophic levels: "Then there are the secondary consumers. Here, again 10% of the energy is transferred. At this spot, there is an error in the diagram, because the mouse does not pass on just 1% of its energy."

(2) The arrow indicating dissipation of thermal energy from the decomposers to the atmosphere (27.9% of the incorrect markings). Students marking this arrow as incorrect usually noticed the inconsistency between the amounts of energy flowing to and from



the decomposers, but they considered the energy backflow arrow to be correct and changed the percentage associated with the thermal energy arrow: “If you sum it up, you get that the decomposers have 44.5% of the energy. However, decomposers pass 10% to the producers and thus can emit just 34.5% of the thermal energy.”

(3) The arrow indicating energy flow through dead biomass from the eagle owl to the decomposers (16.4% of the incorrect markings). Some students who marked this as incorrect argued that the accompanying percentage should be 0.4% to continue the sequence of percentages of energy flow through dead biomass. “On the sheet, the value of 0.5% is false, because the number gets consistently smaller by a zero point →40%→4%→0.4% so there should be nothing with a 5.”

(4) The arrow indicating dissipation of thermal energy from the producers to the atmosphere (4.9% of the incorrect markings).<sup>16</sup> Students who selected this feature expressed the belief that plants do not give thermal energy to the environment: “The tree does not release thermal energy because it does not move.”

The remaining students marked another detail in addition to the incorrect arrow (3 students, 2.9%), or either made an ambiguous marking or no marking at all (11, 10.8%).<sup>17</sup>

#### *Group 2 (n = 100) – incorrect diagram with the error encircled*

Twenty-eight (28%) of students in Group 2 sufficiently explained why the encircled arrow was incorrect, by referring either to plant nutrition (plants do not get energy from the soil or the decomposers / plants only get energy from the sun) or general characteristics of energy flow (energy cannot be recycled / energy does not flow in a cycle). Most students (63, 63.0%) gave an unsatisfactory explanation. The most frequent statement (39.7%) was that plants get energy from the soil, but the percentage accompanying the arrow was too high or too low, for example “The marked feature is false because the consumer [*sic*] must absorb 100%.”

Additionally, a considerable number of students (27.0%) said that no energy would be left for backflow. These students noticed the inconsistency between the energy flowing to the decomposers and being released from them, “...the decomposers cannot give 10% of the energy back to the producers, because they get a total of 44.5% of the energy from the food chain, but these 44.5% are lost by thermal energy. Thus, they do not

<sup>16</sup> The remaining 11.5% of the incorrect markings refer to various other features in the diagram.

<sup>17</sup> The sum of 99.9% is caused by rounding.

## Studie 2

have energy left they could hand over to the producers.”<sup>18</sup> However, a solely mathematical argument was not considered a sufficient explanation.

A few other students stated that the arrow is correct (2.0%;  $n = 2$ ), “The red marked area is not a mistake as decomposers as well as consumers cannot produce their own energy. However, they give off part of the food they received previously. This part transferred to the tree, amounts to generally 10% of the received energy.” The remaining seven students (7%) did not give any explanation at all.

### *Group 3 (n = 103) – correct diagram*

Students of Group 3 described the correct diagram. Their texts were not analyzed further in the context of this study.

## 5.6 Discussion

The instructional tool presented and considered here integrates the approaches of learning from errors and learning through depictive representations, by incorporating a pictorial error based on well-known misconceptions of the flow of energy derived from the literature. The tool was used to explore whether learning with an incorrect flow diagram enhances students’ conceptual knowledge of energy more than learning with a correct diagram. The results indicate that learning from such errors fosters acquisition of conceptual knowledge of energy more effectively than learning with a correct diagram, provided that the students succeed in identifying and explaining the error. Failure to perform associated tasks adequately does not seem to be particularly harmful as students who failed to identify and explain the error did not gain less knowledge than students learning with the correct diagram. Strikingly, only 11% of students who learned with the incorrect diagram (Group 1) and 28% of students who learned with the incorrect diagram with encircled error (Group 2) satisfactorily completed their respective tasks. Successful and non-successful students did not significantly differ in cognitive abilities or biology grade. However, successful students in Group 1 self-reportedly put more effort into work with the diagram than those who failed. This indicates that identifying the error may be especially demanding as each part of the diagram must be examined thoroughly, and students must take the task seriously. However, generally, students learning with an incorrect diagram did not reportedly make more effort than those learning with a correct dia-

---

<sup>18</sup> The remaining 33.3% of explanations do not fit into any of the mentioned categories.

gram. The effort might have been influenced by study-related factors that were equal in all groups (and not present in regular lessons), for instance, the extraordinary situation or the fact that the results would not affect the students' biology grade.

Concerning the relevance of prior knowledge, there was no significant difference in pretest scores (and thus assumed prior knowledge) between successful and non-successful students of Group 1, but this could be due to the small proportion of successful students (11 %), and thus low statistical power. Moreover, successful students in Group 2 had a higher mean pretest score than those who failed. This finding supports the assumptions that prior knowledge is needed to identify and explain the error, and highlighting errors reduces demands on learners (Große & Renkl, 2007). Research on learning with correct worked examples also shows that learners' prior knowledge should be considered when selecting prompts intended to evoke self-explanations (Neubrand, Borzikowsky, & Harms, 2016; Neubrand & Harms, 2016). Thus, matches between instructional support and learners' prior knowledge are crucial for learning with both correct and incorrect learning material. We conclude that both learning with correct worked examples in combination with prompts and learning from errors enhances cognitive activation of the learner since both address students' prior knowledge (Baumert et al., 2010).

In contrast to patterns typically observed in mathematics education, correlations between pretest scores and knowledge gains were negative in all groups. Learning from the incorrect diagram showing energy flow through a forest ecosystem benefited students with low prior knowledge, implying that our approach is not solely applicable to high-achieving students. The higher students scored on the pretest, the lower the conceptual knowledge of energy they gained during the intervention. However, this finding is not the result of a ceiling effect in the energy test. It is possible that students in Group 1 stopped examining the diagram once they thought they had identified the incorrect feature, thus forfeiting the chance to further advance their knowledge. Hence, not specifying the number of errors inserted in the diagram might be advantageous. This might be a crucial difference from learning from errors in mathematics education, where students usually have to solve problems correctly, and thus have to examine complete representations.

Große and Renkl (2007) and Heemsoth and Heinze (2014) found that students with high prior knowledge benefit more from learning with incorrect learning material than students with low prior knowledge, whereas Durkin and Rittle-Johnson (2012) found no such difference. We found the opposite pattern, but our results clearly showed a need for high prior knowledge to identify and explain the error. This is not surprising because,

## Studie 2

as exemplified in the theoretical background, prior knowledge of the content and about diagrammatic conventions is needed to learn successfully with biological diagrams (Cheng & Gilbert, 2015; Kragten et al., 2015). Considering the various features in the diagram that were erroneously identified as incorrect by the students in Group 1, we found little evidence of difficulties with diagrammatic conventions such as arrows, spatial relationships, and colors. However, we detected content-related difficulties. The feature identified most frequently as incorrect—the arrow indicating energy flow from the mouse to the eagle owl—was erroneously regarded as incorrect due to misunderstanding of the percentages of energy flowing into the system. We decided to include percentages in the diagram for two reasons. First, energy can be conceptualized as an abstract accounting quantity defined in a system (Duit, 2014). For example, the given percentages illustrate that energy is finally transferred to the atmosphere, thereby indicating that an ecosystem depends on a constant energy source. Second, percentages are typical features of energy flow diagrams in biology textbooks. However, they also gave students a clue about the error and offered them the possibility to argue mathematically (e.g., “There is no energy left for backflow”) instead of biologically (e.g., “Plants do not get energy from the soil”). Thus, the students may have expected to find a small error in the numbers, rather than considering a whole arrow to be incorrect. To counter this potential learning obstacle, in further studies a diagram without percentages could be used, representing the error solely in depictive information.

Interpreting the results, it should be noted that the set tasks and correct responses were discussed after the posttest. Similarly, in an authentic class setting, discussion of such an error would be a crucial step of the instructional process to ensure that misconceptions are not reinforced. Students who do not identify and explain the error, and thus establish the contrast between correct and incorrect knowledge by themselves must be confronted with the correct knowledge through discussion to facilitate learning.

### **Limitations**

The study presented here has several methodological limitations. First, despite pilot tests, the internal consistency of the energy test was rather low, especially for the pretest. Second, a follow-up test of students’ knowledge of the energy concept assessing whether the differential knowledge gain is maintained would be instructive (i.e., investigation of the sustainability). Third, analysis of the learning of a group without a diagram would have allowed estimation of the knowledge gain induced by the presentation alone.

However, we decided to settle for assessing the learning from errors approach in relation to comparable instruction in terms of the arrangement (individual work) and time spent on tasks. Given these limitations, the study should be regarded as a first step towards combining learning from errors and depictive representations, particularly in biological energy contexts.

### **Implications for Instruction and Future Research**

Identifying and reflecting errors, thereby establishing a contrast between positive and negative knowledge requires prior knowledge. Therefore, a depictive instructional tool incorporating an incorrect representation should not be used to introduce a new concept or topic. Moreover, teachers should ensure that all students are eventually provided with the positive knowledge, for example, by thoroughly discussing the tasks and correct responses in the classroom.

The learning from errors approach has not yet found its way into school teaching; correct examples are mainly used in classrooms (Booth et al., 2013). Therefore, more practical teaching material implementing the approach is needed. In this study, a biological flow diagram was used, partly because this type of representation is frequently (and advantageously) used to depict energy flows in biological and ecological systems. However, we assume that learning from errors is transferable to other types of diagrams and other scientific domains. Ideally, inserted errors should address prevalent misconceptions, and the students must have sufficient prior knowledge of the conventions of the type of representation used. Further research is needed to test these assumptions. We also need to learn more about the role of prior knowledge in learning from errors in different domains and from different representations, given the heterogeneous research results.

A potentially harmful effect of presenting students with incorrect representations is that they may memorize their content, as several studies have shown that when conflicting information is presented in picture and text, students are more inclined to remember the information embedded in the picture (Crisp & Sweiry, 2006; Peeck, 1989). Hence, future studies should include a follow-up test to assess this potential risk and the sustainability of students' knowledge acquisition. Moreover, closer examination of strategies that students use while looking for errors in a picture is warranted, and could lead to the design of supporting provisions besides marking the error. For this purpose, process-oriented studies using eye-tracking methodology and think-aloud protocols might prove valuable.

## Studie 2

According to the theory of negative knowledge and preliminary empirical studies, an error-tolerant classroom culture is needed for students to learn from their own errors (Oser et al., 1999; Steuer & Dresel, 2015). Instructions concerning deliberately introduced errors might contribute to a constructive error climate by illustrating that it is possible and desirable to use errors as opportunities for learning. Beyond the direct effect on students' knowledge about abstract concepts such as energy this instructional approach might thus enhance science teaching more generally.

## 5.7 References

- Amettler, J., & Pintó, R. (2002). Students' reading of innovative images of energy at secondary school level. *International Journal of Science Education*, *24*, 285-312. doi: 10.1080/09500690110078914
- Barman, C. R., Griffiths, A. K., & Okebukola, P. A. O. (1995). High school students' concepts regarding food chains and food webs: a multinational study. *International Journal of Science Education*, *17*, 775-782. doi: 10.1080/0950069950170608
- Baumert, J., Kunter, M., Blum, W., Brunner, M., Voss, T., Jordan, A., . . . Tsai, Y. M. (2010). Teachers' mathematical knowledge, cognitive activation in the classroom, and student progress. *American Educational Research Journal*, *47*, 133-180. doi: 10.3102/0002831209345157
- Beals, A. M., McNall Krall, R., & Wymer, C. L. (2012). Energy flow through an ecosystem: conceptions of in-service elementary and middle school teachers. *International Journal of Biology Education*, *2*, 1-18.
- Beyer, I., Remé, R., & Steinert, C. (Eds.). (2010). *Natura 2. Biologie für Gymnasien* [Natura 2. Biology for secondary schools]. Stuttgart, Germany: Klett.
- Booth, J. L., Lange, K. E., Koedinger, K. R., & Newton, K. J. (2013). Using example problems to improve student learning in algebra: Differentiating between correct and incorrect examples. *Learning and Instruction*, *25*, 24-34. doi: 10.1016/j.learninstruc.2012.11.002
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1991). Misconceptions in first-year undergraduate science students about energy sources for living organisms. *Journal of Biological Education*, *25*, 209-213. doi: 10.1080/00219266.1991.9655208
- Braun, J., Paul, A., & Westendorf-Bröring, E. (Eds.). (2011). *Biologie heute SII* [Biology today for upper secondary school]. Braunschweig, Germany: Westermann Schroedel.
- Burger, J. (2001). *Schülervorstellungen zu "Energie im biologischen Kontext". Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen* [Student conceptions concerning energy in biological contexts. Research, analysis, and conclusions] (Dissertation, University of Bielefeld, Bielefeld, Germany). Retrieved from [pub.uni-bielefeld.de/download/2305865/2305868](http://pub.uni-bielefeld.de/download/2305865/2305868)
- Chabalengula, V. M., Sanders, M., & Mumba, F. (2012). *Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological contexts*. *International*

- Journal of Science and Mathematics Education*, 10, 241-266. doi: 10.1007/s10763-011-9291-2
- Cheng, M. M. W., & Gilbert, J. K. (2015). Students' visualization of diagrams representing the human circulatory system: The use of spatial isomorphism and representational conventions. *International Journal of Science Education*, 37, 136-161. doi: 10.1080/09500693.2014.969359
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104
- Crisp, V., & Sweiry, E. (2006). Can a picture ruin a thousand words? The effects of visual resources in exam questions. *Educational Research*, 48, 139-154. doi: 10.1080/00131880600732249
- Cromley, J. G., Snyder-Hogan, L. E., & Luciw-Dubas, U. A. (2010). Cognitive activities in complex science text and diagrams. *Contemporary Educational Psychology*, 35, 59-74. doi: 10.1016/j.cedpsych.2009.10.002
- DeBoer, G. E., Quellmalz, E. S., Davenport, J. L., Timms, M. J., Herrmann-Abell, C. F., Buckley, B. C., . . . Flanagan, J. C. (2014). Comparing three online testing modalities: Using static, active, and interactive online testing modalities to assess middle school students' understanding of fundamental ideas and use of inquiry skills related to ecosystems. *Journal of Research in Science Teaching*, 51, 523-554. doi: 10.1002/tea.21145
- Diakidoy, I.-A. N., Kendeou, P., & Ioannides, C. (2003). Reading about energy: the effects of text structure in science learning and conceptual change. *Contemporary Educational Psychology*, 28, 335-356. doi: 10.1016/s0361-476x(02)00039-5
- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school - Empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19, 59-66. doi: 10.1088/0031-9120/19/2/306
- Duit, R. (2014). Teaching and learning the physics energy concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, & A. Scheff (Eds.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (pp. 67-85). New York, NY: Springer.
- Durkin, K., & Rittle-Johnson, B. (2012). The effectiveness of using incorrect examples to support learning about decimal magnitude. *Learning and Instruction*, 22, 206-214. doi: 10.1016/j.learninstruc.2011.11.001



- Gotwals, A. W., & Songer, N. B. (2010). Reasoning up and down a food chain: Using an assessment framework to investigate students' middle knowledge. *Science Education*, *94*, 259-281. doi: 10.1002/sce.20368
- Große, C. S., & Renkl, A. (2007). Finding and fixing errors in worked examples: Can this foster learning outcomes? *Learning and Instruction*, *17*, 612-634. doi: 10.1016/j.learninstruc.2007.09.008
- Harms, U. (2016). *Ohne Energie geht nichts!* [Nothing works without energy]. *Unterricht Biologie*, *411*, 2-11.
- Heemsoth, T., & Heinze, A. (2014). The impact of incorrect examples on learning fractions: A field experiment with 6th grade students. *Instructional Science*, *42*, 639-657. doi: 10.1007/s11251-013-9302-5
- Heller, K. A., & Perleth, C. (2000). *KFT 4-12 +R-Kognitiver Fähigkeits-Test für 4.-12. Klassen, Revision* [Test of cognitive abilities in grades 4-12, revised]. Göttingen, Germany: Hogrefe.
- Joung, W., Hesketh, B., & Neal, A. (2006). Using "War stories" to train for adaptive performance: Is it better to learn from error or success? *Applied Psychology: An International Review*, *55*, 282-302. doi: 10.1111/j.1464-0597.2006.00244.x
- Keogh, B., & Naylor, S. (1999). Concept cartoons, teaching and learning in science: an evaluation. *International Journal of Science Education*, *21*, 431-446. doi: 10.1080/095006999290642
- Kozlovsky, D. (1968). A critical evaluation of the trophic level concept. I. Ecological efficiencies. *Ecology*, *49*, 48-60. doi: 10.2307/1933560
- Kozma, R., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: developing representational competence. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 121-146). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Kragten, M., Admiraal, W., & Rijlaarsdam, G. (2015). Students' ability to solve process-diagram problems in secondary biology education. *Journal of Biological Education*, *49*, 91-103. doi: 10.1080/00219266.2014.888363
- Lancor, R. (2014). Using student-generated analogies to investigate conceptions of energy: a multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, *36*, 1-23. doi: 10.1080/09500693.2012.714512
- Landis, R. J., & Koch, G. K. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, *33*, 159-174. doi: 10.2307/2529310

- Leach, J., Driver, R., Scott, P., & Woo-Robinson, C. (1996). Children's ideas about ecology 2: ideas found in children aged 5-16 about the cycling of matter. *International Journal of Science Education*, *18*, 19-34. doi: 10.1080/0950069960180102
- Lin, C.-Y., & Hu, R. (2003). Students' understanding of energy flow and matter cycling in the context of the food chain, photosynthesis, and respiration. *International Journal of Science Education*, *25*, 1529-1544. doi: 10.1080/0950069032000052045
- Liu, X., & Tang, L. (2004). The progression of students' conceptions of energy: a cross-grade, cross-cultural study. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, *4*, 43-57. doi: 10.1080/14926150409556596
- Markl, J. (Ed.). (2010). *Markl Biologie Oberstufe* [Markl biology for upper secondary school]. Stuttgart, Germany: Ernst Klett.
- Mayer, R. E. (2011). Instruction based on visualizations. In R. E. Mayer, & P. A. Alexander (Eds.), *Handbook of research on learning and instruction* (pp. 427-445). New York, NY: Routledge Chapman & Hall.
- Métioui, A., Matoussi, F., & Trudel, L. (2016). The teaching of photosynthesis in secondary school: A history of the science approach. *Journal of Biological Education*, *50*, 275-289. doi: 10.1080/00219266.2015.1085427
- Needham, R. (2014). Using 'energy ideas' in the teaching of biology. *School Science Review*, *96*, 74-77.
- Nesher, P. (1987). Towards an instructional theory: the role of student's misconceptions. *For the Learning of Mathematics*, *7*, 33-40.
- Neubrand, C., Borzikowsky, C., & Harms, U. (2016). Adaptive prompts for learning Evolution with worked examples – Highlighting the students between the "novices" and the "experts" in a classroom. *International Journal of Environmental & Science Education*, *11*, 6774-6795.
- Neubrand, C., & Harms, U. (2016). Tackling the difficulties in learning evolution: effects of adaptive self-explanation prompts. *Journal of Biological Education*, 1-13. doi: 10.1080/00219266.2016.1233129
- OECD. (2010). *PISA computer-based assessment of student skills in science*. Paris, France: OECD.
- Opitz, S. T., Harms, U., Neumann, K., Kowalzik, K., & Frank, A. (2015). Students' energy concepts at the transition between primary and secondary school. *Research in Science Education*, *45*, 691-715. doi: 10.1007/s11165-014-9444-8

- Opitz, S. T., Neumann, K., Bernholt, S., & Harms, U. (in press). Students' energy understanding across biology, chemistry, and physics contexts. *Research in Science Education*.
- Oser, F., Hascher, T., & Spychiger, M. (1999). Lernen aus Fehlern. Zur Psychologie des "negativen" Wissens [Learning from errors. On the psychology of 'negative' knowledge]. In W. Althof (Ed.), *Fehlerwelten. Vom Fehlermachen und Lernen aus Fehlern* (pp. 11-41). Opladen, Germany: Leske + Budrich.
- Oser, F., Nöpflin, C., Hofer, C., & Aerni, P. (2012). Towards a theory of negative knowledge (NK): Almost-mistakes as drivers of episodic memory amplification. In J. Bauer, & C. Harteis (Eds.), *Human fallibility. The ambiguity of errors for work and learning* (pp. 53-70). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Oser, F., & Spychiger, M. (2005). *Lernen ist schmerzhaft. Zur Theorie des negativen Wissens und zur Praxis der Fehlerkultur* [Learning is painful: the theory of negative knowledge and the use of error culture]. Weinheim, Germany: Beltz.
- Özay, E., & Öztaş, H. (2003). Secondary students' interpretations of photosynthesis and plant nutrition. *Journal of Biological Education*, 37, 68-70. doi: 10.1080/00219266.2003.9655853
- Özkan, Ö., Tekkaya, C., & Geban, Ö. (2004). Facilitating conceptual change in students' understanding of ecological concepts. *Journal of Science Education and Technology*, 13, 95-105. doi: 10.1023/B:JOST.0000019642.15673.a3
- Peeck, J. (1989). Trends in the delayed use of information from an illustrated text. In H. Mandl, & J. R. Levin (Eds.), *Knowledge acquisition from text and pictures* (pp. 263-277). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Rapp, D. N. (2005). Mental models: theoretical issues for visualizations in science education. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 43-60). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Ryoo, K., & Linn, M. C. (2012). Can dynamic visualizations improve middle school students' understanding of energy in photosynthesis? *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 218-243. doi: 10.1002/tea.21003
- Sadler, P. M., Coyle, H., Smith, N. C., Miller, J., Mintzes, J., Tanner, K., & Murray, J. (2013). Assessing the life science knowledge of students and teachers represented

- by the K-8 national science standards. *CBE - Life Sciences Education*, 12, 553-575. doi: 10.1187/cbe.12-06-0078
- Schnotz, W. (2001). Wissenserwerb mit Multimedia [Knowledge acquisition with multimedia]. *Unterrichtswissenschaft*, 29, 292-318.
- Solomon, J. (1983). Messy, contradictory and obstinately persistent: a study of children's out-of-school ideas about energy. *The School Science Review*, 65, 225-229.
- Stark, R., Kopp, V., & Fischer, M. R. (2011). Case-based learning with worked examples in complex domains: Two experimental studies in undergraduate medical education. *Learning and Instruction*, 21, 22-33. doi: 10.1016/j.learninstruc.2009.10.001
- Steuer, G., & Dresel, M. (2015). A constructive error climate as an element of effective learning environments. *Psychological Test and Assessment Modeling*, 57, 262-275.
- Stoy, P. C. (2010). Thermodynamic approaches to ecosystem behaviour: fundamental principles with case studies from forest succession and management. In D. G. Raffaelli, & C. L. J. Frid (Eds.), *Ecosystem ecology. A new synthesis* (pp. 40-64). New York, NY: Cambridge University Press.
- Tippett, C. D. (2010). Refutation text in science education: a review of two decades of research. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8, 951-970. doi: 10.1007/s10763010-9203-x
- Trumper, R. (1993). Children's energy concepts: a cross-age study. *International Journal of Science Education*, 15, 139-148. doi: 10.1080/0950069930150203
- Trussell, G. C., Ewanchuk, P. J., & Matassa, C. M. (2006). The fear of being eaten reduces energy transfer in a simple food chain. *Ecology*, 87, 2979-2984. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2979:TFOBER]2.0.CO;2
- Tsui, C.-Y., & Treagust, D. F. (2013). Introduction to multiple representations: their importance in biology and biological education. In D. F. Treagust, & C.-Y. Tsui (Eds.), *Multiple representations in science education* (pp. 3-18). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Van den Broek, P., & Kendeou, P. (2008). Cognitive processes in comprehension of science texts: the role of co-activation in confronting misconceptions. *Applied Cognitive Psychology*, 22, 335-351. doi: 10.1002/acp.1418
- Van Heuvelen, A., & Zou, X. (2001). Multiple representations of work-energy processes. *American Journal of Physics*, 69, 184-194. doi: 10.1119/1.1286662

- Weidenmann, B. (1989). When good pictures fail: An information-processing approach to the effect of illustrations. In H. Mandl, & J. R. Levin (Eds.), *Knowledge acquisition from text and pictures* (pp. 157-170). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Wernecke, U., Schwanewedel, J., Schütte, K., & Harms, U. (2016). Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt? - Entwicklung eines Kategoriensystems und exemplarische Anwendung auf eine Schulbuchreihe [How is energy represented in biology textbooks? – Development of a category system and its application to a textbook series]. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22, 215-229. doi: 10.1007/s40573-016-00512
- Winn, W. (1989). The design and use of instructional graphics. In H. Mandl, & J. R. Levin (Eds.), *Knowledge acquisition from text and pictures* (pp. 125-144). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- World Energy Council (Ed.). (2015). *World energy trilemma. Priority actions on climate change and how to balance the trilemma*. Retrieved from <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2015/05/2015-World-Energy-Trilemma-Priority-actions-on-climate-change-and-how-to-balance-the-trilemma.pdf>

### **Acknowledgement**

This work was supported by the European Science Education Research Association (ESERA) with an Early Career Researcher Travel Award 2016.

Studie 2

## **5.8 Appendix**

### **Supplemental Material**

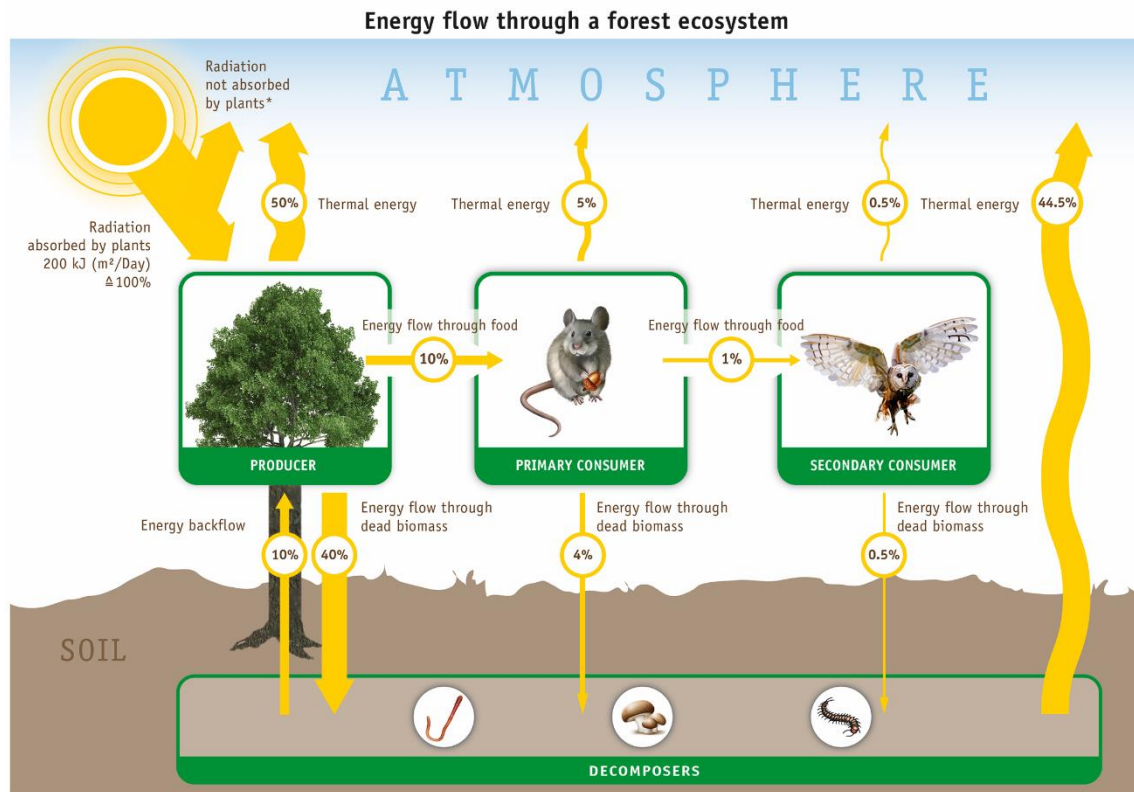
Part 1: Learning Material

Part 2: Energy Test

Part 3: Presentation

Part 1: Learning Material

1.1 Learning material provided to Group 1



Drawing (including the width of arrows) is not true to scale.

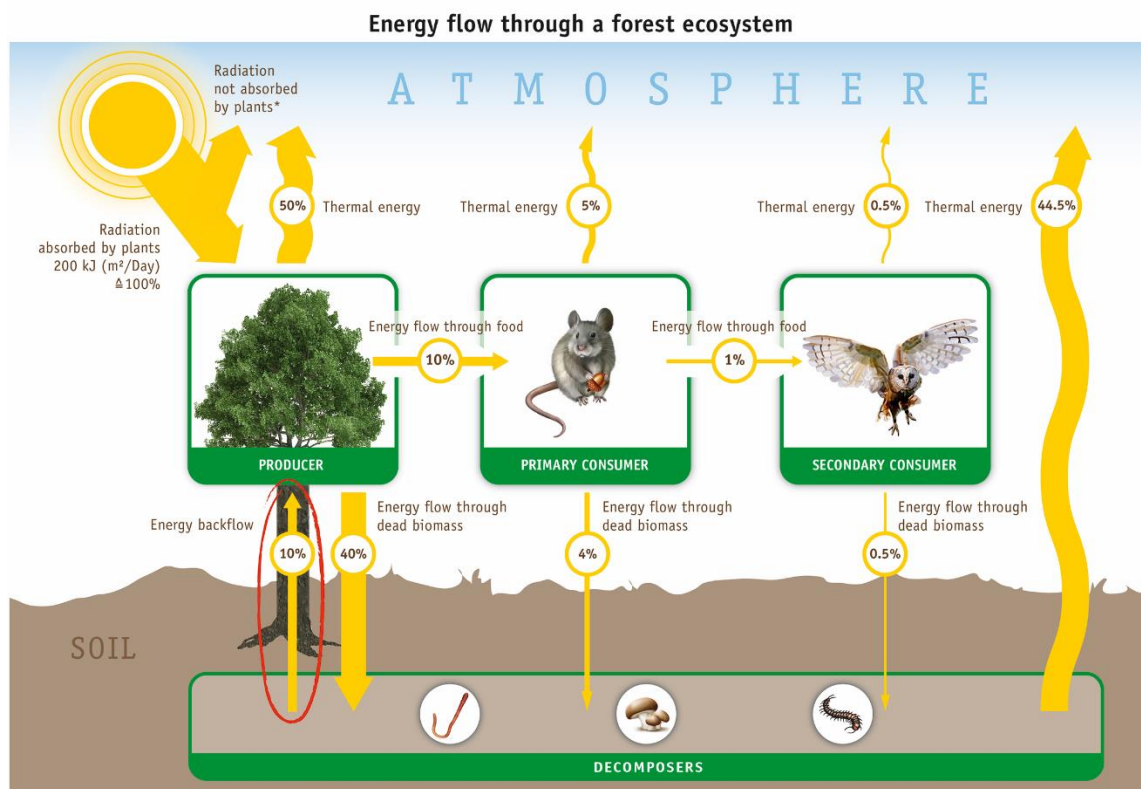
\*e.g. radiation reflected by the earth's surface

Anna found this diagram in the journal of her environmental organization. She is not sure whether she understands it correctly. Therefore, she shows it to her biology teacher and asks her for help. The teacher discovers an error in the diagram.

1. What error has Anna's teacher found? Encircle the error.
2. Explain the energy flow through the forest ecosystem on the basis of the diagram. Give reasons why you marked the feature as incorrect. Mention typical characteristics of energy flow that can be derived from the diagram and also apply to energy flows of other ecosystems.

## Studie 2

### 1.2 Learning material provided to Group 2



Drawing (including the width of arrows) is not true to scale.

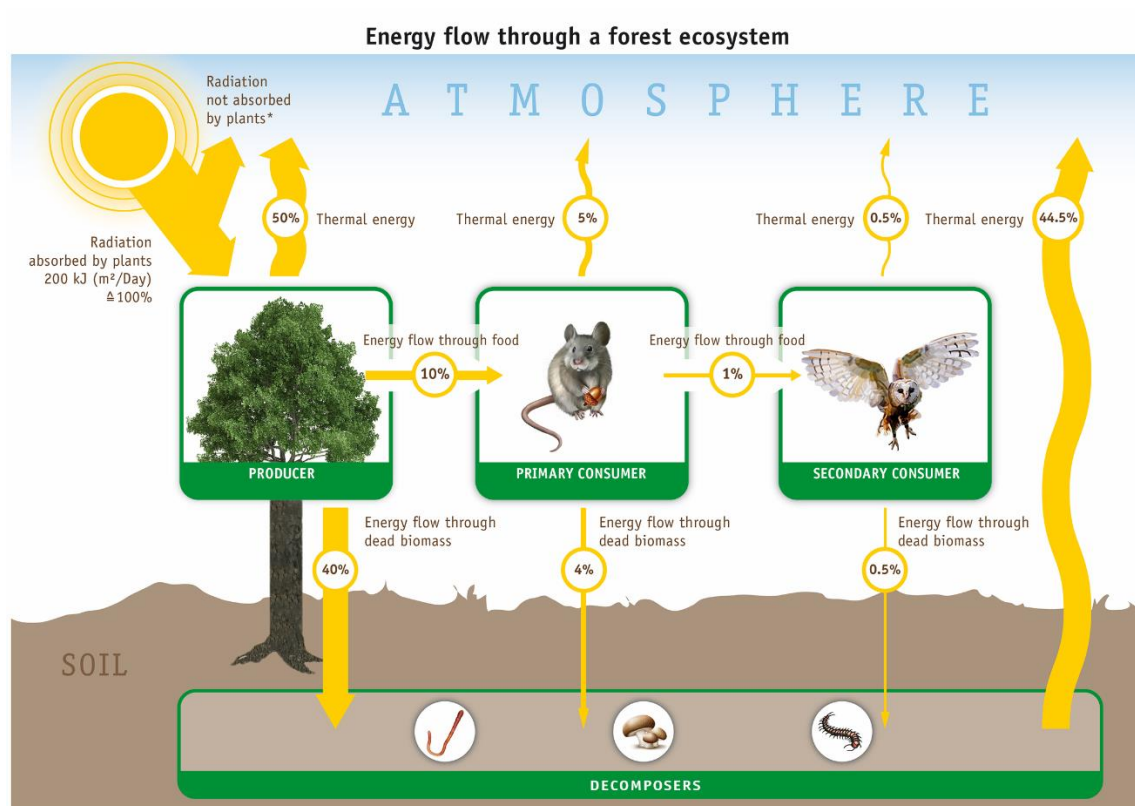
\*e.g. radiation reflected by the earth's surface

Anna found this diagram in the journal of her environmental organization. She is not sure whether she understands it correctly. Therefore, she shows it to her biology teacher and asks her for help. The teacher discovers an error in the diagram and encircles it.

**Task:** Explain the energy flow through the forest ecosystem on the basis of the diagram. Give reasons why the teacher marked the spot as incorrect. Mention typical characteristics of energy flow that can be derived from the diagram and also apply to energy flows of other ecosystems.



1.3 Learning material provided to Group 3



Drawing (including the width of arrows) is not true to scale.

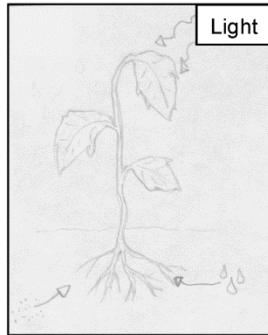
\*e.g. radiation reflected by the earth's surface

Anna found this diagram in the journal of her environmental organization. She is not sure whether she understands it correctly. Therefore, she shows it to her biology teacher and asks her for help.

*Task:* Explain the energy flow through the forest ecosystem on the basis of the diagram. Mention typical characteristics of energy flow that can be derived from the diagram and also apply to energy flows of other ecosystems.

## Part 2: Energy Test

### Task 1



Plants produce sugar for their growth from carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) with the help of sunlight. The amount of sugar that is produced depends on several factors.

Match each of the four points to the correct energy form.

	Energy form			
	Thermal energy	Light energy	Kinetic energy	Chemical energy
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">                     In each line, <b>one</b> energy form is correct!                 </div>				
Sunlight				
Temperature of the environment				
Wind speed (in a storm, leaves rarely directly face the sun)				
<u>Sugar</u> produced for plant growth with the help of sunlight				

Task 2



People sweat when they move a lot. Sweating helps to keep the body temperature constant.

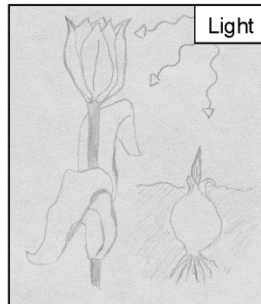
Select the statements that correctly describe the relation between increasing movement and the degradation of energy into heat!

**2 answers**  
are correct!

- Through increased movement, additional chemical energy is converted into heat. This additional energy has to be released into the environment because a build-up of heat would harm the body.
- During exercise, friction in the body increases. Through combustion of chemical energy in the body, additional heat is released. As the environment is cooler than the body, heat is released to the environment, where it is degraded. As a form of 'insulation', sweat works as a counter measure.
- Through evaporation of sweat, the skin is cooled. This way, excessive heat is released. However, the skin can transform heat back into chemical energy. Thereby, degraded energy is 're-valued'.
- The skin is cooled down by the evaporation of sweat. In this process, excessive heat is released into the environment. Thereby, the body is protected from overheating. However, the energy is 'degraded', because the body cannot transform heat any further.

## Studie 2

### Task 3



For its growth, a flower can use the sun's light energy, but also the energy stored in its flower bulb.

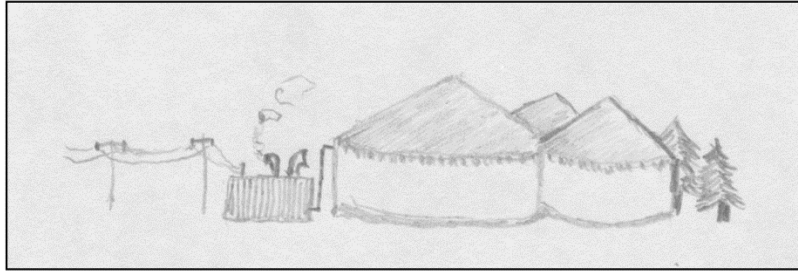
For the following three steps, select ...

(A) which pair of energy forms is involved, and ...

(B) how the energy is passed on!

Steps	(A) Energy forms			(B) How energy is passed on	
	Light energy → chemical energy	Chemical energy → chemical energy	Light energy → thermal energy	<b>Transfer</b> , because the energy form remains the same	<b>Transformation</b> , because the energy form changes
(1) With the help of sunlight, the flower's leaves build up sugar from carbon dioxide.					
(2) Sugar, that was stored in the flower bud, is broken down. Its energy is used for the growth of the plant.					
(3) As the sugar is built up, heat is released, too.					

## Task 4



In the last years, biogas plants (see drawing) have been widely established as small, decentralized power stations to provide a renewable energy source. Assume that a biogas plant is supplied with 2.000.000 kJ (kiloJoules;  $\approx$  480.000 kcal, kilocalories) of chemical energy in plant material ('biomass').

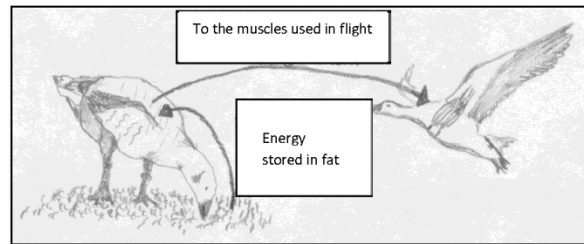
Select the statements that correctly describe how the amount of energy supplied to the biogas plant relates to the amount of energy transformed from it in the plant!

**2 answers**  
are correct!

- Micro-organisms decompose biomass. The hereby released gas (methane) is combusted by an engine. The chemical energy of the gas is transformed into thermal and kinetic energy. A generator then transforms the kinetic energy into electric energy.
- Micro-organisms digest the chemical energy of the plant material. They thereby release a gas from which electric energy is produced. While the chemical energy is lost in this process, electric energy can be created.
- In all transformations in the plant, heat is released. The heat is largely emitted into the environment and then stays unused. In sum, the emitted thermal energy, the electric energy and the chemical energy of residue biomass represent the initial 2.000.000 kJ. The energy is conserved.
- In combustion, the supplied chemical energy is lost, as it is consumed. The emitted heat contains no energy. The energy leaving the plant (as electric power and waste) contains much less energy than the initially supplied energy of 2.000.000 kJ.

## Studie 2

### Task 5



Before they go on their annual migration, birds put on a lot of weight and thereby store a lot of energy in fat stores. To generate movement, energy is passed on from the fat store to the muscles.

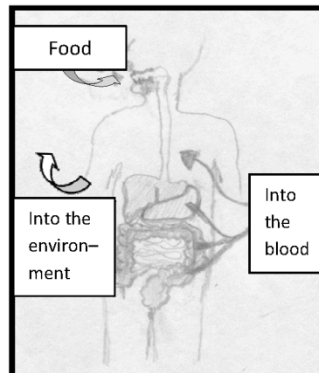
For the following three steps, select ...

(A) which pair of energy forms is involved, and ...

(B) how the energy is passed on!

	(A) Pair of energy forms			(B) How energy is passed on.	
	Chemical energy → chemical energy	Chemical energy → kinetic energy	Kinetic energy → thermal energy	<b>Transfer</b> , because the energy form stays the same	<b>Transformation</b> , because the energy form changes.
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">                     For each of the steps, tick  <b>one box for (A) AND one                      box for B.</b> </div> <p><b>Steps</b></p>					
(1) Chemical energy from the fat store is transported to the muscle and then handed over to the body's energy currency.					
(2) The 'energy currency' causes the muscle to contract. Thereby, the muscle moves.					
(3) The movement also causes friction. Therefore, energy is also passed on as heat.					

Task 6



A person takes up energy from the environment and transforms it in the body. A part of the energy is released back into the environment, another part remains in the body.

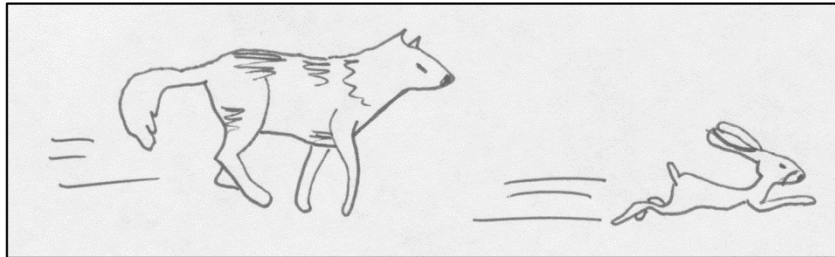
**(A)** In the following three steps, select if the energy is taken up by the body/stored in it, OR, if it's released back into the environment.

In part (A), chose <b>one option</b> for each of the three cases. In part (B), chose one option.	Energy <b>taken up/stored</b> in the body	Energy <b>released</b> by the body into the environment
1) Chemical energy from food	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2) Chemical energy in growing body parts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3) Energy transformed into heat in the body	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**(B)** Select the correct relation of the given amounts of energy.

The amount of <b>energy taken up</b> is ...	<input type="radio"/> ... <b>smaller than</b> ... <input type="radio"/> ... <b>larger than</b> ... <input type="radio"/> ... <b>equal to</b> ...	... the amount of <b>energy released</b> into the environment AND the <b>energy stored</b> in the body.
---	--	---

Task 7



Two wolves hunt. Wolf number 1 is hunting in northern Canada, where it's very cold. After 10 hours of hunting, he catches one fat hare. Wolf 2 is hunting for one hour in a summer forest and catches a little partridge.

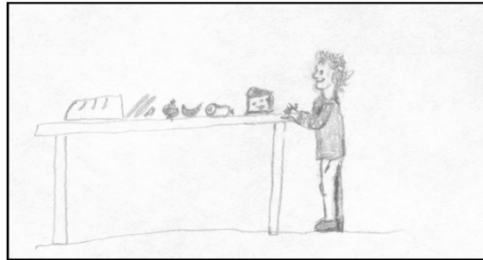
Select the options that correctly identify what the energy in the wolves' bodies is related to.

**2 answers**  
are correct !

- It is important how much chemical energy from food is stored in the wolf's body. The body does not possess chemical energy without food.
- The chemical energy in the wolf depends on the nature and extent of the stores of chemical energy (fats, sugar, proteins) in foods that are taken up by the wolf with the food.
- The chemical energy in the animals depends on how much chemical energy they give off through excrements and how much energy is transformed in body functions (e.g. movement, body heat) during the hunt.
- It is important how much chemical energy is stored in the digestive tract and in the muscles. There are no stores of energy in other body parts. Therefore, there is substantially more energy stored in wolf 1 than in wolf 2.



Task 8



A growing person transforms energy stores from food or from body (fat) for various life processes.

Select, where you can rediscover the energy after the transformation.

**2 answers**  
are correct!

- In new grown body structures, in the person's movement and in undigested parts of the food
- Energy is almost completely stored in new grown body mass (weight). The rest is heat and remains in the body.
- In the heat of the body and the environment
- In the electric currents of nerves which control the body functions
- In heat stores, which the body uses to generate movement

Tick one answer each for the following eight questions!

### Task 9

What is the original energy source for all of the food chains in a forest?

- green plants
- consumers
- decomposers
- sunlight
- soil nutrients

### Task 10

Organisms classified biologically as decomposers

- make their own food through photosynthesis.
- break down organic matter into its simpler components for use by green plants.
- recycle energy from dead matter back into the ecosystem for use by green plants.
- provide oxygen to consumers.
- provide carbon dioxide to consumers.

### Task 11

Consider the following food chain: Grass → cricket → frog → snake

Which of the following is true?

- Energy for the food chain comes from the soil.
- There is more energy available to frogs in the form of crickets than is available to snakes in the form of frogs.
- All of the energy in crickets that are eaten by frogs is transformed into energy in the form of the frog's flesh.
- Unlike the animal organisms in the food chain, grass does not depend upon an energy source to survive.

### Task 12

Which of the following statements concerning food chains is correct?

- The organic matter that is built up in a body contains as much energy as the food contained.
- The biomass increases during the food chain, from producers to consumers of higher stages.
- Food production depends on sunlight finally.
- Especially pollutants that are readily biodegradable are accumulated during the food chain.

### Task 13

Which of the following statements concerning ecosystems is correct?

- The whole energy of an ecosystem is gradually transformed to heat energy and emitted into space.
- Organisms living in an ecosystem can transform heat energy to kinetic energy.
- Energy and nutrients are recycled in an internal circle of an ecosystem.
- The thinner earth's crust, the more energy an ecosystem gets out of earth's interior.

### Task 14

On what factor depends the energy inflow of most food chains typically?

- how much grass primary consumers eat
- efficiency of matter cycle of the whole ecosystem
- efficiency of producers regarding the conversion of rays of sunlight into chemical energy
- activity of bacteria that fix nitrogen

### Task 15

Which of the following statements concerning biomass in a forest ecosystem is correct?

- The biomass of primary and secondary consumers is equal.
- The biomass of producers is smaller than the biomass of primary consumers.
- The biomass of secondary consumers is bigger than the biomass of primary consumers, provided that the diversity of species is bigger.
- The biomass of producers is the biggest.

### Task 16

Which of the following statements is correct?

- An ecosystem can absorb matter and energy from the environment and also release matter and energy to the environment.
- An ecosystem can absorb matter, but no energy from the environment and can also release matter, but no energy to the environment.
- An ecosystem can absorb energy, but no matter from the environment and also release energy, but no matter to the environment.
- An ecosystem can absorb and release neither matter nor energy from or to the environment.

**Task 17**

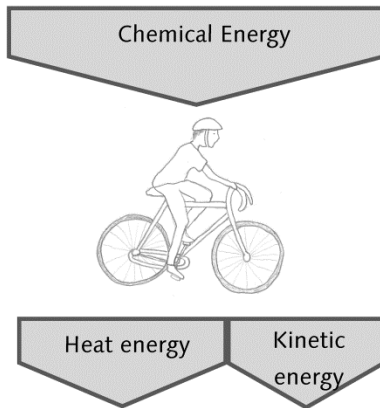


Fig.1: Energy flow diagram of an active person

The diagram in figure 1 shows that the whole chemical energy that the physically active person has ingested before is converted into heat and kinetic energy and given to the environment.

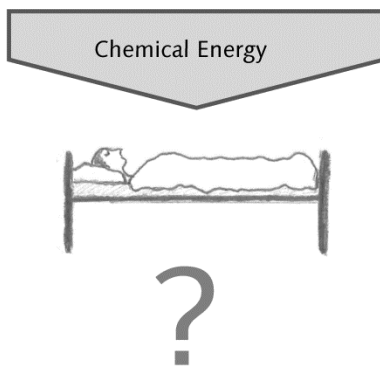


Fig. 2: Energy flow diagram of a resting person

The diagram in figure 2 is incomplete. It shows a resting person who has ingested as much energy as the active person. Describe in a text what happens to the energy in this case!

**Task 18**

A raptor with a weight of 1 kg eats about 10 kg mice a year. These 10 kg mice eat, in their turn, about 100 kg of grain. If the raptor fed on grain directly, it would only need to eat 10 kg thereof. Hence, the energy of 90 kg grain could be saved. Try to explain this.

## Sources

All items were used in German language.

**Task 1 – Task 8:** Opitz, S. T. (2016). Students' progressing understanding of the energy concept. An analysis of learning in biological and cross-disciplinary contexts. Dissertation, Christian-Albrechts-University at Kiel, Germany. Retrieved from [http://macau.uni-kiel.de/receive/dissertation\\_diss\\_00019005](http://macau.uni-kiel.de/receive/dissertation_diss_00019005) [08.06.2017].

**Task 9:** Beals, A. M., McNall Krall, R., & Wymer, C. L. (2012). Energy flow through an ecosystem: Conceptions of in-service elementary and middle school teachers. *International Journal of Biology Education*, 2, 1-18. *Item slightly modified.*

**Task 10:** Beals, A. M., McNall Krall, R., & Wymer, C. L. (2012). Energy flow through an ecosystem: conceptions of in-service elementary and middle school teachers. *International Journal of Biology Education*, 2, 1-18. *Item slightly modified.*

**Task 11:** Beals, A. M., McNall Krall, R., & Wymer, C. L. (2012). Energy flow through an ecosystem: Conceptions of in-service elementary and middle school teachers. *International Journal of Biology Education*, 2, 1-18. *Item slightly modified.*

**Task 12:** Hildebrandt, K. (2006). *Die Wirkung systemischer Darstellungsformen und multiperspektivischer Wissensrepräsentationen auf das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs* [The effect of systemic graphic illustrations and multiple knowledge representations on the understanding of the global carbon cycle]. Dissertation, Christian-Albrechts-University at Kiel, Germany. Retrieved from [http://eldiss.uni-kiel.de/macau/receive/dissertation\\_diss\\_2412](http://eldiss.uni-kiel.de/macau/receive/dissertation_diss_2412) [18.11.2013].

**Task 13:** constructed by authors

**Task 14:** Kappei, D., Mühle, C., & Lucius, E. (2009). Klausur 2. Runde an Schulen (Okt./Nov. 2009). [Exam 2. round at schools]. Retrieved from [http://wettbewerbe.ipn.uni-kiel.de/ibo/fr\\_reload.html?erste\\_runde.html](http://wettbewerbe.ipn.uni-kiel.de/ibo/fr_reload.html?erste_runde.html) [30.03.2015]. *Item slightly modified.*

## Studie 2

**Task 15:** constructed by authors

**Task 16:** constructed by authors

**Task 17:** Beyer, I., Remé, R., & Steinert, C. (2010). *Natura 2. Biologie für Gymnasien* [Natura 2. Biology for academic track schools]. Stuttgart, Germany: Klett. *Item strongly modified.* Note: For legal reasons, we replaced the pictures originally used in this item. The pictures shown here are similar to the ones used before.

**Task 18:** Burger, J. (2001). *Schülervorstellungen zu "Energie im biologischen Kontext". Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen* [Student conceptions concerning energy in biological contexts-research, analysis and conclusions]. Dissertation, University Bielefeld, Germany. Retrieved from <https://pub.uni-bielefeld.de/publication/2305865> [24.06.2016]. *Item slightly modified.*



### Part 3: Presentation

Note:

The presentation was translated from German into English.

For legal reasons, we replaced the pictures originally used in this presentation with the pictures used in the energy flow diagram. Before this, the pictures were comparable but not identical.

The photographs shown are the same as those in the original presentation.



# Energy Flow through Ecosystems



Ulrike Wernecke  
Leibniz Institute for Science and Mathematics Education  
Olshausenstraße 62, 24118 Kiel, Germany  
Tel. +49 431 880 – 5697  
e-mail: wernecke@ipn.uni-kiel.de

## Ecosystem

=

Set of relationships existing between a community of organisms and their environment.

Organisms are interrelated to one another.

## Feeding relationships in an ecosystem

### Food chain:



### Example:



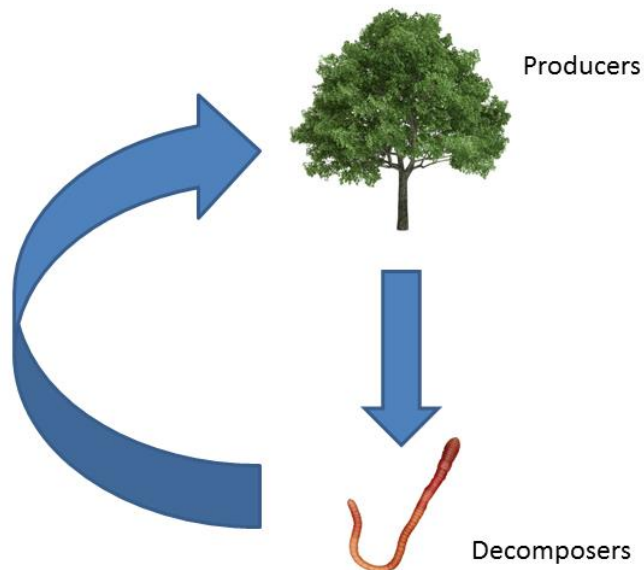
### Decomposers (e.g. fungi, earthworms)

- feed on biomass of other organisms, just as consumers.
- break down dead biomass into its inorganic components, such as water, carbon dioxide and mineral salts. These materials can be absorbed by plants.

3

## Cycle of matter in an ecosystem

- Certain materials (oxygen, carbon dioxide, mineral salts) are recycled over and over again. Matter circulates in an ecosystem.



4

## Energy flow

= energy transfer through an ecosystem

In contrast to matter, energy does not flow in a cycle, but in a “one-way street”.

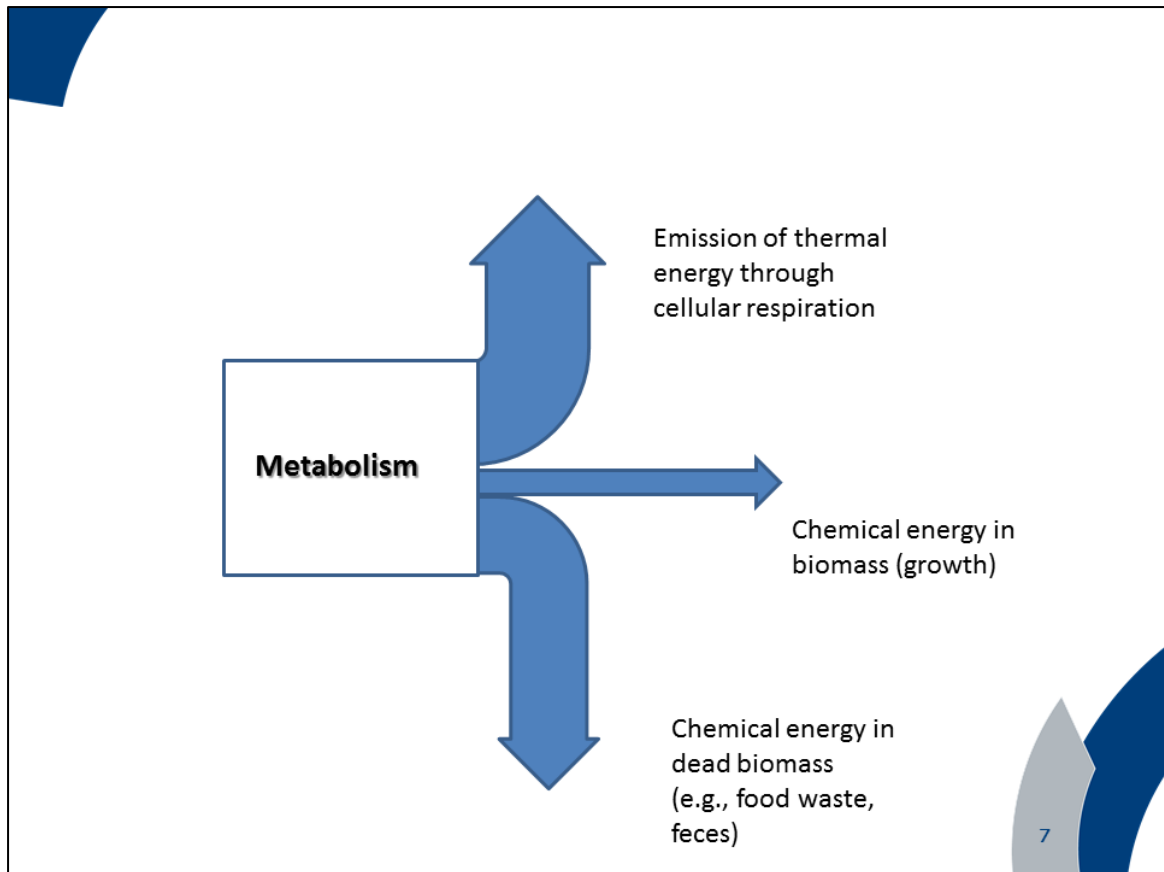
5

## Absorption of energy

- Producers (green plants) use radiation energy from the sun for photosynthesis.
- In photosynthesis, energy-rich organic compounds (such as carbohydrates) are synthesized.
- Consumers and decomposers cannot synthesize organic compounds by themselves. They feed on organic compounds of other organisms.

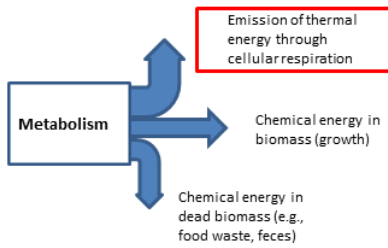


6

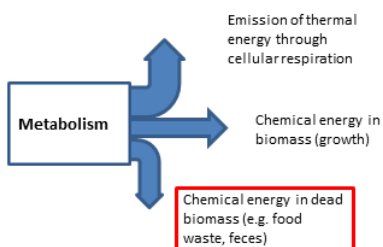


This diagram is a smaller version of the one above, with the word "Metabolism" in its central box enclosed in a red border. The three arrows and their corresponding labels are identical to the first diagram.

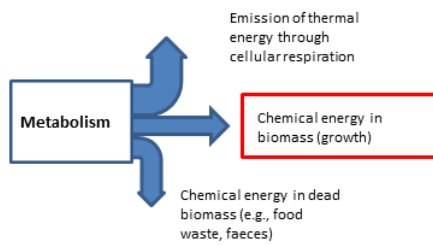
- Metabolic processes run all the time in organisms' cells.
- The processes are always associated with energy conversion, that is, one energy form is transformed into one or more other energy form(s).



- Every energy transformation generates thermal energy, which is released to the surroundings.
- Organisms cannot convert thermal energy into other energy forms (energy degradation).
- That is why an ecosystem needs a constant energy supply from the sun.



- Chemical energy stored in dead biomass feeds decomposers.



- Only the energy stored in biomass is available for the next level in the food chain.
- Rule of thumb: From one level in the food chain to the next, only 10% of the energy is transferred.

11



The amount of energy in the universe is always the same, because energy can neither be created nor destroyed (energy conservation).

12





## 6 STUDIE 3

### Metaphors Describing Energy Transfer through Ecosystems

– helpful or misleading?<sup>19</sup>

#### Abstract

Energy transfer in ecosystems is an abstract and challenging topic for learners. Metaphors are widely used in scientific and educational discourse to communicate ideas about abstract phenomena. However, although considered valuable teaching tools, metaphors are ambiguous and can be misleading when used in educational contexts. Educational researchers have found various metaphorical patterns in scientific and everyday language that have been summarized as conceptual metaphors. However, little is known about the way students deal with crucial metaphors of specific science content. Using metaphor theory as a framework, the study presented here focuses on four metaphors describing energy transfer through an ecosystem: *energy flow*, *non-cycle*, *one-way street* and *energy loss*. Applying qualitative content analysis, the usage of the metaphors was analyzed in 13 biology textbooks and 50 students' texts. We found notable differences between textbooks' and students' application of metaphors. Students often do not adopt the metaphors or use them as intended. For example, energy flow is a conventionalized metaphor for energy transfer processes, but students tend to use this metaphor in terms of a substance instead of a process. Implications for the use of these metaphors in biology instruction are derived.

#### Keywords

metaphor, ecosystem, energy transfer, secondary

---

<sup>19</sup> Der finale Artikel ist erschienen: Wernecke, U., Schwanewedel, J. & Harms, U. (2018). Metaphors Describing Energy Transfer through Ecosystems – helpful or misleading? *Science Education*, 102, 178-194. doi: 10.1002/sce.21316 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sce.21316>

## 6.1 Introduction

Contemporary research on empirically validated learning progressions addresses progression in students' understanding of four key aspects of energy: (1) energy forms, (2) energy transfer and transformation, (3) energy degradation, and (4) energy conservation (Neumann, Viering, Boone, & Fischer, 2013). Educational research has revealed that students have a conceptually limited understanding of energy in physical, chemical and biological contexts (Opitz, Neumann, Bernholt, & Harms, in press). In biology education, the energy concept is particularly considered when teaching students about ecosystems (Nordine, 2016). Energy flow is a challenging topic for students (Lin & Hu, 2003; Sadler et al., 2013) and associated with multiple alternative conceptions (Boyes & Stanisstreet, 1991; Burger, 2001). For example, students have been found to have problems distinguishing between matter and energy: They believe that energy can be recycled (e.g., by decomposers) and reused (e.g., by plants) in an ecosystem (e.g., Burger, 2001; Lancor, 2014b; Leach, Driver, Scott, & Woo-Robinson, 1996). In the context of abstract scientific concepts and processes, metaphors have been found to be effective teaching tools (e.g., for the global warming associated with increases in atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations metaphorically described as 'the greenhouse effect'; Niebert & Gropengießer, 2014). However, studies also reveal that metaphors can lead to misunderstandings (Niebert, Marsch, & Treagust, 2012), for example if a metaphor evokes associations from everyday life that are not consistent with its scientific meaning. Alternative conceptions about energy often arise from, or are reinforced by, discrepancies between scientific and everyday language (Jin & Wei, 2014; Needham, 2014). Because energy is *lost* or *used up*, people are admonished to *save* energy. These metaphors illustrate the degradation of energy (usually defined as the process by which energy becomes less available for doing work), but when taken literally, they contradict the first law of thermodynamics which states that energy is conserved. Hence, it is crucial to appreciate that metaphorical language has the power to foster or hinder learning. However, there is still a lack of empirical research examining the structure and application of energy-related metaphors in educational contexts. Thus, the present study analyzes metaphors related to energy transfer from an educational perspective and assesses students' use of the metaphors. The findings provide a basis for improving use of metaphors in energy instruction.

## 6.2 Theoretical Background

### 6.2.1 Scientific Content: Energy Transfer in Ecosystems

Ecosystems follow the physical laws of thermodynamics (Stoy, 2010). As they are open systems, energy can be transferred to and from the surrounding environment. The sun is the ultimate energy source for most ecosystems.<sup>20</sup> Its radiation is used to synthesize biological molecules by photosynthesis, and chemical energy is transferred through the food chain. Every transformation of chemical energy in organisms generates heat energy, which eventually dissipates into the environment. This energy serves biological functions (e.g., the maintenance of body temperature of homeothermic organisms), but cannot be used for further energy transformations (which could be thermodynamically regarded as the ‘work’ in ecosystems). Some chemical energy is passed to decomposers, e.g., in feces and food waste (Reece et al., 2011). From one trophic level to another, approximately 10% of the energy is transferred (Kozlovsky, 1968). The inefficiency of energy transfer is regarded as the reason why food chains rarely have more than five links (Trussell, Ewan-chuk, & Matassa, 2006). Energy can be transformed from one form into another and transferred from one place to another. However, energy can neither be created nor destroyed, but is conserved, as formulated in the first law of thermodynamics. Moreover, energy cannot be recycled, implying that a continuous energy input from the sun is needed to sustain ecosystems (Reece et al., 2011).

### 6.2.2 The Theory of Conceptual Metaphors

The conceptual metaphor theory, which was developed by the linguist Lakoff and the psychologist Johnson, is a prominent theory about humans’ understanding of abstract concepts (Borghetti et al., 2017). It states that the human conceptual system is fundamentally metaphorical and that abstract concepts are understood through concrete concepts by use of metaphors (Lakoff & Johnson, 1980, 2003). A metaphor is a word or phrase that can be understood beyond the literal meaning and has a target and a source domain, i.e., one domain is understood in terms of another domain (Lakoff & Johnson, 1980; Schmitt, 2005). This broad definition of a metaphor includes analogies, similarities and symbols (Niebert et al., 2012). Cognitive linguists have found patterns of metaphors using the same source and target domains and summarized them in metaphorical concepts with a

---

<sup>20</sup> We deliberately exclude chemosynthesis in this examination.

title in the form of Target is Source (Lakoff & Johnson, 2003). For example, Lakoff and Johnson (2003, pp. 46-47) identified the conceptual metaphor ‘Ideas are Food’, which is reflected in sentences like ‘What he said left *a bad taste in my mouth*’, ‘I just can’t *swallow* that claim’, and ‘*That’s food for thought*’. The transfer of features from source domain to target domain is called mapping. Since only selected features of the source domain can be transferred (imprecisely) to the target domain, the mapping is not exhaustive, but partial. A single metaphor highlights certain aspects of a concept and hides others. This is why multiple metaphors are used to describe an abstract concept (Lakoff & Johnson, 1980). Although metaphors are often coherent and may overlap each other, they must not be consistent (Amin, 2009; Lakoff & Johnson, 2003).

An assumption related to the theory of conceptual metaphor is that humans ground their ideas in experiences with their bodies and the environment (Johnson, 1987; Lakoff, 1990). This theoretical framework, called experientialism, has proven value in science education research for explaining students’ understanding of scientific concepts (Niebert et al., 2012). According to this theory, our bodily experience is highly structured. Johnson (1987) calls the structures ‘image schemata’ and shows that image schemata such as path and cycle organize our mental representations. The image schemata structures can be transferred to abstract domains by metaphors (Johnson, 1987). Hence, image schemata provide the sources for a wide range of metaphorical projections. For example, Niebert and Gropengießer (2015) showed that image schemata are used as embodied source domains to structure scientific phenomena such as microbial growth, greenhouse effect, and carbon cycle.

### **6.2.3 Metaphors in Science Education: Potentials and Challenges**

The understanding of many scientific phenomena is necessarily imaginative: “In fact, metaphorical concepts are essential to scientific thought—without them we could understand very little beyond our direct physical experience”. (Lakoff & Johnson, 1980, p. 208). Chew and Laubichler (2003) go even further and hypothesize a correlation between the complexity of scientific phenomena and humans’ dependence on metaphorical language.

As already mentioned, in science education research metaphors are regarded as valuable teaching tools that can help students to visualize abstract phenomena, motivate them and make new ideas intelligible (Duit, 1991; Posner, Strike, Hewson, & Gertzog,

1982). However, a meta study by Niebert et al. (2012) found that effective instructional metaphors need unambiguous, embodied sources that students understand directly. This claim is not always satisfied by common metaphors, causing several problems that are likely to be overlooked. Metaphors used by experts (e.g., teachers) in scientific discourse are often conventionalized and no longer perceived as figurative language. Moreover, so-called ‘dead metaphors’ do not invoke a concrete source domain, and students who are not familiar with the specific scientific meaning of a metaphor may understand it in a different way, that is, their ideas might be more affected by the source domain (Amin, Jeppsson, Haglund, & Strömdahl, 2012; Rundgren, Hirsch, & Tibell, 2008).

Rundgren et al. (2008) pointed out that the described challenges also apply to verb-metaphors. Verbs used metaphorically are usually used in everyday contexts as well. Therefore, they offer opportunities to map abstract processes to students’ everyday life, but may evoke everyday associations that are not in line with the precise meaning of the verb in a scientific context (Rundgren et al., 2008). This is particularly challenging in classroom settings. Although metaphors have the potential to enable communication about abstract concepts and facilitate understanding, several empirical studies have revealed that students struggle with their adequate usage. For instance, Felzmann (2014) found that students and scientists use the same conceptual metaphors regarding glaciers, but students sometimes applied them in inappropriate contexts. An example is the conceptual metaphor *a Glacier is an Immobile Ice Body* leading students to inadequate concepts regarding the geomorphology of Northern Germany. In this context, the metaphor *a Glacier is a Flow of Ice* would be appropriate. Similarly, Niebert and Gropengießer (2014) found that students and scientists use the same schemata for understanding the greenhouse effect, but inadequate mapping from source to target domains by students often results in scientifically incorrect conceptions. For example, in the context of plant nutrition students map their experience of eating (i.e., the intake of matter) to plant nutrition, which leads to the scientifically inadequate idea that plants get the bulk of their food [more strictly organic substances] directly from the environment rather than making it by photosynthesis (Leach et al., 1996).

#### **6.2.4 Energy Understanding is Based on Metaphors**

Energy is an excellent example of an abstract scientific concept. We cannot experience energy directly, only energy carriers and energy transformation processes are ob-

servable. The same goes for ecological processes: Processes such as energy transfer in an ecosystem cannot be observed due to the spatial and temporal dimensions. Amin (2009) and Amin et al. (2012) showed that the abstract concept energy is understood by using multiple conceptual metaphors grounded in experience in both everyday and scientific language. Despite the agreement about the omnipresence of energy-related metaphors and their potential for teaching and learning, little is known about the way students understand and use them. However, Lancor (2014b) has presented a particularly relevant metaphor theory-based investigation of college and university students' conceptions of energy. Students were asked to write analogies with energy in contexts of mechanical systems, electrical circuits, chemical reactions, and ecosystems. Lancor (2014b) identified seven conceptual metaphors that were used in varying frequencies depending on the context. For example, the conceptual metaphor Energy is a Substance that can Flow was frequently used in the contexts of circuits and ecosystems. Moreover, only students who were asked to write about ecosystems used the metaphor that Energy is a Substance that can be Lost, and only 30% of these descriptions included an energy source. Thus, there is a clear need for further exploration of students' and teachers' use of energy-related metaphors, and associated understandings and misunderstandings. These are the foci of the study presented here, as described in the following section.

### 6.3 Research Aim

The traditional approach of systematic metaphor analysis (Schmitt, 2005) identifies single metaphors from a dataset and arranges metaphors with the same source and target domains to reconstruct conceptual metaphors, thereby describing metaphorical patterns. Examples of this approach in analyses of energy-related metaphors are provided by Amin (2009) and Lancor (2014b). However, an issue that has received little attention is whether energy-related metaphors used in educational contexts are adopted and used in the intended way by students. We target this research gap by analyzing the use (and misuse) of single metaphors that are literally used in teaching and learning scientific concepts, taking previous findings concerning underlying conceptual metaphors into account.

We focus on four metaphors describing energy transfer through an ecosystem. The central metaphor for this target domain is *energy flow*, a metaphor which is conventionalized and used as a scientific term. Three more metaphors were selected for thorough investigation because they describe different crucial features of energy transfer.

Two of them are variations of energy flow: *non-cycle* and *one-way street*. Energy flow and matter cycling are the central processes in an ecosystem. Unlike matter, energy cannot be recycled. Students have been found to have problems with differentiating these processes (e.g., Leach et al., 1996). We decided to survey the non-cycle metaphor, which is supposed to prevent students from blending energy and matter transfer. Moreover, we analyze the *one-way street* metaphor which is a striking term to describe the directionality of energy transfer. The third metaphor chosen for detailed analysis is *energy loss*. Although this metaphor is not restricted to energy transfer in ecosystems, it targets energy degradation, which is a critical feature of energy transfer processes. In order to examine the metaphors' educationally intended use, we analyze current biology textbooks. Textbooks are central instructional tools in science teaching, they are frequently used in schools (e.g., McDonald, 2016), and are assumed to heavily influence teaching and learning in school science classrooms (Abd-El-Khalick et al., 2017).

## 6.4 Research Questions

The aims of this study are to describe metaphors referring to energy transfer through an ecosystem and investigate their usage in an educational context. As outlined above, the metaphors selected are: *energy flow*, *non-cycle*, *one-way street*, and *energy loss*. Our systematic analysis of these metaphors from an educational perspective addresses the following questions.

1. Which features (source domain, highlighted and hidden aspects) do these metaphors have and how are the metaphors related to each other?
2. How are these metaphors used in teaching material (specifically biology textbooks)?
3. How are these metaphors used in students' descriptions of energy transfer in an ecosystem?

## 6.5 Method

In order to address these research questions, we divided our study into three steps: (1) survey of metaphor features, (2) survey of textbooks' use of metaphors, and (3) survey of learners' adoption of metaphors. The critical comparison of the results provides the basis for the derivation of implications for educational settings.

*Survey 1.* We surveyed energy transfer metaphors from an educational perspective by analyzing their prominent features. Here we describe the selected metaphors with regard to their source domain, and both highlighted and hidden aspects. We also review suggestions of educational researchers concerning these metaphors' applications to identify their educational value, and deficiencies.

*Survey 2.* To analyze how metaphors are used in instructional material, we chose 10 German biology textbooks for middle and upper school from four publishers that are widely approved by German federal states. Since the use of metaphors may be language-specific, we also included two textbooks in English that are widely used in English-speaking countries: Campbell Biology (Reece et al., 2011) and Biology IB Diploma (Clegg, 2014). We selected the pages dealing with energy flow according to their indexes<sup>21</sup>, including glossary entries (see Table 6-1 and Supplement 1).

Table 6-1

*Analyzed textbooks*

Textbook	Analyzed Pages
Linder Biologie 2*	pp. 140-141, 160-161
Linder Biologie Gesamtband	pp. 388-389
Natura 2*	pp. 157-158, 202-203
Natura Oberstufe	pp. 328, 365, 380
Markl Biologie	pp. 348-349, glossary entry 'energy flow'
Fokus Biologie 7/8*	pp. 196-197
Fokus Biologie 9/10*	pp. 154-157
Biologie Oberstufe	pp. 343, 354-355, glossary entry 'energy flow'
BIOskop 7-10*	pp. 34-35, 122-123
BIOskop SII	pp. 83, 170-171, 185, glossary entry 'energy flow'
Campbell Biology	pp. 1264-1266, 1271-1273 (overview and chapter 55.1, 55.3)
Biology IB Diploma	pp. 194-200, 209-210

*Note.* Asterisks indicate textbooks used for lower secondary education.

*Survey 3.* To survey students' applications of these metaphors, we analyzed texts written by 50 students (56.0% female;  $M = 14.84$  years,  $SD = 0.50$ ) from the 9<sup>th</sup> grade of secondary schools ('Gymnasium') in the German federal state Schleswig-Holstein.

<sup>21</sup> For exceptional cases, see Supplement 1.



Since metaphors are commonly used for explaining energy transfer in ecosystems, it would be artificial to teach the topic without metaphors. For this reason, we decided to give a short, standardized presentation (PowerPoint) prior to the data collection that explains energy transfer through an ecosystem and thus exposes students to the selected metaphors (see Supplement 2). In this presentation, it is stated that “In contrast to matter, energy does not flow in a cycle, but in a ‘one-way street’”. It also provides the following explanation of the metaphor energy flow: “Energy flow = energy transfer through an ecosystem”. By contrast, following a recommendation by Jewett (2008), the metaphor *energy loss* was deliberately avoided in the lecture. However, we analyze students’ spontaneous application of this metaphor. Copies of the presentation on 12 slides were handed out to the students, who viewed them, and then described (in writing) a diagram illustrating the energy flow through a forest ecosystem. The rubric for this task was: “Explain the energy flow through the forest ecosystem on the basis of the diagram. Mention typical characteristics of energy flow, which can be derived from the diagram, and which also apply to energy flows of other ecosystems”. (see Supplement 3). The texts contained on average 151 words (range 14 - 330,  $SD = 58.7$ ).

*Analysis of data from Surveys 2 and 3.* We applied qualitative content analysis (Mayring, 2014) to analyze systematically the use and explanations of the metaphors in the instructional material and students’ texts. For this purpose, we compiled the coding scheme presented in Figure 6-1. The main categories reflect the four metaphors. The subcategories were deductively derived from the results of Survey 1, i.e. analysis of the metaphors’ features and suggestions of educational researchers. Additional subcategories were inductively derived from the material. The formulation of the subcategories was sharpened while coding the instructional material and analyzing students’ texts.

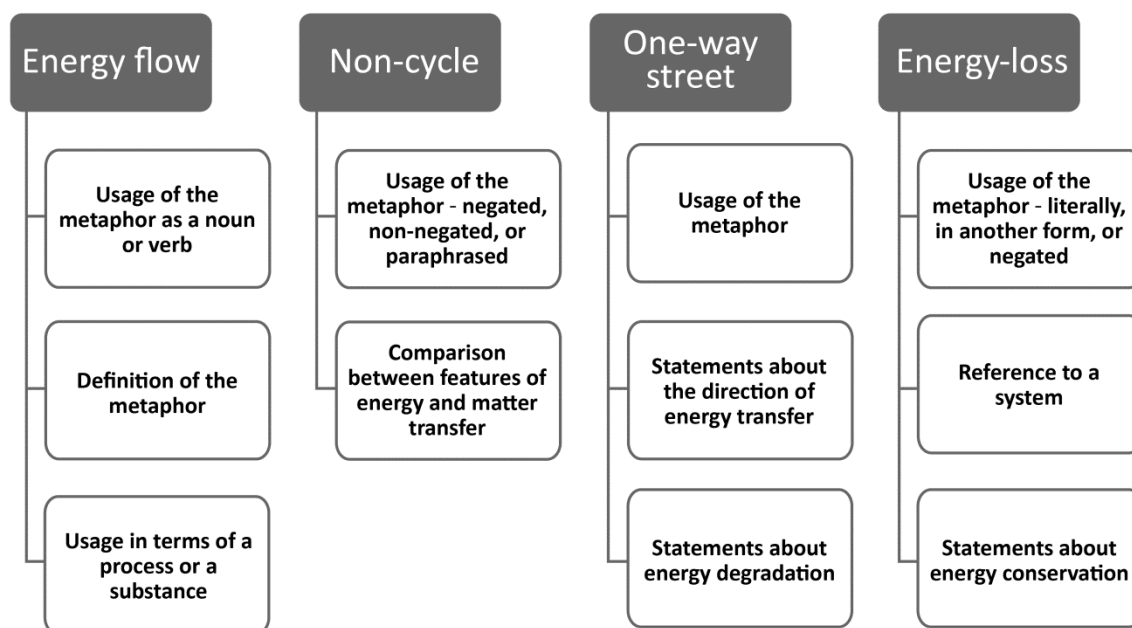


Figure 6-1. Coding scheme.

*Trustworthiness.* In order to check the objectivity of the first author’s coding in Surveys 1 and 2, 25% of textbooks ( $n = 3$ ) and students’ texts ( $n = 13$ ) were randomly selected and coded by two trained observers. Kappa values (Fleiss, 1971), calculated as a chance-corrected coefficient of observer agreement, indicated for each category substantial ( $\kappa = 0.65$ ) to perfect agreement ( $\kappa = 1$ ) according to Landis and Koch (1977) (see Supplement 4 for a detailed list of kappa coefficients). Final ratings are based on the consensus between the three raters. To appraise validity, we compared our qualitative results to the results of previous studies of students’ energy concepts or metaphor use.

## 6.6 Results

This chapter is divided into three sections. First, we analyze the features of each selected metaphor and review suggestions of educational researchers concerning its application (step 1). Then, we examine metaphors’ use in biological textbooks (step 2). In the third section, we analyze how far student’s descriptions of energy transfer reflect the intended use of the metaphors (step 3).

## Step 1: Analysis of metaphors' features

### (1) *Energy flow*

*Energy flow* is undoubtedly the most prominent metaphor for describing energy transfer between systems. Implying that energy behaves like a fluid, it belongs to the conceptual metaphor Energy is a Substance / Energy is a Quasi-Material (Duit, 1987, 2014; Lancor, 2014a). This conceptual metaphor structures human thinking, as reflected in everyday language: “I don’t have any energy left at the end of the day” (Lakoff & Johnson, 2003, p. 51). Aside from being part of our everyday language, Energy is a Substance is probably the most intensively addressed conceptual metaphor regarding energy, and its benefit for teaching and learning is controversial. A few researchers argue against viewing energy as if it was a kind of substance (Chi, 2005; Tracy, 2014). However, various studies have found evidence that this conception is helpful for understanding some aspects of the energy concept, especially energy conservation (e.g., Brewe, 2011; Dreyfus, Gupta, & Redish, 2015; Scherr, Close, McKagan, & Vokos, 2012). Duit (1987) and Duit and Häußler (1994) argue that the conception of energy as a quasi-material that flows does not contradict the energy concept in general and might be a helpful frame to embed students’ life-world conception of energy. However, the metaphor should not be used in certain unsuitable contexts, e.g., quantum physics (Duit, 1987).

The noun *flow* means the “the steady and continuous movement of something/somebody in one direction” (Wehmeier, 2005, p. 595). We assume that the corresponding image schema is the path schema, which consists of a source or starting point, an endpoint and a sequence of contiguous locations connecting these two (Johnson, 1987). Flow is commonly used as a source domain for both concrete and abstract target domains, e.g., traffic flow and information flow, respectively. The metaphor is based on embodied cognition to make the abstract processes accessible. “Fluid flow is a useful analogy for energy transfers between systems because most of us have developed an intuition that fluid that flows from someplace must end up someplace else”, states Nordine (2016, p. 73) and concludes that this metaphor highlights energy conservation. However, Lancor (2014b) found that students applied this metaphor more frequently to energy transfer and degradation than to energy conservation. Moreover, the transformation aspect is hidden by the energy flow metaphor since the ‘fluid’ stays the same (Lancor, 2014a). Nordine (2016) warns of using the energy flow metaphor too early (not before middle school), to prevent students from believing that energy is indeed a physical fluid.

(2) *Non-cycle*

A cycle is “the fact of a series of events being repeated many times, always in the same order” (Wehmeier, 2005, p. 381). According to Johnson (1987), the cycle schema enables humans to understand temporal and non-temporal sequences of events. Initially, cycles may seem too abstract to function as a source domain. However, some cyclical processes are directly accessible for humans. For example, we constantly experience diurnal and seasonal cycles throughout our lives (Johnson, 1987). In terms of matter, the cycle metaphor is well-established and widely used in diverse biological contexts, for instance blood circulation and cell cycling. In ecosystems, carbon, water, oxygen, and nitrogen cycles (among many others) are essential. Thus, in addition to the definition given above, it is important to note that the *same* object, or substance, passes through repeated series of events. However, students have been found to believe that energy can be recycled in an ecosystem and thus flows cyclically, like matter (Burger, 2001; Lancor, 2014b). Due to the omnipresence of cycles in biology and ecosystems, there is a need to emphasize that energy does *not* cycle, although it is metaphorically often treated as a substance. This is a form of negative knowledge, i.e. knowledge about what something is *not* in contrast to what it really is, which can clarify boundaries of a concept or principle (Oser & Spychiger, 2005). Hence, this metaphor highlights the contrast between energy and matter transfer. Instead of thinking in the cycle schema, the path schema would be more appropriate in this context.

(3) *One-way street*

The metaphor of energy as a *one-way street* illustrates the direction of energy transfer and highlights the irreversibility of energy degradation. One-way means “moving or allowing movement in only one direction” (Wehmeier, 2005, p. 1060). We assume that this source domain is structured by the path schema. Although the path schema is not inherently directional, humans following a path usually aim to reach a destination point and therefore experience paths as directional (Johnson, 1987). One-way streets are known by everyone who is familiar with traffic regulations. Theoretically, a sequence of one-way streets may result in a cycle, which might be weakness of this metaphor. Unlike the other metaphors presented here, the use of this metaphor is limited to energy transfer in an ecosystem and not used in other biological or energetic contexts.

#### (4) *Energy loss*

The metaphor *energy loss* belongs to the conceptual metaphor Energy is a Substance (Lancor, 2014a) or, more precisely, “Change in Energetic State is Movement of Possession” (Amin, 2009). Loss means “the state of no longer having something or as much of something” (Wehmeier, 2005, p. 911). The energy loss metaphor is commonly used to describe the inefficiency of energy transformations, e.g., in an ecosystem. It highlights energy degradation, but hides energy conservation (Lancor, 2014a, 2015). This metaphor may seem to contradict the first law of thermodynamics. However, “When scientists say that energy is lost, they mean that it has been transferred as thermal energy to such a large system that one cannot hope to recover it again.” (Nordine, 2016, p. 66). Similar phrases in scientific and everyday language do not equate ‘loss’ with ‘stop existing’. For example, ‘blood loss’ means that blood is given off from the body, e.g., through a wound, and can no longer flow in the circulatory system. The crucial difference is that energy, in contrast to blood, cannot be seen or felt directly, the target domain is abstract instead of concrete. Thus, students might think that energy has not only left the viewed system but has actually disappeared when it is ‘lost’. Duit (1987) stresses that conceptions of Energy as a Substance must be used only in a fixed system of reference. In order to prevent confusion, Jewett (2008) recommends avoiding the word ‘loss’ in energy teaching.

#### *Summary: Interaction of the Metaphors*

The abstract concept of energy transfer in an ecosystem can be described by various metaphors each highlighting and hiding different aspects of the content. The metaphors *non-cycle*, which negates the validity of the cycle schema, and *one-way street*, which affirms the validity of the path schema, are complementary, respectively ruling out recycling and backflow of energy. The non-cycle metaphor explicitly distinguishes between features of energy and matter transfer. In the interaction of metaphors, *non-cycle* and *one-way street* especially emphasize the direction of energy transfer and energy degradation, whereas the *energy flow* metaphor stresses the continuous transfer of energy and energy conservation. The *energy loss* metaphor highlights energy degradation.

## Step 2: Use of metaphors in biology textbooks

### (1) *Energy flow*

*Energy flow* is used in all analyzed textbooks: in seven only as noun (e.g., Biology IB Diploma), and in five as noun and verb (e.g., Campbell Biology). Some textbooks state that energy flow means the energy transfer through an ecosystem (e.g., BIOskop SII), or more generally “in a biological system” (Biologie Oberstufe, p. 492), or through a food chain (Markl Biologie, p. 487), whereas others do not give an explicit explanation of the term (Natura 2, Natura Oberstufe, Fokus Biologie 7/8, Biology IB Diploma). Moreover, although BIOskop SII defines energy flow as the transfer of chemical energy in an ecosystem (p. 170 and glossary p. 346), the energy transfer in a plant—a lower system level—is also called energy flow (p. 83). Hence, this term is used for different target domains which are not always indicated by the given definition.

### (2) *Non-cycle*

Only two of the analyzed textbooks use the *non-cycle* metaphor literally (Campbell Biology, BIOskop 7-10). However, nine books compare features of matter and energy transfer, for example, “But unlike matter, energy cannot be recycled. . . . Energy flows through ecosystems, whereas matter cycles within and through them” (Campbell Biology, p. 1264), “Whereas mineral nutrients circulate in more or less closed cycles, energy flow is a one-way street” (Markl Biologie, p. 348). Instead of or additionally to this explicit explanation, four textbooks include tasks asking students to distinguish between the features of energy and matter transfer, e.g., “Explain . . . why we speak of cycle of matter and flow of energy” (Linder Biologie 2, p. 141). Three books do not explicitly compare features of matter and energy.

### (3) *One-way street*

The metaphor of a *one-way street* is not used in Campbell Biology or Biology IB Diploma, but it is used in six of the 10 examined German biology textbooks for upper and lower secondary school. These books use this metaphor, each in a different way. BIOskop SII focuses on energy degradation and defines energy flow in the glossary as follows, “. . . organisms cannot convert heat into other energy forms. That is why one sometimes speaks of ‘one-way street of energy’” (p. 346). Two textbooks (Natura 2 and Biologie

Oberstufe) stress the unidirectional transfer of energy, e.g., “As in a one-way street, energy flows in just one direction.” (Natura 2, p. 158). Hence, energy cannot be given back from a higher trophic level to a lower level in a food chain or from the atmosphere back to organisms. Markl Biologie (p. 348) states that energy flow—in contrast to matter cycle—is a one-way street without further explanation of the metaphor.

#### (4) *Energy loss*

The handling of the energy loss metaphor in textbooks is not homogenous. Some biology textbooks do not use this controversial term at all in the analyzed sections (Linder Gesamtband, Natura 2 and Fokus Biologie 7/8). BIOskop 7-10 explains that this term belongs to colloquial language (p. 34). The other eight textbooks do use the energy loss metaphor. There are two ways to stress that energy does not stop existing: (a) stating the law of energy conservation and (b) clearly referring to a system to show that energy does not vanish but goes somewhere else. On the analyzed pages, four of the eight textbooks (e.g., Campbell Biology and Biology IB Diploma) mention that energy is conserved. Linder 2 also places quotation marks around the term, presumably to show that it is not meant literally (p. 141, 161). Moreover, they at least partly name the systems that release and gain energy. Markl Biologie also refers to systems when using the *energy loss* metaphor. By contrast, Fokus Biologie 9/10, Natura Oberstufe and BIOskop SII state that energy is lost, e.g., through feces or heat, without referring to energy conservation on the analyzed pages and without explicitly explaining where the energy goes. A phrase sometimes used that is similar to the *energy loss* metaphor, is that energy is ‘used up’ by life processes or metabolism (Fokus Biologie 9/10, Markl Biologie). Biologie Oberstufe explains that the term ‘energy consumption’ is false since energy cannot be destroyed (p. 354), but the textbook also uses the *energy loss* metaphor.

#### *Identification of metaphorical language*

The metaphors surveyed here are not named as metaphors in the analyzed textbook pages. However, four books use quotation marks to indicate (presumably) the metaphorical nature of ‘one-way street’ and/or ‘energy loss / consumption’.

### Step 3: investigation of students' use of metaphors

#### (1) *Energy flow*

The metaphor of *energy flow* was used by 33 of the 50 participating students, mostly as a noun. Few of them used it only as a verb ( $n = 3$ ) or as a noun and a verb ( $n = 4$ ). Two students explain the term by saying that energy flow means energy transfer. Notably, a quarter of students who used the metaphor ( $n = 8$ ) applied it in terms of a substance. Another quarter used it in terms of both a substance and a process.

A process perspective is marked by use of the verb 'to flow' or constructions in which energy flow can be replaced, grammatically and semantically correctly, by energy transfer, e.g. 'In the same proportion as by the producers, the energy flows onwards' (S13<sup>22</sup>), "When a mouse eats, for example, an acorn from a tree, the energy transfer is 10%" (S46). In a more substance-like perspective, energy flow is combined with an additional verb of transfer, e.g. "In that case, the mouse gives 1% of the energy flow through food to the eagle owl" (S21) or it is treated as a substance that can be lost, e.g. "The secondary consumer loses 0.5% energy flow through dead biomass" (S18). In many of these cases, it would be semantically correct to use the word 'energy' instead of 'energy flow'.

#### (2) *Non-cycle*

Few students ( $n = 4$ ) adopted the non-cycle metaphor in its correct, negating form. By contrast, six students adopted it in an incorrect way, stating that energy does flow in a cycle or circle: "Moreover, part [of the energy] gets lost as dead biomass, which can be 'recycled' and given to the producers, so that this energy flows in a circle" (S30). "The energy flow starts with the sun and ends with the decomposers, that is, it runs a complete cycle, which starts somewhere and ends somewhere" (S03). The latter indicates that this student does not understand what a cycle means. Although not adopting the metaphor literally, four students state that energy can be recycled or flows in a cycle: "So that in the end, the whole energy is in the air/atmosphere as heat energy. This energy is then utilized further and the process starts again from the beginning" (S20).

Only three students—all of whom also used the cycle metaphor correctly— compared features of matter and energy transfer: "Typical features are for

---

<sup>22</sup> The students in the sample are serially numbered.



example that matter is reused and that the energy flows in only one direction and that there is no cycle” (S46). However, the comparison of matter and energy transfer was not essential required to complete the task.

### (3) *One-way street*

The *one-way street* metaphor was adopted by four students. Two of them used the same wording as given in the PowerPoint presentation: “In contrast to matter, energy does not flow in a cycle, but in a ‘one-way street’” (S10, S15). One of these texts refers to energy degradation, but it is not used to explain the metaphor (S10). One student slightly altered the wording: “Energy flows not in a cycle. But in a ‘one-way street’ (no return)” (S24), and another one only wrote down the phrase “one-way street” (S18). Five students wrote that energy flows in just one direction, but only one of them used the *one-way street* metaphor.

### (4) *Energy loss*

The PowerPoint presentation did not state that *energy is lost*. However, 14 of the students used this metaphor. Of these, nine stated literally that energy is lost, three used another expression (energy is ‘used up’ or ‘vanishes’) and two used both a literal and another expression. None of the phrases describe tracks of energy through systems in a manner indicating that energy does not disappear but goes somewhere else. Only three students negated the *energy loss* metaphor: “That [heat energy in the atmosphere] is about 100%. Thus, finally, no energy gets lost” (S01). However, two of them also used the metaphor in a non-negated form. One student negated the alternative expression that energy is used up, and another negated that energy can be destroyed (S45).

In total, 11 students used the term or described energy conservation. This does not happen in combination with the negated cycle-metaphor, but three students name both energy conservation and the (scientific false) aspect that energy flows in a cycle. In four texts, energy conservation is described together with use of the *loss* metaphor.

### *Identification of metaphorical language*

None of the students named metaphors as such. However, nine students placed one or more words (e.g., ‘renewed energy’; S48) in quotation marks.

## 6.7 Discussion

### 6.7.1 Comparison and Suggestions for Metaphor Use in the Context of Energy Transfer

In this section, we compare results of our analyses of textbooks' and students' use of metaphors and draw implications regarding their use in teaching and learning energy transfer in ecosystems. We then suggest broader suggestions for metaphor use in educational contexts that could be transferred to other topics.

Table 6-2 shows similarities and differences detected between the use of the examined metaphors in biology textbooks and students' descriptions of an energy flow diagram.

Table 6-2

*Comparison of metaphor usage in textbooks and students' texts*

Metaphor	Textbooks	Student's texts
Energy flow	frequently used as noun and verb	frequently used as a noun, rarely used as a verb
	always used in terms of a process	sometimes used in terms of a substance
Non-cycle	rarely used—only in its negated form	rarely used, sometimes incorrectly (energy indeed flows in a cycle)
	features of transfer frequently compared	features of transfer rarely compared
One-way street	frequently used	rarely used
	explanations differ between textbooks	no explanations given
Energy loss	usage differs between textbooks	sometimes used (spontaneously)
	combined with system references and/or statements about energy conservation	absence of explicit system references or statements about energy conservation

In order to appraise the validity of a qualitative study, the results should be compared to results of similar studies. To our knowledge, no previous studies have addressed the *non-cycle* or *one-way street* metaphors, but we can address findings concerning the *energy flow* and *energy loss* metaphors.

*Energy flow.* As mentioned in the Results section, *energy flow* is a common metaphor in both the examined textbooks and the 9th graders' descriptions of energy transfer through an ecosystem. This is consistent with previous findings, e.g. *energy flow* was the metaphor most frequently used by student participants in the study by Lancor (2014b),

especially in the contexts of electrical circuits and ecosystems. In biology textbooks, ‘energy flow’ could be replaced by ‘energy transfer’ and is therefore used in terms of a process. This was not always the case in students’ descriptions. Overgeneralizations of previously learned knowledge can be sources of alternative conceptions, whereby previously acquired systems of concepts and beliefs are applied to other domains (Nesher, 1987). We found that some students seemed to overgeneralize the Energy is a Substance metaphor, treating not energy, but the whole energy flow as a substance. This could have been merely an imprecise use of language, but it may also have resulted from extension of the embodied cognition, i.e., the experience that something that can flow has substance-like qualities. This interpretation is supported by the finding that students tend to use matter ontologies instead of process ontologies in biology (Barak, Sheva, Gorodetsky, & Gurion, 1999). Needham (2014) suggests that more emphasis should be placed on the fact that chemical energy is transferred by biomass and becomes available through the process of respiration. The confusion between process and matter is a potential weakness of the *energy flow* metaphor. Therefore, students should be encouraged to discuss the boundaries of the metaphor and the similarities and differences between matter and energy. Teachers should be aware that students might overgeneralize the substance metaphor, and hence treat energy flow as a substance instead of a process. It might be helpful to provide a definition of energy flow. Moreover, using energy flow in its verb form (‘energy flows’) stresses the process character.

*Non-cycle.* Although energy is often treated as a substance, it does not fully follow the movements of substances in an ecosystem, i.e., it cannot be recycled and does not flow in a cycle. We hypothesize that one possibility to avoid possible confusion arising from this discrepancy is to facilitate negative knowledge by using the *negated cycle* metaphor. However, students might unconsciously change the metaphor to its non-negated form, so that it fits their alternative conception that energy can be recycled. Moreover, we found evidence that some students do not understand what a cycle means. If understanding of a source domain differs from the intended understanding, the target domain is understood differently too (Niebert et al., 2012), and the metaphor fails. Strikingly, none of the students stated that energy is conserved together with the non-cycle metaphor. Students may find it hard to understand why energy that leaves the ecosystem is still existent. Tasks found in textbooks that explicitly ask learners to explain the terms ‘cycle of matter’

and ‘flow of energy’ might foster the scientifically correct concept. Teachers should also stress the law of energy conservation when using this metaphor.

*One-way street.* The metaphor of a one-way street is a visual depiction of energy transfer, but what is meant is not at all obvious. When using the one-way street metaphor, some textbooks try to stress the irreversibility of energy degradation. However, the connection with the fact that the amount of energy in a system decreases with every energy transfer is not directly obvious—a one-way street does not necessarily get narrower. In terms of the amount of ‘useful’ energy, the source domain does not match the target domain because it omits the needed experience (see Niebert et al., 2012, for similar cases). Other textbooks use the metaphor to visualize the idea that energy ‘flows in one direction’. This negates the concept that energy may flow back, e.g., from consumers to producers, but the statement might be misleading because energy goes to the atmosphere, the decomposers and the next trophic level, i.e., in three ‘directions’. Although a series of one-way streets may form a cycle, textbooks sometimes use this metaphor to stress the contrast to a cycle. We adopted this approach in the PowerPoint presentation stating that ‘in contrast to matter, energy does not flow in a cycle but in a one-way street.’ Students rarely adopt this metaphor in their descriptions. Students rarely adopted this metaphor in their descriptions, and we assume that they might be uncertain about its meaning. Hence, detailed explanations should be provided if the *one-way street* metaphor is applied. Since it is apparently not used for other scientific contents and we found no other studies examining this metaphor, more research is needed to determine whether this metaphor is beneficial for learning about energy transfer or not.

*Energy loss.* *Energy is lost* states more explicitly than the *one-way street* metaphor that energy is degraded, but may be more likely to evoke alternative conceptions. The alternative phrasing *energy is used up* might also evoke the idea that energy can be destroyed. We found that many of the surveyed textbooks do use these metaphors. The meaning is often clarified by referring to the systems involved or by stating the law of energy conservation. Students used this metaphor spontaneously in their descriptions, but there was little evidence that their conceptions of energy loss and conservation were scientifically sound. This is consistent with findings of other empirical studies. Lancor (2014, 2015) found that students frequently use the *energy loss* metaphor, but often without a clear reference to a system. Similarly, Opitz, Blankenstein, and Harms (2016) found

that interviewed students of grades 5, 7, 9, and 11 frequently stated that energy is lost, and this generally seemed to reflect an inadequate energy concept rather than use of inaccurate language. They also found (as in this study) that students had problems taking system boundaries into consideration. The findings indicate that teachers should pay attention to textbooks' use of the *energy loss* metaphor, for which we found a noteworthy variation. When using this metaphor, a clear reference to system boundaries or the law of energy conservation is crucial, and even if the metaphor is avoided when teaching energy, teachers should pay attention to students' spontaneous use of this metaphor.

### 6.7.2 Broader Educational Implications

Due to the lack of direct experiences with energy transfer in an ecosystem, understanding of this process is based on imagination. Metaphorical language is omnipresent in everyday life as well as educational settings to visualize such abstract phenomena. Metaphors in scientific language should be made explicit to students. Conventionalized metaphors—as energy flow—are listed as scientific terms in the glossary of textbooks and thus might not be perceived as metaphors. Hence, it might be helpful if crucial metaphors were marked in biology textbooks—either by lexical markers (e.g., ‘the metaphor energy flow’) or by layout features whose meaning is explained (e.g., quotation marks). The metaphors analyzed in this study are rarely treated in such a manner. Similarly, Amin et al. (2012) found a range of unmarked ‘implicit’ metaphors in sections of textbooks dealing with entropy and the second law of thermodynamics. Due to the lack of linguistic markers, teachers should call their students' attention to metaphorical language.

Moreover, the source domain should be reflected to increase the awareness of the correct schemata (Niebert et al., 2012). In terms of energy transfer in an ecosystem, the path schema is appropriate as an embodied source, but we found that some students employed the cycle schema. It must also be ensured that students understand the source domain correctly. The meaning of the metaphors should be clarified in lessons since they are not self-explanatory. The explanation of what a specific metaphor illuminates—e.g., one-way street—is sometimes neglected by textbooks. Further, students should reflect on strengths and weaknesses of metaphors. By focusing on the metaphors' strengths, students might be encouraged to use them for their own communication purposes, while talking about weaknesses might help avoidance of misunderstandings and overgeneralizations.

### 6.7.3 Limitations of the Study and Future Directions

The PowerPoint presentation given to the learners provided a pre-determined selection of metaphors and is likely to have influenced their use of metaphors when writing the text. However, metaphorical language is commonly used when communicating ideas about energy in general and energy transfer in particular, in scientific as well as educational contexts. Therefore, it would have been artificial to teach the topic without use of metaphors. Our aim was not to identify students' metaphorical concepts without any instruction but to survey students' adoption of well-established metaphors in a concrete educational context. However, it is not possible to tell whether the students recognized metaphorical language as such. For this purpose, qualitative interviews to probe students' metacognitive awareness of metaphors could be valuable. Moreover, students' use of metaphors does not necessarily reflect their depth of understanding (Tibell & Rundgren, 2010). A further problem is that a specific metaphor may be helpful for some students, but not others. More research is needed to determine how the selected metaphors can be used most effectively for teaching and learning energy transfer, e.g., by intervention studies.

Metaphors are expressed and conveyed with language. Each language has its own lexical and syntactic structure that is used to formulate metaphors (Cameron, 2003). Even if a metaphor seems easy to translate, the connotations might slightly differ. For example, the German translation of flow, 'Fluss', is also used for 'river'. This might evoke a stronger mental image of the energy transfer process. Moreover, the English term 'flow' can be used as a noun or a verb, whereas in German 'Fluss' is solely used as a noun, the corresponding verb is 'fließen'. The morphological difference might help German students to distinguish between a substance and a process. Additionally, metaphors may be influenced by cultural factors (Schmitt, 2005). Thus, the transferability of metaphors across languages and cultures is limited (Cameron, 2003). Readers should keep in mind that students' texts analyzed in this study were collected in Germany. Further research is needed to survey the use of the described metaphors in other languages or cultures.

## 6.8 References

- Abd-El-Khalick, F., Myers, J. Y., Summers, R., Brunner, J., Waight, N., Wahbeh, N., ... Belarmino, J. (2017). A longitudinal analysis of the extent and manner of representations of nature of science in U.S. high school biology and physics textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, *54*, 82-120. doi: 10.1002/tea.21339
- Amin, T. G. (2009). Conceptual metaphor meets conceptual change. *Human Development*, *52*, 165-197. doi: 10.1159/000213891
- Amin, T. G., Jeppsson, F., Haglund, J., & Strömdahl, H. (2012). Arrow of time: metaphorical construals of entropy and the second law of thermodynamics. *Science Education*, *96*, 818-848. doi: 10.1002/sce.21015
- Barak, J., Sheva, B., Gorodetsky, M., & Gurion, B. (1999). As 'process' as it can get: students' understanding of biological processes. *International Journal of Science Education*, *21*, 1281-1292. doi: 10.1080/095006999290075
- Borghini, A. M., Binkofski, F., Castelfranchi, C., Cimatti, F., Scorolli, C., & Tummolini, L. (2017). The challenge of abstract concepts. *Psychological Bulletin*, *43*, 263-292. doi: 10.1037/bul0000089
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1991). Misconceptions in first-year undergraduate science students about energy sources for living organisms. *Journal of Biological Education*, *25*, 209-213. doi: 10.1080/00219266.1991.9655208
- Brewe, E. (2011). Energy as a substancelike quantity that flows: theoretical considerations and pedagogical consequences. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, *7*(2). doi: 10.1103/PhysRevSTPER.7.020106
- Burger, J. (2001). *Schülervorstellungen zu "Energie im biologischen Kontext". Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen* [Student conceptions concerning energy in biological contexts. Research, analysis, and conclusions] (Dissertation, University of Bielefeld, Bielefeld, Germany). Retrieved from [pub.uni-bielefeld.de/download/2305865/2305868](http://pub.uni-bielefeld.de/download/2305865/2305868)
- Cameron, L. (2003). *Metaphor in educational discourse*. London, United Kingdom: Continuum.
- Chew, M. K., & Laubichler, M. K. (2003). Natural enemies – metaphor or misconception? *Science*, *301*, 52-53. doi: 10.1126/science.1085274

- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences, 14*, 161-199. doi: 10.1207/s15327809jls1402\_1
- Dreyfus, B. W., Gupta, A., & Redish, E. F. (2015). Applying conceptual blending to model coordinated use of multiple ontological metaphors. *International Journal of Science Education, 37*, 812-838. doi: 10.1080/09500693.2015.1025306
- Duit, R. (1987). Should energy be illustrated as something quasi-material? *International Journal of Science Education, 9*, 139-145. doi: 10.1080/0950069870090202
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education, 75*, 649-672. doi: 10.1002/sce.3730750606
- Duit, R. (2014). Teaching and learning the physics energy concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Eds.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (pp. 67-85). New York, NY: Springer.
- Duit, R., & Häußler, P. (1994). Learning and teaching energy. In P. J. Fensham, R. F. Gunstone & R. T. White (Eds.), *The content of science: a constructivist approach to its teaching and learning* (pp. 185-200). London, United Kingdom: The Falmer Press.
- Felzmann, D. (2014). Using metaphorical models for describing glaciers. *International Journal of Science Education, 36*, 2795-2824. doi: 10.1080/09500693.2014.936328
- Fleiss, J. L. (1971). Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychological Bulletin, 76*, 378-382. doi: 10.1037/h0031619
- Jewett, J. W. (2008). Energy and the confused student III: language. *The Physics Teacher, 46*, 149-153. doi: 10.1119/1.2840978
- Jin, H., & Wei, X. (2014). Using ideas from the history of science and linguistics to develop a learning progression for energy in socio-ecological systems. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Eds.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (pp. 157-173). New York, NY: Springer.
- Johnson, M. (1987). *The body in the mind. The bodily basis of meaning, imagination, and reason*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Kozlovsky, D. (1968). A critical evaluation of the trophic level concept. I. Ecological efficiencies. *Ecology, 49*, 48-60. doi: 10.2307/1933560
- Lakoff, G. (1990). *Women, fire, and dangerous things: What categories reveal about the mind* (Vol. 64). Chicago, IL: The University of Chicago Press.



- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). The metaphorical structure of the human conceptual system. *Cognitive Science*, 4, 195-208. doi: 10.1207/s15516709cog0402\_4
- Lakoff, G., & Johnson, M. (2003). *Metaphors we live by*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Lancor, R. (2014a). Using metaphor theory to examine conceptions of energy in biology, chemistry, and physics. *Science & Education*, 23, 1245-1267. doi: 10.1007/s11191-012-9535-8
- Lancor, R. (2014b). Using student-generated analogies to investigate conceptions of energy: a multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, 36, 1-23. doi: 10.1080/09500693.2012.714512
- Lancor, R. (2015). An analysis of metaphors used by students to describe energy in an interdisciplinary general science course. *International Journal of Science Education*, 37, 876-902. doi: 10.1080/09500693.2015.1025309
- Landis, R. J., & Koch, G. K. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-174. doi: 10.2307/2529310
- Leach, J., Driver, R., Scott, P., & Woo-Robinson, C. (1996). Children's ideas about ecology 2: ideas found in children aged 5-16 about the cycling of matter. *International Journal of Science Education*, 18, 19-34. doi: 10.1080/0950069960180102
- Lin, C.-Y., & Hu, R. (2003). Students' understanding of energy flow and matter cycling in the context of the food chain, photosynthesis, and respiration. *International Journal of Science Education*, 25, 1529-1544. doi: 10.1080/0950069032000052045
- Mayring, P. (2014). *Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution*. Klagenfurt, Austria: SSOAR.
- McDonald, C. V. (2016). Evaluating junior secondary science textbook usage in Australian schools. *Research in Science Education*, 46, 481-509. doi: 10.1007/s11165-015-9468-8
- Needham, R. (2014). Using 'energy ideas' in the teaching of biology. *School Science Review*, 96(354), 74-77.
- Nesher, P. (1987). Towards an instructional theory: the role of student's misconceptions. *For the Learning of Mathematics*, 7, 33-40.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50, 162-188. doi: 10.1002/tea.21061

- Niebert, K., & Gropengießer, H. (2014). Understanding the greenhouse effect by embodiment – Analysing and using students' and scientists' conceptual resources. *International Journal of Science Education*, 36, 277-303. doi: 10.1080/09500693.2013.763298
- Niebert, K., & Gropengießer, H. (2015). Understanding starts in the mesocosm: conceptual metaphor as a framework for external representations in science teaching. *International Journal of Science Education*, 37, 903-933. doi: 10.1080/09500693.2015.1025310
- Niebert, K., Marsch, S., & Treagust, D. F. (2012). Understanding needs embodiment: a theory-guided reanalysis of the role of metaphors and analogies in understanding science. *Science Education*, 96, 849-877. doi: 10.1002/sce.21026
- Nordine, J. (2016). Talking about energy. In J. Nordine (Ed.), *Teaching energy across the sciences K-12* (pp. 61-78). Arlington, VA: NSTA.
- Opitz, S. T., Blankenstein, A., & Harms, U. (2016). Student conceptions about energy in biological contexts. *Journal of Biological Education*. doi: 10.1080/00219266.2016.1257504
- Opitz, S. T., Neumann, K., Bernholt, S., & Harms, U. (in press). Students' energy understanding across biology, chemistry, and physics contexts. *Research in Science Education*.
- Oser, F., & Spsychiger, M. (2005). *Lernen ist schmerzhaft. Zur Theorie des negativen Wissens und zur Praxis der Fehlerkultur* [Learning is painful: the theory of negative knowledge and the use of error culture]. Weinheim, Germany: Beltz.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227. doi: 10.1002/sce.3730660207
- Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wassermann, S. A., Minorsky, P. V., Jackson, R. B., & Campbell, N. A. (2011). *Campbell Biology Global Edition* (9th ed.). San Francisco, CA: Pearson Benjamin Cummings.
- Rundgren, C.-J., Hirsch, R., & Tibell, L. A. (2008). Death of metaphors in life science? - A study of upper secondary and tertiary students' use of metaphors in their meaning-making of scientific content. In C.-J. Rundgren (Ed.), *Visual thinking, visual speech - a semiotic perspective on meaning-making in molecular life science* (pp. 1-24). Norrköping, Sweden: FontD.

- Sadler, P. M., Coyle, H., Smith, N. C., Miller, J., Mintzes, J., Tanner, K., & Murray, J. (2013). Assessing the life science knowledge of students and teachers represented by the K-8 national science standards. *CBE Life Sciences Education*, *12*, 553-575. doi: 10.1187/cbe.12-06-0078
- Scherr, R. E., Close, H. G., McKagan, S. B., & Vokos, S. (2012). Representing energy. I. Representing a substance ontology for energy. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, *8*(2). doi: 10.1103/PhysRevSTPER.8.020114
- Schmitt, R. (2005). Systematic metaphor analysis as a method of qualitative research. *The Qualitative Report*, *10*, 358-394.
- Stoy, P. C. (2010). Thermodynamic approaches to ecosystem behaviour: fundamental principles with case studies from forest succession and management. In D. G. Raffaelli & C. L. J. Frid (Eds.), *Ecosystem ecology. A new synthesis* (pp. 40-64). New York, NY: Cambridge University Press.
- Tibell, L. A., & Rundgren, C. J. (2010). Educational challenges of molecular life science: characteristics and implications for education and research. *CBE Life Science Education*, *9*, 25-33. doi: 10.1187/cbe.08-09-0055
- Tracy, C. (2014). Energy in the new curriculum: an opportunity for change. *School Science Review*, *96*(354), 51-61.
- Trussell, G. C., Ewanchuk, P. J., & Matassa, C. M. (2006). The fear of being eaten reduces energy transfer in a simple food chain. *Ecology*, *87*, 2979-2984. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2979:TFOBER]2.0.CO;2
- Wehmeier, S. (Ed.). (2005). *Oxford Advanced Learner's Dictionary* (7th ed.). Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.

### **Analyzed Textbooks**

- Angermann, I., Engel-Frühauf, M., Gräbe, G., Hammon, U., Hampl, U., Jentsch, S., . . . Telschow-Malz, S. (2009). *Fokus Biologie Gymnasium 9/10* [Focus Biology for academic track schools, 9/10]. Berlin, Germany: Cornelsen.
- Bayrhuber, H., Hauber, W., & Kull, U. (Eds.) (2010). *Linder Biologie Gesamtband* [Linder Biology for all German federal states]. Braunschweig, Germany: Schroedel.
- Becker, A., Bokelmann, I., Krull, H.-P., & Schäfer, M. (2012). *Natura. Biologie für Gymnasien. Oberstufe* [Natura. Biology for academic track schools. Upper secondary]. Stuttgart, Germany: Klett.

### Studie 3

- Becker, A., Knabe, B., Maier, A., Remé, R., Schneeweiß, R., Steinert, C., & Wilborn, M. (2014). *Natura 2. Biologie für Gymnasien*. [Natura 2. Biology for academic track schools]. Stuttgart, Germany: Klett.
- Bley, A., Dieckmann, R., Engel-Frühauf, M., Freimann, T., Gräbe, G., Hampl, U., . . . Woll, M. (2008). *Fokus Biologie Gymnasium 7/8* [Focus Biology for academic track schools, 7/8]. Berlin, Germany: Cornelsen.
- Clegg, C. J. (2014). *Biology for the IB Diploma* (2nd ed.). London, United Kingdom: Hodder Education.
- Hausfeld, R., & Schulenberg, W. (Eds.). (2007). *BIOskop Gymnasium 7-10* [BIOskop for academic track schools 7-10]. Braunschweig, Germany: westermann.
- Hausfeld, R., & Schulenberg, W. (Eds.). (2010). *BIOskop Sekundarstufe II* [BIOskop for academic track schools, upper secondary]. Braunschweig, Germany: westermann.
- Konopka, H.-P., Paul, A., & Starke, A. (Eds.). (2009). *Linder Biologie 2* [Linder Biology 2]. Braunschweig, Germany: Schroedel.
- Markl, J. (Ed.). (2010). *Markl Biologie Oberstufe* [Markl Biology for upper secondary]. Stuttgart, Germany: Klett.
- Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wassermann, S. A., Minorsky, P. V., Jackson, R. B., & Campbell, N. A. (2011). *Campbell Biology Global Edition* (9th ed.). San Francisco, CA: Pearson Benjamin Cummings.
- Weber, U. (Ed.). (2015). *Biologie Oberstufe Gesamtband* [Biology, upper secondary, for all federal states]. Berlin, Germany: Cornelsen.

## 6.9 Appendix

### 6.9.1 Supplement 1: Data Selection and Coding Manual

#### Selection of textbook sections

Chapters dealing with energy flow / energy transfer in ecosystems were chosen according to the index. If present, glossary entries about energy flow / energy transfer, one-way street, cycle or energy loss were included (see Table 6-3). Exceptional cases: In *Natura 2*, the chapter “Way of energy and cycle of matter” (p.158-159) was included without a reference in the index. In *Campbell biology*, we chose sections 55.1 and 55.3 according to the naming of ‘energy flow’ and ‘energy transfer’, the key concept headlines. All information given on the selected pages was analyzed, including headlines, pictures with their labels and captions, and tasks. The selected pages of one textbook served as one unit of analysis.

Table 6-3

#### Analyzed textbook sections

Textbook	Full Reference	Analyzed Pages
Linder Biologie 2	Konopka, H.-P., Paul, A., & Starke, A. (Eds.). (2009). <i>Linder Biologie 2</i> . Braunschweig, Germany: Schroedel.	pp. 140-141, 160-161
Linder Biologie Gesamtband	Bayrhuber, H., Hauber, W., & Kull, U. (Eds.) (2010). <i>Linder Biologie Gesamtband</i> . Braunschweig, Germany: Schroedel.	pp. 388-389
Natura 2	Becker, A., Knabe, B., Maier, A., Remé, R., Schneeweiß, R., Steinert, C., & Wilborn, M. (2014). <i>Natura 2. Biologie für Gymnasien</i> . Stuttgart, Germany: Klett.	pp. 157-158, 202-203
Natura Oberstufe	Becker, A., Bokelmann, I., Krull, H.-P., & Schäfer, M. (2012). <i>Natura. Biologie für Gymnasien. Oberstufe</i> . Stuttgart, Germany: Klett.	pp. 328, 365, 380
Markl Biologie	Markl, J. (Ed.). (2010). <i>Markl Biologie Oberstufe</i> . Stuttgart, Germany: Klett.	pp. 348-349, glossary entry ‘energy flow’ p. 487
Fokus Biologie 7/8	Bley, A., Dieckmann, R., Engel-Frühauf, M., Freimann, T., Gräbe, G., Hampl, U., . . . Woll, M. (2008). <i>Fokus Biologie Gymnasium 7/8</i> . Berlin, Germany: Cornelsen.	pp. 196-197
Fokus Biologie 9/10	Angermann, I., Engel-Frühauf, M., Gräbe, G., Hammon, U., Hampl, U., Jentsch, S., . . . Telschow-Malz, S. (2009). <i>Fokus Biologie Gymnasium 9/10</i> . Berlin, Germany: Cornelsen.	pp. 154-157
Biologie Oberstufe	Weber, U. (Ed.). (2015). <i>Biologie Oberstufe Gesamtband</i> . Berlin, Germany: Cornelsen.	pp. 343, 354-355, glossary entry ‘energy flow’ p. 492

*Analyzed textbook sections*

Textbook	Full Reference	Analyzed Pages
BIOskop 7-10	Hausfeld, R., & Schulenberg, W. (Eds.). (2007). <i>BI-Oskop Gymnasium 7-10</i> . Braunschweig, Germany: westermann.	pp. 34-35, 122-123
BIOskop SII	Hausfeld, R., & Schulenberg, W. (Eds.). (2010). <i>BI-Oskop Sekundarstufe II</i> . Braunschweig, Germany: westermann.	pp. 83, 170-171, 185, glossary entry 'energy flow' p. 346
Campbell Biology	Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wassermann, S. A., Minorsky, P. V., Jackson, R. B., & Campbell, N. A. (2011). <i>Campbell Biology Global Edition</i> (9th ed.). San Francisco, CA: Pearson Benjamin Cummings.	pp. 1264-1266, 1271-1273 (Overview and chapter 55.1, 55.3)
Biology IB Diploma	Clegg, C. J. (2014). <i>Biology for the IB Diploma</i> (2nd ed.). London, United Kingdom: Hodder Education.	pp. 194-200, 209-210

**Selection of students' texts**

A sample of 50 texts was randomly selected. Each text serves as one unit of analysis. Headlines given to the text by a student are not included in the analysis since it was found that students copy the headline given on the material sheet.

**Coding manual**

## 1. Identification of metaphorical language (multiple codes are allowed)

- verbal: explicit naming as metaphor, analogy, or similar  
"The metaphor energy flow describes energy transfer in an ecosystem."
- by quotation marks (in students' text, all words in quotation marks are registered because students might perceive them as figurative language).  
"Then, the energy is "degraded"."
- no marking or naming of figurative language

## 2. Metaphor: energy flow

## 2.1 Usage of the metaphor (multiple codes are allowed)

- The metaphor is used as a noun ('energy flow' or 'flow' in combination with 'energy').  
"There is a flow of energy in an ecosystem".
- The metaphor is used as a verb ('to flow').  
"Energy enters, flows through, and exits an ecosystem".
- The metaphor is not used.

## 2.2 Definition of the metaphor

- An explicit definition is given, energy flow is defined as energy transfer.  
“Energy flow means energy transfer”.  
The definition can be part of a textbook task: “Why is the transfer of energy in an ecosystem referred to as energy flow, not energy cycling”?
- A definition is not given.
- The metaphor energy flow (or its verb form) is not used.

## 2.3 Usage in terms of a process or a substance

- The metaphor energy flow is used in terms of a process. The word ‘energy flow’ can be replaced by ‘energy transfer’.  
“The energy flow has its origin in the sun”.  
Borderline case: “The energy flow decreases in the course of the food chain.”
- The metaphor energy flow is used in terms of a substance. The word ‘energy flow’ cannot be replaced by ‘energy transfer’ since it is already combined with a verb of transmission (e. g., formulations like ‘energy flow is transferred’). In many of these cases, it would be semantically correct to use the word ‘energy’ instead of ‘energy flow’.  
“The energy flow through dead biomass is given off to the soil”.  
“The energy flow through food is passed on”.  
“The tree gives 40% of the energy flow off to the decomposers”.
- Mixed usage: the metaphor is used terms of both a process and a substance.
- The metaphor energy flow (or its verb form) is not used.

## 3. Metaphor: non-cycle

### 3.1 Usage of the metaphor

- The negated metaphor is used correctly in a text or task. The word ‘cycle’ or the verb ‘to cycle’ is used in combination with ‘energy’ and a negation.  
“Energy does not flow in a cycle”.  
“Energy does not cycle in an ecosystem”.
- Scientifically wrong usage: The word ‘cycle’ or the verb ‘to cycle’ is used in combination with energy without negation, blending of the cycle of matter and the flow of energy, or statement that a cycle of energy is possible.  
“The energy flow runs in a complete cycle”.  
“Energy does not cycle in an ecosystem”.
- The word ‘cycle’ is not used, but a cycle of energy is described.  
“Then, the energy is recycled and the energy flow starts anew”. (The statement “The process starts anew” is not sufficient to code this category. It needs to be clear that the same energy is supposed to run through the same way anew.)

## Studie 3

- The metaphor is not used: No use of the word ‘cycle’ in combination with energy, no description of a cycle of energy.

### 3.2 Comparison of features of matter and energy transfer

- A contrast/comparison between matter/energy or matter cycle/energy flow is given in the text. (Note: A description of matter cycle without contrast with energy is not sufficient, the processes must refer to each other.)  
“But unlike matter, energy cannot be recycled”.  
“Energy is not given back to producers, only nutrients”.
- A contrast/comparison between matter/energy or matter cycle/energy flow is required in a task (only textbook analysis).  
“Why is the transfer of energy in an ecosystem referred to as energy flow, not energy cycling”?
- A contrast/comparison between matter/energy or matter cycle/energy flow is given in the text and required in a task (only textbook analysis).
- A contrast/comparison between matter/energy or matter cycle/energy flow is not given.

## 4. Metaphor: one-way street

### 4.1 Usage of the metaphor

- The metaphor one-way street is used.  
“Energy flows in form of a one-way street”.
- The metaphor one-way street is not used.

### 4.2 Statements about the direction of energy transfer

- It is stated that energy flows in only one direction or that energy cannot flow backwards (‘one way/direction’ or ‘not back(wards)’ must be stated).  
“Energy flows in just one direction”.
- It is not stated that energy flows in only one direction or that energy cannot flow backwards.

### 4.3 Statements about energy degradation

- Energy degradation is used to explain the one-way street metaphor.  
“Organisms cannot convert thermal energy into other energy forms. That is why one sometimes speaks of ‘one-way street of energy’”.
- Energy degradation is described but not explicitly used to explain the one-way street metaphor (no reference between one-way street and energy degradation).



“Energy flow is a one-way street. Just a small amount of solar radiation (about 5%) is used for photosynthesis. .... The energy transformed to heat cannot be used any more”.

- The one-way street metaphor is used but energy degradation is not described.
- The metaphor one-way street is not used.

## 5. Metaphor: energy loss

### 5.1 Usage of the metaphor (multiple codes are allowed)

- The metaphor is used (as a noun ('loss') or as a verb ('lost') in combination with energy or an energy carrier/an energy form, e.g., solar radiation).  
“From the producers to the consumers, a lot of energy is lost”.  
“A part of the solar radiation is lost”.
- The metaphor is used in another form (e.g., energy is ‘used up’ or ‘vanishes’).  
“In the end, the energy is used up”.
- The metaphor is used negated  
“Energy does not get lost”.
- The metaphor is used in another, negated form.  
“Energy is never used up”.
- The metaphor energy loss is not used.

### 5.2 Reference to a system (multiple codes are allowed)

- There is a clear reference to a system (e.g., an ecosystem, an individual) with energy tracking. It is stated which system releases energy and where the energy can be found afterwards.  
“All energy reaching the Earth from the sun is ultimately lost from ecosystems as heat energy into space”.
- Weak or no system reference. The loss metaphor is used but it is unclear where the energy goes.  
“The consumer loses 5% heat energy”.
- The energy loss metaphor is not used.

### 5.3 Statements about energy conservation

- A statement about energy conservation is given: It is said that energy cannot get lost, or naming of the first law of thermodynamics, or calculation in which 100% of the energy is existing, or statement that all the energy ends up in the atmosphere.  
“Energy is not getting lost”.  
“Energy cannot be created or destroyed”.

### Studie 3

“In the end, 100% of the energy is in the atmosphere as heat”.

Not sufficient: “In the end, all energy is transformed to non-usable heat energy”, because the energy could vanish.

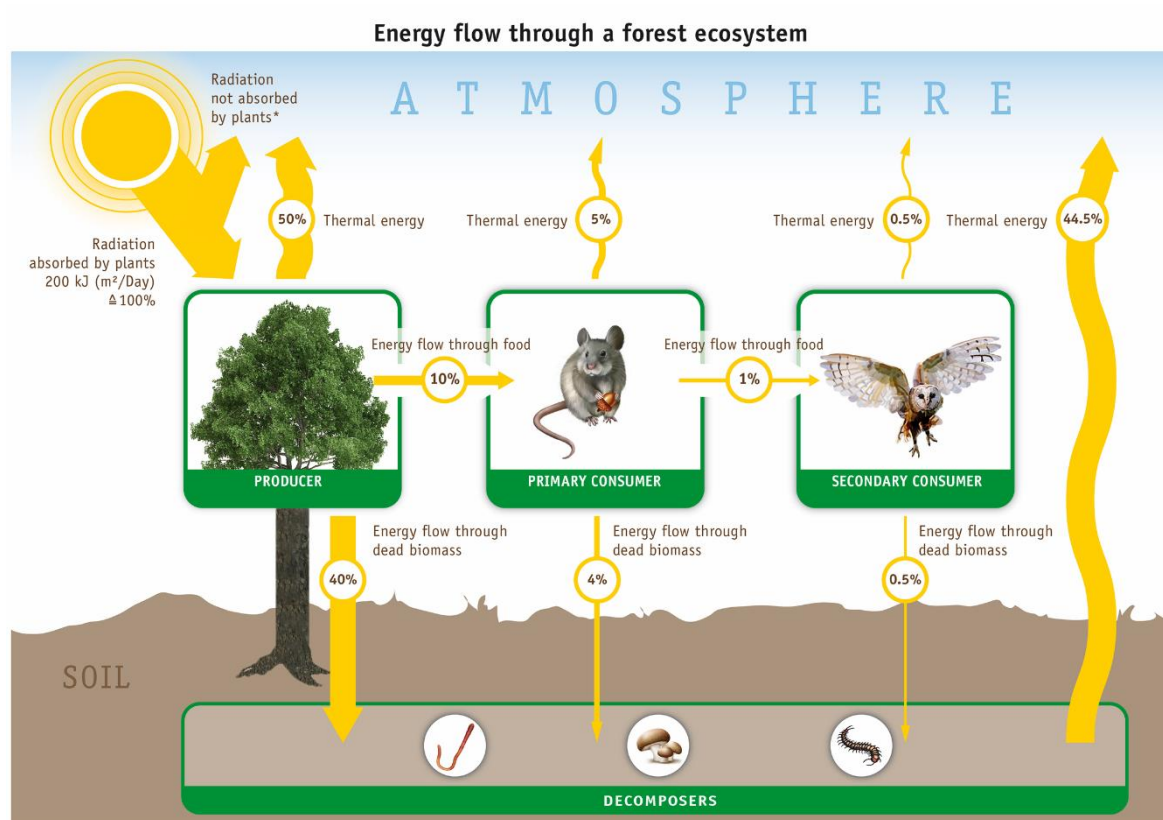
- The energy conservation law is explicitly contradicted.  
“Energy is not conserved”.
- No statements with reference to energy conservation or not sufficient for the previous codes.

#### **6.9.2 Supplement 2: Presentation**

Please see Supplemental Material of Study 2.

6.9.3 Supplement 3: Diagram and Task

Energy flow through a forest ecosystem



Drawing (including the width of arrows) is not true to scale. \*e.g. radiation reflected by the earth's surface

Anna found this diagram in the journal of her environmental organization. She is not sure whether she understands it correctly. Therefore, she shows it to her biology teacher and asks her for help.

**Task:** Explain the energy flow through the forest ecosystem on the basis of the diagram. Mention typical characteristics of energy flow that can be derived from the diagram and also apply to energy flows of other ecosystems.

### 6.9.4 Supplement 4: Inter-Rating

Coefficient of agreement: Inter-rater agreement was measured using Fleiss's Kappa (Fleiss, 1971), which extends Cohen's Kappa (Cohen, 1960) for calculations of the chance-corrected agreement between more than two raters.

*Sample:* A subsample of 25% of the materials was used for inter-rating. Concerning the textbooks, we randomly selected one of the two English textbooks (Campbell Biology) and two of the ten German textbooks (Natura 2, Fokus 9/10) to ensure objectivity across the languages. Concerning students' texts, we randomly selected  $n = 13$  out of  $N = 50$  texts.

*Raters:* The first author conducted the coding of the whole material. Two more raters were trained for inter-rating: a secondary school science teacher and a master student with a BSc degree in Biology and Chemistry.

*Results:* The inter-rating results of the overall sample of  $n = 16$  coding units are shown in Table 6-4. The individual results for the textbooks and students' texts are shown in Tables 6-5 and 6-6, respectively. The final rating presented in the paper is based on the consensus between the three raters (cf. Kesidou & Roseman, 2002).

#### Overall sample

Table 6-4

*Results of the inter-rating, overall sample*

Metaphor	Category	Agreement	Fleiss' Kappa
Energy flow	Usage of the metaphor	88%	$\kappa = .79$
	Definition of the metaphor	92%	$\kappa = .83$
	Usage in terms of a process or a substance	88%	$\kappa = .81$
Non-cycle	Usage of the metaphor	92%	$\kappa = .74$
	Comparison between features of energy and matter transfer	92%	$\kappa = .67$
One-way street	Usage of the metaphor	100%	$\kappa = 1$
	Statements about the direction of energy transfer	100%	$\kappa = 1$
Energy loss	Statements about energy degradation	100%	$\kappa = 1$
	Usage of the metaphor	91%	$\kappa = .83$
	Usage of the metaphor - negated	96%	$\kappa = .84$
	Reference to a system	83%	$\kappa = .65$
	Statements about energy conservation	96%	$\kappa = .89$

**Textbook analysis**

Due to the small sample ( $n = 3$ ), Fleiss' Kappa could not be calculated meaningfully. There were nine codings for each category (3 raters x 3 books) and at least seven of them were identical (see Table 6-5). The discrepancies were discussed. The final rating is based on the consensus among the three raters.

Table 6-5

*Results of the inter-rating, textbook analysis*

Metaphor	Category	Remark
Energy flow	Usage of the metaphor	2 discrepancies
	Definition of the metaphor	2 discrepancies
	Usage in terms of a process or a substance	100 % Agreement
Non-cycle	Usage of the metaphor	2 discrepancies
	Comparison of features of energy and matter transfer	2 discrepancies
One-way street	Usage of the metaphor	100% Agreement
	Statements about the direction of energy transfer	100% Agreement
	Statements about energy degradation	100% Agreement
Energy loss	Usage of the metaphor	1 discrepancy
	Usage of the metaphor - negated	1 discrepancy
	Reference to a system	2 discrepancies
	Statements about energy conservation	1 discrepancy

*Note.* There were nine codings for each category.

**Analysis of students' texts**

Table 6-6

*Results of the inter-rating, students' texts*

Metaphor	Category	Agreement	Fleiss' Kappa
Energy flow	Usage of the metaphor	95%	$\kappa = .91$
	Definition of the metaphor	100%	$\kappa = 1$
	Usage in terms of a process or a substance	85%	$\kappa = .78$
Non-cycle	Usage of the metaphor	100%	$\kappa = 1$
	Comparison of features of energy and matter transfer	100%	$\kappa = 1$
One-way street	Usage of the metaphor	100%	$\kappa = 1$
	Statements about the direction of energy transfer	100%	-
	Statements about energy degradation	100%	$\kappa = 1$
Energy loss	Usage of the metaphor	95%	$\kappa = .86$
	Reference to a system	90%	$\kappa = .74$
	Statements about energy conservation	100%	$\kappa = 1$

*Note.* No statements about the direction of energy transfer were found in the material. Fleiss' Kappa cannot be calculated.

**Literature**

- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104
- Fleiss, J. L. (1971). Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychological Bulletin*, 76, 378-382. doi: 10.1037/h0031619
- Kesidou, S. & Roseman, J. E. (2002). How well do middle school science programs measure up? Findings from project 2061's curriculum review. *Journal of Research in Science Teaching*, 39, 522-549. doi: 10.1002/tea.10035

## **7 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER DREI STUDIEN**

### **Studie 1: Wie wird Energie im Biologieschulbuch dargestellt? – Erarbeitung eines Kategoriensystems und exemplarische Analyse einer Lehrwerkreihe**

Ziel der ersten Studie war es, ein Kategoriensystem zur inhaltlichen und formalen Beschreibung von energiebezogenen Repräsentationen zu entwickeln und Informationen über die derzeitige Darstellung von Energie in Biologieschulbüchern zu gewinnen. Die inhaltlich ausgerichteten Kategorien des Systems beschreiben, wie das Energiekonzept fachlich dargestellt wird. Als Grundlage dienten Studien zur Vorstellungsforschung und die theoretische Beschreibung des Energiebegriffs. Ausgangspunkt für die formale Analyse waren Forschungsarbeiten zur lernwirksamen Gestaltung von Abbildungen. Das Kategoriensystem wurde auf Repräsentationen in stoffwechsel- und ökologiebezogenen Kapiteln der Schulbuchreihe Linder angewandt. Insgesamt wurden  $N = 103$  Texte,  $N = 182$  Abbildungen und  $N = 127$  Aufgaben analysiert.

Die Ergebnisse der inhaltsbezogenen Kategorien zeigen, dass die Thematisierung von Energie erwartungsgemäß mit steigender Klassenstufe zunimmt. Auf eine Definition von Energie wird verzichtet. Es wurden nur wenige fachliche Fehler festgestellt. Empirisch nachgewiesene Alternativvorstellungen der Schülerinnen und Schüler werden in sehr wenigen Repräsentationen und Aufgaben aufgegriffen. Energieformen und -umwandlungen werden häufig, Energieentwertung und -erhaltung hingegen selten explizit thematisiert.

Die Ergebnisse der formalen Kategorien zeigen, dass darstellende Abbildungen (z. B. Fotos, realistische Zeichnungen) mit steigender Klassenstufe abnehmen und logisch-analytische Abbildungen (v. a. Flussdiagramme) zunehmen. Die Abbildungen weisen potenziell lernförderliche Eigenschaften auf, da sie in der Regel über Beschriftungen und Untertitel verfügen und lernförderliche Funktionen erfüllen, indem sie beispielsweise die Interpretation des Textes unterstützen können. Die energiebezogenen Aufgaben lassen eine geringe Variation in den Anforderungen erkennen. Vor allem der Anteil an Aufgaben, die die Integration mehrerer Repräsentation oder die Konstruktion einer Repräsentation erfordern, ist niedrig. Zugleich erfordern nur wenige Aufgaben explizit die Verwendung von Fachsprache.

## **Studie 2: Enhancing Conceptual Knowledge of Energy in Biology with Incorrect Representations**

Die zweite Studie überprüfte die Wirksamkeit einer neu entwickelten Instruktionsmaßnahme, die zwei Lehr-Lernstrategien verknüpft, die sich in Bezug auf abstrakte Konzepte als lernförderlich erwiesen haben: Das Lernen mit depiktiven Repräsentationen und das Lernen aus Fehlern. Es wurde erwartet, dass sich das konzeptuelle Wissen über Energie von Schülerinnen und Schülern stärker verbessert, wenn sie mit einer fehlerhaften statt mit einer korrekten Repräsentation lernen. Außerdem wurde untersucht, ob eine bereits vorgenommene Markierung des Fehlers und das Vorwissen den Lernerfolg beeinflussen. Es wurde eine Interventionsstudie mit  $N = 304$  Schülerinnen und Schülern der 9. Klassenstufe von Gymnasien durchgeführt. In Anlehnung an entsprechende Schulbuchabbildungen wurde ein Energieflussdiagramm gestaltet. In dieses wurde gezielt ein Fehler eingearbeitet, der an Alternativvorstellungen anschließt: ein zusätzlich eingefügter Pfeil, der suggeriert, dass Pflanzen Energie aus dem Boden bekommen und dass Energie in einem Kreislauf fließt. In einer Variante des Diagramms wurde der Fehler eingekreist. Eine dritte Variante des Diagramms stellt den Energiefluss fachlich korrekt dar. Das konzeptuelle Wissen der Schülerinnen und Schüler über Energie wurde zwei Wochen vor und unmittelbar nach der Intervention mit einem standardisierten Test erfasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schülerinnen und Schüler aller drei Bedingungen ihr konzeptuelles Wissen über Energie steigern konnten. Der Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler, die mit dem fehlerhaften Diagramm lernten, war jedoch signifikant höher als der Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler, die mit dem korrekten Diagramm lernten – wenn sie den Fehler selbst erkannt und/oder erklärt haben. Dies war jedoch für die Mehrheit der Schülerinnen und Schüler zu schwierig: Nur 10,8 % der Schülerinnen und Schüler, die mit dem fehlerhaften Diagramm lernten, identifizierten und erklärten den Fehler. Wenn der Fehler bereits markiert war, gaben 28,0 % der Schülerinnen und Schüler eine zufriedenstellende Erklärung des Fehlers. Erfolgreiche und nicht erfolgreiche Schülerinnen und Schüler unterschieden sich nicht in Bezug auf ihre kognitiven Fähigkeiten oder ihre Biologienote. Allerdings haben sich die Schülerinnen und Schüler, die den Fehler identifizierten, nach eigener Aussage stärker angestrengt. Lernzuwachs und Vorwissen waren negativ korreliert, das heißt, dass vor allem Schülerinnen und Schüler mit niedrigem Vorwissen ihr konzeptuelles Wissen über Energie steigern konnten.



### **Studie 3: Metaphors Describing Energy Transfer Through Ecosystems – helpful or misleading?**

Im Fokus der dritten Studie standen deskriptive Repräsentationen der Energieweitergabe in einem Ökosystem: die Metaphern (1) Energiefluss, (2) kein Kreislauf, (3) Einbahnstraße und (4) Energieverlust. Ziel war es zu klären, welche Eigenschaften diese Metaphern haben und wie sie im Lehr-Lehrkontext verwendet werden, um darauf aufbauend Empfehlungen für die Verwendung dieser Metaphern im Biologieunterricht abzuleiten. Zunächst wurde die Struktur der Metaphern auf Grundlage der Metapherntheorie von Lakoff und Johnson (1980, 2003) und unter Einbeziehung vorhandener Erkenntnisse über übergeordnete konzeptuelle Metaphern analysiert. Auf dieser Basis wurde ein Kategoriensystem für die qualitative Inhaltsanalyse deduktiv erstellt und im Zuge der Analyse induktiv erweitert und ausgeschärft. Insgesamt wurden  $N = 13$  Biologieschulbücher und  $N = 50$  Beschreibungen eines Energieflussdiagramms von Schülerinnen und Schülern der 9. Klassenstufe analysiert. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

*Energiefluss* ist eine konventionalisierte Metapher für die Energieweitergabe in einem Ökosystem. Sie betont die Aspekte Energieübertragung und -erhaltung, verdeckt jedoch Energieumwandlung. Während Biologieschulbücher die Metapher fachlich korrekt im Sinne eines Prozesses verwenden, tendieren die Schülerinnen und Schüler dazu, Energiefluss als Substanz zu behandeln.

Die Metapher *kein Kreislauf* betont den Unterschied zwischen dem Transfer von Stoffen und Energie in einem Ökosystem und stellt bezogen auf das Energiekonzept negatives Wissen dar. Die wörtliche Verwendung ist in den untersuchten Biologieschulbüchern selten. Es wurde festgestellt, dass einige Schülerinnen und Schüler die Metaphern in ihrer nicht negierten Form verwenden oder den Begriff Kreislauf missverstehen.

Die *Einbahnstraße* betont die Richtung des Energietransfers bzw. die Irreversibilität der Energieentwertung. Die Erklärung dieser Metapher bleibt in den untersuchten Biologieschulbüchern oft vage oder es wird keine Erklärung gegeben. Die Schülerinnen und Schüler übernehmen diese Metaphern sehr selten.

Die Metapher *Energieverlust* betont den Aspekt Energieentwertung und verdeckt Energieerhaltung. Bezüglich des Umgangs mit dieser Metapher in Biologieschulbüchern wurde eine große Vielfalt festgestellt (Vermeidung, Kenntlichmachung als uneigentliche Sprache, Verwendung mit und ohne Systembezug). Schülerinnen und Schüler verwenden diese Metapher spontan und ohne Systembezug.



## 8 DISKUSSION UND AUSBLICK

### 8.1 Übergreifende Diskussion

Die vorliegende Arbeit trägt dazu bei, die Forschungslücke im Bereich der Lernangebote zum Thema Energie in der Biologie ein Stück weit zu schließen. Es wurden Erkenntnisse über die Beschaffenheit und Verwendung deskriptiver und depiktiver Repräsentationen des Energiekonzepts gewonnen. Die Ergebnisse der Studien werden detailliert in den Manuskripten diskutiert (Kapitel 4 bis 6). In diesem Kapitel sollen die Studien im Zusammenhang betrachtet werden. Dabei werden drei Schwerpunkte gelegt: Erstens ist das Ergebnis der zweiten Studie besonders diskussionswürdig, da der hohe Schwierigkeitsgrad der Aufgabenstellung nicht erwartet wurde. Zweitens wird die Strukturierung des Energiekonzepts reflektiert, auf deren Grundlage die drei Studien durchgeführt wurden. Drittens erfolgt eine methodenbezogene Reflexion, da in Studie 1 und Studie 3 unterschiedliche Verfahren zur Sicherung der Objektivität der Kodierungen angewandt wurden.

#### 8.1.1 Gründe für die Schwierigkeit der Fehleridentifikation und -erklärung

Die in Studie 2 erprobte Instruktion erwies sich als anspruchsvoll: Die Fehleridentifikation und -erklärung war für die Mehrheit der Schülerinnen und Schüler zu schwierig. Das Geben der Hilfestellung (Markierung des Fehlers) ist sinnvoll, da unter dieser Bedingung ein größerer Anteil der Schülerinnen und Schüler in der Lage war, den Fehler zu erklären und ihr Wissen stärker zu steigern. Allerdings hat die Mehrheit der Schülerinnen und Schüler auch unter dieser Bedingung eine falsche oder unzureichende Erklärung gegeben. Im Folgenden sollen unter Einbeziehung der Ergebnisse der Studien 1 und 3 mögliche Gründe für den hohen Schwierigkeitsgrad der Aufgabe diskutiert werden.

*Alternativvorstellung.* Die Schulbuchanalyse zeigte, dass nur selten in Schulbüchern auf energiebezogene Alternativvorstellungen explizit eingegangen wird. In der zweiten Studie wird die verbreitete Alternativvorstellung, dass Pflanzen Energie aus dem Boden bekommen bzw. Energie recycelt werden kann, durch den eingefügten Fehler adressiert. Die Alternativvorstellung zeigt sich auch noch nach der Intervention, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Lernenden über die korrekte Lösung der Diagrammaufgaben erst nach dem Posttest informiert wurden. Gemäß der *Conceptual Change*-Theorie muss für einen Konzeptwechsel eine Unzufriedenheit mit der vorhandenen

Vorstellung existieren und die neue Vorstellung muss verständlich, plausibel und fruchtbar sein (z. B. Strike & Posner, 1992). Die Auseinandersetzung mit einem Fehler, der auf Alternativvorstellungen beruht, kann nur einen ersten Schritt zur Vorstellungsänderung darstellen. Im Zuge der Metaphernanalyse wurden Beschreibungen des korrekten Energieflussdiagramms analysiert. Die Alternativvorstellung zeigte sich auch hier: Die vorgegebene Metapher *kein Kreislauf* wurde von einigen Lernenden in ihre nicht negierte Form geändert oder ein Energiekreislauf wurde beschrieben. Die Ergebnisse der Studien zeigen somit einmal mehr, dass die Alternativvorstellung häufig vorkommt. Für Schülerinnen und Schüler, die die Alternativvorstellung besitzen, kann die Fehleridentifikation und -erklärung zu schwierig gewesen sein.

*Mangelndes Vorwissen.* Zum Finden und Erklären des Fehlers ist Vorwissen notwendig (z. B. Große & Renkl, 2007). Das als notwendig erachteten Informationen zum Thema Energie und Energiefluss in Ökosystemen werden in der Präsentation dargestellt (siehe Anhang Studie 2, Kapitel 5.8). Diese Präsentation war dazu gedacht, den Schülerinnen und Schülern die Informationen ins Gedächtnis zu rufen und nicht – im Sinne eines Nürnberger Trichters – zur Aneignung neuen Wissens. Zusätzlich war es aus organisatorischen Gründen oft nicht möglich, die Studie in den Ökologieunterricht einzubinden. Es ist deshalb möglich, dass nicht alle Schülerinnen und Schüler über ausreichendes Vorwissen zum Thema verfügten, um den Fehler identifizieren bzw. erklären zu können.

*Unklare und hinderliche Metaphern.* Metaphern werden verwendet, um abstrakte Konzepte wie den Energiefluss zu kommunizieren (vgl. Schulbuchanalyse der dritten Studie). Sie waren deshalb auch Bestandteil der Präsentation und der Aufgabenstellung. Metaphern können lernförderlich oder lernhinderlich wirken (Duit, 1991). Im Rahmen der dritten Studie wurde festgestellt, dass Lernende dazu tendieren, die Energieflussmetapher im Sinne einer Substanz und nicht fachlich korrekt im Sinne eines Prozesses aufzufassen. Die Metapher *kein Kreislauf* wurde von einigen Lernenden in ihre nicht negierte Form geändert. Ferner hat sich gezeigt, dass die Einbahnstraßen-Metapher nur sehr selten übernommen wurde, was darauf hindeuten könnte, dass ihre Bedeutung unklar war. Somit liegt nahe, dass die Verwendung der Metaphern als schwierigkeitserzeugendes Merkmal bei der Instruktion gewirkt haben könnte und somit dazu beitrug, dass nur wenige Schülerinnen und Schüler den Fehler im Energieflussdiagramm identifizieren und/oder erklären konnten.

*Mangelndes Wissen über Energieerhaltung und -entwertung.* Der Prozess Energiefluss in Ökosystemen umfasst alle vier Aspekte der Energie (vgl. Kapitel 2.2.2). Bei den Aspekten Energieerhaltung und -entwertung weisen Lernende die größten Schwierigkeiten auf (z. B. Jin & Anderson, 2012; Opitz et al., im Druck). Der zusätzlich eingefügte Pfeil in das Energieflussdiagramm verletzt das Gesetz der Energieerhaltung. Durch den Energierückfluss zu den Produzenten geben die Destruenten 10 % mehr Energie ab, als sie aufnehmen, wodurch Energie neu erzeugt werden müsste. Der Energieerhaltungssatz wurde vor der Bearbeitung des Diagramms wiederholt und lag den Schülerinnen und Schülern in dem Wortlaut „Die Gesamtenergie des Universums bleibt immer gleich, denn Energie kann nicht erzeugt oder zerstört werden (Energieerhaltung)“ während der Arbeitsphase vor. Damit boten die Prozentzahlen in dem Diagramm einen Hinweis auf die Fehlerstelle. Etwa ein Viertel der Schülerinnen und Schüler in Gruppe 1, die ohne Hilfeleistung mit dem Fehler lernten, wies in seinen Erklärungen auf den Widerspruch in den Prozentzahlen hin. Andere Schülerinnen und Schüler taten dies nicht. Möglicherweise haben sie den Prozentzahlen keine Beachtung geschenkt oder waren von der Relation der Zahlen überfordert. Denkbar ist auch, dass Schülerinnen und Schüler grundsätzlich Probleme haben, das Gesetz der Energieerhaltung auf biologische Phänomene wie den Energiefluss in einem Ökosystem anzuwenden (vgl. hierzu auch Andersson, Bach, & Zetterqvist, 1998) und deshalb den Hinweis nicht nutzen konnten. In mehreren Studien wurde beobachtet, dass Lernende den Energieerhaltungssatz auswendig wiedergeben können, das Gesetz aber nicht bei der Lösung von Aufgaben anwenden (im biologischen Kontext mit Studierenden: Chabalengula et al., 2012; im physikalischen Kontext mit Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe: Goldring & Osborne, 1994; Kesidou & Duit, 1993). Im Rahmen der Metaphernanalyse wurden Beschreibungen eines korrekten Energieflussdiagramms analysiert. Die Analyse bietet in Bezug auf die Energieerhaltung eine aufschlussreiche Beobachtung: Der Energieerhaltungssatz wird von den Lernenden nie zusammen mit der negierten Kreislaufmetapher genannt. Möglicherweise ist es für Schülerinnen und Schüler schwierig zu erkennen, warum Energie, die nicht in einem Kreislauf fließt, sondern das Ökosystem verlassen hat, immer noch existent ist. Viele Menschen haben eine teleologische Sicht auf die Natur, bei der angenommen wird, dass naturwissenschaftliche Phänomene einen Zweck oder Sinn erfüllen müssen (Langlet, 2002). Auf der anderen Seite gibt es drei Texte von Lernenden, in denen ein Kreislauf der Energie benannt oder beschrieben wird und zugleich der Energieerhaltungssatz genannt wird. In Analogie zu Stoffkreislauf und Materieerhaltung scheint ein Zusammenspiel aus Energiekreislauf und

Energieerhaltung logisch. Diese Vermutung wird von den Ergebnissen der Fragebogen- und Interviewstudie von Goldring und Osborne (1994) gestützt, in der 31 % der befragten Sechstklässler unter *Energieerhaltung* das Sparen oder Recyceln von Energie verstehen. Angesichts der Verwendung der Energieverlustmetapher besteht die Vermutung, dass Schülerinnen und Schüler tatsächlich annehmen, dass Energie verschwindet. Die Schulbuchanalyse im Rahmen dieser Dissertation zeigte, dass die Aspekte Energieerhaltung und -entwertung nur sehr selten in den untersuchten Biologieschulbüchern angesprochen werden. Angesichts der hohen Bedeutung des Schulbuchs für den naturwissenschaftlichen Unterricht liegt es nahe, dass es nur wenige Lerngelegenheiten zu diesen Energieaspekten im Biologieunterricht gibt. Das fehlende konzeptuelle Wissen über Energieentwertung und -erhaltung könnte zur niedrigen Quote korrekter Lösungen der Diagrammaufgabe in Studie 2 beigetragen haben.

### **8.1.2 Reflexion der Strukturierung des Energiekonzepts**

Die Strukturierung des Energiekonzepts anhand von vier Aspekten wurde in physikalischen Kontexten entwickelt (Duit, 1984; Neumann et al., 2013). Aufgrund der Offenheit biologischer Systeme hat Kattmann (2015a) für die Biologie eine andere Strukturierung vorgeschlagen, bei der „das physikalisch zentrale Konzept der Energieerhaltung . . . zugunsten des Durchflusses und der Speicherung von Energie zurück[tritt]. . . . Das Zurücktreten des Konzepts der Energieerhaltung ist auch deshalb angebracht, weil das Theorem der Energieerhaltung im Unterricht weder nachweisbar ist noch veranschaulicht werden kann.“ (S. 147 f.). Gegen Kattmanns These spricht, dass die in Studie 3 untersuchte Metapher *Energiefluss* die Aspekte Energieübertragung und Energieerhaltung betont. Zudem kann angenommen werden, dass der Energieerhaltungssatz unter Einbeziehung angrenzender Systeme bzw. des größten denkbaren Systems, des Universums, in Repräsentationen visualisiert werden kann. In dem Diagramm, das für die zweite Studie erstellt wurde, wurden angrenzende Systeme eingeschlossen: Es ist dargestellt, dass Energie ausgehend von der Energiequelle Sonne in die Nahrungskette eingebracht wird und wieder vollständig – wie die Prozentzahlen zeigen – in die Atmosphäre abgegeben wird. Allerdings waren die gedachten Systemgrenzen nicht in das Diagramm eingezeichnet, was eine Schwäche des Diagramms darstellen könnte.

Ferner spricht für die Einbeziehung der Energieerhaltung in den Biologieunterricht die Annahme, dass die Berücksichtigung aller Aspekte notwendig ist, um ein natur-

wissenschaftlich adäquates Energiekonzept aufzubauen, denn jeder der Energieaspekte kann nur unter Einbeziehung der anderen Aspekte vollständig erfasst werden (Duit, 2014; Duit & Häußler, 1994). Vor allem die Aspekte Energieentwertung und Energieerhaltung sind eng verknüpft und sollten deshalb unter gegenseitiger Bezugnahme in den naturwissenschaftlichen Fächern unterrichtet werden (Duit, 1984; Millar, 2014; Park & Liu, 2016; Schecker & Theyßen, 2007). Die Adressierung aller Energieaspekte in jedem naturwissenschaftlichen Fach ist im Sinne eines fächerübergreifenden, kohärenten Energiekonzepts wünschenswert (Opitz, 2016).

In der vorliegenden Arbeit hat sich die Entscheidung für die Strukturierung des Energiekonzepts nach Neumann et al. (2013) bewährt. Wie in den Studien von Opitz (für eine Übersicht siehe Opitz, 2016) konnte die Strukturierung sinnvoll auf biologische Themen angewendet werden. In der Schulbuchanalyse konnten alle vier Aspekte zugeordnet werden. Ferner wurde das nach den Energieaspekten strukturierte Testinstrument von Opitz et al. (im Druck) in gekürzter Form in der zweiten Studie eingesetzt. In der dritten Studie war es zum Teil notwendig, die Aspekte Energieumwandlung und Energieübertragung getrennt zu betrachten, da beispielsweise die Metapher *Energiefluss* Energieübertragung hervorhebt, Energieumwandlung aber verdeckt. Die Trennung dieser beiden Aspekte wird in einigen Strukturierungsvorschlägen vorgenommen (z. B. Lancor, 2014; Nordine, 2016) und könnte sich zukünftig durchsetzen.

### 8.1.3 Objektivität der Kodierungen

Zur Auswertung der Dokumente in den Studien 1 und 3 wurde die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2010, 2014) herangezogen. Für die Qualitätssicherung der Ergebnisse ist vor allem das Kriterium der Anwenderunabhängigkeit der Kategoriensysteme relevant, welches durch Interratings überprüft wurde. Als zufallskorrigiertes Maß der Übereinstimmung wurde der Kappa-Koeffizient nach Cohen (1960) bzw. die Erweiterung für mehr als zwei Rater nach Fleiss (1971) herangezogen. Es gibt keine allgemeingültigen Grenzwerte für Gütemaße der Übereinstimmung zwischen Ratern (Wirtz & Caspar, 2002). Nach der etablierten Skala von Landis und Koch (1977) wurde eine substanzielle bis perfekte Übereinstimmung erreicht, in wenigen Fällen wurde nur eine moderate Übereinstimmung erzielt. Die Werte wurden in den Manuskripten bzw. in den Onlinematerialien kritisch beleuchtet (vgl. Kapitel 4.6, 4.10.3 und 6.9.4). In Studie 1 beruhen die Analysen auf den Kodierungen der Erstautorin, während bei Studie 3 das Verfahren

der kommunikativen Validierung angewandt wurde. Dabei diskutieren die Rater Fälle, die von ihnen unterschiedlich beurteilt wurden, und versuchen, eine Einigung zu erzielen. Ein solches Konsensverfahren ist aufwendig und nicht unproblematisch. Unter anderem besteht die Gefahr, dass ein Rater oder eine Gruppe von Ratern – auch unwillentlich – den Ratingprozess dominiert und sich die anderen Rater in ihrem Urteil unterordnen, sodass nur ein scheinbarer Konsens entsteht (Holliday, 2003). Andererseits kann kommunikative Validierung zur Qualitätssicherung beitragen (Mayring, 2010, 2014). Vor Anwendung des Verfahrens im Rahmen der Studie 3 wurde betont, dass nicht in jedem strittigen Fall zwingend eine Einigung erzielt werden muss. Gegen eine einseitige Dominanz im Validierungsprozess spricht, dass jeder der drei Rater mindestens einmal eine Kodierung vertrat, der sich die anderen beiden anschlossen. Im Zuge der Diskussion konnte der Kodierleitfaden an einzelnen Stellen noch stärker ausgeschärft werden. Deshalb wird das Verfahren als sinnvoll beurteilt.

## 8.2 Grenzen der Studien

In den vorgelegten Manuskripten zu den Studien (Kapitel 4 bis 6) wird differenziert auf die Grenzen der Studien eingegangen. An dieser Stelle sollen die wichtigsten Grenzen aufgegriffen werden.

*Schulbücher als Analysematerial.* Biologieschulbücher waren Gegenstand der Analysen in den Studien 1 und 3. Da Angaben über Verkaufszahlen in der Regel nicht öffentlich verfügbar sind, wurden Bücher ausgewählt, die in vielen deutschen Bundesländern zugelassen sind. Ferner gibt es nur wenige aktuelle Umfragen unter Schulen bzw. Lehrkräften, die Aufschluss über die tatsächliche Nutzungshäufigkeit geben. Es muss berücksichtigt werden, dass die Darstellung von Energie in Schulbüchern nur in dem Maße in den Unterricht einfließt, in dem das Schulbuch tatsächlich genutzt wird. Wie Energie tatsächlich vermittelt wird, lässt sich nur durch Unterrichtsstudien feststellen.

*Grenzen von Studie 2.* Im Gegensatz zu den Studien 1 und 3, die einen eher qualitativen Ansatz verfolgen, ist Studie 2 eher quantitativ ausgerichtet<sup>23</sup> und nutzt statistische Verfahren. Der verwendete Test erlaubt eine reliable und valide Messung des konzeptuellen Wissens über Energie (Opitz et al., im Druck), wurde allerdings aus Zeitgründen in

---

<sup>23</sup> Eine strikte Trennung nach qualitativer und quantitativer Auswertung ist in dieser Arbeit nicht sinnvoll. Beispielsweise schließt die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) in den Teilstudien 1 und 3 auch quantitative Aspekte mit ein. Die Fehlermarkierungen der Schülerinnen und Schüler der Gruppe 2 in Teilstudie 2 wurden qualitativ betrachtet.



einer gekürzten Fassung eingesetzt. Die Reliabilitätskennwerte des gekürzten Tests fielen geringer aus als erwartet. Des Weiteren muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die Intervention recht kurz war, da nur ein Diagramm eingesetzt wurde. Eine weitere Grenze der Studie besteht darin, dass kein Follow-up Test durchgeführt wurde, sodass keine Aussage über die Nachhaltigkeit des Lernerfolgs getroffen werden kann.

*Generalisierbarkeit der Ergebnisse.* Externe Validität (Generalisierbarkeit) liegt vor, wenn die Ergebnisse auf andere Personen, Situationen oder Zeitpunkte übertragen werden können. Die externe Validität sinkt mit abnehmender Repräsentativität der untersuchten Stichprobe (Bortz & Döring, 2002). Die Generalisierbarkeit der im Rahmen dieser Dissertation gewonnenen Ergebnisse muss durch weitere Studien überprüft werden. Die erste Studie untersucht lediglich eine Schulbuchreihe, die nicht repräsentativ für alle Biologieschulbuchreihen sein muss. Inwiefern die Ergebnisse der zweiten Studie generalisierbar sind, bleibt ebenfalls offen. Ausschließlich Schülerinnen und Schüler von Gymnasien in Schleswig-Holstein haben an der Studie teilgenommen, sodass die untersuchte Stichprobe auf einen Bildungsgang und eine Region begrenzt ist. Zudem wurde bislang nur eine gezielt fehlerhafte Repräsentation eingesetzt. In der Metaphernanalyse sind drei von vier Metaphern spezifisch für den Kontext Energieweitergabe in Ökosystemen, lediglich die Metapher *Energieverlust* ist auch in anderen Kontexten gängig. Konzeptuelle Metaphern sind im Vergleich zu Einzelmetaphern eher dazu geeignet, Denkmuster zu verallgemeinern (Schmitt, 2007); da jedoch bereits Erkenntnisse zu energiebezogenen konzeptuellen Metaphern vorliegen, war deren Identifikation nicht Ziel der Untersuchung. Gerade die Spezifität der ausgewählten Einzelmetaphern ist eine Stärke der Studie, da dies die Metaphern sind, die wörtlich in Lehr-Lernkontexten verwendet werden. Generelle Schlüsse über die Verwendung von Metaphern wurden unter Einbeziehung anderer vorhandener Studien gezogen.

### **8.3 Implikationen für die Unterrichtspraxis**

Im Biologieunterricht sollen Repräsentationen verwendet werden, die das Potenzial haben, den Aufbau konzeptuellen Wissens über Energie zu fördern. Mithilfe des in Studie 1 entwickelten Kategoriensystems können Lehrkräfte das eingesetzte Material kritisch in Bezug auf Inhalt und Form prüfen. Ausgehend von den Analyseergebnissen der ausgewählten Schulbuchreihe sollten Lehrkräfte vor allem darauf achten, in ihrem

Biologieunterricht (1) den Energiebezug explizit zu machen, (2) die Aspekte Energieentwertung und Energieerhaltung zu thematisieren und (3) im Sinne des Konstruktivismus Alternativvorstellungen über Energie aufzugreifen. Bei der Umsetzung dieser Punkte könnten Lehrkräfte weitere Materialien (neben dem Schulbuch) hinzuziehen und geeignete Unterrichtsstrategien anwenden. Eine Strategie, Alternativvorstellungen anzusprechen, wurde in der zweiten Studie in Bezug auf das Thema Energiefluss in Ökosystemen untersucht. Das Lernen aus einem Fehler in einem Diagramm hat sich als vielversprechend, aber anspruchsvoll erwiesen. Die Lehrkräfte sollten sicherstellen, dass die Schülerinnen und Schüler das zur Fehleridentifikation notwendige Vorwissen besitzen. Nach der Bearbeitung des Materials sollte allen Schülerinnen und Schülern das korrekte Wissen und in Abgrenzung dazu das negative Wissen zur Verfügung stehen, indem der Fehler und die Begründung der Fehlerhaftigkeit beispielsweise in einem Unterrichtsgespräch geklärt werden.

Bei der Kommunikation über abstrakte Konzepte wie Energie sollte besonderes Augenmerk auf metaphorische Sprache gelegt werden, die in Alltags- und Fachsprache unvermeidbar ist und sowohl lernförderlich als auch lernhinderlich wirken kann. Generell sollten Lehrkräfte Metaphern bewusst verwenden, ihre Bedeutung explizit erklären und Leistungen und Grenzen der Metaphern gemeinsam mit den Lernenden besprechen (vgl. hierzu auch Langlet, 2004; Niebert et al., 2012; Orgill, 2013). Lehrkräfte sollten untersuchen, welche Metaphern auf welche Weise zur Darstellung des Energieflusses in dem von ihnen eingesetzten Unterrichtsmaterial verwendet werden. Eine Hilfestellung hierfür kann das für Studie 3 erarbeitete Kategoriensystem bieten. Angesichts der Ergebnisse der Metaphernanalyse können insbesondere folgende Empfehlungen für Lehrkräfte und Schulbuchautorinnen und -autoren gegeben werden: (1) Der Prozesscharakter der Energieflussmetapher sollte verdeutlicht werden, beispielsweise durch die Verwendung der Metapher als Verb. (2) Auf die korrekte (negierte) Verwendung der Kreislaufmetapher sollte geachtet und der Scheinkonflikt mit der Energieerhaltung aufgelöst werden. (3) Die Verlustmetapher sollte nur mit expliziten Systembezügen verwendet werden. Auch wenn die Metapher im Unterricht vermieden wird, muss auf ihre spontane Verwendung durch die Lernenden geachtet werden. (4) Generell müssen die Bedeutungen der Metaphern explizit gemacht werden, eine Lücke wurde vor allem in Bezug auf die Einbahnstraßenmetapher festgestellt.

Ökosysteme sind offene Systeme: Sie nehmen Energie aus der Umgebung auf und geben sie wieder in die Umgebung ab. Der Energietransfer aus einem System heraus ge-

hört somit notwendigerweise zum Konzept *Energiefluss in Ökosystemen* dazu. Wie die Metaphernanalyse gezeigt hat, wird dies in einigen Erklärungen von Energiefluss, die nur die Energieweitergabe innerhalb einer Nahrungskette umfassen, nicht berücksichtigt. Dies deckt sich mit der Beobachtung der ersten Studie, dass Energieentwertung und -erhaltung in Schulbüchern nur sehr selten thematisiert werden. Schulbuchautorinnen und -autoren und Lehrkräfte sollten den Energiefluss in einem Ökosystem deshalb in einem erweiterten Sinne behandeln. Dabei sollte nicht nur explizit geschildert werden, welches System Energie abgibt, sondern auch, wo diese Energie anschließend zu finden ist. Die Forderung des konkreten Einbezugs angrenzender Systeme gilt auch für die Energieweitergabe auf anderen Systemebenen, beispielsweise bei der Betrachtung eines Individuums.

#### **8.4 Implikationen für zukünftige Forschung**

Im Rahmen der ersten Studie wurde die Darstellung von Energie in einer Schulbuchreihe in Bezug auf stoffwechselbiologische und ökologische Kontexte untersucht. Das vorgelegte Kategoriensystem kann in Bezug auf andere Kontexte – beispielsweise durch das Hinzufügen weiterer Ankerbeispiele in den Kodierleitfaden – ausgeschärft werden. Eine Masterarbeit an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel hat das Kategoriensystem zur Erfassung der Energiedarstellung in Schulbüchern im Kontext Klimawandel genutzt (Fischer, 2017). Ferner kann das Kategoriensystem für die Analyse von Schulbüchern anderer Fächer oder von Hochschullehrwerken angepasst werden. Eine Bachelorarbeit an der Leibniz Universität Hannover hat bereits eine adaptierte und erweiterte Fassung des Kategoriensystems für die Analyse der Energiedarstellung in einem Chemie- und einem Physikschulbuch für die Sekundarstufe I verwendet (Klenke, 2017). Wenn noch weitere Analysen durchgeführt werden würden, könnten die Ergebnisse verglichen und Aufschluss über deren Generalisierbarkeit erlangt werden. Darüber hinaus werden Studien im Klassenraum benötigt, um festzustellen, wie Energie im Biologieunterricht vermittelt wird und in welchem Maße dabei das Schulbuch herangezogen wird.

Angesichts der vielversprechenden Ergebnisse der zweiten Studie sollten zukünftige Studien die Annahme überprüfen, dass das Lernen aus Fehlern in Repräsentationen auf weitere Repräsentationstypen und andere naturwissenschaftliche Themen übertragbar ist. In Hinblick auf die beobachtete hohe Schwierigkeit der Aufgabe sind die Strategien, die die Schülerinnen und Schüler bei der Suche nach Fehlern in einer Repräsentation anwenden, ein interessanter Bereich für zukünftige Forschung. Indem Aufschluss darüber

erlangt würde, welche Strategien erfolgreiche und nicht erfolgreiche Lernende anwenden, könnten weitere Unterstützungsmaßnahmen – neben der Markierung des Fehlers – entwickelt werden. Eye-Tracking und lautes Denken könnten geeignete Methoden sein, um die bei der Aufgabenbearbeitung ablaufenden kognitiven Prozesse zu erfassen.

Auch in Bezug auf den Umgang mit Metaphern wäre ein Einblick in die (meta-)kognitiven Prozesse aufschlussreich. Durch Interviews könnte herausgefunden werden, ob Schülerinnen und Schüler Metaphern in Schulbüchern als solche wahrnehmen und ob sie sich über Leistungen und Grenzen der Metaphern bewusst sind. Des Weiteren sind analoge Studien zu weiteren kontextspezifischen energiebezogenen Metaphern wünschenswert, beispielsweise zu den Metaphern „Energiehaushalt“, „Energiekraftwerke“ und „Energiewährung“ im Bereich Stoffwechsel (Bayrhuber et al., 2010, S. 73, 76; Becker, Bokelmann, Krull, & Schäfer, 2012, S. 74, 84, 94), um spezifische Empfehlungen für den Einsatz dieser Metaphern in der Unterrichtspraxis abzuleiten und die generellen Hinweise zur Metaphernverwendung zu untermauern.

## 8.5 Ausblick

Durch schulische Bildung sollen Schülerinnen und Schüler auf Themen der nachhaltigen Entwicklung vorbereitet werden. In einem gemeinsamen Projekt haben die Kultusministerkonferenz (KMK) und das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) einen Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung erarbeitet (KMK & BMZ, 2008, 2016). Als Kernkompetenzen werden die Bereiche Erkennen, Bewerten und Handeln beschrieben (Schreiber, 2016). Die vorgeschlagenen Themenbereiche, die den Schülerinnen und Schülern Möglichkeiten zur Entwicklung von Kernkompetenzen des Lernbereichs geben sollen, umfassen unter anderem biologisch-energetisch relevante Themen wie Ernährung, globale Umweltveränderungen und Energiegewinnung (Schroeter, Bernholt, Härtig, Klinger, & Parchmann, 2016). Im Rahmen des Beitrags des Fachs Biologie zum Lernbereich Globale Entwicklung sollen „insbesondere bei der Behandlung von Ökosystemen [...] globale Aspekte und Dimensionen nachhaltiger Entwicklung in den Unterricht einbezogen werden“ (Schroeter et al., 2016, S. 332). Es ist anzunehmen, dass grundlegendes Wissen über Energie – beispielsweise in Zusammenhang mit Ökosystemen – Voraussetzung dafür ist, energiebezogene Themen der nachhaltigen Entwicklung erkennen und bewerten zu können und Handlungsfähigkeit zu erlangen. Empirische Belege für diese Hypothese fehlen bislang. Am

Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik haben kürzlich Forschungsarbeiten begonnen, die den Zusammenhang zwischen dem Wissen über Energie und der Fähigkeit zur Teilhabe an der Bewältigung gesellschaftspolitischer Herausforderungen untersuchen.

## 8.6 Literaturverzeichnis

- Andersson, B., Bach, F., & Zetterqvist, A. (1998). Understanding global and personal use of energy. *Journal of Baltic Science Education, 1*, 4-18.
- Bayrhuber, H., Dietmair, C., Drös, R., Feldermann, D., Hansen, T., Harms, U., . . . Renke, B. (2010). *Linder Biologie Gesamtband*. Braunschweig: Schroedel.
- Becker, A., Bokelmann, I., Krull, H.-P., & Schäfer, M. (2012). *Natura. Biologie für Gymnasien. Oberstufe*. Stuttgart: Klett.
- Bortz, J., & Döring, N. (2002). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer.
- Chabalengula, V. M., Sanders, M., & Mumba, F. (2012). Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological contexts. *International Journal of Science and Mathematics Education, 10*, 241-266. doi: 10.1007/s10763-011-9291-2
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement, 20*, 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104
- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school – Empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education, 19*, 59-66. doi: 10.1088/0031-9120/19/2/306
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education, 75*, 649-672. doi: 10.1002/sce.3730750606
- Duit, R. (2014). Teaching and learning the physics energy concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (S. 67-85). New York, NY: Springer.
- Duit, R., & Häußler, P. (1994). Learning and teaching energy. In P. J. Fensham, R. F. Gunstone & R. T. White (Hrsg.), *The content of science: A constructivist approach to its teaching and learning* (S. 185-200). London: The Falmer Press.
- Fischer, J. (2017). *Wie wird Energie in Biologie- und Geographielehrwerken dargestellt? Eine inhaltliche und formale Analyse ausgewählter Kapitel zum Klimawandel*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Fleiss, J. L. (1971). Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychological Bulletin, 76*, 378-382. doi: 10.1037/h0031619

- Goldring, H., & Osborne, J. (1994). Students' difficulties with energy and related concepts. *Physics Education*, 29, 26-32.
- Große, C. S., & Renkl, A. (2007). Finding and fixing errors in worked examples: Can this foster learning outcomes? *Learning and Instruction*, 17, 612-634. doi: 10.1016/j.learninstruc.2007.09.008
- Holliday, W. G. (2003). Comment: Methodological concerns about AAAS's Project 2061 study of science textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 40, 529-534. doi: 10.1002/tea.10094
- Jin, H., & Anderson, C. W. (2012). A learning progression for energy in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 1149-1180. doi: 10.1002/tea.21051
- Kattmann, U. (2015). Energie und Entropie – zentrale Begriffe für biologische Bildung. In U. Gebhard & M. Hammann (Hrsg.), *Lehr- und Lernforschung in der Biologiedidaktik* (S. 135-150). Innsbruck: Studienverlag.
- Kesidou, S., & Duit, R. (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics – An interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 85-106.
- Klenke, A. C. (2017). *Energie in Chemie- und Physikschulbüchern am Beispiel von Chemie heute S1 und Dorn Bader Physik Sek1. Adaption und Anwendung eines bestehenden Kategoriensystems*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- KMK, & BMZ (Hrsg.). (2008). *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung*. Bonn: Warlich Druck Gruppe.
- KMK, & BMZ (Hrsg.). (2016). *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Bonn: Cornelsen.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). The metaphorical structure of the human conceptual system. *Cognitive Science*, 4, 195-208. doi: 10.1207/s15516709cog0402\_4
- Lakoff, G., & Johnson, M. (2003). *Metaphors we live by*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Lancor, R. (2014). Using student-generated analogies to investigate conceptions of energy: a multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, 36, 1-23. doi: 10.1080/09500693.2012.714512

- Landis, R. J., & Koch, G. K. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, *33*, 159-174. doi: 10.2307/2529310
- Langlet, J. (2002). "Biologie muss man verstehen!" Zum wissenschaftstheoretischen und bildenden Gehalt der Biologie. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, *55*, 481-485.
- Langlet, J. (2004). Wie leben wir mit Metaphern im Biologieunterricht? In H. Gropengießer, A. Janßen-Bartels & E. Sander (Hrsg.), *Lehren fürs Leben. Didaktische Rekonstruktion in der Biologie* (S. 51-59). Köln: Aulis.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (11 Auflage). Weinheim und Basel: Beltz.
- Mayring, P. (2014). *Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution*. Klagenfurt: SSOAR.
- Millar, R. (2014). Towards a research-informed teaching sequence for energy. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (S. 187-206). New York, NY: Springer.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, *50*, 162-188. doi: 10.1002/tea.21061
- Niebert, K., Marsch, S., & Treagust, D. F. (2012). Understanding needs embodiment: a theory-guided reanalysis of the role of metaphors and analogies in understanding science. *Science Education*, *96*, 849-877. doi: 10.1002/sce.21026
- Nordine, J. (2016). Talking about energy. In J. Nordine (Hrsg.), *Teaching energy across the sciences K-12* (S. 61-78). Arlington, VA: NSTA.
- Opitz, S. T. (2016). *Students' progressing understanding of the energy concept. An analysis of learning in biological and cross-disciplinary contexts*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Opitz, S. T., Neumann, K., Bernholt, S., & Harms, U. (im Druck). Students' energy understanding across biology, chemistry, and physics contexts. *Research in Science Education*.
- Orgill, M. (2013). How effective is the use of analogies in science textbooks? In M. S. Khine (Hrsg.), *Critical analysis of science textbooks: evaluating instructional effectiveness* (S. 79-99). Dordrecht: Springer.



- Park, M., & Liu, X. (2016). Assessing understanding of the energy concept in different science disciplines. *Science Education*, *100*, 483-516. doi: 10.1002/sce.21211
- Schecker, H., & Theyßen, H. (2007). Energie. Ein Konzept in allen Naturwissenschaften? *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, *18*, 82-85.
- Schmitt, R. (2007). Versuch, die Ergebnisse von Metaphernanalysen nicht unzulässig zu generalisieren. *Zeitschrift für qualitative Forschung*, *8*, 137-156.
- Schreiber, J.-R. (2016). Kompetenzen, Themen, Anforderungen und Curricula. In KMK & BMZ (Hrsg.), *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage, S. 84-110). Bonn: Cornelsen.
- Schroeter, B., Bernholt, S., Härtig, H., Klinger, U., & Parchmann, I. (2016). Naturwissenschaftlicher Unterricht (Biologie, Chemie, Physik). In KMK & BMZ (Hrsg.), *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage, S. 332-356). Bonn: Cornelsen.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Hrsg.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (S. 147-176). Albany, NY: State University of New York Press.
- Wirtz, M., & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität*. Göttingen: Hogrefe.



## **DANKSAGUNG**

Meinen großen Dank möchte ich an dieser Stelle Frau Prof. Dr. Ute Harms aussprechen. Sie hat mein Interesse an fachdidaktischen Fragestellungen gestärkt und mich zur Aufnahme des Promotionsvorhabens ermutigt. Während meiner Promotionszeit hat sie mich kompetent und konstruktiv beraten und großes Vertrauen in meine Arbeit gesetzt. Sie hat mich gefördert und gefordert und damit wesentlich zu meiner beruflichen und persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Des Weiteren möchte ich mich sehr herzlich bei meiner Mentorin Frau Prof. Dr. Julia Schwanewedel bedanken, die biologische Inhalte und Fragen der fachdidaktischen Forschung intensiv mit mir diskutiert hat. Ganz herzlichen Dank auch an meine Mentorin Frau Dr. Kerstin Schütte, die mich vor allem in methodischen Fragen kompetent und geduldig unterstützt hat. Beide hatten immer ein offenes Ohr und ihr Engagement und ihre vertrauensvolle Beratung war für diese Arbeit und für mich persönlich von unschätzbarem Wert.

Ebenso gilt mein Dank allen meinen Kolleginnen und Kollegen und den Hilfskräften, die mich während meiner Promotionszeit begleitet und auf vielfältige Weise unterstützt haben.

All diese Menschen standen mir auch über die Belange der Arbeit hinaus zur Seite und ich möchte mich von Herzen für die schöne Zeit bedanken.

Ferner bedanke ich mich bei den Schulleiterinnen und Schulleitern, Lehrkräften und Eltern, die ihr Einverständnis zur Studiendurchführung gegeben haben, sowie bei den Schülerinnen und Schülern für ihre Studienteilnahme.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir Halt gibt und die mich jeden Tag durch ihre Liebe stärkt.



## **ERKLÄRUNG**

Hiermit erkläre ich, dass diese Dissertation – abgesehen von der Beratung durch meine Betreuerinnen – nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist. Die Arbeit ist unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden. Sie hat weder im Ganzen noch zum Teil an anderer Stelle im Rahmen eines Promotionsverfahrens vorgelegen. Ein Teil der Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits publiziert bzw. zur Publikation eingereicht (Kapitel 4 bis 6, siehe Tabelle 3-1).

Kiel, 20.07.2017

---

Ulrike Wernecke